

Федеральное агентство по образованию
—
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
—
ИНСТИТУТ ЭВОЛЮЦИОННОЙ ФИЗИОЛОГИИ
И БИОХИМИИ ИМ. И.М. СЕЧЕНОВА

В.В. Александров

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Под редакцией чл.-кор. РАН, д-ра техн. наук
проф. *М.П. Федорова*

Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по университетскому политехническому
образованию в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки 280200 “Защита окружающей среды”

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2010

УДК 556.113:550.373; 550.37.3:557.35.017.4; 577.3; 537.8; 621.357.035.4; 621.08;
612:576.12
ББК 26.22:22.336
А 46

Рецензенты:

Академик РАН, научный руководитель Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН *В.Л. Свидерский*

Доктор технических наук, профессор СПбГПУ *И.Ф. Кузнецов*

Александров В.В. Экологическая роль электромагнетизма / В.В. Александров. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 736 с.

Монография посвящена экологической роли электрофизических процессов в природно-технических объектах и системах. Обобщены экспериментальные и теоретические разработки автора, позволившие выявить и научно обосновать взаимодействие электрических и магнитных явлений, которые подчиняются законам движения макроскопических объектов и законам физической кинетики.

На примере водных экосистем и абиотической среды крупных континентальных водоемов, лабораторных аквариумных физических моделей, обширных урбанизированных территорий и внутренних производственно-учебных помещений, современных технических устройств электротехники и электроники рассмотрены связи и взаимодействие вещества в его различных агрегатных состояниях с окружающей средой, обуславливающие обменные энергетические процессы.

Природная среда насыщена электромагнитным излучением. Однако растения, животные и человек эволюционно адаптированы к воздействию только части спектра излучения. Последствия такого селективного и биоактивного влияния колебаний электромагнитных полей и излучений от различных источников генерирования энергии, особенно антропоферных, предвидеть сложно. Поэтому необходимо внедрение новейших методов и технологий для защиты биосферы.

Книга предназначена специалистам, исследующим биосферные процессы, а также студентам, обучающимся по направлению подготовки 280200 “Защита окружающей среды”.

© Александров В.В., 2010

© Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, 2010

ISBN 978-5-7422-2677-2

*Многолетний труд
подтачивает даже богатырское здоровье
и в первую очередь зрение.
Великолепный офтальмолог-хирург
и Человек с большой буквы
Галина Владимировна Ангелопуло
возвратила мне зрение.
С благодарностью посвящаю ей свой скромный труд.*

Автор

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
От автора	11
Введение	13
1. Современная оценка экологической роли неионизирующего электромагнитного излучения в природно-технических системах	13
2. Геосферные показатели связи и взаимодействия неионизирующего электромагнитного излучения со средой обитания животных и человека	18
Часть 1. ГЕОМАГНЕТИЗМ И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ ..	26
1.1. Электромагнитное поле земли и его роль в биосфере	27
1.1.1. Геомагнетизм и биосфера Земли	27
1.1.2. Элементы геомагнитного поля	30
1.1.3. Пространственно-временная неоднородность геомагнетизма	35
1.1.4. Геомагнитные карты	40
1.2. Эволюционная и онтогенетическая роль геомагнетизма	43
1.3. Электромагнитные поля в системе солнечно-земных связей: динамические процессы и отклик экосистем	54
1.3.1. Электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца	54
1.3.2. Межпланетное магнитное поле и его связь с геомагнитным полем	62
1.3.3. Солнечная активность и ее проявления на Земле ..	67
1.3.4. Связь явлений солнечной активности с геомагнетизмом	82
Часть 2. ЭЛЕКТРОФИЗИКА АКВАЛАНДШАФТА И СРЕДСТВА ЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ	107
2.1. Электромагнитные явления в гидросфере	107
2.1.1. Электрофизические процессы в акваториях и их роль в системе познания природы	107
2.1.2. Макроскопические электромагнитные характеристики водной среды	110
2.1.3. Естественные электрические и магнитные поля акваторий	133
2.1.4. Ритмичность флуктуаций электрического поля	146
2.2. Методы и средства оценки экологического состояния водных экосистем	156
2.2.1. Электрополюметрия — новый перспективный метод изучения водоемов	156
2.2.2. Измерительные электродные системы	160
2.2.3. Зондирующие устройства и их назначение	171
2.2.4. Метрологическая оценка электрополюмеров, анализ помех и способы их снижения при полевых исследованиях	174

2.2.5. Принципиальные способы электрополюметрии акваторий	183
2.2.6. Новые средства измерений электрических и магнитных полей	200
2.3. Моделирование электрокинетических явлений в лабораторных условиях	207
2.3.1. Волновые колебания, течения, движение наносов и седиментация в каналах	208
2.3.2. Субаквальная фильтрация в резервуарах	211
2.3.3. Управление движением твердофазных примесей в электролитах под действием магнитного поля на тонкослойной модели водоема	216
2.4. Экспериментальные результаты исследования функцио- нальных геофизических зон акваторий	222
2.4.1. Комплексный электрофизический подход к оценке структуры нормального геофизического поля акваторий	222
2.4.2. Береговая зона, рельеф дна и донные отложения — стационарные факторы возмущения электрического поля водных масс. Новые аспекты	234
2.4.3. Гидродинамические поля и их вклад в колеба- тельный ритмический режим теллурического поля	251
2.4.4. Вихревая структура электрического поля в биоактивных слоях водоемов	282
2.5. Эколого-физиологическая роль электромагнетизма	309
2.5.1. Электрокинетические явления в биоактивной функциональной зоне водоемов	310
2.5.2. Пелагические гидробионты — пространственно- временной источник электрокинетических полей акваторий	317
2.5.3. Магнитобиологическая концепция двигательной активности и вертикальной миграции планктона	335
2.5.4. Электромагнитные характеристики среды обитания и физиологические реакции водных животных ...	345
Часть 3. МАГНИТОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПОВЕДЕ- НИЕ ЭКОСИСТЕМ	353
3.1. Регуляция физиологии экосистем в естественных условиях	353
3.1.1. Электромагнитное излучение биологической природы	354
3.1.2. Восприятие нестационарных сигнально-информа- ционных слабых электромагнитных полей животными и растениями	362
3.1.3. Естественная электромагнитная среда и человек	383
3.1.4. Лабораторные и клинические наблюдения над реакциями живых систем с учетом действия магнитных полей	393
3.2. Экспериментальное моделирование воздействия слабых внешних электромагнитных факторов на биологические и физико-химические системы	404

3.2.1. Водные экосистемы как объект физического моделирования	404
3.2.2. Методический подход к исследованию	407
3.2.3. Обсуждение результатов измерений	419
3.3. Детерминирующая роль современных электромагнитных методов в здравоохранении и развитии новых биотехнологий ...	428
3.3.1. Регуляция физиологических функций животных и человека	428
3.3.2. Электромагнитное излучение в проблемах медицины	436
3.3.3. Адаптивные изменения в организме при действии электромагнитного излучения	446
Часть 4. АНТРОПОСФЕРА И НЕИОНИЗИРУЮЩЕЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	454
4.1. Современное осознание экологической роли техносферных источников электромагнитной энергии	455
4.1.1. О проблеме биологической опасности неионизирующего электромагнитного излучения	455
4.1.2. Живые системы в условиях неизбежного притока электромагнитной энергии от промышленных источников	456
4.1.3. Комбинированное действие экранирования биологических объектов и вариаций геомагнитного поля при скоростном движении	472
4.1.4. Новая проблема экологической роли сильных техногенных ЭМП, обусловленная “незаявленной деятельностью по обогащению урана электромагнитным методом”	475
4.2. Экологическая уязвимость водоемов и проблемы адаптации водных организмов в условиях воздействия электромагнитных полей	477
4.2.1. О проблеме чистой воды	478
4.2.2. Электрическое поле гетерогенных водных масс, содержащих искусственные примеси	482
4.2.3. Способ контроля качества воды по ее электрофизическим показателям	491
4.2.4. Экологическое состояние озер северо-западного региона России по результатам электрометрического контроля	503
4.2.5. О внедрении результатов исследования техногенных стационарных и флуктуирующих электрических полей на акваториях для решения навигационных и народно-хозяйственных задач	531
4.2.6. Перспектива развития электрофизических методов исследования водоемов и разработки новой аппаратуры ...	566
4.3. Биогеоценозы на урбанизированных территориях, факторы риска в жизнеобеспечении населения	574
4.3.1. О влиянии городских условий на локальные изменения магнитного поля ультранизкочастотного диапазона ..	583

4.3.2. Методы изучения и оценка изменчивости пространственно-временной структуры электромагнитного поля в городских условиях	594
4.3.3. Нравственно-правовая проблема антропосферы: повсеместное внедрение неионизирующего электромагнитного излучения в биоценозы	645
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	663
Abstract	672
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	681
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	709

ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография посвящена изучению электромагнитных воздействий на биологические объекты и системы с целью установления совместимости их, а также эволюционной значимости для биосферных процессов на Земле. Рассматриваются неионизирующие электромагнитные излучения, имеющие естественные и искусственные (техногенные) источники. Оба эти вида излучений имеют не только моментное влияние на жизнедеятельность, но и определяют эволюцию живого вещества — растений и животных. Если влияние геомагнитного поля Земли как глобального фактора проявляется в результате длительного временного воздействия, то техногенные источники имеют импульсный характер и вызывают быстроизменяющиеся процессы как наиболее потенциально опасные для здоровья человека и состояния биосферы.

Содержание монографии построено на диалектике исследования электромагнетизма как экологического фактора абиотической среды. Книга как итог многолетнего научного труда автора содержит четыре основные части, посвященные следующим вопросам:

- роль геомагнетизма и излучения Солнца в формировании биосферных процессов, влияние на достоверность метеорологических прогнозов, безопасность наземных и космических систем;
- исследование электрофизических свойств водных систем на основе электрополюметрического метода;
- влияние электромагнитных явлений на биологические объекты и экологические системы, включая восприятие сигнально-информационных слабых полей живыми организмами (телемобильная связь);
- экологическая уязвимость живых систем в условиях интенсивного воздействия электрических и магнитных полей разного происхождения, определение путей контроля качества электромагнитной среды.

Автор монографии — Владимир Владимирович Александров, доктор географических наук, посвятил изучению электромагнитных

явлений и их связей с живой природой многие десятки лет. Он прекрасный экспериментатор сложных с точки зрения физического моделирования неионизирующих электромагнитных полей, в том числе слабых по интенсивности излучения. Кроме физической стороны, его исследования были связаны и со сложными водными экосистемами, которые создавались в лабораторных условиях и существовали длительное время в целях фиксации изменчивости биоценозов или их стабильности при разных параметрах изучаемого воздействия.

Еще одна несомненная научная заслуга автора — обобщение полученных экспериментальных результатов с имеющимися представлениями о глобальных электромагнитных процессах и их роли в формировании биосферы. Поэтому итог многоплановых исследований автора является достаточно полным и комплексным научным изысканием, представляющим интерес для науки и практики, а также для обучения специалистов в области геоэкологии и защиты окружающей среды. Монография в большей своей части может рассматриваться как учебное пособие для студентов и научных работников.

Автор не воздерживается от соблазна осветить всю проблему электромагнитной совместимости, которая по своей сути очень многогранна, и охватывает прикладные аспекты физики, биологии, экологии, медицины и других дисциплин. Но это следствие увлеченности автора своим предметом исследования и может быть также положено в его заслуги.

*Ректор СПбГПУ,
член-корреспондент РАН*

М.П. Федоров

ОТ АВТОРА

Экспериментальная работа геофизика, извлекающего крупницы научных фактов и знаний непосредственно в естественных и лабораторных условиях, растягивается на годы. И если повезет, результаты работы оформляются в виде опубликованной монографии. На своем пути автор получает помощь и поддержку десятков людей-единомышленников — соратников-экспериментаторов, консультантов, критиков, организаторов исследований.

Хочется благодарить всех. Особенно ушедших из жизни:

акад. РАН А.Л. Яншина, акад. РАН В.В. Шулейкина, чл.-кор. РАН В.В. Богородского, вице-адмирала, д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Яковлева, контр-адмирала В.Д. Шандабылова, проф. Ф.Г. Грибакина, проф. В.Г. Морачевского, проф. В.С. Жекулина, д-ра техн. наук, проф. И.Ф. Кузнецова, д-ра геол.-мин. наук, проф. Г.Б. Свешникова, проф. Н.А. Лабзовского, проф. К.Е. Иванова, проф. М.М. Ермолаева, проф. Д.А. Фридрихсберга, д-ра физ.-мат. наук Г.А. Трошкова, д-ра техн. наук И.С. Коплан-Дикса, д-ра мед. наук Г.Р. Броуна, д-ра мед. наук Н.И. Моисееву, д-ра биол. наук В.Р. Протасова, проф. Л.Г. Качурина, проф. А.С. Семенова, канд. биол. наук Е.С. Слуцкого, канд. физ.-мат. наук В.И. Лопатникова, д-ра физ.-мат. наук Н.В. Красногорскую, гл. редактора “Гидрометеопиздата” Т.Г. Недошивину, канд. хим. наук, редактора журнала “Химия и жизнь” В.Е. Жвирблиса. Друзья незабвенные, спите спокойно.

Приношу глубокую признательность ныне здравствующим:

акад. РАН В.Л. Свидаерскому, акад. РАН К.С. Демирчяну, акад. РАН Ю.С. Васильеву, чл.-кор. РАН М.П. Федорову, адмиралу, д-ру техн. наук, Президенту Русского геогр. общества А.А. Комарицыну, проф. Н.Б. Барышникову, д-ру биол. наук, проф. Л.А. Сиренко, проф. С.Э. Шнолю, проф. Ю.В. Тарбееву, д-ру биол. наук В.Д. Барону, д-ру физ.-мат. наук Ю.А. Копытенко, д-ру биол. наук Р.А. Григорьяну, д-ру биол. наук Л.А. Кутиковой, канд. физ.-мат. наук Э.С. Горшкову,

ст. ред. морских карт ГУНИО В.Н. Виноградову, д-ру физ.-мат. наук Г.А. Фонареву, канд. физ.-мат. наук В.Ю. Семенову, канд. физ.-мат. наук Е.З. Гак, канд. физ.-мат. наук Г.В. Соколову, канд. техн. наук И.Л. Калюжному, канд. геогр. наук Г.И. Мосоловой, д-ру геол.-мин. наук Л.В. Подгорных, мл. науч. сотр. И.П. Николаевой, мл. науч. сотр. Н.В. Родионовой, канд. техн. наук В.М. Данилову, канд. техн. наук А.Н. Чусову, редактору “Гидрометеоиздата” З.И. Мироненко, инж. Л.В. Зайцеву, врачу-консультанту Б.В. Александрову, D.S. Roger Coghill, D.S. Ad.J. Kalmijn, Dr. rer. nat. U. Warnke. Дорогие друзья, живите и здравствуйте!

Особую признательность хочется выразить сотрудникам Центрального картографического производства ВМФ, любезно предоставившим новые карты геомагнитного поля Антарктики для эпохи 2000–2005 гг. [Атлас Антарктики. Т. VI, с. 93. Издательство Главного управления навигации и океанографии МО Российской Федерации. СПб., 2005].

Первое издание монографии (2006 г) переработано и дополнено новейшими сведениями о влиянии электромагнитного неионизирующего излучения техносферы Земли на живые системы.

Обновленная рукопись публикуется с грифом Министерства образования РФ “учебное пособие”, присвоенным учебно-методическим объединением по университетскому политехническому образованию в 2010 году.

Учитывая значимость издания книги в год празднования 65-летия Победы Советского союза и его мужественного народа в Великой Отечественной войне над фашизмом, склоняю голову в память о погибших героях.

Приношу глубокую благодарность Дмитрию Владимировичу Александрову, доценту кафедры физики Санкт-Петербургского технологического института (университета), изучившего внимательно рукопись книги и внесшего критические замечания и пожелания. Эта работа существенно улучшила учебно-познавательную значимость настоящего издания.

Основные ключевые слова

Адаптационный синдром; Антропосфера; Аномалии воды; Биосфера; Биоритмы; Биосенсоры; Геомагнетизм; Гелиобиология; Гидробионты; Иммуитет; Ионная теория; Онтогенез; Солнечная активность; Урбанизация; Центральная нервная система; Эволюция; Электромагнитное излучение; Электрорецепция; Электрокинетика; Энергия

ВВЕДЕНИЕ

1. Современная оценка экологической роли неионизирующего электромагнитного излучения в природно-технических системах

Современное состояние проблемы научно обоснованного многоцелевого использования природных ресурсов обусловило разработку и внедрение новых методов исследования всех компонентов биосферы. Для обеспечения сохранения всех форм жизни на Земле необходимо изменить потребительское отношение к природе в целом, начиная с бытового водопотребления и кончая крупными энергетическими преобразованиями в системе Земля—Космос. Безусловно, трудно выделить приоритетное направление в выборе какого-либо метода или группы методов исследования, поэтому только комплексный подход может обеспечить достоверность оценки экологического состояния среды и позволит выбрать стратегию ее использования с перспективой на сохранение жизни в целом. Тем не менее, можно отметить, что группу новейших разработок составляют электрофизические и магнитометрические методы теоретического и экспериментального исследования явлений и процессов в среде обитания как животных, так и человека, и, в частности, в гидросфере. Это новое научное направление в экологии всемерно поддерживается не только мировой научной общественностью [1–10], но и официальными мероприятиями крупных государств-участников, подписавших конвенцию о сохранении и устойчивом развитии биосферы [11–32]*.

За последние пятьдесят лет развитие вычислительной техники, средств связи и программирования достигло такого уровня, что можно говорить о вполне реальной экологической роли глобальной многоцелевой информационно-вычислительной системы,

*Библиографию см. в специальном списке на с. 23–24 к введению.

частью которой является Интернет, куда интегрируются системы телефонной связи, телевидения и радио. “Определить структуру такой сложной системы представляется возможным, только погрузив ее в систему еще большей сложности, в проблематику человека, общества и культуры” [8–9, 14].

Исходя из перспективы совершенствования и развития новых учебно-методических направлений и требований к современному специалисту-экологу, в ИСФ СПбГПУ на кафедре экологических основ природопользования (ЭОП) был разработан и преподавался с 1995 по 2004 г. учебный курс, посвященный экологической роли электромагнетизма в среде обитания животных и человека. В новой редакции, утвержденной Министерством образования страны, формулировка курса следующая: “**Защита окружающей среды от энергетических воздействий**” (2004–2009). Значительная доля излагаемого материала отражает приоритетные области знания — энергия, охрана окружающей среды, природные ресурсы, которые связаны между собой проблемой электромагнитных взаимодействий и экологической безопасностью энергетики (в новой редакции в течение 2009–2011 курс именуется: “Современные экологические проблемы безопасности жизнедеятельности”).

Новые разделы по изучению и анализу воздействия неионизирующего электромагнитного излучения (**НЭМИ**) на экосистемы биосферы Земли должны не только ознакомить студентов с проблемами влияния естественного геомагнитного и теллурического полей на биоту, но и помочь осознанию роли техногенных источников **НЭМИ**, как нового и зачастую опасного экологического фактора окружающей среды (**ОС**).

Развитие научно-исследовательской и учебно-методической работы не должно замыкаться только на изложение теоретического курса, необходимо внедрение экологического практикума с использованием современных технических средств и аппаратуры. В качестве механизма, обеспечивающего оптимальный и кратчайший по времени путь от теории до реального управления экологическими процессами, предлагается организация всесторонне оснащенной лаборатории. Такую лабораторию кафедра ЭОП начала создавать в 1996/97 гг. — учебно-научная лаборатория (УНЛ) “Электрофизика естественных экосистем”. Именно она должна способствовать развитию электромагнитных методов экологического мониторинга. В этом ее междисциплинарная значимость и связь с общеуниверситетской программой становления сквозного экологического образования. В настоящее время объединенная кафедра “Гражданское строительство и прикладная экология” сохраняет преемственность кафедре ЭОП и дополняет упомянутый выше курс

новыми аспектами по безопасности жизнедеятельности в естественных и антропосферных условиях.

Таким образом, теоретический курс и лабораторный практикум преследуют цель — внедрение новых комплексных знаний в междисциплинарной области *электрофизика — экологическая физиология* и формирование нового экологического грамотного мышления при проектировании, изыскательских работах, строительстве, а также последующем хозяйственном использовании природных ресурсов.

Следует подчеркнуть, что на данном этапе природопользования зримо ощущается совместимость проблем экологической физиологии с проблемами инженерно-технического обеспечения сохранения экологического равновесия (генетического и физиологического гомеостаза) в природных экосистемах при крупномасштабном строительстве энергосистем, портовых и гидротехнических комплексов, при организации агропромышленных комплексов, создании рекреационных зон, при расширении транспортных перевозок по железным дорогам, авиалиниям и т.д.

В конечном счете экологическое образование расценивается как одна из ведущих составляющих для обеспечения эффективной природоохранной политики на государственном уровне.

Исследования электрофизики подвижных оболочек Земли и ее биосферы представляют собой сравнительно молодое научное направление. Фундамент его составляют открытия и разработки классических наук — физики, химии, медицины XIX–XX вв. Электромагнитные явления и процессы в биосфере являются составной частью общей динамики земного электромагнетизма.

Сложность исследования этих процессов на Земле и особенно в воде обуславливается наличием внешнего по отношению к Земле (космического) источника генерирования электромагнитных колебаний и внутреннего (собственно земного) источника колебаний. Внутренние колебания зависят от геоструктуры литосферы и наличия подвижности газовой и водной оболочек Земли. Биосфера Земли обладает также собственными внутренними источниками генерирования электромагнитных колебаний. Анализ экспериментальных данных, получаемых в столь сложных условиях, требует совместного решения задач электрогидродинамики, электрохимии и коллоидной химии, гидрологии, гидробиологии, биофизики, водной токсикологии, геологии, радиотехники. Поэтому из-за объективно существующих трудностей проблема электрофизики биосферных экосистем практически не рассматривалась. Существовали разработки по частным вопросам возникновения электрического поля в литосфере, атмосфере, водоемах, в биологических структурах и т.д.

Формирование и становление нового направления исследований — изучение естественных электрических полей и явлений в подвижных оболочках Земли — обусловлено рядом обстоятельств. В частности, существующее взаимодействие космических процессов с электрофизическими процессами Земли уже в настоящее время может быть использовано в научных разработках при освоении и охране природных ресурсов системы Космос—Земля. Поэтому новые задачи стимулируют углубленное изучение не только электромагнитных свойств окружающей среды, но и механизмов взаимодействия всех видов неионизирующих излучений с веществом.

Актуальность рассмотренной выше проблемы подтверждается тем, что в течение последних 25 лет научные организации мира провели крупные симпозиумы, конференции и конгрессы, посвященные исследованиям электромагнитных свойств окружающей среды и взаимодействия электрических и магнитных полей компонентов биосферы с внешними электромагнитными полями космических и земных источников. Особенно были выделены задачи биоиндикации последствий воздействия космических, земных и антропоферных источников электромагнитного поля на биосферу в целом и человека в частности.

Результатом этих мероприятий явилось развитие многообразных и многоцелевых исследований в области электромагнетизма неионизирующих излучений в окружающей среде, электромагнитных свойств физико-химических и биологических систем. Определены пути решения сложных проблем взаимодействия Земли и Космоса, литосферы и гидросферы, живых и неживых компонентов нашей планеты.

За последнее десятилетие выполнены научные разработки, в которых показана конкретная значимость влияния электромагнитных флуктуаций, вызванных внешними (космическими) и внутренними (собственно земными — литосферными, гидродинамическими и биолого-химическими) источниками возмущения поля. Появилась новая аппаратура для измерения слабых электромагнитных сигналов в ультранизкочастотном диапазоне колебаний, учет которых оказывается исключительно важным в интерпретации планетных и локальных геофизических процессов и явлений. Прямыми экспериментами была доказана и высокая биоактивность этих сигналов [500].

Электромагнитные методы исследования окружающей среды особенно широко стали внедряться на акваториях океанов, морей и внутриконтинентальных водоемов. Это продиктовано актуальными задачами практического использования электрических и магнитных эффектов в воде.

Точные измерения характеристик электрического поля, электрической проводимости воды, магнитных свойств всевозможных

естественных растворов, суспензий и других фазовых состояний вещества становятся насущно необходимыми для решения общетеоретических геофизических задач, а также промысловых и различных прикладных задач (поиск полезных ископаемых на шельфе и в абиссали океана, освоение биологических ресурсов, обнаружение металлических объектов, борьба с коррозией, оценка качества воды в пресноводных бассейнах и др.).

Как и физико-химические факторы среды, электромагнитное поле является объективным природным фактором, играющим существенную роль в формировании абиотических условий в воде и влияющим на протекание процессов в биосфере. В природных экосистемах все без исключения физико-биологические процессы сопровождаются электрическими и магнитными явлениями и находятся в то же время под воздействием внешних электромагнитных излучений. Эволюция экологических условий на Земле протекала под воздействием как внешнего, так и внутреннего электромагнитного поля, которое с наступлением эпохи технического прогресса в сфере человеческой деятельности изменило ее естественный ход. Поэтому электромагнитные поля природных объектов в свою очередь являются методическим средством, инструментом исследования динамики экологических условий окружающей среды, а также мерой техногенного последствия разрушения природных целостных экосистем. Исследование изменчивости электромагнитных полей экосистем дает объективную информацию о причинах структурной перестройки их в процессе эволюции, а также не исключает возможности оценить короткопериодные внешние антропогенные воздействия. Относительная слабость природных излучений по сравнению с техногенными источниками их искажения и возмущения до сих пор существенно затрудняла их изучение и выделение из общего спектра флуктуаций. Но современное электрофизическое оборудование и приборы для научных изысканий позволяют скрупулезно исследовать тончайшие механизмы электромагнитного взаимодействия вещества и внешних физических полей среды.

В данной книге рассматриваются вопросы электрогенеза экосистем на примере крупных и мелких пресноводных озер и морских акваторий. В озерах, как в зеркале, отражается вся созидательная и разрушительная деятельность человека. Лимнические системы могут быть источником информации о том, где и на какой стадии идет активное преобразование людьми окружающей среды. Кроме того, анализируются проблемы безопасности животных и человека, подвергающихся действию **НЭМИ** повсеместно и непрерывно.

2. Геосферные показатели связи и взаимодействия неионизирующего электромагнитного излучения со средой обитания животных и человека

Ранее было отмечено, что на данном этапе природопользования зримо ощущается совместимость проблем экологической физиологии с проблемами инженерно-технического обеспечения сохранения экологического равновесия (генетического и физиологического гомеостаза) в природных экосистемах.

Именно поэтому современному специалисту в области природопользования и геоэкологии необходимо расширить свой кругозор как в области биологии, так и в области геофизики. В частности, надо усвоить ряд новых терминологических понятий, без которых не обойтись при обсуждении материала курса. Например:

Экологическая физиология. Под этим термином понимают совокупность знаний о физиологических основах приспособлений (адаптаций) к природным факторам среды и к сложному сочетанию их в различных физико-географических условиях.

Как физиологическая дисциплина экологическая физиология представляет ветвь эволюционной физиологии*. Она пользуется физиологическими методиками исследования и физиологическим экспериментом. Ее задачей является исследование адаптаций — совокупности физиологических явлений в их взаимной связи, суммирующей, замещающей (викарирующей), или еще более сложно, интегрирующей взаимоотношения отдельных органов и систем, отдельных более или менее сложных элементов поведения и регуляции физиологических функций.

Сейчас особо отмечается значение сведений о влиянии упомянутых выше факторов как на видовые особенности физиологических функций и поведения животных, так и на особенности отдельных популяций, видов в связи с особенностями их существования в разных ареалах, в различные периоды года, в зависимости от тех или иных изменений условий среды [Слоним, 1971, с. 5].**

*Эволюционная физиология — раздел науки, в задачи которого входит изучение происхождения физиологических функций, их эволюции в связи с общей эволюцией органического мира. Эволюционная физиология тесно связана с проблемами общей экологии.

**Прямая связь: действие ЭМП — физиология двигательного поведения гидробионтов.

Читателям хорошо известно понятие о сформировавшемся в конце XIX — начале XX в. представлении о биологических сообществах (биоценозах) как о некоторых целостных совокупностях (комплексах) организмов, взаимосвязанных между собой и с окружающей неживой средой. Это, в свою очередь, привело к появлению таких понятий, как “экологическая система” (“экосистема”) [Тенсли, 1935] и “биогеоценоз” [Сукачев, 1940].

К 50-м годам уже ушедшего XX века формируется **ОБЩАЯ ЭКОЛОГИЯ**. Основное внимание исследователей переносится на изучение взаимодействия организмов и структуры образуемых ими систем, и развивается **физиологическая и эволюционная экология** [Шварц, 1969].

В 70-х годах XX века формируется **экология человека**, или социальная экология, изучающая закономерности взаимодействия человеческого общества и окружающей среды.

Всё большее распространение в экологии получают количественные методы исследования, чаще используются эксперименты (не только лабораторные, но и в природе) и математические модели. Происходит “экологизация” многих естественных наук.

Электрические и магнитные поля — неотъемлемая составная часть окружающей неживой среды обитания, а также и всех других компонентов экосистемы. Различные виды исследования экосистем входят в задачи общей экологии, хотя часто биогеоценологию считают самостоятельной наукой. В постановке задач монографии и практических занятий, проводимых в СПбГПУ, мы не претендуем на формирование подобного взгляда у слушателей.

Дав монографии название **“Экологическая роль электромагнетизма”**, автор выделяет этим лишь уже вполне сформировавшуюся пограничную (смежную) научную и учебную дисциплину, посвященную исследованию, анализу и разработке физико-экологических критериев оценки действия электромагнитных факторов окружающей среды в целом на биосферу, на ее составные части — водную среду, сопредельные контактные зоны, а также на определенные виды гидробионтов. На первый план здесь выступают ответные реакции живого вещества на действие и протекающие в дальнейшем эволюционные процессы в экосистемах. В настоящее время это лишь в некоторой степени аутоэкологическая задача*,

*Аут(о)экология (греч. *аутос* — сам + экология) — раздел экологии, изучающий взаимоотношения отдельной особи (популяции, вида) с окружающей её (их) средой. Ср.: демэкология, синэкология [Реймерс Н.Ф. Популярный биологический словарь. М., 1991. С. 49].

хотя она и отвечает проблемам более широкой дисциплины — физиологической экологии. Проникая в сущность, механизм физического воздействия электромагнитных факторов на живое вещество, оценивая физиологические последствия такого воздействия, мы сможем в итоге выявить энергетическую (стимулирующую или угнетающую) роль как слабых естественных геофизических полей в системе солнечно-земных связей, так и полей техногенных источников. В этом, по нашему мнению, состоит задача разумного познания и использования природных ресурсов.

Проблема познания биологического, эколого-физиологического значения электромагнетизма и геомагнетизма, в частности, — многолика, многофакторна (я бы заметил: “гетерогенна”). Оценка этого значения, видимо, восходит к тому моменту, когда человек стал сознавать и понимать, что он живет на планете, которая представляет собой “большой магнит”. Как и в любой научной области, так и в этой пограничной, смежной, междисциплинарной проблеме имеются достаточно глубоко теоретически и экспериментально разработанные разделы, но также и начавшие быстро развиваться за последние 3–2 десятилетия и потому лишь только нащупывающие пути направления научной мысли.

В связи с изложенным обращаем внимание читателей на то, что в данной проблеме необходимо выделить следующие аспекты:

1) энергетическое действие электромагнитного поля Земли (ЭМПЗ) на биосферу, на ее живые компоненты (или биосенсоры системы Земля—Космос);

2) сигнально-информационное значение слабых флуктуирующих ЭМП ультранизкочастотного диапазона (УНЧ-диапазон) с характеристиками $f = 10^1 \div 10^{-4}$ Гц и B в пределах ~ единиц-сотен нТл;

3) генетическая активность факторов среды обитания, в том числе и ЭМП, способных менять наследственные признаки живых систем (действие на генетический материал, или генотип) [т.е. это уже расширение круга задач экологической физиологии до проблем экологической генетики].

***Замечания по структуре книги,
в основу которой положен лекционный курс,
читаемый в СПбГПУ***

1. Даны общие представления об электрофизических явлениях в системе солнечно-земных связей, об энергетическом воздействии космических и околоземных электромагнитных полей и электрических

токов на биосферу, о космической ритмике воздействий и ответная реакция биосферы.

2. Рассмотрены закономерности и механизм формирования региональных и локальных электрических и магнитных полей в водоемах, возникновение функциональных геофизических зон, их динамика и ритмы как следствие экзогенных и эндогенных причин, свойственных водным самоорганизующимся и саморегулирующимся экосистемам.

3. Показаны специфические формы воздействия ЭМП Земли на отдельные компоненты (виды) экосистем и роль последних в биоиндикации внешних естественных факторов влияния на живое вещество.

4. Рассмотрены последствия изменения естественного электромагнитного фона водной среды и видового состава биологической популяции экосистемы в результате влияния загрязнения акватории промышленными сточными водами; показана роль движущихся технических средств, гидротехнических сооружений, средств связи и передачи электроэнергии, приводящих к изменению экологического гомеостаза.

5. Последовательно изложены электромагнитные методы экспериментального исследования и оценки качества водной среды открытых крупных акваторий, описано лабораторное моделирование гидрофизических и биологических явлений и процессов в воде, представлена новая аппаратура.

6. Показана перспектива развития экспресс-контроля и мониторинга экологического состояния крупных естественных водоемов и искусственных водохранилищ.

7. Обобщены современные достижения по биорегуляции в экосистемах различного уровня развития — от простейших организмов до человека — с использованием электромагнитных методов и технических средств, а также основные аспекты медико-биологических проблем сохранения здоровья населения страны с учетом новых нормативов ГОСТ по воздействию НЭМИ на биоту.

Основные положения новой программы были представлены в докладах на конференциях и конгрессах [15–32].

На структурной схеме показана попытка суммировать общие показатели связи и взаимодействия НЭМИ со средой обитания в биосфере. Автор не претендует на полноту учёта всех факторов такого взаимодействия, тем более, что исключены источники ЭМП более высоких частот. Проблема связи биоты с другими ЭМ полями, тем не менее, будет рассмотрена в специальном разделе.

Геоферные показатели связи и взаимодействия неионизирующего электромагнитного излучения со средой обитания животных и человека



На схеме:

ЭМ — электромагнитные поля (излучения); **ПМП** — постоянное магнитное поле; **ПеМП** — переменное магнитное поле; **ПЭП** — постоянное электрическое поле; **ПеЭП** — переменное электрическое поле; **ВЧ-диапазон** — высокочастотный диапазон; **УНЧ-диапазон** — ультранизкочастотный диапазон; **ЛЭП** — линии электропередач; **МГД-генераторы** — магнито-гидродинамические генераторы (тока, полей).

ЛИТЕРАТУРА К ВВЕДЕНИЮ

1. **Александров В.В.** Электрофизика пресных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 184 с.
2. Регулярные Международные Конгрессы Европейской Ассоциации по Биоэлектромагнетизму (Congr. of European Bioelectromagnetics Association, EBEA, №№ 1–9, 1990–2009; см. congress site «www.ebea.org»).
3. First World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine. June 14–19, 1992. Orlando, Florida, USA.
4. 3rd Nordic Workshop on Biological Effects of Low Frequency Electromagnetic Fields. March 14–15, 1994. Umea, Sweden,
5. International Symposium on Charge and Field Effects in Biosystems. June 20–24, 1994. Richmond, Virginia, USA.
6. Регулярные Российские научно-технические конференции “Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов, ЭМС. СПб, №№ 1–10, 1990–2008.
7. Регулярные Международные конгрессы “Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине”, №№ I–IV, 1997–2006, сайт конгресса «www.LFBM-congress.spb.ru». Публикации В.В. Александрова с коллегам представлены на всех конгрессах.
8. **Кастинг М.** Программа действий — Повестка дня на 21-й век и другие документы конференции в Рио-де-Жанейро в популярном изложении / Центр “За наше общее будущее”, 1993. 70 с.
9. Концепция перехода России к устойчивому развитию. 1996 (утверждена Президентом России).
10. Межправительственное соглашение по Устойчивому развитию северных стран (Рованиеми, 1991; Нууке, 1993).
11. **Егоров Б.Ф., Игнатьев М.Б.** О новых направлениях в работе отдела РФФИ по науке о человеке и обществе // Вестник РФФИ. 2000. № 19. с. 27–31.
12. **Александров В.В.** Электрокинетические поля гидробионтов. Биоритмы локомоторной активности. Связь с геомагнетизмом // Биофизика. 1995. Т. 40, вып. 4. С. 771–777.
13. **Александров В.В.** Электромагнетизм среды обитания и поведение водных организмов // Пятьдесят лет развития кибернетики: Тр. конф. СПб., Политехн. ун-та. 5–7 октября 1999 г. С. 95–96.
14. **Александров В.В.** Поведенческие реакции водных организмов как отражение геокосмических связей в биосфере // Научные чтения “Белые ночи”. Секция “Электромагнитная экология”. МАНЭБ. СПб., 1–3 июня 1999. С. 9–13.
15. **Александров В.В., Федоров М.П.** Междисциплинарное направление в учебном процессе — “Электрофизический мониторинг природных экосистем” // Докл. III Всероссийск. научно-практич. конф. с международным участием “Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности”. СПб., 16–18 июня 1998. Т.1. С. 236–241.
16. **Александров В.В., Федоров М.П.** Геофизика акваландшафта как фундаментальный элемент в проблеме совместимости экологии и энергетики // Сб. докл. V Российской научно-технич. конф. “Электромагнитная

совместимость технических средств и биологических объектов. ЭМС–98”. СПб., 1998. С. 357–364.

17. **Александров В.В., Уставников Д.А., Александров Д.В., Слуцкий Е.С., Богодист О.Е.** Возможно ли лабораторное моделирование поведенческого адаптационного синдрома у водных организмов электромагнитными методами?// Научные чтения “Белые ночи”. Секция “Электромагнитная экология”. МАНЭБ. СПб., 1–3 июня 2000 г. С. 13–24.

18. **Александров В.В., Уставников Д.А., Воронов П.М.** Влияние городских условий на локальные изменения магнитного поля ультранизкочастотного диапазона// Сб. докл. VI Российской научно-технич. конф. “Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов. ЭМС-2000”. СПб., 2000. С. 445–451.

19. **Александров В.В., Уставников Д.А., Слуцкий Е.С., Соколов Г.В., Федоров М.П.** Моделирование поведенческих реакций водных организмов электромагнитными методами// Там же. С. 573–582.

20. **Александров В.В., Александров Д.В., Слуцкий Е.С., Уставников Д.А.** Магнитофизиологические принципы контроля поведенческих реакций водных организмов при стрессе // Вестник МАНЭБ. 2001. № 3 (39). С. 5–19.

21. **Александров В.В., Александров Б.В.** Высокочастотное электромагнитное излучения в техносфере и ответные реакции экосистем. “Инновационная экономика и промышленная политика региона (ЭКОПРОМ-2009). Тр. международной научно-практической конференции, 30.09–03.10. 2009 г., том 2”. С. 461–474. СПб, Изд-во Политехнического университета, 2009.

22. **Alexandrov V.V., Shilov I.O., Alexandrov D.V., Stepanuk I.A.** The locomotor activity of aquarium fishes in ultradian cycles //Proceedings of the 14th International Congress of Biometeorology. September 1–8, 1996. Under the auspices of The Intern. Soc. of Biometeorol. Ljubljana, Slovenia. 1996. P. 90–91, 270–272.

23. **Alexandrov V.V., Evdokimov I.I., Shilov I.O., Alexandrov D.V., Fedorov M.P.** Respond to weak 50 Hz Alternating Electric Field of Fishes Community // Second World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine. June 8–13, 1997. Bologna, Italy. P. 37, 86-B.

24. **Alexandrov V.V.** Environmental Electromagnetic Fields and Motional Activity of Aquatic Organisms //XXXIII International Congress of Physiological Sci. IUPS 1997. St.Petersburg. 30.06–5.07.97. P. 047.10.

25. **Alexandrov V.V.** Environmental Electromagnetic Fields and Motional Activity of Aquatic Organisms //Proceedings 4th Congress of the European Bioelectromagnetics Association. Zagreb-Croatia. November 19–21, 1998. P. 103–105.

26. **Alexandrov V.V., Ustavnikov D.A., Sokolov G.V., Slutsky Y.S., et. al.** Stress of hydrobionts as response to a short-acting multifunction magnetic fields. The 5 th Intern. Congr. EBEA, 6–8. 09.2001. Helsinki, Finland, p. 237–239.

27. **Alexandrov V.V., Alexandrov B.V., Balagula Y.M., et. al.** Methodological and Instrumentation Approach for Study of Aquarium Fishes Transient Behavior *in-vivo*. The 6 th Intern. Congr. EBEA, 13–15. 11.2003. Budapest, Hungary, P-083, pp 205–207.

28. **Alexandrov V.V., Dubovoy L.V., Efremov V.A., Bogodist O.E.** Morphometric response of *Carassius auratus* on weak ELF magnetic field // Bioelectromagnetics 2005, Dublin, Ireland, P-B-2 STUDENT. P 349–350.

29. **Alexandrov V.V., Alexandrov B.V., Chusov A.N.** Weak nonionization environment electromagnetic fields (Δ EMFs) and their effects to aquatic ecosystems. The 8 th Intern. Congr. EBEA, 10–13. 04.2007, p. 1–10. Bordeaux, France.

30. **Alexandrov V.V., Alexandrov B.V.** Earth electromagnetic Fields and aquatic ecosystems (англ., резюме — русск.). «Periphyton and fouling: theory and practice», Book of Abstracts, Russian academy of sciences, Russian Foundation for Basic Research, JPC «RusHydro», St.-Petersburg, 2008, p. 150–151.

31. **Alexandrov V.V. Co-authors: Alexandrov B.V., Avramenko E.E., Kichigin E.A., Popova L.A., Vinogradov V.N.** Phytometer and environmental geomagnetic fields Δ GMFs for investigation of resting-place in pleasure ground. BIOEM 2009 Davos. Joint meeting of the Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Assotiation, Davos, Switzerland, June 14–19. 2009. P-260, p 55.

32. **Alexandrov V.V. Co-authors: Alexandrov B.V., Avramenko E.E., Kichigin E.A., Popova L.A., Vinogradov V.N.** Trees Moribidity and Local geomagnetic Field Distribution. «Alexandrovi artikkel.doc».

Influence of geopathic fields on life and environment. Seminar, 11–14 june 2009, Saaremaa. “Radieting Fields of Earth, related Architectural geometry of Forms and their Influence on Organisms”. Estonian geopathic Society, 2009, pp. 1–10. «<http://www.geopaatia.ee>».

**ГЕОМАГНЕТИЗМ
И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ**

Раздел посвящается фундаментальной проблеме познания солнечно-земных связей и понимания места планеты Земля в Космосе. Преследуется цель по возможности объективно описать современные научные достижения в области геокосмических электромагнитных явлений и показать их эволюционную значимость для биосферы Земли.

Достоверность оценки экологического состояния земных ресурсов, выбор стратегии их использования и перспектива сохранения жизни в целом на планете Земля возможны лишь при глубоком знании и понимании механизмов, определяющих суть энергетических преобразований в системе Земля—Космос, но основную роль играют здесь электромагнитные взаимодействия между ближайшей звездой к Земле — Солнцем, межпланетным магнитным полем и электромагнетизмом Земли.

Необходимо отметить аспекты прикладного внедрения результатов фундаментальных исследований в системе Земля—Космос — это планомерное, межгосударственное взаимообеспечение бесперебойной гелиогеофизической информацией о состоянии солнечной погоды в пределах магнитосферы Земли:

повышение надежности и оправдываемости климатологических и метеорологических прогнозов (долгосрочных и краткосрочных для любой хозяйственной деятельности);

обеспечение безопасности полетов космических кораблей в пределах магнитосферы Земли, а также авиации в пределах стратосферы;

надежность и безопасность радиосвязи в пределах верхней атмосферы (ионосферы);

обеспечение безопасности и живучести наземных энергосистем на основе прогнозов космической погоды (особенно повышение точности прогноза мировых магнитных бурь интенсивностью более 1000 нТл) и т.д.;

обеспечение службой солнечно-земных связей достоверными прогнозами лечебно-профилактических медицинских учреждений

о перспективе геомагнитных возмущений в целях снижения риска летальных исходов для людей, страдающих сердечно-сосудистой патологией;

создание государственных служб солнечно-земных связей (солнечных данных) в основных ведущих развитых странах — России, США, Великобритании, Норвегии, Японии, Франции, Китае. Существует Международный центр данных, информация доступна в Интернет;

создание государственных служб (банк данных) по геомагнетизму (Россия, США, Великобритания, Япония) для обеспечения навигационных потребностей крупных морских государств (геомагнитное картирование океанов и морей), а также применение магнитотеллурических методов зондирования крупных акваторий для поиска природных минеральных ресурсов на шельфе и в абиссали;

создание крупных научно-прикладных международных ассоциаций по электромагнетизму среды обитания (EVEA, BEMS, WHO и т.д.), осуществляющих новую форму распространения фундаментальных знаний и обмен информацией для практических целей путем проведения международных конгрессов, симпозиумов, конференций именно в сфере экологической деятельности.

1.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ И ЕГО РОЛЬ В БИОСФЕРЕ

1.1.1. Геомагнетизм и биосфера Земли

1.1.2. Элементы геомагнитного поля

1.1.3. Пространственно-временная неоднородность геомагнетизма

1.1.4. Геомагнитные карты

1.1.1. Геомагнетизм и биосфера Земли

Предварительно требуется оценить условия, определяющие естественные ландшафтные электрофизические особенности биосферных экосистем. Отличие геофизики биосферного ландшафта от геофизики глубин Земли состоит в том, что сумма абиотических электромагнитных факторов, вторгающихся в жизнь в подвижных системах, должна исследоваться и учитываться не только как неживой компонент биосферы, но и как носитель физического воздействия на живое вещество природы. Здесь должны рассматриваться

не только общие физические закономерности, свойственные нашей планете, но и исследоваться тонкие, локальные характеристики среды и ее обитателей для каждого полного или неполного природного комплекса любого ранга.

Геомагнитное поле и земные электрические токи в совокупности с внешними (сторонними) силовыми полями обуславливают разнообразные электрофизические явления в природных открытых неравновесных экосистемах, в частности, водных и воздушных. В таких системах электромагнитные свойства среды меняются от точки к точке и могут быть представлены как функции пространственных координат, что в свою очередь обуславливает неоднородности в распределении и распространении электромагнитных полей искусственного и естественного происхождения.

Почему же эколог должен быть осведомлен о свойствах электромагнитного поля Земли?

В последние 20—25 лет установлено, что магнитные взаимодействия имеют существенное значение в физиологии и биологии живых организмов. Этот вывод базируется на двух соображениях:

1) атомы и ионы, из которых состоит организм, благодаря наличию у них магнитных моментов и электрических зарядов могут взаимодействовать с магнитным полем окружающей среды;

2) окружающая среда практически каждого организма характеризуется стабильным и высоко упорядоченным относительно времени жизни организма геомагнитным полем (ГМП), содержащим как пространственную, так и временную информацию, которая может быть важна для организма.

Значение этих соображений весьма серьезно, если учесть, что ГМП уже существовало до возникновения жизни на Земле, поэтому эволюция биосферы проходила под контролем земного электромагнетизма. Более того, за исключением коротких периодов времени, охватывающих инверсии магнитного поля, его конфигурация, напряженность почти не отличались от современных. Поэтому было бы удивительно, если бы в животном мире отсутствовали виды, способные обнаруживать МП и использовать это преимущество в борьбе за существование.

В течение последних 30 лет было убедительно доказано, что у различных организмов — от бактерий до позвоночных — выявляются поведенческие реакции на изменение ГМП или сравнимых по величине полей, создаваемых в лабораторных условиях. Это свидетельствует о том, что ГМП и воспринимается организмами и является важным компонентом среды обитания. Некоторые из изученных организмов, способных к магниторецепции, содержат микроскопические частицы магнетита, по-видимому, связанные

с нервными клетками [Zoeger et al., 1981]. Открытие этого факта указывает на то, что скоро можно будет идентифицировать органы, обладающие прямой магнитной рецепцией, в отличие от косвенной, которая осуществляется через посредство наведенных электрических полей и органов, обладающих электрической рецепцией. Известны прямые, несенсорные реакции на ГМП, обнаруженные в поведении магнитотаксических бактерий. Френкель и другие подсчитали, что вращающий момент, действующий на такие бактерии, достаточен для ориентации их в ГМП [Frankel et al., 1979]*.

В настоящее время установлено, что независимо от того, каким именно образом осуществляется магниторецепция, ГМП следует рассматривать как фактор окружающей среды, имеющий большую или меньшую значимость для разных таксономических групп. Тем более, что относительная устойчивость поля в экологическом (в отличие от эволюционного) масштабе времени в сочетании с его географической аксиальной и экваториальной симметрией создают условия для ориентации и навигации. Кроме того, поле испытывает возмущение из-за локальных и региональных изменений в литосфере и рельефе поверхности. Поэтому такие формы рельефа, как горы, острова, побережья и некоторые локальные области спокойного рельефа, можно опознать по особенностям магнитного поля. Перечислим ряд наиболее очевидных путей взаимодействия организма с ГМП:

1. Солнечное излучение, солнечные и лунные приливные силы взаимодействуют с электрическими токами ионосферы. В результате этого ГМП на земной поверхности испытывает малоамплитудные вариации с периодами, равными солнечным и лунным суткам, синодическому месяцу и тропическому году. Любая из этих периодических вариаций может действовать как синхронизатор для биологических часов и давать возможность достаточно чувствительным организмам отмечать ход времени (здесь только обозначим явление, подробно оно будет рассмотрено в специальных разделах — авт.).

2. Имеются точные сведения об электромагнитных предвестниках землетрясений, которые породили мысль о том, что с их помощью можно объяснить некоторые наблюдения о необычайном поведении животных перед ростом сейсмической активности. Есть утверждения [Тарасов Б.Г. Пульсация земли и циклы геодинамической активности в потоках космической плазмы. СПб: Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ). — 2009. 319 с.] о роли и других катастрофических геофизических явлений — вулканизме, ураганах и др.

3. Было выдвинуто предположение, что во время инверсии ГМП скорости вымирания и видообразования должны увеличиваться в

*Последние данные о реакции ДНК на действие МП см. в ч. 3.

том случае, если уменьшение напряженности поля приводит к изменениям климата или возрастанию потока высокоэнергетических частиц и радиации на земной поверхности. Так, в глубоководных колонках осадочных отложений наблюдалась приближенная корреляция между инверсиями поля в течение последних нескольких миллионов лет и появлением и исчезновением некоторых видов планктона. Альтернативное объяснение может состоять в том, что как инверсии поля, так и изменение фауны обусловлены третьим явлением, таким как удар метеорита. К этому теперь можно добавить, что вымирание или видообразование могли бы происходить в случаях, когда популяции, зависящие от временной или пространственной информации, получаемой через ГМП, были лишены ее на протяжении многих поколений во время инверсии.

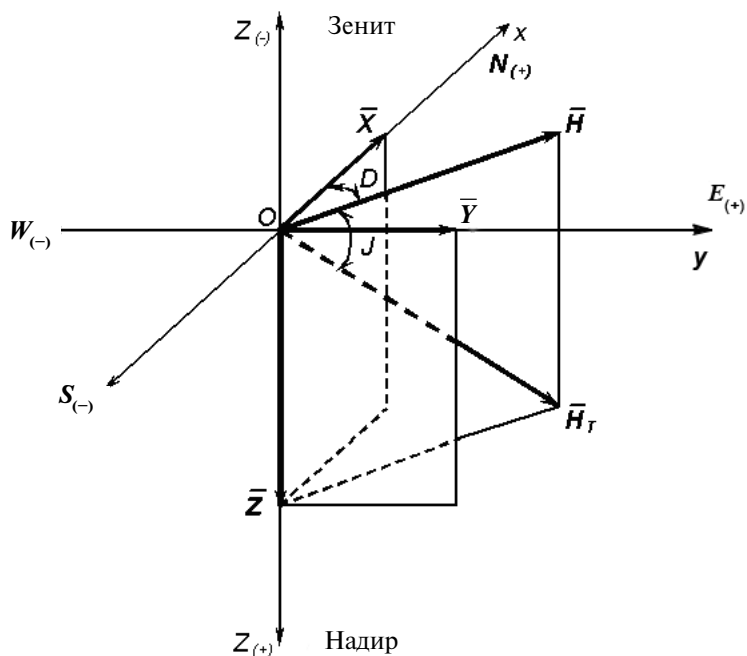
Задачей данного раздела является описание ГМП с учетом геологического прошлого планеты и современного ее состояния. Основное внимание мы уделили феноменологии, дав незначительный объем теоретических и методологических сведений.

1.1.2. Элементы геомагнитного поля

Основные закономерности электромагнетизма Земли и околоземного пространства описаны во многих работах [Рикитаки, 1968; Bullard, 1970; Оль, 1971; Почтарев, 1974; Блюх и др., 1977; Яновский, 1978]. Однако космические и наземные исследования последнего десятилетия внесли много нового в представление о механизме взаимодействия внешних и внутренних источников изменчивости электромагнитного поля Земли, которые регистрируются современной аппаратурой. Поэтому многие вопросы теории ЭМ поля Земли гипотетического характера постоянно подвергаются пересмотру и переосмысливанию [Моффат, 1980; Харгривс, 1982; Лайонс и Уильямс, 1987; Электромагнитные и плазменные процессы..., 1989; Электромагнитные поля в биосфере, 1984; Problems of Geocosmos, 1996].

Земля и околоземное пространство находятся в сфере действия электромагнитных полей системы солнечно-земных связей, которые обуславливают космическую ритмику электрических и магнитных эффектов на Земле. Внеземные источники (все виды солнечного излучения, лунные приливные воздействия, внутригалактические и внегалактические высокоэнергетические источники возмущения электромагнитного поля Земли) рассмотрены достаточно глубоко в специальной литературе, мы далее остановимся лишь на их ритмической значимости в сфере земного электромагнетизма, а в этом разделе несколько подробнее коснемся земных источников изменчивости поля, обуславливающих его неоднородности на поверхности Земли и в воде.

Начало координат будем полагать в точке, где происходит наблюдение напряженности ГМП, тогда вектор H_t займет по отношению к нашей системе координат какое-то положение OH_t (рис. 1.1).



Название произошло от арабского *назир* — “стоящий напротив”

Проекция этого вектора H_t на ось x носит название северной (меридиональной) составляющей и обозначается буквой X ; проекция на ось y называется восточной (широтной) составляющей Y , а проекция на ось z называется вертикальной составляющей Z . Проекцию H_t на горизонтальную плоскость называют горизонтальной составляющей, которую обозначают символом H .

Вертикальная плоскость zOH , в которой лежит вектор H_t , называется плоскостью магнитного меридиана, а угол между магнитным меридианом и плоскостью xOz — магнитным склонением и обозначается буквой D . Угол HOH_t между горизонтальной плоскостью и направлением вектора H_t носит название магнитного наклона I .

На рис. 1.1 положительным склонением будет восточное, т.е. когда вектор H отклонен от севера к востоку, а отрицательным — западное.

Наклонение I положительно, когда вектор H_t направлен вниз от земной поверхности, что имеет место в северном полушарии, и отрицательно, когда H_t направлен вверх, т.е. в южном полушарии.

Склонение (D), наклонение (I), горизонтальная составляющая (H), вертикальная составляющая (Z), северная (X) и восточная (Y) носят название **элементов земного магнетизма**, которые можно рассматривать как координаты конца вектора H_t в различных системах координат. Так, например, X, Y, Z — не что иное, как координаты конца вектора H_t в прямоугольной системе координат; Z, H и D — координаты в цилиндрической системе; H, D и I — координаты в сферической системе.

В каждой из этих трех систем координаты независимы друг от друга. Для перехода же от одной системы координат к другой и определения величины вектора H_t существуют следующие соотношения:

$$\begin{aligned} X &= H \cos D, \quad Z = H \operatorname{tg} I, \quad Y = H \sin D, \\ H^2 &= X^2 + Y^2, \quad H_t^2 = H^2 + Z^2, \\ \operatorname{tg} D &= Y/X, \quad H_t = H \sec I = Z \operatorname{cosec} I. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Ни один из этих элементов не остается постоянным во времени, а каждый непрерывно меняет свое значение от часа к часу и от года к году. Такие изменения получили название **вариаций элементов земного магнетизма**. Уже упоминалось о суточных вариациях, годовых и вековых, поэтому вариации классифицируются на **быстротечные периодического характера и медленные, вековые**. Быстротечные связаны с изменением ионосферных токов, вековые — с изменением ЭП внутри земного ядра.

Рассмотрим физическую сущность силовых составляющих элементов земного магнетизма.

Напряженность магнитного поля $\vec{H}$ — это количественная характеристика МП, не зависящая от магнитных свойств среды и равная

магнитной индукции $\bar{B}$, деленной на абсолютную магнитную проницаемость. В свою очередь магнитная индукция, или плотность магнитного потока (Φ), определяется как отношение модуля силы $d\bar{F}$, с которой МП действует на элемент тока $\bar{I}d\ell$, перпендикулярному вектору $\bar{B}$. Перечисленные величины определяются формулами:

$$B = \frac{dF}{Id\ell}; \quad \Phi = \int \bar{B}dS; \quad \bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0\mu}. \quad (1.2)$$

Введем размерности и единицы измерения магнитных характеристик среды в системе СИ.

Магнитная индукция имеет размерность

$$\dim B = MT^{-2} I^{-1}.$$

Единица B — ньютон на ампер-метр — носит название тесла (Тл, Т). Тесла есть индукция МП, действующего на элемент тока 1 А·м, направленного по нормали к линии поля, с силой 1 Н.

Магнитный поток — поток вектора магнитной индукции через данную поверхность, определяемый интегралом по этой поверхности, имеет размерность

$$\dim \Phi = L^2MT^{-2} I^{-1}.$$

Единица Φ — тесла-квадратный метр — носит название *вебер* (Вб, Wb). Вебер равен потоку магнитной индукции 1 Тл через сечение площадью 1 м².

Потокосцепление Ψ — это сумма магнитных потоков через поверхности, ограниченные проводниками электрической цепи, имеет ту же размерность и выражается в тех же единицах, что и магнитный поток.

Индуктивность L , *взаимная индуктивность* M есть отношение потокосцепления, связанного с током в электрическом контуре, к силе этого тока:

$$L = \Psi / I, \quad M = \Psi / I,$$

имеют размерность

$$\dim M = L^2MT^{-2} I^{-2}$$

и выражаются в веберах на ампер. Этой единице присвоено наименование генри (Гн, Н). Генри равен индуктивности электрической цепи, с которой при силе постоянного тока в ней 1 А сцепляется магнитный поток 1 Вб.

Приняв во внимание, что μ_0 выражается в генри на метр, единицей $\bar{H}$ является

$$\bar{H} = \text{тесла} \frac{\text{метр}}{\text{генри}} = \frac{\text{вебер}}{\text{квадратный метр}} \frac{\text{метр}}{\text{генри}} = \frac{\text{ампер}}{\text{метр}}.$$

Так как ампер на метр равен напряженности МП в вакууме при магнитной индукции, равной $\{\mu_0\}$ тесла, то размерность напряженности МП:

$$\dim H = L^{-1}I.$$

В гауссовой системе — системе СГС — единицей магнитной индукции является гаусс (Гс). В литературе по гео- и биомagnetизму часто встречается единица, называемая эрстед (Э) и представляющая собой единицу измерения напряженности МП в системе СГС (ее не следует путать с горизонтальной составляющей $\vec{H}$ геомагнитного поля), которая в системе МКС эквивалентна А/м. Однако для всех практических приложений эрстед и гаусс численно равны. При измерениях очень слабых магнитных полей используются нанотесла (нТл) в системе МКС и гамма (γ) в СГС. Эти единицы магнитной индукции связаны между собой следующими соотношениями:

$$1\text{Гс} = 10^{-4}\text{Тл} = 10^{-4}\text{Вб/м}^2,$$

$$1\gamma = 10^{-5}\text{Гс} = 10^{-9}\text{Тл} = 1\text{нТл}.$$

Индукция ГМП на поверхности Земли изменяется примерно от 0,24 Гс в районе Рио-де-Жанейро (Бразилия) до 0,61 ÷ 0,68 Гс вблизи географических полюсов. По лабораторным стандартам это поле довольно слабое. Постоянные поля до 10^5 Гс легко создаются в лабораторных условиях, а МП вблизи игрушечного магнита имеет порядок 10^2 Гс. С другой стороны, J.P. Wikswo и др. [Wikswo et al. 1980] обнаружили поле в 0,12 нТл, созданное потенциалом действия изолированного седалищного нерва лягушки-быка. Последняя величина представляет интерес, так как она позволяет оценить уровень шума внутри организма. Чтобы внешние поля можно было обнаружить биологическим путем, они должны превышать уровень шума собственно организма. Если организм проявляет поведенческую или физиологическую реакцию на магнитное поле, необходимо выяснить, реагирует ли он на МП прямо через магниторецептор или косвенно через электрическое поле. В свете доказанных электросенсорных способностей различных организмов [Kalmijn, 1974] это приобретает особое значение.

Аналогичная проблема существует и при рассмотрении реакций организмов на электрические поля. Однако, если учитывать только небольшие низкочастотные (НЧ) медленно меняющиеся ЭП, свойственные естественному окружению биологических систем, то окажется, что магнитные поля, связанные с временными изменениями электрических полей, обычно чрезвычайно слабы. Исключение составляют такие лабораторные условия, когда организм подвергается воздействию импульсных электрических полей. В подобных случаях низкочастотное приближение нарушается (даже

если число пульсаций в единицу времени мало) внезапными включениями и выключениями ЭП, что может приводить к возникновению значительных магнитных полей.

1.1.3. Пространственно-временная неоднородность геомагнетизма

На земной поверхности элементы магнитного поля непрерывно меняются в пространстве и во времени. Напряженность магнитного поля земного шара убывает приблизительно обратно пропорционально кубу расстояния от центра сферы до точки наблюдения. Многообразие источников геомагнитного поля и его невысокая напряженность по сравнению с искусственными полями обуславливают сложность его исследования.

Крупномасштабную часть геомагнитного поля (так называемое “главное поле”) объясняют действием электрических токов в высокопроводящем внешнем слое земного ядра, которые индуцируются в результате конвективных движений в жидкой части ядра в первичном слабом магнитном поле. Такое трактование принято в геофизике в качестве теоретической бесспорной гипотезы “самовозбуждающегося динамо”, которая объясняет два важнейших свойства “главного поля”:

- 1) вековые вариации магнитного момента, общей конфигурации поля, отдельных больших аномалий;
- 2) инверсии поля (изменение полярности), многократно повторяющиеся на протяжении геологической истории Земли.

“Главное поле” с напряженностью примерно 40 А/м существует в течение геологического времени около $3 \cdot 10^9$ лет. Это время примерно соответствует возрасту Земли — $5 \cdot 10^9$ лет. Следовательно, как утверждает Г.К. Моффат (H.K. Moffatt), “его нельзя считать реликтовым полем, захваченным при аккреции Земли из межпланетного вещества; такое поле в отсутствие какого-либо восстанавливающего механизма не способно просуществовать в течение продолжительной истории Земли” [Моффат, 1980]. Этот механизм объясним лишь с позиции теории самовозбуждающегося динамо. Важнейшее свойство “главного поля” состоит в том, что оно является экраном, защищающим Землю (биосферу) и околоземное пространство от проникновения сюда космического излучения (волнового, корпускулярного).*

*Природа “самовозбуждающегося динамо” окончательно не выяснена; кроме того, процесс индукции МП неустойчив, и в настоящее время напряженность поля геоцентрического диполя уменьшается со скоростью, которая может привести к его исчезновению приблизительно через 2000 лет [Скайлс, 1989, с. 93].

Переменную часть геомагнитного поля образуют геомагнитные пульсации, генерируемые электрическими токами и волновыми процессами в верхних слоях атмосферы и в околоземном пространстве (внешние источники). Несмотря на то, что вклад этих внешних источников очень мал и нерегулярен (примерно $4 \div 5 \%$ в наиболее активные периоды), значение этих пульсаций в проблеме магнито-биологических связей, видимо, существенно больше, чем значение медленно меняющегося внутреннего (“главного земного”) поля. Это обусловлено динамическими свойствами внешнего поля. Магнитное поле внешнего источника (магнитосфера, ионосфера) состоит из нескольких типов полей, различающихся между собой спектральными, энергетическими и другими характеристиками, они-то и генерируют ритмические электрические эффекты в окружающей среде.

Земное электрическое поле складывается из атмосферно-электрического поля и поля земной коры (электротеллурического поля). Любой электромагнитный процесс, изменяющийся во времени, представляет собой непрерывную связь электрического и магнитного полей. Поэтому необходимо одновременно учитывать также и все компоненты переменного электромагнитного поля Земли (ЭМПЗ). В каждой точке наблюдения на земной поверхности (λ, φ) и в любой момент времени существуют все шесть компонент векторов E и H поля Земли: $E_Z, E_\lambda, E_\varphi, H_Z, H_\lambda, H_\varphi$ (E_Z и H_Z — вертикальные компоненты электрического и магнитного полей; E_λ, E_φ и H_λ, H_φ — широтные и меридиональные (горизонтальные) компоненты поля земных токов и магнитного поля).

Разница в амплитудах поля, образуемая между суммарным переменным полем и постоянным (так называемым «нормальным полем»), классифицируется как колебания, или вариации:

$$\begin{aligned}\delta E &= E(\lambda, \varphi, t) - E_0(\lambda, \varphi), \\ \delta H &= H(\lambda, \varphi, t) - H_0(\lambda, \varphi).\end{aligned}\tag{1.3}$$

Компоненты электрического поля, измеряемые на земной поверхности и в ее недрах, характеризуют теллурическое (земное) поле. Теллурическое поле, объясняемое конвективными движениями проводящей среды в ядре, осложнено многими эффектами чисто земного происхождения. Например, известны литосферные электрические процессы, вызванные энергетическим обменом на границах ядра, мантии и земной коры и сопровождающиеся термоэлектрическим эффектом, гравитационными электродвижущими силами из-за высокого сжатия земного шара. Наблюдаются и аномально резкие изменения уровня теллурического поля, сопровождающие усиление сейсмической активности земной коры

(землетрясения с магнитудой $5 \div 5,5$ и более). Обнаружено, что максимумы изменения уровня теллурического поля (Камчатка) в среднем на 10 суток опережают соответствующие максимумы землетрясений, а резкий рост удельной электрической проводимости воды в геотермальных Зурамакентских источниках (Дагестан) наблюдается за трое суток до первого толчка, если эпицентр находится в пределах 5 км от точки наблюдения [Осика, Магеев, 1978]. Вопрос о сейсмоэлектрическом эффекте подробно рассмотрен в работе [Соболев, Демин, 1980]. Теллурическое поле меняется и при вулканических возмущениях земной коры*.

Околоземное пространство в пределах атмосферы включает в себя атмосферно-электрический компонент единого поля Земли. Атмосферно-электрическое поле (оно всегда направлено нормально к земной поверхности) измеряется в воздухе. Это поле проявляется в фильтрационно-электрических эффектах, генерирующих конвекционные токи в нижних слоях атмосферы, ионизирующих атмосферные осадки, аэрозоли и гидрозоли. Электрические процессы в атмосфере, протекающие медленно или быстро, всегда сопровождаются электромагнитными возмущениями, которые в земной коре индуцируют вихревые токи [Краев, 1971].

Движение ионизированных частиц в верхних слоях атмосферы вызывает изменение магнитного поля у поверхности Земли на $10 \div 100$ нТл. Движение облаков теоретически должно давать напряженность поля у Земли примерно $4 \cdot 10^{-3}$ В/м на частоте 1 Гц, причем спектральная плотность пропорциональна f^{-2} при $f < 1$ Гц и f^{-3} — при $f > 1$ Гц.

Перенос заряженных воздушных масс ветром на высоте $10 \div 20$ м создает в хорошую погоду изменение градиента потенциала у поверхности Земли до ± 1 В/м в диапазоне частот $10^{-3} \div 1$ Гц (цит. по: Александров, Зайцев, 1978). Имеются сведения о том, что напряженность поля у поверхности Земли, в частности над водной поверхностью океанов, существенно изменяется при изменениях скорости ветра. В работе [Лободин, 1963; Красногорская, 1972] показано, что увеличение скорости ветра на 1 м/с приводит к увеличению градиента потенциала электрического поля на 1 В/м. Здесь наблюдается своеобразный трибополяризационный эффект (сопутствует баллоэлектрическому эффекту) в результате электризации водяных капель, тонкого поверхностного слоя воды и пены (кавитационные явления).

*Пояснения к проблемам прогноза землетрясений и вулканизма см. в разделе “Геофизика” на с. 668.

С помощью специального прибора (электростатический вольтметр с вращающимся конденсатором) американские геофизики провели измерения атмосферного электростатического потенциала, по которому можно было вычислить плотность нескомпенсированных ионов. В бурную погоду при записи на открытом воздухе на высоте 2,14 м над поверхностью Земли авторы зафиксировали изменение потенциала от нескольких вольт до нескольких сотен вольт [Cretrol, Hammond, Stewart, 1955]. Более совершенная аппаратура была разработана в Институте физики Земли АН России. При штилевой погоде и слабом ветре были зарегистрированы пульсации с амплитудой от 200 до 500 В/м; при увеличении скорости ветра до 7 м/с, сопровождаемого снежной метелью, наблюдались пульсации с амплитудами до $3 \div 4$ кВ/м при повышении общего фоновой уровня поля более чем на 20 кВ/м. Эти особенности авторы объясняют электризацией снежных масс и разделением зарядов на границе воздух–ледяной покров в районе эксперимента на СП-22 в Северном Ледовитом океане [Структура электромагнитного..., 1980, с. 145–147; 158–163].

Изменение электрического поля, связанное с суточными вариациями скорости ветра, составляет 4 % от амплитуды колебаний теллурического поля. Поэтому вклад дополнительной ионизации приводного слоя за счет усиления ветра и отрыва капелек воды от поверхности в суммарный эффект поля весьма незначителен, хотя локальная напряженность поля может быть достаточно искажена в момент усиления ветра.

Автор наблюдал существенные изменения в амплитудно-частотной структуре теллурического поля с помощью специально организованного электрополюметрического полигона на побережье и в воде Якимварского залива (северо-западная часть Ладожского озера). Наземная установка с ориентацией электродных линий север–юг и запад–восток при увеличении скорости ветра с 3 до $7 \div 10$ м/с регистрировала рост амплитуды поля от $2 \cdot 10^{-6}$ до $3,2 \cdot 10^{-5}$ В/м с периодом пульсаций 4, 5, 7 и 10 с. Ветровые шквалы, внезапно возникающие над невозмущенной поверхностью воды, индуцировали в тонкой $2 \div 3$ -сантиметровой пленке воды скачок разности потенциалов до $(4 \div 6) 10^{-6}$ В/м. Аналогичные результаты наблюдались в Андижанском водохранилище [Александров, 1985].

В работах Морского гидрофизического института АН Украины показано, что спорадические изменения естественного электромагнитного фоновой поля в морях и океанах на глубинах до $100 \div 200$ м в диапазоне частот выше единиц герц обусловлены в основном суммарным атмосферно-электрическим полем [Проблемы морских электромагнитных исследований, 1980, с. 38–45].

Наблюдения над колебаниями естественного электрического поля в морской и пресной воде в период грозового состояния атмосферы подтверждают это положение. В.И. Лопатников приводит данные о том, что при записи теллурических токов в море обнаруживаются сигналы грозовых разрядов, фиксируемые подводной установкой лишь при местной грозе [Лопатников, 1973].

Локальные грозовые разряды наблюдались автором в 1973 и 1974 гг. на Ладожском озере при вертикальных зондированиях и съемках акватории буксируемыми зондами с длиной измерительных линий 10 и 20 м. Сигнал при грозовых разрядах имеет специфический характер и легко исключается из серии любых резких колебаний градиента потенциала, которые наиболее ярко выражены в зоне перемешивания разнородных по физико-химическим свойствам водных масс. Амплитуды сигналов, наблюдавшихся в поверхностном слое воды, достигали $(1 \div 1,5)10^{-3}$ В/м [Александров, Зайцев, 1978, с. 219].

Таким образом, еще раз напомним, что ГМП делят на главное магнитное поле и его вековые вариации, имеющие своим источником внутриземные причины, и переменное магнитное поле, имеющее происхождение, обусловленное внешними источниками.

Переменное поле по существу является не только магнитным, но и электрическим, поэтому удобнее его называть более общим термином — электромагнитное поле Земли (ЭМП).

Следует отметить, что понимание фундаментальной взаимосвязи между электрическими и магнитными полями весьма существенно для правильной интерпретации биологических реакций на воздействие ГМП. Поскольку электрические и магнитные поля являются компонентами одного и того же ЭМП, то пространственные и временные характеристики его будут казаться различными для двух или нескольких наблюдателей, движущихся относительно друг друга. Поэтому важно, чтобы каждый наблюдатель измерял все физические величины приборами, располагающимися в его собственной системе отсчета, т.е. приборами, неподвижными по отношению к нему.

Сила $\bar{F}_q$, которая действует на заряженную частицу со стороны электрического и магнитного полей, и называемая обобщенной силой Лоренца, определяется выражением:

$$\bar{F}_q = \bar{F}_e + \bar{F}_m = q\bar{E} + kq\bar{V} \times \bar{B}, \quad (1.4)$$

где k — постоянная, зависящая от используемой системы единиц. В электромагнитной (СГСМ) и электростатической (СГСЭ) системах, а также в системе МКС и СИ $k = 1$, а в системе СГС $k = 1/c$. Электрическая сила $\bar{F}_e$ действует как на покоящуюся, так и на

движущуюся заряженную частицу, а магнитная сила $\vec{F}_m$ — только на движущуюся частицу.

Уравнение (1.4) справедливо для всех наблюдателей независимо от их относительных движений. Однако величины и направления векторов $\vec{E}$, $\vec{F}_q$, $\vec{V}$ и $\vec{B}$ будут в общем случае различны для разных наблюдателей. Из-за инвариантности заряда* значение q является одним и тем же для всех наблюдателей, и изменение знака q приводит к изменению направления силы $\vec{F}_q$ на противоположное.

1.1.4. Геомагнитные карты

Одной из главных задач прикладного геомагнетизма является построение карт элементов магнитного поля. Магнитные исследования проводились мореплавателями, начиная, по крайней мере, с 1500-х годов, но более или менее достоверные мировые магнитные съемки стали проводиться лишь с начала XX века. Первоначально измеряли лишь склонения и наклонения, поскольку надежные измерения напряженности МП оказались возможны только после теоретических и технологических достижений XIX в.

В настоящее время МП непрерывно изучают с помощью наземных, морских, воздушных и спутниковых измерений. При этом наиболее точные измерения проводятся на глобальной сети, состоящей примерно из 200 обсерваторий, размещенных по всему земному шару [Электромагнитные и плазменные..., 1989, с. 214]. Детальная информация о структуре и о поведении поля получена примерно за последние 80 лет. Выводы о глобальном распределении поля до этого времени приходится делать, исходя из крайне отрывочных данных, используя приложенный к геомагнетизму принцип униформизма, известный как “гипотеза осевого геоцентрического диполя”.

Установлено, что ГМП содержит значительную ориентационную и навигационную информацию. Линии равной напряженности поля, называемые *изодинамами*, над большей частью поверхности Земли простираются в направлении восток–запад, что позволяет производить приближенное определение широты в каждом полушарии (рис. 1.2, цв. **). Изменение вертикальной составляющей ГМП показано на

*Инвариантность — надёжность, независимость, неизменность от некоторых физических условий. Пример: полный электрический заряд.

**Рисунки, рядом с намерами которых указано “цв”., см. в блоке цветных иллюстраций.

рис. 1.3в, цв**) Линии равных наклонений называются **изоклинами**, или магнитными широтами (рис. 1.3а). Изоклина, опоясывающая Землю, для которой $I = 0$, называется **магнитным экватором**, а точка, в которой $I = +90^\circ$ ($I = -90^\circ$), называется северным (южным) **магнитным полюсом**. Заметим, что магнитные полюса не совпадают с географическими и не являются антиподами. По изоклинам можно еще точнее определять географическую широту, а изменение знака I на экваторе дает возможность провести границу между полушариями. При наличии компаса можно определить склонение в любой точке, что равносильно определению направления на географический север.

Линии равного склонения называются **изогонами** (рис. 1.3б, цв.). Изоклины и изогоны образуют координатную сетку, аналогичную той, которую образуют географические параллели и меридианы. Отметим, что есть две линии нулевого магнитного склонения ($D = 0$) (см. рис. 1.3б, цв.). В свете многочисленных исследований ориентирования и миграций животных, которые проводились в Европе в течение последних нескольких десятилетий, интересно отметить, что одна линия нулевого магнитного склонения проходит через Центральную Европу почти точно в меридиональном направлении. За явным исключением Центральной Азии и Южной Африки, над большей частью континентов и северных океанов изогоны проходят приблизительно с севера на юг, поэтому их можно использовать для определения географической долготы без помощи часов.

При построении карт элементов МП Земли добиваются максимума их надежности путем определения: 1) соответствующих значений на поверхности по спутниковым и аэромагнитным данным, 2) исключением локальных аномалий, связанных с геологическими структурами в пределах нескольких верхних километров земной коры, 3) осреднением периодических (дрейфующих) от года к году или от месяца к месяцу вариаций по определенным интервалам времени, 4) исключением возмущений, связанных с бурями*.

Дрейф значений магнитных элементов, известный под названием **вековой вариации**, происходит достаточно быстро, что требует ревизии геомагнитных карт каждые 5 ÷ 10 лет. Так, в районах Лондона и Парижа склонение изменилось на 18° , а наклонение на 6° за 100 лет. Причем, как скорость, так и знак вековой вариации

*Карты МП Земли для эпохи 1975 г. соответствуют также с современными уточнениями картам эпохи 1965 г., которые строились усилиями специалистов разных стран и назывались картами Международного эталонного геомагнитного поля (МЭГП).

менялись во времени. Такие быстрые изменения поля по направлению явно имеют биологический смысл. Однако, если способность ориентироваться относительно ГМП могла быть запрограммирована генетически, то весьма маловероятным кажется, что и абсолютное направление поля было заложено в эту биологическую программу. Таким образом, последующие поколения животных должны научиться связывать направления ГМП с конкретным географическим направлением.

Существенны для биологических оценок ГМП и магнитные аномалии поля, связанные, как правило, с остаточной и индуцированной естественной намагниченностью горных пород. Известны крупные аномалии — Лапландская ($Z \approx 3,6$ Гс), Курская ($Z \approx 1,9$ Гс, $D \approx$ от $+60$ до -110°), но чаще всего встречаются слабые магнитные аномалии до $100 \div 1000$ нТл, которые охватывают всю Землю. Поэтому такие аномалии являются типичным фоновым шумом, с которым может неожиданно встретиться мигрирующая рыба или птица. Так, С. Walkott [1978] отметил, что ориентация домашних голубей нарушается вблизи немного более интенсивных,

но характеризующихся более резким градиентом аномалий ($3000 \div 4000$ нТл на 3 км). Однако такие аномалии могли бы оказаться полезными большому количеству видов, которые смогли бы научиться распознавать конкретный район по особенностям магнитного поля.

Заканчивая обзор о структуре геомагнитных карт, нельзя не отметить достижений отечественных геофизиков. Так, сотрудники лаборатории магнитной картографии Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН к началу 90-х годов XX века завершили составление атласа магнитных карт мира и разработали математические модели магнитного поля Земли [Электромагнитные и плазменные..., 1989, с. 3–14].

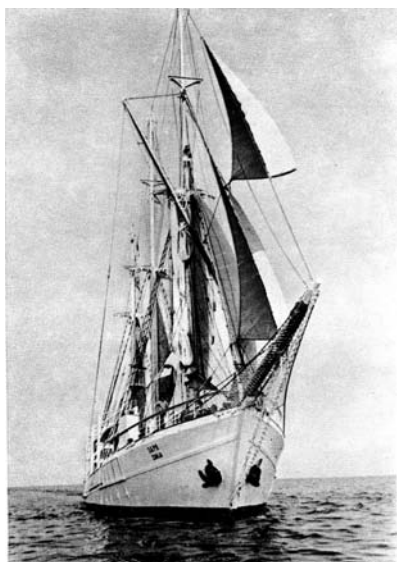


Рис. 1.4. Антимангнитная шхуна “Заря”. Российский современный флагман исследования геомагнитного поля морей и океанов [Касьяненко, Пушков, 1987]

Такая планетарная модель получена впервые в мире. Магнитные карты территорий различных стран мира и всего земного шара столь же необходимы, как топографические или геологические карты. Составляются они только в России, США и Англии и обязательно используются в морской и воздушной навигации, геологии и т.д. Так, санкт-петербургские морские магнитологи составили карту осей магнитных аномалий для акватории Мирового океана, которая позволяет оценить симметричное разрастание океанического дна по обе стороны от планетарных разломов со скоростью $\approx 1 \div 10$ см/год. Результаты проделанной работы подтверждают существующую гипотезу о горизонтальных движениях крупных блоков земной коры на протяжении всей геологической истории Земли. В последнее десятилетие изучалось магнитное поле и его вековые вариации преимущественно в Балтийском море, как и ранее в океане, на антимагнитной шхуне “Заря” (рис. 1.4), что позволяет оценить современные тектонические процессы, связанные с медленным поднятием коры Скандинавского полуострова [Карасик, Касьяненко, Цуцкер, 1989]. Последним достижением СПбФИЗМИР РАН являются карты геомагнитного поля Антарктики (рис. 1.3г, цв., авт. В.И. Колесова, издание Главного управления навигации и океанографии МО Российской Федерации, 2006 г.).

1.2. ЭВОЛЮЦИОННАЯ И ОНТОГЕНЕТИЧЕСКАЯ* РОЛЬ ГЕОМАГНЕТИЗМА

В становлении науки о земном магнетизме решающий шаг был сделан Гауссом, который разработал методику абсолютных измерений ГМП и создал математический аппарат для его анализа. Рассматривая ГМП как потенциальную функцию, удовлетворяющую уравнению Лапласа, Гаусс предложил метод аппроксимации наблюденного поля разложением в ряд по сферическим гармоникам. Метод позволил разделить поле внешних и внутренних источников и строго доказать абсолютно превалирующую роль внутренних источников [Головков, Коломийцева, Ротанова, 1989]. Появилась возможность описывать пространственное распределение ГМП с помощью набора сферических гармонических коэффициентов, определяемых по экспериментальным данным решением систем уравнений:

*Онтогенез — от греческого *on*, род. Падеж *ontos* — сущее и... генез — индивидуальное развитие организма — совокупность преобразований, претерпеваемых организмом от зарождения до конца жизни. Термин введен в 1866 г. немецким биологом Э. Геккелем.

$$\begin{aligned}
Z &= \frac{\partial V}{\partial r} = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (n+1)(g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2}; \\
X &= \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \frac{\partial P_n^m(\cos \theta)}{\partial \theta} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2}; \\
Y &= -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \lambda} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n m(g_n^m \sin m\lambda - h_n^m \cos m\lambda) \frac{P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2},
\end{aligned} \tag{1.5}$$

где r, θ, λ — сферические координаты; $P_n^m(\cos \theta)$ — присоединенные полиномы Лежандра второго рода.

Поскольку изолированные магнитные заряды (монополи*) не существуют (либо так редки и неуловимы, что не могут быть обнаружены), **простейшей формой** магнитного поля является поле диполя. Наиболее известным примером такого диполя служит поле магнитного стержня, так называемое **поле осевого геоцентрического диполя**. Если такой гипотетический диполь поместить в центр Земли и ориентировать его вдоль оси ее вращения, то лучшая аппроксимация достигается в том случае, когда ось диполя будет наклонена на $11,5^\circ$ относительно географической оси вращения Земли в направлении к меридиану 70° з.д. (т.е. к Тихому океану) [Физический энциклопедический словарь, 1983. С. 200].*

У аппроксимирующего ГМП геоцентрического диполя южный магнитный полюс расположен в Северном полушарии, а северный магнитный полюс — в Южном полушарии Земли. В этом случае лучшая аппроксимация достигается, когда наклоненный диполь смещен от центра Земли примерно на 462 км на период 1970 г. [Бочкарев Н.Г., 1985], т.е. при таком приближении в описании магнитного поля Земли говорят как об эксцентричном диполе.

Магнитный момент земного диполя $M \simeq 0,8 \cdot 10^{16} \text{ А} \cdot \text{м}^2 = 0,8 \cdot 10^{26} \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$. M — это характеристика магнитного поля в целом. В простейшем случае величина дипольного магнитного момента определяется произведением **количества магнетизма** в каждом из полюсов магнита на расстояние между полюсами. “Количество магнетизма”, или **магнитная масса**, или **магнитный заряд** m — фиктивная величина, определяемая как отношение силы F , действующей на заряд в магнитном поле, к напряженности этого магнитного поля $\vec{H}$:

$$m = \frac{F}{H}.$$

*См. [Daninos Franck, 2010.]

Согласно этому уравнению, магнитная масса имеет размерность магнитного потока (см. ч. 1, разд. 1.1) и выражается в веберах:

$$\dim m = \frac{\dim F}{\dim H} = L^2MT^{-2}I^{-1}.$$

Также отметим, что в соответствии с этим соотношением магнитный момент диполя, образованного двумя разноименными магнитными массами, отстоящими одна от другой на расстоянии L , имеет ту же размерность, что и кулоновский магнитный момент контура с током $p'_m = \mu_0 IS$:

$$\dim (mL) = \dim p'_m = L^3MT^{-2}I^{-1}.$$

Магнитный момент диполя также выражается в вебер-метрах и называется кулоновским.

Напряженность МП на магнитном полюсе составляет 19,5 А/м (0,65 Э). Напряженность МП на магнитном экваторе 10,5 А/м (0,35 Э) [спр. “Физические величины”, 1991].

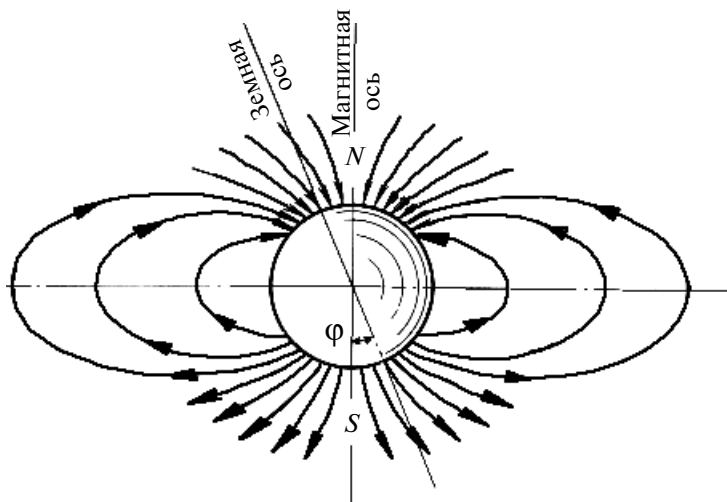


Рис. 1.5. Аппроксимация ГМП геоцентрическим осевым диполем

Простейшая модель структуры ГМП, образованной геоцентрическим диполем, показана на рис. 1.5. Ось геоцентрического диполя (называемая **геомагнитной осью**) пересекает земную поверхность в антиподальных точках 78,6° с.ш., 69,8° з.д. и 78,6° ю.ш., 110,2° в.д., которые известны как северный и южный геомагнитные полюса, соответственно. **Геомагнитные полюса** не следует путать с северным и южным **магнитными полюсами**. Геомагнитные полюса не являются физической реальностью, тогда как положение магнитных полюсов

можно установить с помощью магнитного компаса. Таким образом, несмотря на то, что источник диполя не существует как физическая реальность и является лишь наиболее удобной моделью для визуального представления общей конфигурации ГМП, в теоретических задачах геомагнитная ось используется при определении системы **геомагнитных широт и долгот**. Большой круг, перпендикулярный геомагнитной оси, называется **геомагнитным экватором**, т.е. линией нулевого наклона главного дипольного поля.

Еще раз следует обратить внимание на то, что в Северном полушарии расположен южный магнитный полюс воображаемого магнита, а в Южном полушарии — северный магнитный полюс этого (геоцентрического диполя) воображаемого магнита. Поэтому северный конец магнитной стрелки в Северном полушарии притягивается к южному магнитному полюсу и наклоняется вниз; северный конец стрелки в Южном полушарии отталкивается от северного магнитного полюса и поднимается вверх. Таким образом, силовые линии магнитной индукции геомагнитного поля выходят из Южного полушария и устремляются, огибая Землю, в Северное полушарие [Почтарев, 1974].

Если главное дипольное поле вычтеть из наблюдаемого глобального, то остаточное поле будет соответствовать **недипольному полю**. Как показали карты вертикальной компоненты недипольного поля для эпохи 1975 г. [Почтарев, 1984]*, такое поле не является совершенно хаотичным, а состоит из нескольких аномалий, размеры которых сравнимы с размерами континентов (см. рис. 1.6). Недипольное поле также изменяется со временем. Одним из наиболее интересных изменений такого рода является видимая тенденция недипольного поля дрейфовать на запад со скоростью примерно $0,2^\circ/\text{год}$.

Проведенные за многие годы исследования позволяют с достаточной уверенностью утверждать, что хотя конфигурация ГМП меняется во времени, древнее поле (палеомагнитное) в основных чертах было похоже на современное, т.е. напряженность его на поверхности Земли была в пределах $0,1 \div 1$ Гс. Конечно, учитывая возраст поля, не стоит удивляться некоторым исключениям из общего правила. Действительно, во время инверсии или в период времени до и после инверсии главного диполя напряженность магнитного поля, по-видимому, падает; поле становится недипольным и чрезвычайно знакопеременным и неупорядоченным на протяжении нескольких тысяч лет. В частности, это может свидетельствовать и о неустойчивости процесса самовозбуждающегося динамо независимо от сущности его природы. В настоящее время эта напряженность уменьшается со

*Имеются в виду карты Международного эталонного геомагнитного поля для эпохи 1975 г. — МЭГП.

скоростью, которая может привести к его исчезновению приблизительно через 2000 лет. И хотя это лишь теоретическая экстраполяция, но тем не менее подобная перспектива весьма неутешительна: Земля станет более уязвима к воздействию солнечной радиации на ее живую природу (см. разд. 1.3).

Анализ современных моделей МАП (международные аналитические модели) позволил определить, что за период 1945–1980 гг. магнитный момент уменьшался со скоростью 20,4 нТл/год, магнитный центр смещался со скоростью 0,15°/год к северу и 0,13°/год на запад, а также на 24 км/год радиально от центра Земли [Головков, Коломийцева, Ротанова, 1989]. Подобные определения, выполненные для периода последних 2000 лет, показали, что магнитный центр, двигаясь по сложной орбите, тем не менее не выходил за пределы зоны в западной части Тихого океана. Полагают, что существует долговременная асимметрия ГМП, которая проявляется, в частности, в смещенности магнитного центра в определенный долготный сектор. Примеры инверсий характеристик геомагнитного диполя и хронологические их ритмы показаны на рис. 1.7, 1.8 по результатам анализа палеомагнитных данных за последние 9 тыс. лет [Glatzmaier, Roberts, 1995]. Данные по усредненным значениям ГМП по всей поверхности планеты за интервалы 500 и 2000 лет также указывают на расположенность мировых аномалий в определенных регионах (рис. 1.6).

Наиболее детальная и точная картина последовательности инверсий ГМП была получена для геосферного осадочного материала или горных пород возраста моложе 5 млн. лет, датированных калий-аргоновым (K-Ar) изотопным методом. **Хронологическая шкала полярности** для этого периода делится на четыре **эпохи полярности**, каждая из которых продолжается 700 тыс. лет или более и включает в себя несколько коротких эпизодов (**ивентов**) **полярности** длительностью от 20 тыс. до 200 тыс. лет. Время между двумя последовательными инверсиями обычно называют **интервалом полярности**. Если не брать в расчет те эпизоды полярности, которые вызывают сомнение, то окажется, что инверсии поля за последние **5 млн. лет** происходили, по крайней мере, 23 раза. Длина интервалов полярности меняется от 20 до 730 тыс. лет и в среднем составляет около 217 400 лет. Последняя инверсия дипольного поля произошла около 730 тыс. лет тому назад.

Известна аналитическая работа [La Brecque et al., 1977], позволяющая представить поведение ГМП за последние **80 млн. лет**, по которой за это время произошло 188 инверсий, включающих в себя ивенты полярности продолжительностью всего лишь по 10 тыс. лет. Указанное возрастание частоты инверсий за последние 72 млн. лет, видимо, является реальным.

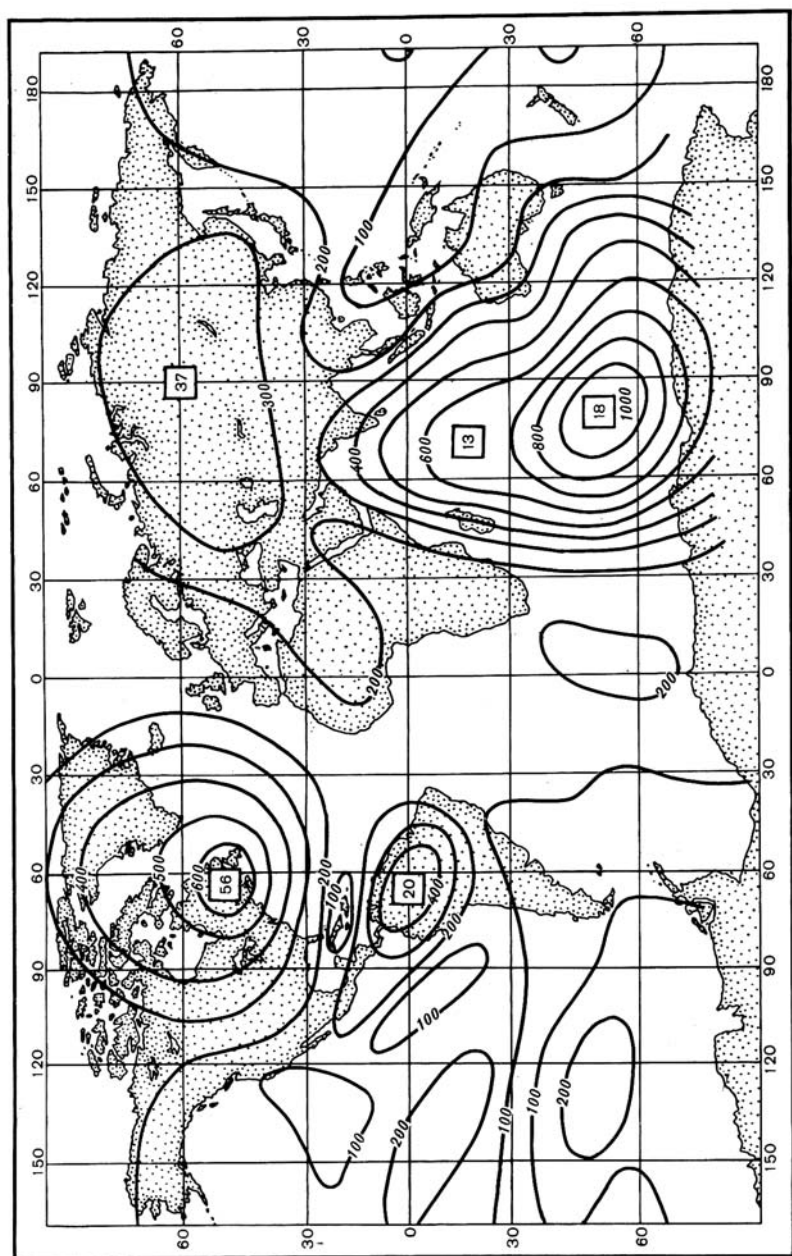


Рис. 1.6. Карта глобального распределения амплитуд в нТл и фаз (в годах) для 60-летних вариаций [Головков и др., 1989, с. 222]

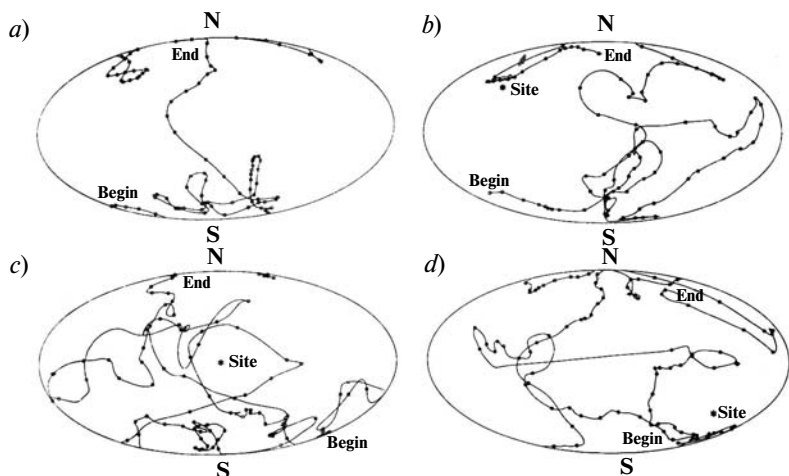


Рис. 1.7. Картина изменения положения в пространстве дипольного момента Земли в течение последних 9 тыс. лет [воспроизведено по: Glatzmaier, Roberts, 1995]: *a* — истинное значение положения вектора индукции; расчетные положения векторов индукции (вариации) в зависимости от заданных координат (модель); *b* — координаты $\varphi = +40^\circ, \lambda = 60^\circ$; *c* — координаты $\varphi = 0^\circ, \lambda = 180^\circ$; *d* — координаты $\varphi = -40^\circ, \lambda = 300^\circ$

Что же происходит во время инверсий?

В принципе при инверсии дипольного ГМП сохраняется либо направление вектора поля при уменьшении его напряженности до нуля с последующей ориентацией поля в противоположном направлении, либо сохраняется сама величина напряженности при повороте вектора на 180° . Другая возможность — нарушение динамо-процесса, в результате которого дипольное поле становится неупорядоченным и недипольным, а после того как процесс восстановится, создается новое дипольное поле противоположного знака. Очевидно, любой из этих процессов мог иметь серьезные глобальные последствия для тех видов живых организмов, которые так или иначе зависят от устойчивого ГМП. Во всяком случае каждый из упомянутых процессов влечет за собой значительную потерю информации об ориентации МП во время инверсии.

Анализ геохронологических данных позволяет сделать вывод, что инверсии являются свойством, присущим геодинамо, и их возникновение вовсе не обусловлено какими-то внешними причинами. Даже существует такое сравнение, что движения, обуславливающие возникновение вековых вариаций ГМП, соответствуют крупномасштабным метеорологическим явлениям, таким как

ураганы и перемещение областей высоких и низких давлений по земному шару, тогда как изменения механизма динамо, происходящие в течение длительного периода времени, соответствуют климатическим изменениям.

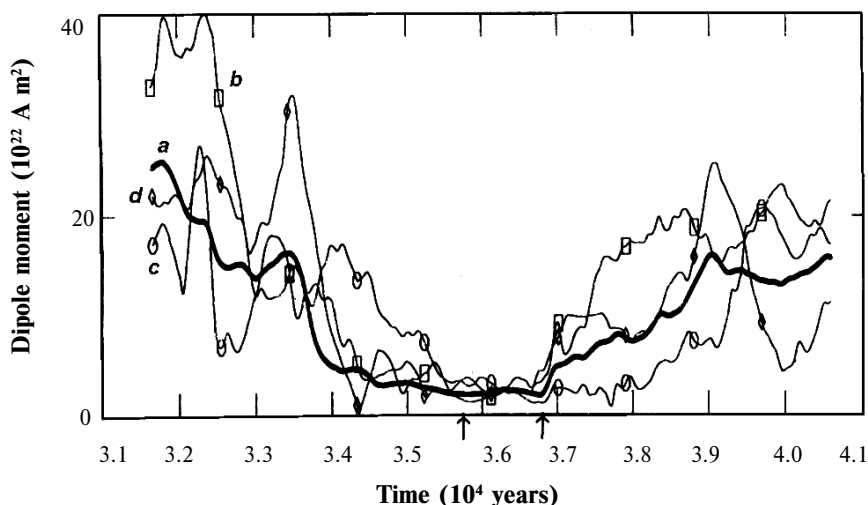


Рис. 1.8. Изменение дипольного момента Земли во времени в течение последних 9 тыс. лет [воспроизведено по: Glatzmaier, Roberts, 1995]:

a — колебания истинного значения вектора индукции (жирная кривая); расчетные значения векторов индукции (вариации) в зависимости от заданных координат (модель); *b* — координаты $\varphi = +40^\circ$, $\lambda = 60^\circ$ (отмечена квадратами); *c* — координаты $\varphi = 0^\circ$, $\lambda = 180^\circ$ (отмечена кружками); *d* — координаты $\varphi = -40^\circ$, $\lambda = 300^\circ$ (отмечена ромбами).

Стрелками указаны моменты положения вектора в соответствии с внутренней границей земной коры (слева) и на ее поверхности (справа)

Несколько замечаний по поводу связи инверсий ГМП и филогенетических изменений.

Филогенез (филогения, термин введен Э. Геккелем в 1866 г.) — историческое развитие мира живых организмов как в целом, так и отдельных таксономических групп: царств, типов (отделов), классов, отрядов (порядков), семейств, родов, видов; в этом разделе биологии изучаются закономерности развития биосистем, реконструкция эволюционных процессов с целью построения теории естественного пути становления движущих сил, определяющих адаптивный характер преобразований организмов — естественный отбор. В 1963 г. после открытия окружающих Землю поясов частиц с высокой энергией,

захваченных геомагнитным полем, и установления существования инверсий ГМП Аффен [R.J. Uffen, 1963] смог опубликовать в журнале “Nature” заметку с интригующим названием “Влияние земного ядра на происхождение и эволюцию жизни”. В ней он выдвинул предположение о том, что до того как информация о влиянии земного ядра достигла поверхности и развилась геомагнитная защита, поверхность Земли подвергалась непрерывному воздействию **“стерилизующей космической радиации”**, которая тормозила биогенез. О чем это говорит?

При сформировавшемся ядре и соответственно с появлением дипольного геомагнитного поля возникли “геомагнитная броня” и защищаемая ею эволюция органического мира. Космическое излучение и солнечная плазма (см. корпускулярное излучение Солнца) не могли достигать поверхности Земли. Однако при инверсии ГМП опять появилось действие ионизирующего излучения высокой интенсивности на живые организмы, в результате чего скорости мутаций могли возрастать и темпы эволюции могли частично определяться уже частотой инверсий ГМП и условиями в земном ядре. Несмотря на то, что гипотеза Аффена была быстро отвергнута [в работах 1967–1968 годов], изучение глубоководных колонок грунта засвидетельствовало, что эпохи вымирания или возникновения различных видов морской микрофауны совпадают с инверсиями ГМП. Поэтому вопрос о природе связи между инверсиями поля и филогенетическим изменением возник вновь. Так появилась гипотеза G.C.A. Harrison [Harrison, 1968] о том, что инверсия поля вызывала изменения климата посредством увеличивающейся ионизации верхних слоев атмосферы. В 1976 г. появилась гипотеза G.L. Siscoe и G.C. Reid [Siscoe et al., 1976; Reid et al., 1976], которая по существу является модификацией оригинальной гипотезы Аффена: увеличение потока заряженных частиц в верхних слоях атмосферы во время инверсии могло вызвать катастрофическое уменьшение стратосферного озона и привести к увеличению УФ-радиации на поверхности Земли. Подсчет G.C. Reid показал, что во время инверсии солнечные возмущения могут также воздействовать на климат или значительно уменьшать фоновый уровень интенсивности видимой радиации в диапазоне 400÷500 нм. J.D. Naus [Naus, 1971] показал, что инверсии могли повлиять не только на уровень радиации и климат, но и непосредственно на живые организмы вследствие их чувствительности к магнитным полям.

В этом аспекте следует обратить особое внимание на такое явление, как выживаемость некоторых организмов в условиях инверсий ГМП. Известно, например, что биосфера существует примерно 2 млрд. лет, а насекомые отряда таракановых (*Blattoptera*,

или *Blattodea*) известны с *карбона* (каменноугольный геохронологический период). Карбон начался примерно 345 млн. лет назад и длился 65 млн. лет. В это время суша заселилась первыми позвоночными, появились крылатые насекомые, хвойные и папоротниковые растения, формировались залежи торфа и каменного угля. В море господствовали четырёхлучевые кораллы, моллюски и древние рыбы (селахии). Инверсии ГМП более или менее изучены на протяжении последних 5 млн. лет, и в течение этого периода инверсии отмечены 23 раза. Но за последние 72 млн. лет частота инверсий возросла (188 инверсий), т.е. весь кайнозойский период (самая молодая эра, началась ≈ 66 млн. лет назад) шли систематические инверсии ГМП, а крупная инверсия произошла около 730 тыс. лет назад (близко к началу четвертичного, или антропогенного периода).

Таким образом, геохронологический период от 2,5–3,5 млн. лет до ≈ 700 тыс. лет тому назад (начало четвертичного периода) в условиях непрерывных инверсий иллюстрирует уникальные адаптационные возможности насекомых и невозможность одновременного существования высших позвоночных (человека). По всей вероятности, более поздние обитатели Земли, нежели тараканы, обладают повышенной чувствительностью к колебаниям ГМП.

Отметим, что даже всего 40–30 лет назад экспериментальные данные относительно биологического эффекта слабых магнитных полей были довольно неясны, часто противоречивы и в значительной степени ограничены изучением беспозвоночных, поэтому гипотеза J.D. Naus не была принята во внимание. Однако с учетом появления новых материалов, полученных в период 1979–1980 гг., некоторые положения гипотезы J.D. Naus следует рассмотреть*:

существуют организмы, электрическая чувствительность которых достаточно высока для того, чтобы обнаруживать слабые ЭП, индуцированные при их движении в ГМП;

другие организмы, по-видимому, реагируют непосредственно на МП (голуби, бактерии, саламандры, планктон);

электрочувствительные рыбы способны различать как слабые ЭП, созданные искусственно, так и индуцированные поля при движении в ГМП, т.е. обладают электрорецепцией и магниторецепцией.

Кроме того, данные о биоэффектах слабых МП интересны и для решения проблемы инверсий поля и филогенетических изменений:

*Данные о магниторецепции клетками ДНК см. в ч. 3.

получены твердые доказательства для самых различных таксонов — бактерий [Blakemore, 1975], насекомых [Lindauer, Martin, 1972], рыб [Kalmijn, 1978; Александров, 1999–2002], амфибий [Phillips, 1977], птиц [Keeton, 1974], зоопланктона [Александров, 1978–1984, Wiltshko, 1983–1993], млекопитающих [Zoeger et al., 1981];

данные об ориентации и миграции, т.е. о тех видах поведения, которые часто являются критическими для выживания и размножения; например естественные возмущения ГМП действуют на ориентацию и миграцию [Keeton et al., 1974; Moore, 1977] или приводят к деградации биомассы планктона и нарушению биоритмов его вертикальных миграций [Александров, 1985];

экспериментальные данные [Beiss, Heppner, 1976; Martin, Lindauer, 1977; Александров, 1985, 1991–1996] и довольно обоснованная гипотеза [Brown, 1976] свидетельствуют о синхронизирующей роли суточной вариации ГМП в формировании циркадианных ритмов в биоте*;

данные о зависимости ориентации на N и S магнитотаксических бактерий от наклона внешнего магнитного поля [Frankel et al., 1981].

Эволюционные аспекты этих данных более или менее очевидны, ибо ухудшение качества и стабильности геомагнитной информации во время инверсий могло быть катастрофическим для популяций, которые нуждаются в ней для ориентации и навигации.

Роль увеличения интенсивности геомагнитных возмущений и при этом уменьшения напряженности МП [Siscoe et al., 1976] состоит в нанесении вреда большому числу видов, нарушая ход их биологических часов. И вряд ли это единственный способ, с помощью которого геомагнитные инверсии влияют на эволюцию, это просто наиболее очевидный вывод в свете имеющихся на сегодняшний день данных.

По опыту последнего десятилетия, учитывая появление усовершенствованных методик экспериментов и новой аппаратуры, можно прогнозировать на основе большого числа исследований открытие многочисленных менее очевидных, но более эффективных способов оценки геомагнитных явлений, влияющих на эволюцию органического мира**.

*Не только о синхронизирующей роли ГМП, но и о нарушении ультрадианных биоритмов, например, в двигательной активности рыб в момент геомагнитных возмущений, свидетельствуют экспериментальные данные в аквариумной системе; подавление высокочастотной биоритмики в двигательной активности обнаружены Александровым [Биофизика. 1995. № 40. Вып. 4].

**Публикации к введению № 31, 32

1.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В СИСТЕМЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ: ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОТКЛИК ЭКОСИСТЕМ

1.3.1. Электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца

1.3.2. Межпланетное магнитное поле

и его связь с геомагнитным полем

1.3.3. Солнечная активность и ее проявления на Земле

1.3.4. Связь явлений солнечной активности

с геомагнетизмом

Солнечно-земные связи — система прямых или опосредованных физических связей между гелио- и геофизическими процессами. Земля не только получает от Солнца свет и тепло, но и подвергается комбинированному воздействию ультрафиолетового и рентгеновского излучения, солнечного ветра, солнечных космических лучей. Вариации мощности этих факторов при изменении уровня солнечной активности вызывают цепочку взаимосвязанных явлений в межпланетном пространстве, в магнитосфере, ионосфере, нейтральной атмосфере, биосфере, гидросфере и, возможно, в литосфере Земли. Изучение этих явлений и составляет суть проблемы солнечно-земных связей. “Строго говоря, Земля оказывает некоторое обратное (по крайней мере, гравитационное) воздействие на Солнце, однако оно ничтожно мало, так что обычно рассматривают только воздействие солнечной активности на Землю” [Физика космоса. 1986. С. 629].

Это воздействие сводится к переносу от Солнца к Земле энергии, выделяющейся при нестационарных процессах на Солнце, а также к перераспределению накопленной энергии в магнитосфере, ионосфере и нейтральной атмосфере Земли. В этом и заключается энергетический и информационный аспект взаимодействия [Физика космоса. 1986. С. 631].

1.3.1. Электромагнитное и корпускулярное излучение Солнца

Воздействие Солнца на физические и биологические процессы, происходящие в околоземном пространстве и на поверхности Земли, осуществляется различными видами электромагнитного (волнового) излучения. Спектр солнечного излучения — от низкочастотных

радиоволн до гамма-излучения — распространяется потоками корпускул. Корпускулярные потоки обычно несут с собой и магнитное поле. Бóльшая часть (99 %) полной энергии излучения Солнца приходится на видимую (оптическую) и инфракрасную области спектра и обычно рассматривается как излучение “спокойного” Солнца. Именно эту часть энергии принято характеризовать солнечной постоянной, так как интегральная светимость Солнца как звезды отличается замечательной стабильностью — ее изменения не превышают 0,1 %. За время существования биосферы ($\approx 2 \cdot 10^9$ лет) светимость Солнца не подвергалась заметным изменениям. Максимум излучения находится в сине-зеленой области спектра вблизи длины волны 4700 ангстрем, или 0,47 мкм.

Солнце — рядовая звезда нашей *Галактики*. Поэтому такие проблемы, как источники энергии Солнца, его строение, образование спектра излучения, являются общими для физики Солнца и звезд; эти проблемы мы предлагаем читателям изучить самостоятельно, используя рекомендованную литературу.

При спокойном Солнце с поверхности его исходит непрерывный поток плазмы (называемый иногда потоками частиц, или корпускулярными потоками). Существование этого потока было доказано экспериментально в 1960-х годах путем прямых измерений в космосе. Поток получил официальное наименование *солнечный ветер*. Распространение его в солнечной системе идет приблизительно радиально от Солнца до расстояний ≈ 100 а.е. (1 а.е. — астрономическая единица, или среднее расстояние от Земли до Солнца, $\approx 149,6$ млн. км). Около Земли плотность солнечного ветра невелика: концентрация составляет несколько частиц в 1 см^3 . Скорость потока частиц очень мала во внутренней короне, но быстро возрастает с удалением от Солнца, достигая вблизи Земли $\approx 350 \div 1000$ км/с. Поэтому путь частиц плазменного потока от Солнца до Земли длится $\approx 4\text{--}5$ суток. Заметим, что корпускулярное излучение Солнца не играет существенной роли в его энергетическом балансе, но имеет важное значение для проблемы солнечно-земных связей, поскольку оно весьма изменчиво. Эти изменения (как и изменения в некоторых участках ЭМ спектра) связаны с солнечной активностью (СА), о которой пойдет речь несколько позже.

Таким образом, солнечный ветер — это поток заряженных частиц, главным образом протонов и электронов, постоянно движущихся от Солнца во всех направлениях. Поскольку этот поток обтекает Землю, геомагнитное поле оказывается ограниченным в пространстве вполне определенной областью, называемой *магнитосферой Земли*.

Электромагнитные поля в магнитосфере Земли и межпланетном пространстве. Магнитосфера Земли

Понимание сути явлений в системе солнечно-земных связей складывалось постепенно, на основе отдельных догадок и открытий (К.О. Биркеланд, конец XIX в., А.Л. Чижевский, 1915 г.), и в настоящее время существует довольно стройная их схема.

Рассмотрим наиболее близкую к Земле область, где формируется основное энергетическое влияние на биосферу. **Магнитосфера Земли — это область космического пространства, определяемая взаимодействием солнечного ветра (СВ) с ГМП (рис. 1.9).**

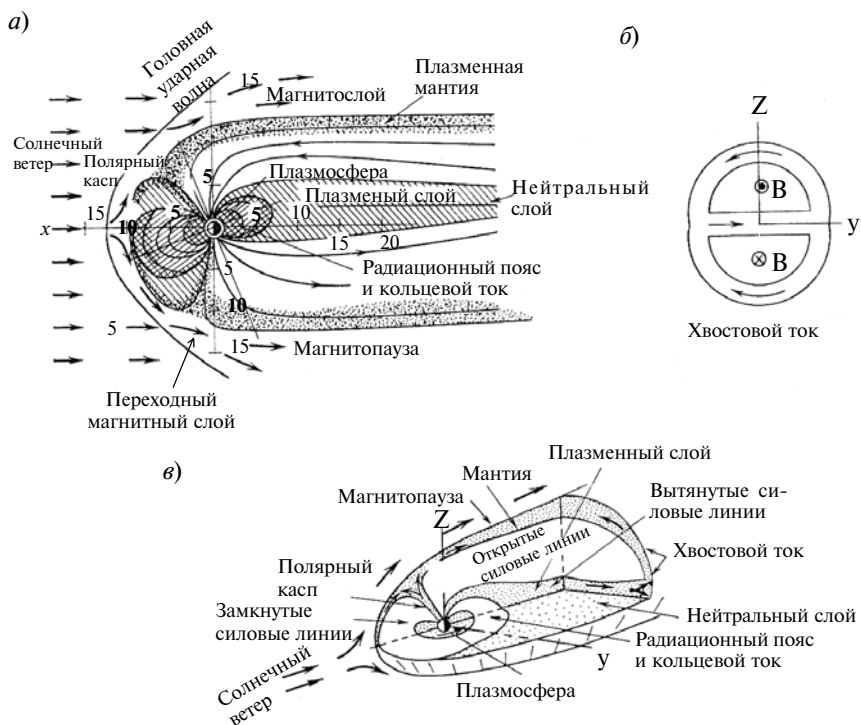


Рис. 1.9. Структура магнитосферы Земли и ее взаимодействие с солнечным ветром:

a — сечение магнитосферы меридиональной плоскостью полдень—полночь; *б* — система токов в хвосте магнитосферы (вид со стороны Солнца); *в* — трехмерная картина, соответствующая сечению “*a*”. Авроральные овалы расположены на высоте ≈ 100 км в пределах магнитных широт $65 \div 75^\circ$

Магнитосфера Земли (как и вообще всех планет) представляет собой полость (каверну), формирующуюся на пути сверхзвукового потока горячей замагниченной плазмы от Солнца — СВ — в результате ее взаимодействия с геомагнитным полем. Полость эта заполнена магнитным полем Земли. Из-за идеальной проводимости плазмы СВ магнитные силовые линии земного геоцентрического диполя не могут проникнуть в натекающий СВ и образуют в первом приближении пустую магнитную полость около Земли. Таким образом, СВ взаимодействует с ГМП на значительном расстоянии от земной поверхности; здесь концентрация нейтральных частиц быстро уменьшается, и можно полагать, что на расстоянии ≈ 1000 км движение ионизованных частиц контролируется исключительно магнитным полем. Эта область верхней атмосферы поэтому и называется **магнитосферой**.

В этом же приближении форма магнитосферы определяется балансом динамического давления СВ и давления ГМП. Там, где устанавливается баланс встречных давлений, возникает пограничная область магнитосферы — **магнитопауза**.

На магнитопаузе геомагнитное поле переходит в межпланетное магнитное поле (**ММП**).

Перед магнитосферой на расстоянии от центра Земли, равном $\approx (13 \div 17)R_z$, образуется отошедшая бесстолкновительная ударная волна. Она отклоняет поток солнечной плазмы и заставляет его обтекать магнитосферу на расстояниях за пределами орбиты Луны и далее радиально и равномерно уходить в межпланетное пространство (дистанция $\approx 1000R_z$). Толщина фронта ударной волны ≈ 100 км, она определяется скоростью нарастания неустойчивостей плазмы при взаимодействии набегающего потока и части потока ионов, отраженных от фронта.

Взаимодействие различных потоков плазмы между собой и их движение поперек магнитного поля Земли приводят к генерации электрических полей и токов широкого спектра плазменных колебаний, электромагнитного излучения и к ускорению частиц. В результате магнитосфера чутко реагирует на изменение параметров СВ и редко находится в состоянии покоя. Она способна накапливать энергию и затем высвобождать ее взрывным образом.

Благодаря вкладу поверхностных токов в плазме СВ, которые при столкновении с ГМП экранируют его проникновение в плазму, а также благодаря идеальному отражению СВ от границы (магнитосферы), установившийся баланс давлений соответствует удвоенному значению ГМП. Баланс давлений на магнитопаузе определяется выражением:

$$2nm_p V^2 = \frac{1}{8\pi} \left(\frac{2M'_3}{D_3^3} \right)^2,$$

где M'_3 — дипольный магнитный момент Земли; D_3 — расстояние от центра Земли до подсолнечной точки (или так называемый радиус Чепмена—Ферраро); n, V — концентрация протонов и скорость СВ, m_p — масса протона.

При типичных параметрах СВ (спокойное Солнце) $D_3 \approx (9 \div 11) R_3$; $R_3 \approx 6400$ км.

Вот так возникает своеобразная “броня”, препятствующая проникновению в магнитосферу высокоэнергетических заряженных частиц из космического пространства, создающая условия для сохранения биосферы. Это магнитошит Земли. Он расположен между внутренней поверхностью фронта ударной волны и внешней границей магнитопаузы. Его называют **переходным магнитным слоем**. Взаимодействуя с магнитосферой, СВ увлекает пересоединенные силовые линии ГМП и образует протяженный магнитный шлейф — хвост магнитосферы. Силовые линии хвоста ГМП начинаются в высоких геомагнитных широтах (вплоть до полюсов), и топологически хвост образован противоположно направленными силовыми линиями, между которыми находится “нейтральный слой”. Магнитная индукция в этом слое $B \approx 0$.

Во время роста СА количество солнечных вспышек увеличивается, СВ при этом возмущается, испуская облака протонов высоких энергий. Пронесясь сквозь СВ, изменяя его скорость и плотность, они приводят к сжатию подсолнечной магнитопаузы до $5R_3$. Известно также, что во время инверсий ГМП магнитопауза может понизиться до $2R_3$. По такому механизму возникают магнитные возмущения на Земле — магнитные бури. Та часть магнитосферы, которая простирается от поверхности Земли до высоты $200 \div 300$ км, является наиболее изученной областью ближнего космического пространства. Однако и здесь остается еще много явлений, природа которых до конца не понятна. Так, одним из крупнейших открытий космической эры до сих пор остается обнаружение в 1958 г. радиационных поясов Земли (С.Н. Вернов, А.Е. Чудаков — СССР и Дж. Ван-Аллен — США), т.е. зон интенсивной проникающей радиации, радиационных аномалий. Эти пояса представляют собой огромные магнитные ловушки, заполненные заряженными частицами больших энергий ($\approx$ сотни МэВ у протонов и сотни кэВ у электронов).

В соответствии со структурой магнитосферы, представленной на рис. 1.9, выделяют области накопления энергии, обладающие собственными магнитными полями (табл. 1.1).

Магнитные поля и энергонесущие зоны плазмы в окрестностях Земли

Показатель	Значение	Показатель	Значение
Солнечный ветер	$5 \div 15$ нТл	Кольцевой ток (зона захваченной радиации)	$100 \div 500$ нТл
Плазменная мантия	$20 \div 30$ нТл	Плазмосфера	$10^2 \div 10^4$ нТл
Плазменный слой	$10 \div 20$ нТл	Ионосфера	$(3 \div 6) 10^4$ нТл
Хвост магнитосферы	30 нТл		

Ориентировочные расчеты показывают, что в этих магнитосферных областях накапливается определенный запас энергии:

- радиационные пояса (плазмосфера, кольцевой ток) $\approx 2 \cdot 10^{15} \div 2 \cdot 10^{18}$ Дж;
- хвост магнитосферы в ближайшей к Земле точке $\approx 30 R_3 \approx 3 \cdot 10^{15} \div 3 \cdot 10^{18}$ Дж.

Поскольку поступление энергии из СВ в магнитосферу есть процесс динамический, ее величину на магнитопаузе можно оценить как поток вектора Пойтинга через площадь этой границы:

$$\bar{P}_3 \approx \left(\frac{C}{4\pi} \right) EBD_3^2 \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ эрг/с} \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ Вт} \quad (1.6)$$

или оценить ее в виде инъекции (потока) горячей плазмы в магнитосферу, равной $\approx 10^{17} \div 10^{18}$ эрг/с = $10^{10} \div 10^{11}$ Дж/с.

Эта энергия расходуется на высыпание частиц в область полярных сияний, на джоулев нагрев ионосферы и формирование кольцевого тока. В ионосфере поток энергии оценивается в $\approx 10^{-1} \div 10^{-2}$ Вт/м² при плотности электрического тока в 10 мкА/м²; полный ток, втекающий и вытекающий из ионосферы, $\approx 10^6$ А; полная мощность излучения на волне $\lambda \approx 1$ км при взаимодействии ускоренных пучков электронов с ионосферной плазмой $\approx 10^8 \div 10^9$ Вт. Плазмосфера вращается вместе с Землей [Физика космоса: Маленькая энциклопедия, 1986].

Следует отметить, что при увеличении плотности энергии в этих зонах (повышение концентрации заряженных частиц), растет и плотность энергии окружающего магнитного поля. Это приводит к колебаниям ГМП на поверхности Земли до нескольких сотен нТл.

Другое важное следствие взаимодействия СВ с магнитосферой — образование популяции частиц, происходящих из магнитослоя и части магнитосферы, расположенной внутри магнитопаузы, а именно — там, где магнитные силовые линии хотя бы одним концом соединяются с **ионосферой**. Сюда входят три участка магнитосферы — низкоширотный пограничный слой, плазменная мантия и пограничный слой в хвосте магнитосферы. В плазмосфере образуется

упомянутая выше область захваченных геомагнитным полем частиц (радиационные пояса и кольцевой ток). Она простирается от высот, ниже которых атмосферные потери препятствуют дрейфу частиц вокруг Земли, т.е. от нескольких сотен км до высот, где этот дрейф невозможен из-за искажений магнитного поля ($\approx 10R_z$).

Частицы радиационных поясов способствуют накоплению энергии в магнитосфере (см. табл. 1.1), а их градиентный дрейф приводит к образованию кольцевого тока, огибающего Землю и ослабляющего ГМП на ее поверхности [L.R. Lyons, D.J. Williams, пер. с англ., 1987] (рис. 1.10 и 1.11).

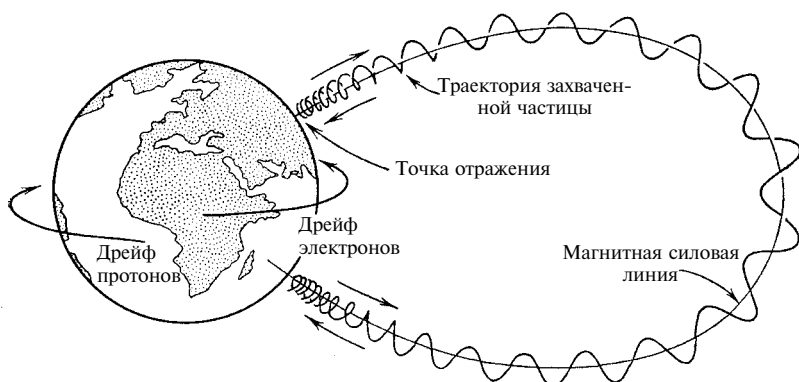


Рис. 1.10. Движение заряженной частицы, захваченной в магнитное поле Земли. Питч-угол винтовой траектории равен 90° [L.R. Lyons, D.J. Williams, пер. с англ., 1987]

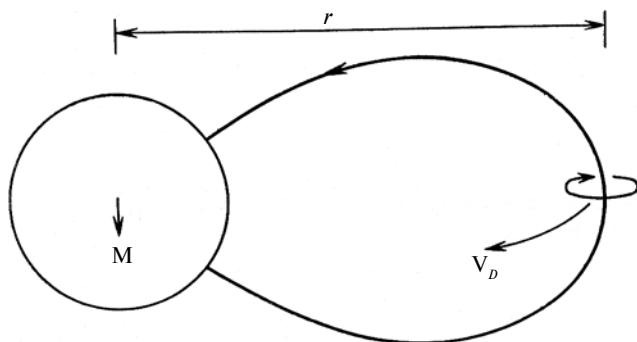


Рис. 1.11. Механизм движения протона вдоль магнитной силовой линии в приближении для дипольного геомагнитного поля на магнитном экваторе Земли [L.R. Lyons, D.J. Williams, пер. с англ., 1987]

Кольцевой ток состоит из протонов, ионов гелия и кислорода, но относительные вклады этих частиц неизвестны. Неизвестно также, что именно является источником частиц радиационных поясов — солнечный ветер или ионосфера. Кольцевой ток направлен с востока на запад и сосредоточен вокруг геомагнитного экватора на среднем геоцентрическом расстоянии $\approx (6 \div 6,5)R_E$. Более правильно эту область теперь называют “зоной захваченной радиации”.

Частицы радиационных поясов ускоряются до своих конечных энергий благодаря в основном конвективному движению электрического поля напряженностью E поперек силовых линий магнитного поля B . Первоначально они разогреваются в геомагнитном хвосте, где дрейф поперек эквипотенциалей ЭП может увеличить энергию частиц до нескольких десятков кэВ. Ионы из ионосферы, как известно, могут ускоряться до энергий $\sim 1 \div 10$ кэВ электрическими полями, параллельными силовым линиям магнитного поля, выходящим из авроральных зон.

Второй крупной областью накопления энергии в магнитосфере является протяженный геомагнитный хвост ($3 \cdot 10^{15} \div 1 \cdot 10^{18}$ Дж). Частицы плазменного слоя и протяженное ГМП вносят примерно одинаковый вклад в этот накопитель энергии. Плазменный слой, авроральные зоны и радиационные пояса тесно связаны друг с другом, но эта взаимосвязь еще не понята до конца.

Если рассматривать магнитосферу Земли в обобщенном смысле как вращающуюся замагниченную плазму, мы увидим, что подобные объекты распространены в нашей Солнечной системе, а может быть, и всюду во Вселенной. Это и не удивительно, поскольку большая часть Вселенной заполнена плазмой, а основные взаимодействия между плазмой, электрическими и магнитными полями, обнаруженные в магнитосфере Земли, имеют место и в космических объектах от небольших межзвездных облаков до целых галактик. В природе возможно ускорение заряженных частиц до очень высоких энергий. В магнитосфере Земли известны, по крайней мере, четыре механизма ускорения частиц. Наиболее общим из них является движение частиц поперек эквипотенциалей электрического поля.

Более специфические механизмы — бетатронное ускорение, ускорение Ферми и ускорение электрическими полями, параллельными магнитным полям. В теоретических работах последних одного-двух десятилетий показано, что пересоединение силовых линий МП может приводить к прямой передаче энергии от МП к

заряженным частицам, а также, что плазменная турбулентность является эффективным механизмом ускорения.

Таким образом, из изложенного следует, что магнитосфера — это область околоземного космического пространства, заполненная магнитным полем Земли. На границе магнитосферы (в магнитопаузе) ГМП переходит в межпланетное магнитное поле (ММП). Рассмотрим его характеристики.

1.3.2. Межпланетное магнитное поле и его связь с геомагнитным полем

Околосолнечное межпланетное пространство заполнено частицами солнечного ветра. Однако СВ уносит с собой в межпланетную среду корональное магнитное поле. Вмороженные в плазму силовые линии этого поля образуют межпланетное магнитное поле (ММП). Хотя напряженность ММП невелика ($H \approx 5 \cdot 10^{-5}$ Гс на орбите Земли)*, и плотность его энергии составляет $\approx 1\%$ от кинетической энергии СВ, оно играет большую роль и в термодинамике самого ветра, и в динамике взаимодействия его с телами Солнечной системы и потоков СВ между собой.

ММП связано с Солнцем и вращается вместе с ним. Магнитные силовые линии, условно вмороженные в плазму солнечного ветра, закручиваются в спираль Архимеда. Наблюдения, проведенные вблизи плоскости эклиптики (плоскость орбиты Земли), показывают, что ММП состоит из нескольких (обычно четырех) секторов, в которых магнитное поле направлено преимущественно к Солнцу или от Солнца вдоль архимедовой спирали. Секторная граница, разделяющая поля противоположной полярности, обычно очень тонкая и проносится мимо наблюдателя за время порядка минут, а время, соответствующее ширине типичного сектора, составляет примерно неделю. Эта секторная магнитная структура (рис. 1.12) вращается со скоростью Солнца — один оборот за 27 дней (при наблюдении с Земли). Прохождение границы сектора мимо Земли фиксируется как изменение знака ММП. К настоящему времени сектор полярных геофизических исследований ИЗМИР РАН подготовил для Интернет таблицу многолетних наблюдений за секторной структурой ММП (с 1960 по 2001 г.). Пример показан на рис. 1.13.

*Напряженность МП на орбите Земли меняется от $2 \cdot 10^{-5}$ до $8 \cdot 10^{-4}$ Гс.

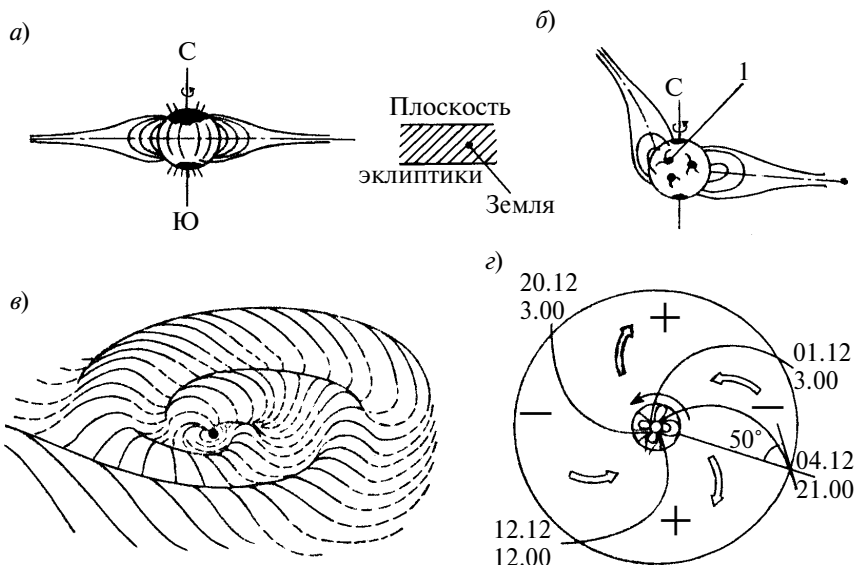


Рис. 1.12. Структура межпланетного магнитного поля [Бочкарёв, 1985]:
 а — магнитосфера Солнца в период минимума солнечной активности, где С и Ю — полюсы Солнца, магнитный экватор (штрих-пунктирная линия) совпадает с гелиографическим экватором Солнца; б — магнитосфера Солнца в период максимума солнечной активности, где 1 — активные области, искажающие положение солнечного экватора; в — гофрированная форма токового слоя солнечного ветра, характерная для роста солнечной активности и приводящая к образованию секторной структуры межпланетного магнитного поля при пересечении последнего плоскостью орбиты Земли (плоскостью эклиптики); г — секторная структура ММП в окрестностях эклиптики Земли (внешняя окружность) и область преобладания давления магнитного поля Солнца (внутренняя окружность); широкие стрелки — направления ММП, тонкая стрелка — направление вращения Солнца; даты и время — моменты прохождения Землей границ секторов в 1964 г.

Направление к Солнцу к западу берется со знаком (–), направление поля от Солнца к востоку берется со знаком (+)

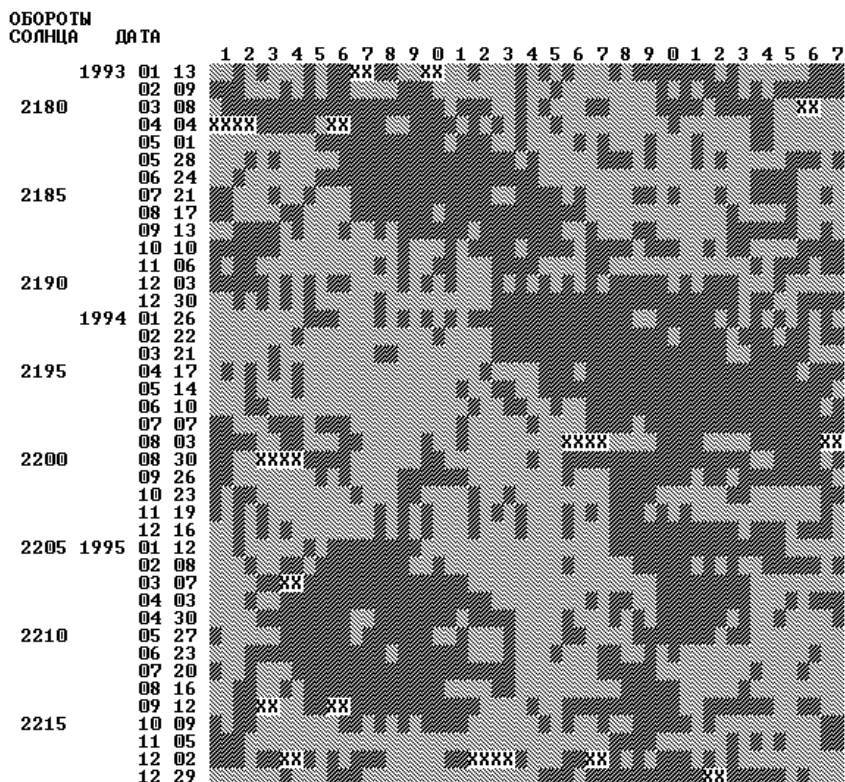


Рис. 1.13. Секторная структура межпланетного магнитного поля (пример) для периода 1993–1995 гг.; темное поле — сектор (+); светлое поле — сектор (–)

Объемная модель крупномасштабного ММП в гелиосфере может быть рассмотрена как следствие существования электрического гофрированного токового слоя, имеющего искривления на север и юг от солнечного экватора и являющегося источником метеорологических эффектов в момент прохождения Земли через границы секторных структур. Модель разработана L. Svalgaard, J.M. Wilcox и др. [Солнечно-земные связи, погода и климат, 1982]. Токовый слой был предсказан шведским астрофизиком Х. Альвеном (иностр. член РАН, нобелевский лауреат) и называется “эффектом балерины”. Находясь вблизи плоскости эклиптики, наблюдатель оказывается то выше, то ниже токового слоя, благодаря чему попадает в секторы с различными знаками радиального компонента ММП (см. рис. 1.12).

Существует гипотеза о крупномасштабном электрическом поле конвекции. J.W. Dungey [Dungey, 1961, 1963] отметил, что существование ММП может привести к прямому переходу магнитных силовых линий, выходящих из полярных областей Земли, в межпланетное магнитное поле (т.н. пересоединение силовых линий магнитных полей). В результате этого может возникнуть магнитная структура, силовые линии в которой идут к Земле от Солнца через межпланетное пространство и магнитосферу Земли. В итоге этого явления “геоэффективность” тех или иных процессов на Солнце существенно увеличивается. В качестве примера рассмотрим топологию ММП южного направления, схематически изображенную на рис. 1.14 для меридиональной плоскости полдень–полночь. Эту топологию можно получить простым сложением межпланетного магнитного поля с дипольным полем Земли, хотя в представленную схему включен также геомагнитный хвост.

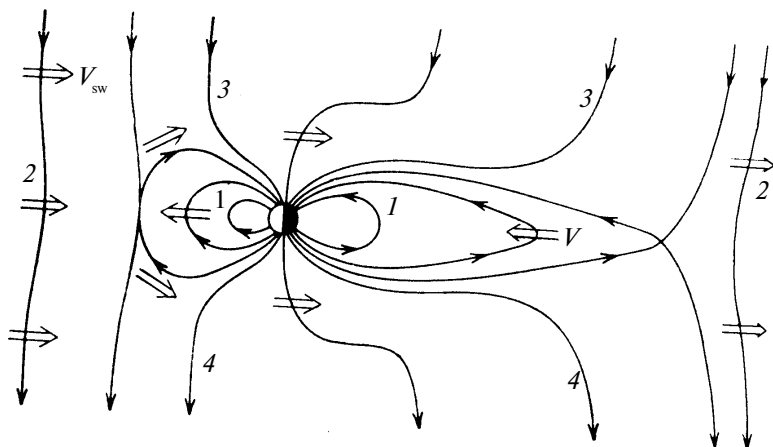


Рис. 1.14. Топология магнитного поля, полученная путем сложения межпланетного магнитного поля (ММП) с дипольным геомагнитным полем для полуденно-полуночной меридиональной плоскости [Dungey, 1961–1965; Ляцкий, 1978; Lyons & Williams, 1987]:

1 — замкнутые силовые линии, связанные с Землей в обоих полушариях; 2 — силовые линии ММП, не связанные с Землей; 3, 4 — открытые силовые линии, у которых один конец связан с северной (3) или южной (4) полярными шапками, а другой конец — непосредственно с ММП.

ММП направлено на юг и включает геомагнитный хвост; широкие стрелки указывают направление потоков плазмы; V_{sw} — скорость солнечного ветра

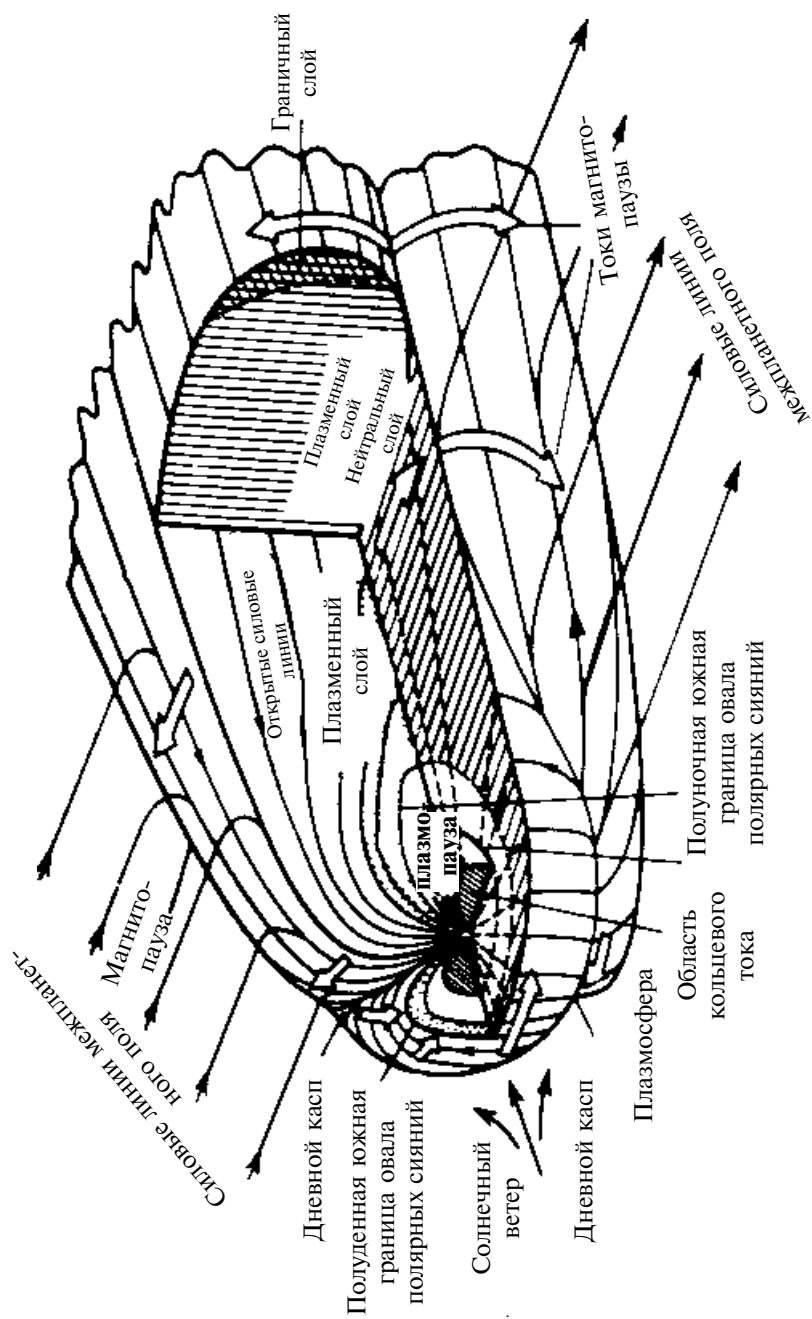


Рис. 1.15. Модель магнитосферы, объясняющая пересоединение МПМП и ГМП

В системе отсчета, связанной с Землей, солнечный ветер (как показано на схеме рис. 1.14) создает электрическое поле $E = -V_{sw} \times B$ поперек силовых линий магнитного поля, сосредоточенное над частью полярной шапки и межпланетного пространства, где V_{sw} — скорость солнечного ветра. Это ЭП направлено от утреннего сектора к вечернему.

Показанная здесь конфигурация МП, полученная сложением дипольного поля Земли и ММП, в основном сохраняется и при произвольном направлении ММП, за исключением именно северного направления, при котором не существует открытых силовых линий.

Модель пространственной объемной структуры магнитосферы иллюстрирует пересоединение силовых линий ММП и ГМП (рис. 1.15) [Бенькова, Долгинов, 1989, с. 238].

Таким образом, наиболее близкая и ответственная за многие процессы на Земле область магнитосферы — ионосфера. Она простирается примерно от 80 км до внешней границы верхней атмосферы и состоит из заряженных частиц либо захваченных из солнечного ветра и космического излучения, либо созданных ионизацией атомов и молекул верхней атмосферы солнечной радиацией высокой энергии. Токи — это крупномасштабные потоки ионосферных частиц, создаваемые электрическими и механическими силами, интенсивность которых зависит от плотностей и средних скоростей потока этих частиц. Наибольший интерес представляют следующие токи в магнитосфере:

1) **атмосферное динамо**, или токи, текущие на высоте около 100 км и возникающие вследствие приливных движений ионосферы под действием солнечных и лунных гравитационных сил или солнечного нагрева ионосферы;

2) **кольцевой ток**, или поток захваченных геомагнитным полем протонов, направленный с востока на запад и сосредоточенный вокруг геомагнитного экватора на среднем геоцентрическом расстоянии $\approx 6R_3$; этот огибающий Землю ток приводит к глобальным ослаблениям МП на поверхности Земли;

3) **токи на магнитопаузе**.

Изменения в конфигурации или интенсивности любой из этих систем токов будут создавать соответствующие изменения в ГМП на земной поверхности.

1.3.3. Солнечная активность и ее проявления на Земле

Солнечной активностью (СА) называют совокупность нестационарных процессов и явлений на Солнце, возникающих и

развивающихся в отдельных ограниченных областях атмосферы Солнца. Эти области, или центры активности, в сочетании образуют совокупности активных областей, которые проявляют себя во всех слоях солнечной атмосферы.

Подавляющее большинство явлений СА наблюдается в центрах активности, где обнаруживается усиление магнитного поля. И поскольку МП Солнца ($МП_{\odot}$) отличается сильной пространственно-временной неоднородностью, большинство астрофизиков в настоящее время считает, что источником $МП_{\odot}$, как и ГМП, служат движения проводящей среды. Эти движения локализованы во внешней конвективной зоне, простирающейся от видимой поверхности Солнца ($r = R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^5$ км) вглубь приблизительно до $0,8 R_{\odot}$. Характерное время затухания основной дипольной моды поля составляет около $4 \cdot 10^9$ лет, т.е. того же порядка, что и возраст Солнечной системы. Физическая сущность явлений СА — превращение энергии, накапливающейся в солнечных магнитных полях, в энергию движения газовых масс, энергию быстрых частиц и коротковолнового ЭМ излучения. В конечном итоге проявления СА поддерживаются за счет энергии процессов, протекающих в недрах Солнца. Однако по сравнению с общей энергией, излучаемой Солнцем, энергия, обусловленная СА, ничтожна, она практически не сказывается на “энергоснабжении” Земли.

Активные области (АО), или центры активности — исключительно сложные образования и значительно различаются диаметрами, внешним видом и продолжительностью жизни, но эволюция их в основных чертах может быть достаточно хорошо предсказана (рис. 1.16, цв.).

Впервые МП в солнечных пятнах обнаружил в 1908 г. Джордж Эллери Хейл, ин. чл.-кор. АН СССР (1925) [Моффат, 1980]. В любой паре пятен полярность МП положительна в одном пятне пары и отрицательна в другом. Более того, все пары в одной полусфере имеют одно и то же направление полярности. Это указывает на то, что поле в них есть результат всплывания с глубины примерно $2 \cdot 10^5$ км подфотосферного тороидального магнитного поля, которое является связанным на протяжении всей полусферы. Пары солнечных пятен в противоположных полусферах обычно имеют противоположные направления полярности, что свидетельствует об антисимметричности тороидального

поля относительно экваториальной плоскости. Солнечные пятна появляются только в полосе, ограниченной широтами, приблизительно $\pm 35^\circ$ выше и ниже экваториальной плоскости $\theta = 90^\circ$ (рис. 1.17а,б, цв.) [Моффат, 1980]. Распределение пятен по широте периодически изменяется во времени с периодом, равным периоду цикла солнечных пятен и изменению магнитных полярностей в них ≈ 11 лет. Если в начале цикла пятна сосредоточены в пределах $\pm 30\text{--}35^\circ$ по широте, то с приближением к максимуму и на спаде активности они систематически “сползают” к широте $\pm 10^\circ$.

Важно отметить, что знак полярности пар солнечных пятен в каждой полусфере изменяется от одного 11-летнего цикла к следующему. Следовательно, подфотосферное тороидальное МП периодически во времени с периодом около $2 \cdot 11 = 22$ года*. Это подтвердилось экспериментально к середине 50-х годов прошлого столетия, когда благодаря изобретению солнечного магнитографа [Моффат, 1980, с. 101] удалось непосредственно измерить напряженность слабого полоидального общего поля Солнца и обнаружить обращение полярности этого поля сначала в 1957–1958 гг., а затем в 1969–1971 гг. В обоих случаях изменения полярности наблюдались в периоды максимальной активности процесса пятнообразования или тотчас же после них. Стало ясно, что 22-летний цикл солнечных пятен в действительности представляет собой специфическое проявление почти периодического поведения общего МП Солнца.

Итак, полная продолжительность цикла солнечной активности составляет 22 года и включает два 11-летних цикла (четный плюс нечетный) (рис. 1.18). В изменении СА обнаруживаются и другие периоды, так что в целом получается серия периодов (циклов). Так, отмечены 80-летние зависимости среднегодового числа пятен от времени (анализировался интервал с 1610 до 1975 г. — 250 лет, где основная периодичность 11 лет, но выделены и др. значения τ); найдено, например, что пятна практически полностью отсутствовали всю вторую половину XVII в. (1645–1715 гг.; рис. 1.19).

*В периоды реполюсовки поле в N и S полушариях меняет знак не одновременно. На несколько месяцев или год Солнце превращается в магнитный “монополь”.

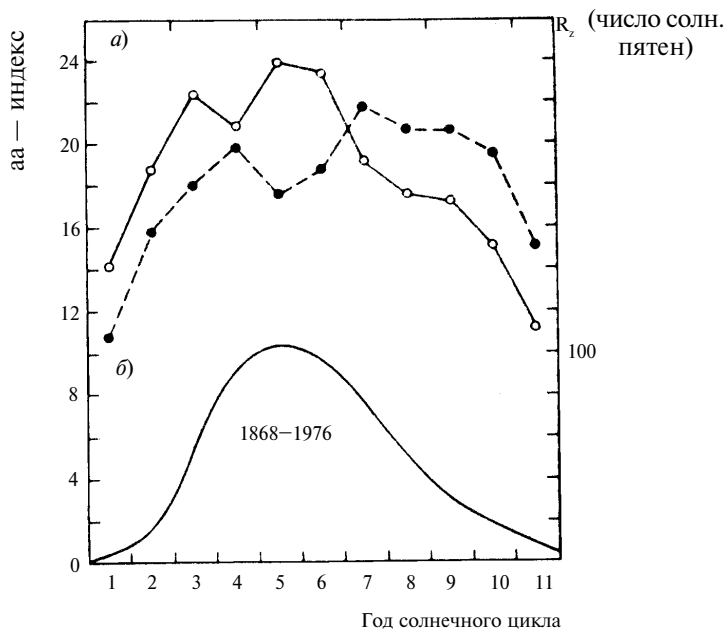


Рис. 1.18. Изменение среднегодового значения геомагнитной активности как функции фазы солнечного цикла:

a — четные циклы (черные точки), нечетные циклы (светлые точки) показывают чередование направленности межпланетного магнитного поля (ММП) наружу от Солнца в северной полусфере и внутрь в южной полусфере; *б* — среднее число солнечных пятен для солнечных циклов с 1868 по 1976 г. (для этого периода построены верхние кривые) [Мак-Кормак, Селига и др., 1982]

В 1848 г. Рудольф Вольф (Rudolph Wolf) предложил характеризовать состояние СА относительными числами пятен, так называемыми числами Вольфа $W = 10g + f$, где g — число групп пятен, f — полное число пятен на видимом полушарии С. Иногда СА характеризуют суммарной площадью пятен, потоком радиоизлучения в сантиметровом диапазоне волн.

На рис. 1.20б представлена периодичность появления солнечных пятен максимальных размеров на протяжении последнего века (1900–2000 гг.) Видно, что самое крупное пятно наблюдалось в 1947 г. Размеры его в 3 раза превышают самое крупное пятно за период с 1990 по 2000 г. Интересно отметить, что площадь максимального пятна за указанные 9 лет превышает площадь поверхности земного шара в 9 раз, а конфигурация магнитного поля в нем весьма сложна и свидетельствует о высокой вероятности возникновения мощных вспышек на Солнце [Space Weather. com, Sunspot Cycle. com, 2000].

На рис. 1.21 показана статистически достоверная периодичность СА, исходя из числа солнечных пятен в течение 1620–1970 гг. [Бочкарев, 1985]. Видно, что кроме 11- и 22-летних циклов, возможен период СА с длительностью ≈ 500 лет.

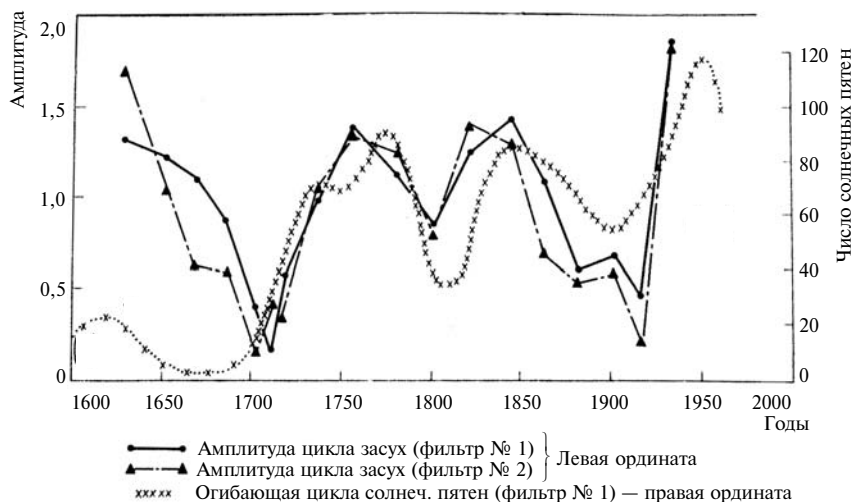


Рис. 1.19. Вариации амплитуды 22-летнего ритма засух в течение 1600–1962 гг. Восстановлены John A. Eddy по данным о солнечных пятнах за период с 1600 до 1700 г.

Кружками и треугольниками отмечены кривые региональных индексов засух (DAJ), проведенные с применением кольцевого анализа (США), крестиками — огибающая кривая изменения хэйловских циклов [Мак-Кормак, Селига и др., 1982]

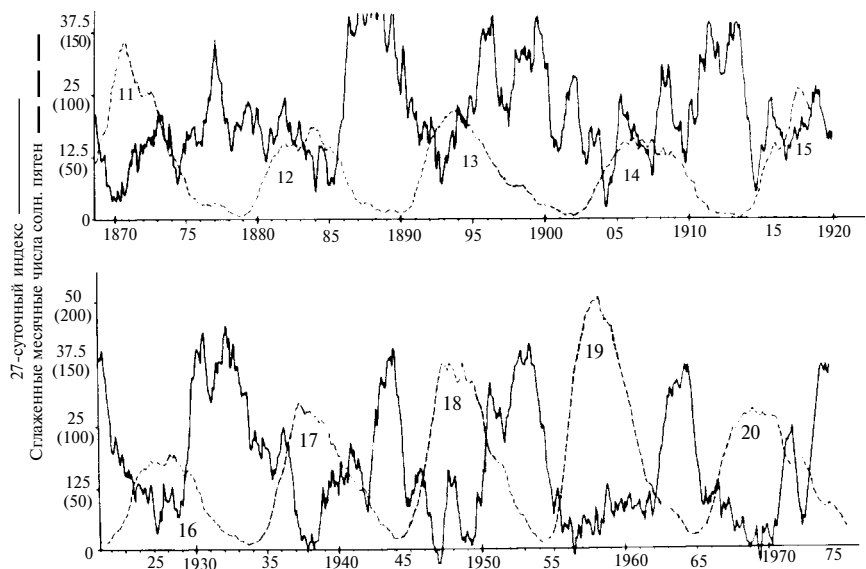


Рис. 1.20а. 27-суточный индекс повторяемости (сплошн. линия) и сглаженные месячные значения числа солнечных пятен с 1868 г. до настоящего времени (пункт. линия) [Мак-Кормак, Селига и др. 1982]



Рис. 1.20б. График, представленный на рисунке, показывает размеры наибольших пятен в этом веке. Наибольшее пятно за последние 100 лет было в 1947 г., оно в 3 раза превышало ныне существующие [Space Weather. com, Sunspot Cycle. com, 2000]

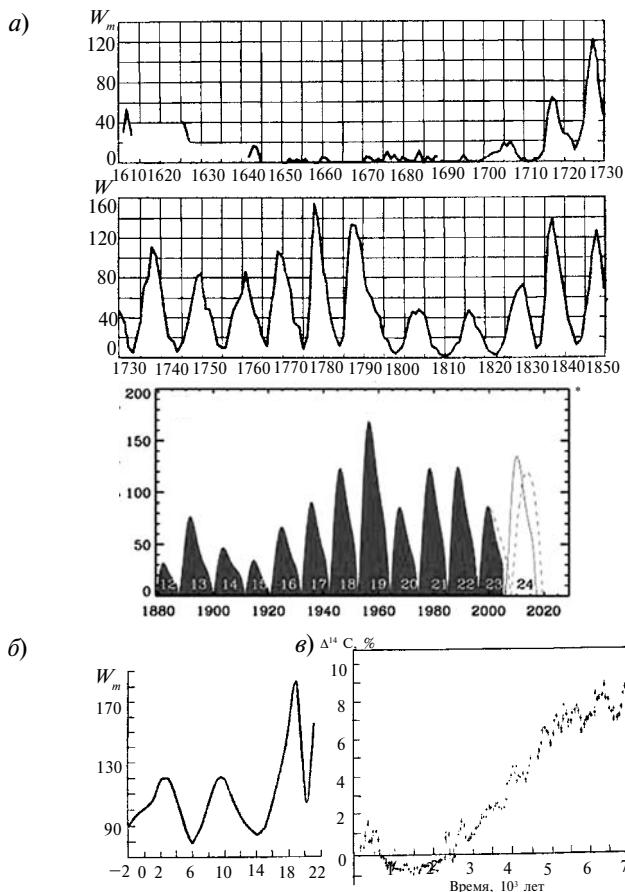


Рис. 1.21. Ритмы солнечной активности [Бочкарев, 1985]:

a — изменение числа Вольфа (W) с начала телескопических наблюдений (1610 г.); *б* — модуляция 11-летнего цикла активности более долгопериодными ритмами (55 лет, 80–90 лет); W_m — максимальные среднегодовые числа Вольфа; номер 11-летнего цикла указан по данным Цюрихской службы Солнца; *в* — колебания концентрации накопленного радиоактивного изотопа углерода ^{14}C в кольцах деревьев в течение тысячелетий (отсчет от настоящего момента в прошлое)

Наиболее выражен 11-летний цикл изменения солнечной активности. В нем различают “ветвь” или “фазу” роста активности (≈ 2 года), фазу или “эпоху” максимума (≈ 3 года), сравнительно более длинную фазу спада активности ($\approx 3,5$ года) и, наконец, эпоху минимума, которая, как и эпоха максимума, длится 2–3 года. То есть цикл имеет характерный несимметричный вид:

*Период новейших наблюдений с 1880 по 2000 гг. дополнен из интернета.

период роста активности $\approx 4,2$ года и период спада ≈ 7 лет. Согласно наблюдениям, продолжительность 11-летнего цикла менялась от 7 до 16 лет. В прошлом столетии он составил в среднем 10,5 года. Циклы пронумерованы. Начало (минимум) первого цикла приходится на 1755 г., который получил название “нулевого цикла” с первым максимумом около 1760 г. Текущие циклы (например № 21) имеют минимум в 1976 г. и максимум в 1980–1981 гг., 22-й цикл имеет минимум в 1987 г. и 23-й — в 1999–2000 гг. (рис. 1.22, цв.)^{*}.

С 11-летним циклом меняются не только количественные характеристики проявлений солнечной активности. Расположение на солнечном диске активных областей, пятен, протуберанцев и других явлений тоже подчиняется 11-летнему циклу. Первые пятна нового цикла в период минимума активности появляются на широтах $\pm (30\text{--}40^\circ)$, последующие — все ближе и ближе к экватору, а последние пятна цикла — около широт $\pm 7^\circ$. Далее средняя широта АО убывает. Получается диаграмма распределения пятен по широтам в функции времени (см. рис. 1.17а,б цв.)^{**}.

В эпоху минимума солнечной активности пятна текущего и будущего циклов сосуществуют, различаясь гелиоширотой и противоположной полярностью магнитного поля ведущего пятна. В нечетных циклах магнитное поле ведущих групп пятен северного полушария имеет северную (N), а в хвостовых — южную (S) полярность. В южном полушарии полярности соответствующих пятен противоположны. Полярности всех пятен меняются при переходе в четный цикл. Полярность общего магнитного поля Солнца также подчиняется 22-летней периодичности. Таким образом, магнитная активность показывает 22-летнюю повторяемость, *называемую циклом Хейла*, или магнитным циклом [Моффат, 1980; Дубов, Хромова, 1992].

Дипольное поле Солнца лучше всего прослеживается в минимуме солнечной активности и почти не ощущается в максимум, когда оно в высоких широтах меняет полярность. После $SA_{\max}$ в 1979 г. полярность $МП_\odot$ установилась, как на Земле, а именно: южный магнитный полюс вблизи северного гелиографического.

Особенности предыдущего 22-го цикла СА сделали его уникальным среди изученных солнечных циклов ($80 < W^* < 130$). Учитывая, что прошедший цикл был самым большим четным одиннадцатилетним циклом, а значит, первой половиной физического (22-летнего) цикла СА, можно было предполагать (согласно правилу Гневыхева—Оля), что 23-й цикл будет очень высоким. Однако полное отсутствие событий планетарного масштаба на фазе спада и вялое развитие нового

^{*}Мах СА наступил в 04. 2000 г., в 24-м цикле его следует ожидать в 2013 г.

^{**}11-летний цикл смены полярности $МП_\odot$ установил Г. Швабе в 1843 г.

цикла в первые годы позволило высказать предположение о том, что этот цикл не может быть интенсивным. Современные возможности наблюдения состояния СА позволяют с определенной долей достоверности дать прогноз о ходе развития прошедшего 23-го цикла; на рис. 1.22, цв. показано, что его развитие полностью укладывалось в схему хода эволюции ему подобных по темпу развития и высоте более ранних солнечных циклов, для которых ($80 < W^* \leq 130$).

В настоящее время наблюдения показали, что максимум СА в 23 цикле наступил в апреле 2000 г., а минимум — в декабре 2008 г. ($W^* = 1,7$). И по прогнозам максимум СА для текущего 24 цикла (он наступил в январе 2009 г. с $W^* = 1,8$) следует ожидать в феврале — июне 2013 года.

Анализ показаний о распределении и количестве солнечных пятен (W^*) дает следующие характеристики для 23-го цикла СА:

- формальное **начало** завершившегося 23-го цикла солнечной активности — **май 1996 г.**, и начальное значение сглаженного числа Вольфа $W_{\min}^* = 8,0$;

- **первая группа** 23-го цикла появилась **непосредственно в точке минимума (май 1996 г.)**, тогда как во всех изученных циклах первые группы пятен нового цикла появлялись не менее чем за полтора года до точки минимума;

- **начало фазы роста — сентябрь 1997 г.** ($W^* = 51,3$, $F_{10.7} = 96,2$), когда на видимом диске Солнца появились первые две большие группы солнечных пятен с площадями > 500 м.д.п. (миллионные доли полусферы диска);

- **максимум** цикла в относительных числах солнечных пятен наступил в апреле 2000 г. ($W^* = 120,7$), а **максимум** значений потока радиоизлучения на волне 10,7 см отмечен в феврале 2002 г. ($F^* = 197,2$), т.е. впервые с начала наблюдений радиопотока максимумы этих двух основных максимумов оказались разнесенными по времени (и сразу на 22 месяца);

- **время осуществления переполюсовки** (окончательная смена знака солнечных структур на широтах $N, S 70^\circ$) общего магнитного поля Солнца — **июль–декабрь 2000 г.**;

- второй максимум цикла в относительных числах солнечных пятен отмечен в ноябре 2001 г. ($W^* = 115,6$), причем **8 месяцев значения W^* превышали 113**;

- **значительное отставание по общему количеству активных областей (АО) 23-го цикла**, появившихся на видимом диске Солнца за соответствующий период (63 месяца) для трех последних циклов, таково:

Структура	21-й цикл	22-й цикл	23-й цикл
АО	2107	1864	1371
КД	>168	226	430

Эти данные показывают, что впервые появился намек на тенденцию: **в солнечных циклах с “дефицитом” активных областей существует “избыток” корональных дыр (КД);**

- сами группы пятен меньше по размерам, менее сложные, с более медленным темпом развития и большим временем жизни. Это характерные признаки стабильных (не вспышечных) активных областей, которые могут указывать **на более слабую циркуляцию в солнечной конвективной зоне в текущем цикле** по сравнению с несколькими предыдущими (18-м—22-м). Количество высокоширотных ($\geq 30^\circ$) групп пятен близко к “нормальному”, наблюдаемому в доверительных циклах, и значительно уступает циклам 22-му и 19-му;

- следствием дефицита вспышечных активных областей явилось и **значительное отставание** текущего цикла **по количеству оптических вспышек, рентгеновских всплесков, в том числе больших, и протонных событий;**

- **резкое снижение флюэнсов** (суммарных суточных потоков) энергичных электронов ($E > 2$ МэВ): за все время развития текущего цикла флюэнс ни разу не достиг значений $1E+8$ солнечных единиц потока, хотя в 21-м и 22-м циклах СА они нередко превышали $1E+9$;

- снижение вспышечной активности привело к **значительному росту количества дней со спокойными геомагнитными условиями.** В то же время количество очень больших магнитных бурь ($A_p \geq 100$) остается на уровне высоких солнечных циклов, что согласуется с правилом осуществления самых больших вспышечных событий на фазах роста и спада солнечных циклов.

Проблема вспышечной активности Солнца порой заводит специалистов-астрофизиков в тупик при интерпретации наблюдаемых явлений. Так, например, в прогнозе СА на 30.08–06.09.2004 г. В.Н. Ишков отмечал грядущий низкий уровень вспышечной активности, но неожиданная смена знака МПМП с “+” на “–” произошла 25.08.2004 г. в 8 ч утра и уже 29.08.2004 г. в 19 ч Земля снова вошла в сектор “+”. Вероятно, полагает Ишков, что планета вступает в эпоху перестройки секторной структуры от двухсекторной, характерной для годов максимума, к четырехсекторной, характерной для годов минимума СА. В переходный период может наблюдаться до шести небольших секторов. Обычно переходный период длится от 2 до 6 месяцев (см. рис. 1.12 и 1.13, а также: www.sec.noaa.gov; www.izmiran.ru и www.izmiran.rssi.ru/space/solar/forecast). Как сообщает служба новостей Yahoo, голландский астрофизик доктор Пирс Ван дер Меер (Piers Van der Meer), эксперт Европейского космического агентства (ESA), полагает, что некоторые признаки свидетельствуют о том, что Солнце вот-вот взорвется.

По мнению доктора Ван дер Меера, температура ядра Солнца, составляющая обычно 27 млн. градусов Фаренгейта, за несколько последних лет поднялась до опасных 49 млн. градусов. Процесс разогрева нашего светила на протяжении последних 11 лет очень похож на изменения, происходящие в звездах перед взрывом Сверхновых — например, в знаменитой Сверхновой 1604 г. Он считает, что процесс глобального потепления, который мы наблюдаем в настоящее время, связан не с действием парникового эффекта, а именно с разогревом Солнца. О необычных процессах, происходящих на Солнце, свидетельствуют и снимки гигантских протуберанцев, полученные солнечной и гелиосферной обсерваторией NASA SOHO, ведущей непрерывные наблюдения за светилом из космоса.

Вычисления, проведенные сотрудниками доктора Меера, показывают, что если температура солнечных недр будет расти такими же темпами, скоро процесс станет необратимым, и в этом случае Солнце взорвется уже лет через шесть (izv.info). Мы попросили ведущего специалиста ИЗМИР РАН по СА и прогнозу о магнитных возмущениях Виталия Никитича Ишкова прокомментировать “предостережения” Пирса Ван дер Меера.

Комментарий В.Н. Ишкова:

Известно, что наиболее мощные события на Солнце в солнечном цикле происходят обычно на фазе спада, которая для текущего 23-го цикла наступила с июля 2002 г. С 19.10 по 4.11 в трех группах пятен произошло 14 больших вспышек, из них 10 балла X. Эти события показывают, что мы о Солнце и событиях на его поверхности знаем еще достаточно мало, однако ничего катастрофического на Солнце не происходит. А высказывание астрофизика это просто неграмотная “утка” с псевдонаучными рассуждениями. Температура ядра Солнца непосредственно не измеряется, а вытекает из современной стандартной модели строения Солнца. Пока она выдержала все удары, которые ей наносят новые наблюдаемые факты (в основном это проблема солнечных нейтрино). Солнце же в текущем цикле солнечной активности принципиально менее активно, чем в предыдущих пяти (с 1944 г.) солнечных циклах. По всей видимости, нас ждут примерно 50 лет (5 циклов) средней и низкой активности. Ничего сверхординарного на Солнце в последние годы не происходит. Самая большая активность происходила в 19-м солнечном цикле (суперцикл) 1957–1960 гг., а Солнце будет светить в неизменном режиме еще не менее чем миллиард лет.

В соответствии с научными данными, наша Вселенная родилась около 15 млрд. лет назад в результате Большого взрыва. Но что именно тогда взорвалось и что существовало до этого грандиозного взрыва, по-прежнему, покрыто завесой тайны [Вокруг света. 2004. № 2. С. 56].

Одним из наиболее интересных событий прошедшего 23-го цикла СА можно считать вспыхнувшую активность в 2000 г. Так, 14.07.2000 г. произошла вторая по мощности солнечная вспышка цикла солнечной активности балла X5.7/3B, оказавшая сильное воздействие на околоземное космическое пространство. Протонное событие от этой вспышки было одним из самых интенсивных за всю историю наблюдений (с 1956 г.). Сеть нейтронных мониторов отметила самое значительное возрастание интенсивности космических лучей в данном цикле, а очень сильная магнитная буря произошла 15–16 июля ($A_p = 173$). Полярное сияние в северном полушарии можно было наблюдать на широте Одессы (до 43° северной широты). Всего же за шесть дней второй декады июля были отмечены еще три малых магнитных бури — 11, 13 и 14.07. Сентябрь 2000 г. ознаменовался прохождением по видимому диску Солнца самой большой по площади в цикле группы пятен. Ее максимальная площадь $S_p = 2140$ миллионных долей полушария (м.д.п.), что в тринадцать раз превышает площадь всей земной поверхности. Группа была достаточно спокойной, в ней не наблюдалось новых всплывающих потоков, и практически все прохождение пятен на фоне диска Солнца сопровождалось вспышками $\approx$ IX баллов. Однако перед уходом за западный лимб Солнца группа активизировалась, и уже за лимбом в ней произошли две сильные вспышки.

Данные предварительные, окончательные могут изменяться до 5 %. Их можно получить в Мировом центре данных в Москве: [<http://www.wdbc.ru>].

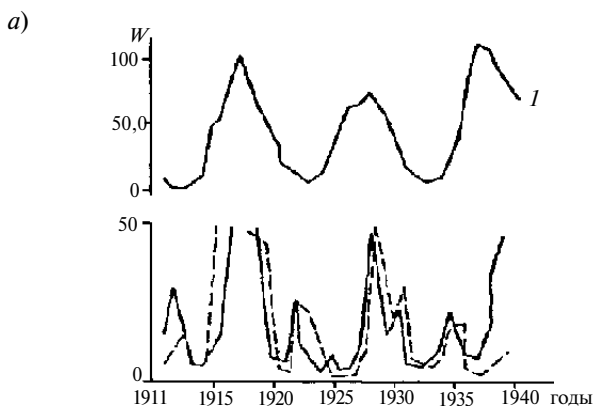
Официальные прогнозы 24-го цикла, которые определяют политику государств в области космических исследований, можно получить в Центре состояния околоземного космического пространства при Национальном управлении по исследованию океана и атмосферы США (NOAA Space Environment Center) и в Европейском центре солнечных данных в Брюсселе.

По данным этих Центров, прогнозировалось, что осуществление мощных солнечных вспышек произойдет со второй половины 2001 г. до 2004 г. В этот же период наиболее вероятно ожидалось несколько очень больших магнитных бурь.

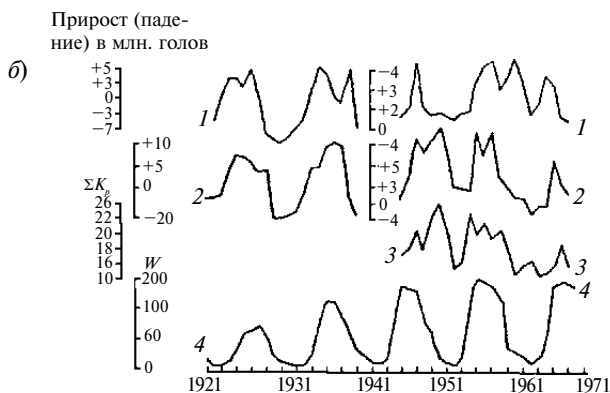
В 2002 г. начался спад СА (по сообщению В.Н. Обридко (ИЗМИР РАН) 18.06.02 на конференции в Пулковской обсерватории, Санкт-Петербург). Все рассмотренные нами источники прогнозирования постоянно корректируют их в начале каждого месяца, когда вычисляется наблюдавшееся относительное число пятен W^* за прошедший месяц* (смотрите ссылки на веб-сайте стр. 106).

О корреляционных связях между СА и различными процессами на Земле в настоящее время известно много. А.Л. Чижевский

одним из первых усмотрел в ионизированных солнечных частицах реальный механизм воздействия на биосферу Земли. За свои исследования об ионных воздействиях на всё живое он получил титул “отца космобиологии”, как основатель науки, изучающей реальные механизмы воздействия космических излучений на живые организмы, человека и общество. До него Р. Вольф установил, что, например, существует взаимосвязь между свечением атмосферы в высоких широтах и вспышками на Солнце. До и после Вольфа были найдены и другие взаимосвязи: 1844 г., Гаутьер — взаимосвязь между температурой воздуха у земной поверхности и числом пятен на Солнце; 1858 г., Малпе — связь пятен с землетрясениями; Мелдрун, (1872 г.) — частота бурь, ураганов и смерчей, а также количество осадков пропорциональны числу солнечных пятен; Зенгер (1887 г.) —

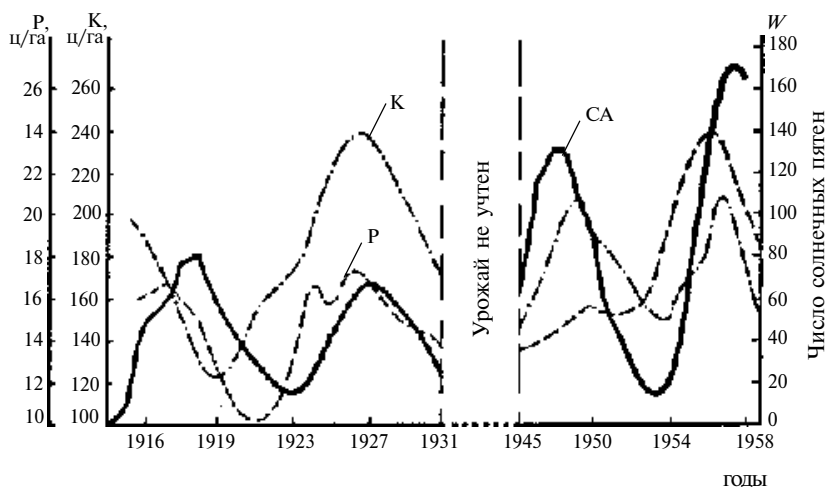


Популяционные кривые сосновой ильдицы в двух географических районах и солнечная активность (верхняя кривая)

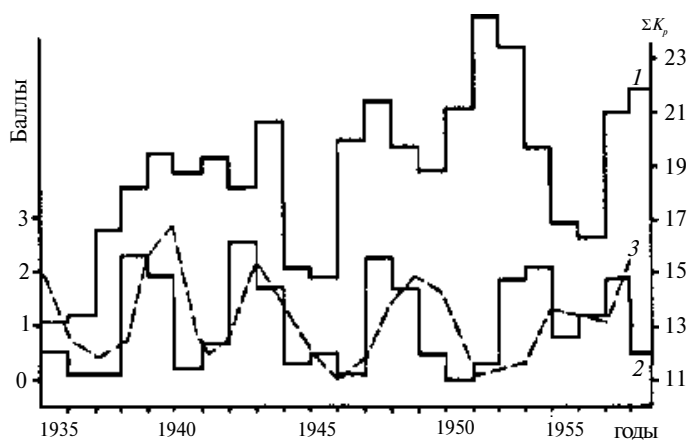


Изменения поголовья крупного рогатого скота (1) и овец (2) в связи с колебаниями магнитной (3) и солнечной активности (4)

Рис. 1.23. Солнечная активность и животный мир

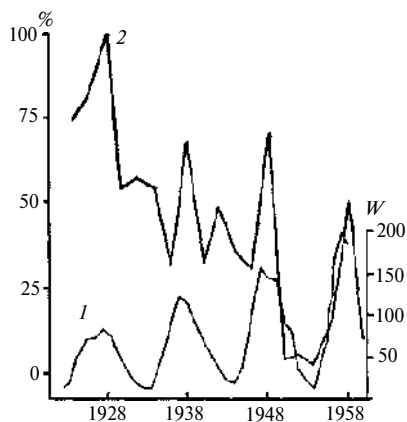


Солнечная активность и средний урожай ржи (Р) и картофеля (К), по данным полевой опытной станции ТСХА

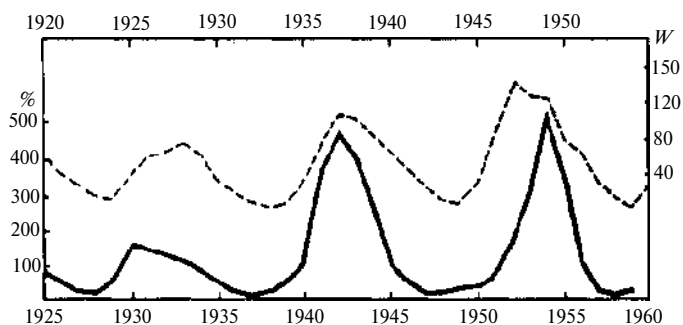


Ход магнитной возмущенности (1), урожайности хвойных деревьев (2) и численности белки на Северо-Западе СССР (3)

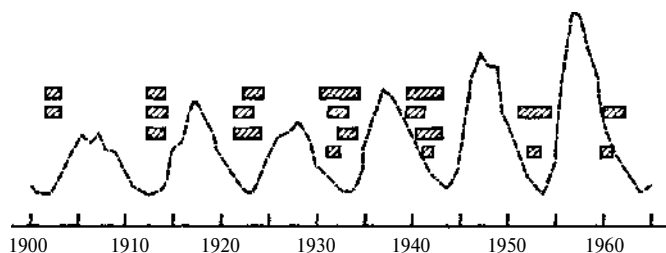
Рис. 1.24. Солнечная активность и растительный мир



Динамика солнечной активности (1) и уловов амурской горбуши (2)



Заготовки зайца-беляка в Якутии (нижняя кривая) и солнечная активность. Кривые сдвинуты по фазе на пять лет



Периоды массового размножения мышевидных грызунов в четырех районах европейской части СССР (прямоугольники) и кривая солнечной активности

Рис. 1.25. Солнечная активность и животный мир

связь частоты гроз и числа пятен. Другие статистические исследования установили связь числа пятен и количества добываемого вина, толщины годовых колец у деревьев, величины улова рыбы, размножаемости и миграции насекомых, количества катастроф и преждевременных смертей. В качестве примеров, поясняющих описанные выше наблюдения, приводим рисунки влияний СА на явления в биосфере (рис. 1.23–1.25) [Мизун, Мизун, 1984; Мизун, Мизун, 2001].

Исходя из реального состояния солнечной погоды (Space Weather Now), NOAA Space Environment Center (США) восстанавливает и прогнозирует развитие новых циклов СА, например показанное на рис. 1.26, цв.

Краткий обзор о периодичности СА мы завершаем высказыванием известного астронома и популяризатора науки Саймона Миттона о том, что “...Солнце — не прогнозируемая переменная звезда, какой ее привыкли считать астрономы, а звезда, поведение которой подвергается значительным непредсказуемым изменениям. Согласно предположению J.A. Eddy, в настоящее время Солнце, возможно, приближается к большому максимуму в XXII или XXIII столетии” [Миттон, 1984].

1.3.4. Связь явлений солнечной активности с геомагнетизмом

Под действием усиленного СВ, корпускулярных потоков, солнечных космических лучей (СКЛ) и связанных с ними резких изменений МП в магнитосфере Земли возникают магнитосферные возмущения, которые регистрируются наземными магнитными обсерваториями в виде “вариаций напряженности ГМП”.

Последовательность событий в системе солнечно-земных связей можно наблюдать, прослеживая цепочку явлений, сопровождающих мощную вспышку на Солнце, т.е. высшее проявление СА.

Вспышку в атмосфере Солнца, так называемую хромосферную вспышку, можно уподобить точечному взрыву. Рассмотрим схему структуры солнечной вспышки (рис. 1.27). В верхней части рисунка представлен вид на краю диска Солнца, в нижней его части — вид на строение магнитного поля подвсплывающих тороидальных “пятен” и их полярность; волнистая линия обозначает траектории движения частиц, ускоренных вспышкой. На рис. 1.27,*а* изображена замкнутая на фотосферу конфигурация силовых линий над двумя парами пятен с нейтральной точкой (x), на рис. 1.27,*б* — открытая в межпланетное пространство структура силовых линий. Заштрихованные области — это протуберанцы (волокна на диске Солнца).

В настоящее время регулярное наблюдение за состоянием солнечной поверхности ведется со спутников, и современные фотоизображения дают прекрасную картину вспышек электромагнитного

излучения в атмосфере Солнца (рис. 1.28, цв.). В результате хромосферных вспышек за несколько минут высвобождается огромное количество энергии, и происходит взрыв, энергия которого эквивалентна энергии одновременного взрыва десятков тысяч водородных бомб. Несмотря на исключительную жизненную важность решения проблемы природы хромосферных вспышек и особенно нахождения способов прогноза времени их возникновения и мощности, еще очень мало известно о механизме их развития. Тем не менее, следствием вспышек являются: рост мощности рентгеновских солнечных лучей; рост потока радиоволн; рост потока ионов различных элементов; рост потока ядер водорода, гелия и электронов. Скорости распространения этих СКЛ в МППП близки к скорости света*.

Поскольку время распространения ЭМ волн от Солнца до Земли несколько больше 8 мин, то последствия вспышки начинают сказываться в околоземном пространстве почти одновременно с событиями на Солнце. Обычно мощная вспышка сопровождается испусканием большого количества ускоренных частиц; так, самые энергичные СКЛ (с энергией $\geq 10^8 \div 10^9$ эВ) начинают приходить

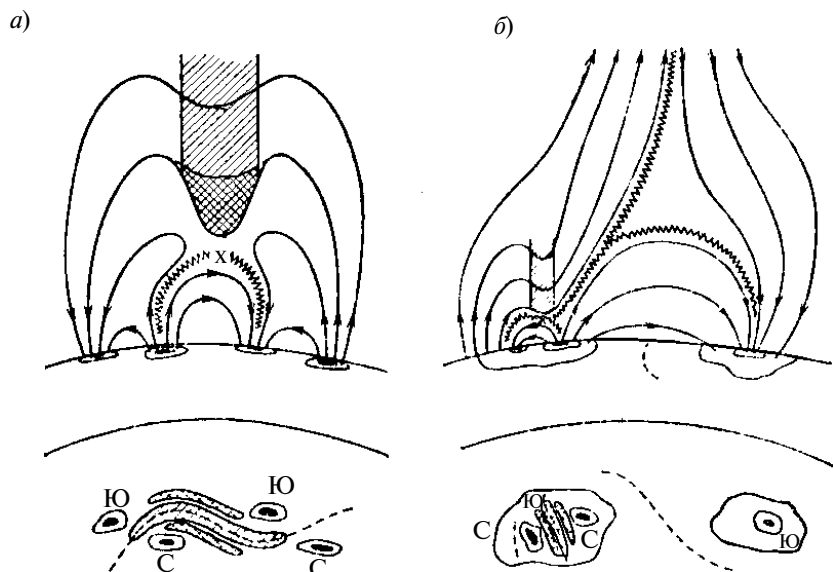


Рис. 1.27. Структура магнитного поля в области солнечной вспышки [Бочкарев, 1985, с. 77]*

*Современные спутниковые наблюдения за структурой МП в области вспышки (см. рис 1.28,в, цв.): комплекс ТЕСИС, Россия, от 19 января 2010 (www.science.plenet/spece)

к Земле спустя примерно ($\geq$) 10 мин после максимума вспышки и наблюдаются вблизи нее несколько десятков часов. Вторжение СКЛ в ионосферу полярных широт вызывает дополнительную ионизацию верхней атмосферы и приводит к ухудшению радиосвязи на коротких волнах, способствует опустошению озонового слоя Земли (озоносферы), увеличивает и радиационную опасность для космической техники и экипажей [Физика космоса. 1986. С. 360].

Верхние слои атмосферы защищают Землю от жесткой радиации, поэтому к границе Земля—атмосфера подходят лишь вторичные продукты ядерных взаимодействий СКЛ с ядрами атомов атмосферы, а именно: нейтроны, мюоны, протоны, гамма-кванты. В части 2 данной работы рассматриваются макроскопические ЭМ свойства водной среды, поэтому здесь уместно отметить, что попадание нейтронов высоких энергий (быстрых, с энергией $0,1 \div 3,0$ МэВ) в воду в реальных условиях приводит к ряду физико-химических явлений.

Когда быстрые нейтроны проникают в воду, их энергия уменьшается, и процессы взаимодействия их с ядрами H_2 и O_2 идут уже в пределах энергии тепловых взаимодействий. В итоге наблюдается радиолиз — выделение ионов H^+ и O^{2-} . Поскольку растворимость H_2 в воде значительно меньше растворимости O_2 , выделение водорода идет в виде газовых пузырьков. Именно наличие во вторичных СКЛ гамма-квантов и электронов, по всей вероятности, вносит вклад в радиолиз воды. СКЛ ионизируют природную воду (меняется pH, возникают изотопы при захвате теплового нейтрона и т.д.). Хотя свойства воды в больших объемах существенно не изменяются, образование газовых пузырьков в результате радиолиза реально влияет на локальные свойства H_2O и способно снизить на порядок кавитационную прочность воды, изменить температуру кипения и ряд других ее физико-химических свойств. Следует также отметить, что в морской воде, концентрационно перенасыщенной $CaCO_3$ и $CaSO_4$, заряженные быстрые частицы СКЛ могут привести к возникновению зародышей кристаллизации.

Вспышка генерирует мощную ударную волну и выбрасывает в межпланетное пространство облако плазмы. Двигаясь со скоростью свыше 100 км/с, ударная волна и облако плазмы за 1,5–2 суток достигают Земли и вызывают *магнитную бурю*, понижение интенсивности галактических космических лучей (рис. 1.29), усиление полярных сияний и возмущения ионосферы. Известно и статистически доказано, что через 2–4 суток после магнитной бури происходит заметная перестройка барического поля тропосферы. В свою очередь увеличивается неустойчивость атмосферы (развитие циклонов, нарушение метеорологической циркуляции воздуха и т.д.). *Мировые магнитные бури представляют собой крайнюю степень возмущенности магнитосферы в целом. При*

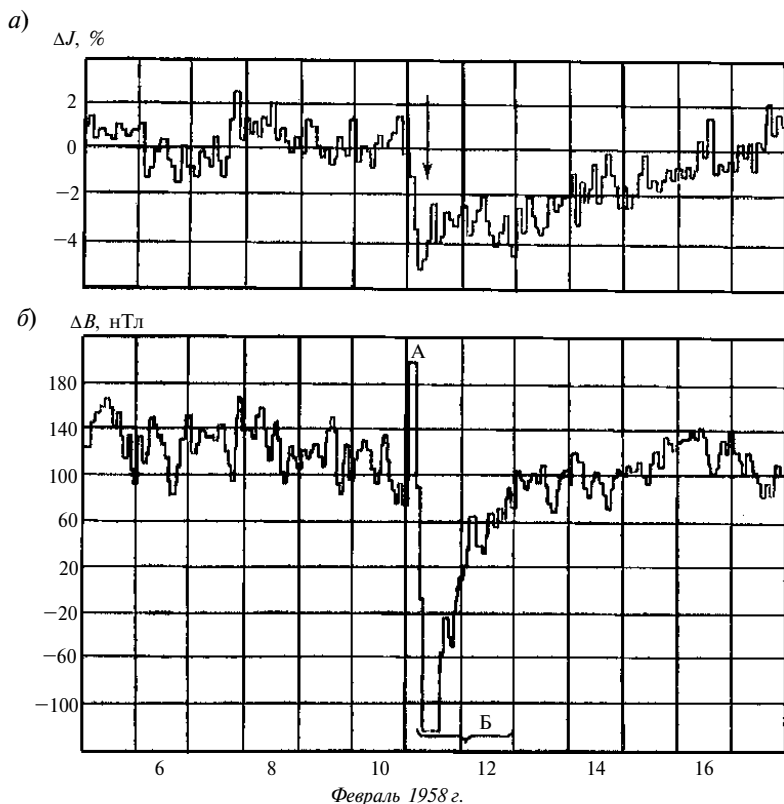


Рис. 1.29. Экспериментальные данные о регистрации вариаций космических лучей $\Delta J, \%$ и индукции магнитного поля $\Delta B, \text{нТл}$, во время геомагнитной бури
[Бочкарев Н.Г., 1985, с. 90]

этом в магнитосфере генерируется широкий спектр ЭМ волн с частотами $0,001 \div 10,0 \text{ Гц}$, которые свободно доходят до поверхности Земли. Во время магнитных бурь интенсивность этого ультранизкочастотного излучения (УНЧ-излучения) возрастает в 10–100 раз. Статистически установлена связь между уровнем солнечной и геомагнитной возмущенности и ходом ряда биосферных процессов (динамикой популяций животных, эпидемий, эпизоотий, количеством сердечно-сосудистых кризов и т.д.). Полагают, что наиболее вероятной причиной такой связи является ЭМП Земли в УНЧ-диапазоне*.

*Наиболее полно об этих процессах см. в разделе об экологической роли ЭМП Земли.

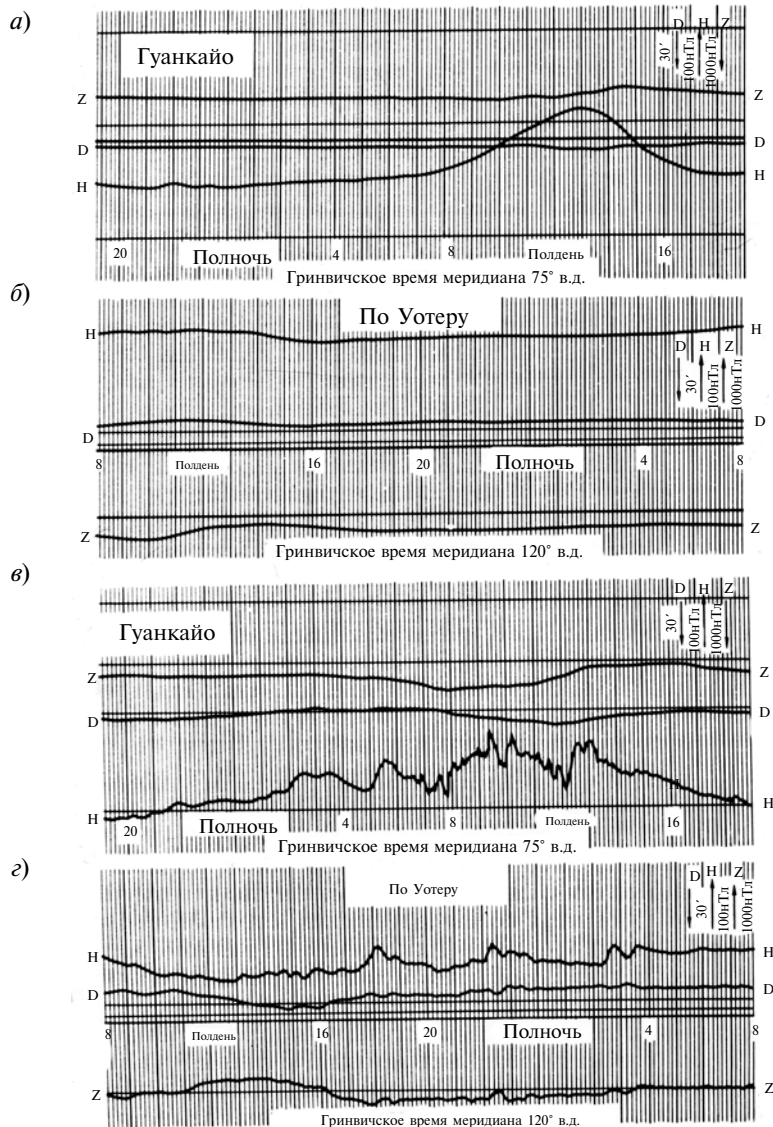


Рис. 1.30. Магнитограммы, полученные обсерваториями Гуанкайо (Перу) и Утеру (Австралия) для магнитоспокойных (а и б) и магнитовозмущенных (в и г) дней [Chapman, Bartels, 1940]

Изменения (вариации) ГМП (H_x , H_y , H_z , D и I) даже от одного и того же возмущения будут различными на разных магнитных обсерваториях в зависимости от их координат. Из всего этого многообразие вариаций ГМП (суточные, сезонные, вековые) далее будут

рассмотрены те, которые связаны с СА. На рис. 1.30, 1.31, цв., даны для сравнения характеристики ГМП с разницей в наблюдениях по времени в 60 лет, полученные обсерваториями в Перу, Австралии и Москве (2001 г.).

На рис. 1.32, цв., также даны сравнительные характеристики сильных магнитных возмущений (бурь) в мировом масштабе для обсерватории Потсдама (1921 г.) и обсерватории Москвы (2000 г.), размах аномалий ГМП более 1400 нТл.

Геомагнитные возмущения, зависящие от СА, можно разделить на два типа — *спорадические* и *рекуррентные* (повторяющиеся) возмущения.

Спорадические возмущения (непериодические) связаны с потоками частиц, летящими от солнечных вспышек, прорывающими замкнутую магнитную структуру в атмосфере Солнца и достигающими окрестностей Земли. Рекуррентные возмущения образуют довольно длинные последовательности возмущений, повторяющихся каждые 27 дней (их связывают с усиленным солнечным ветром от долгоживущих корональных дыр).

При рассмотрении вариаций солнечных космических лучей СКЛ и падения их интенсивности во время геомагнитных возмущений нельзя не вспомнить об очень интересном факте — тайном рейсе научно-исследовательского судна АН СССР “Витязь”*. В начале 60-х годов прошлого века академик Д.В. Скобельцын высказался о необходимости расширения наших фундаментальных знаний в области представлений о природе элементарных частиц [Известия АН СССР. Сер. физ. 1953. № 1]. “Существенный вклад в изучение этого направления внесла экспедиция на научно-исследовательском судне “Витязь”, которая, однако, ни в каких документах не значится” [Вестник РАН. 2004. Т. 74, № 1. С. 68–70] (рис. 1.33).

Инициатором экспедиции был профессор академик Сергей Николаевич Вернов. В задачу рейса входило решение ряда фундаментальных проблем физики элементарных частиц высоких энергий. *Исследовательской лабораторией была атмосфера над океаном, элементарные частицы поставлял космос, а в качестве естественного спектроанализатора выступало магнитное поле Земли.* В тот период ускорителей, подобных современным, еще не изобрели, и единственным источником информации о частицах высоких энергий были космические лучи, регистрируемая энергия которых тогда составляла в среднем 10^{10} эВ. Для сравнения: энергия построенных позднее, крупнейших на то время в мире ускорителей составляла в Дубне (1956 г.) — $10 \cdot 10^9$ эВ и в Серпухове (1967 г.) — $6 \cdot 10^{10}$ эВ.

*О заряде СКЛ приводим историческую справку, которая подтверждает результаты, показанные на рис. 1.29.

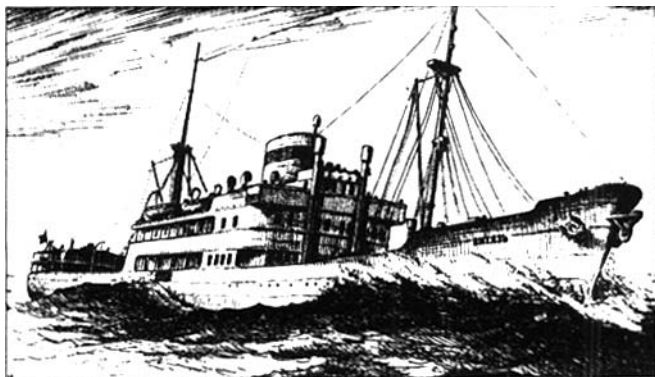


Рис. 1.33. Научно-исследовательское судно “Витязь” в походе

Одна из главных целей изучения природы космического излучения — определение знака заряда элементарных частиц. *В магнитном поле Земли частицы с электрическим зарядом движутся строго по спирали* [см. настоящее издание, ч. 1, рис. 1.10—1.11]. *Особенно сильно влияет на заряженные частицы в атмосфере наиболее мощное приэкваториальное магнитное поле.* Вблизи геомагнитных полюсов оно слабее, поэтому использовать магнитное поле Земли в качестве анализатора в большинстве случаев предпочтительнее на магнитном экваторе, не совпадающем, но близком к географическому. Минимальная энергия, необходимая для преодоления частицей магнитного поля Земли, называется критической. Она зависит от геомагнитной широты и угла движения частиц по отношению к вертикали. На широте Москвы критическая энергия составляет $2 \cdot 10^9$ эВ, независимо от знака заряда и направления прихода частиц. На магнитном экваторе ее величина — $15 \cdot 10^9$ эВ для частиц, приходящих в вертикальном направлении, независимо от знака заряда, но для частиц, идущих под большими углами к вертикали, критические энергии оказываются разными в зависимости от знака заряда [Вернов С.Н., Куликов А.М. // ДАН СССР. 1948. № 6].

Перед экспедицией стояли задачи: 1) определение знака заряда первичных частиц космического излучения путем измерений в стратосфере на экваторе азимутальной асимметрии мягкой и жесткой компонент лучей и всего потока под разными углами к вертикали; 2) исследование в экваториальной зоне высотной зависимости интенсивности компоненты космического излучения, вызывающей ливни из вторичных частиц; 3) изучение на разных широтах компоненты космических лучей, вызывающей ядерные расщепления.

Для положительно заряженных частиц, движущихся с запада, критическая энергия оказывается в 6 раз меньше, чем для движущихся с востока. Для отрицательно заряженных частиц, наоборот, критическая энергия меньше в случае их движения в восточном направлении. Это явление называется азимутальной асимметрией, оно может использоваться для определения знака заряда первичных частиц космических лучей [Вернов С.Н. и др. // ДАН СССР. 1952. № 3].

Таковы были в то время представления о космическом излучении, основанные на теоретических разработках и расчетах.

В результате работ этой маленькой безвестной экспедиции были получены важнейшие результаты, которые сыграли большую роль не только в развитии науки в нашей стране, но, без всякого преувеличения, и во всем мире. Во-первых, было показано, что на экваториальных широтах наблюдается большая восточно-западная азимутальная асимметрия космического излучения, доказывающая положительный знак заряда, по крайней мере, большей части первичных космических частиц, являющихся, таким образом, протонами. Тем самым был опровергнут ошибочный результат эксперимента Джонсона и Барри, который, будучи единственным, создавал неверное представление о природе первичных космических лучей.

Не менее важные результаты были достигнуты при исследовании широтного эффекта ядерных расщеплений в атмосфере. Космические протоны, взаимодействуя с ядрами атомов воздуха, вызывают расщепления ядер и создают потоки сильно ионизирующих частиц. Получены оценки величин энергии, теряемой космическими лучами на ядерные расщепления в атмосфере на разных широтах.

С течением цикла СА наблюдается четко выраженный максимум частоты спорадических возмущений, который совпадает по времени с максимумом солнечных пятен (т.е. тах цикла СА). Через 4–6 лет на фазе спада цикла СА наступает максимум частоты рекуррентных возмущений. Наиболее сильные рекуррентные возмущения наблюдаются на ветвях спада четных циклов, а особенно сильные спорадические возмущения (вспышки) — около максимумов нечетных циклов (см. рис. 1.21, 1.24, 1.26 цв.).

Обычно рекуррентные возмущения несколько слабее спорадических; последние иногда бывают исключительно сильными и часто характеризуются “внезапным началом”, но сравнительно меньшей продолжительностью.

Таким образом, солнечный ветер, основной источник корпускулярного излучения, возмущает магнитосферу Земли, но она, как мы это отметили ранее, не дает СВ приблизиться к ней ближе, чем на

$(7 \div 10)R_3$. Однако проникшее из магнитосферы в ионосферу ЭМ излучение достигает земной поверхности и регистрируется магнитометрической аппаратурой. Эти УНЧ-колебания ГМП наблюдаются как микропульсации поля, а их параметры тесно коррелируют с СА. Например, во многих микропульсациях отчетливо прослеживаются 11-летний цикл СА и его гармоники. Существенные изменения наблюдаются в отдельных частотных полосах микропульсаций при прохождении вблизи Земли секторных границ ММП (об этом свидетельствуют характерные изменения в K -индексах магнитной возмущенности, напряженности ГМП, циркуляции нижней атмосферы на средних широтах и даже во время гроз). Особенно сильные возмущения в диапазоне микропульсаций фиксируются после хромосферных вспышек на Солнце.

Следует отметить, что вклад внешних источников в изменения МП на поверхности Земли составляет менее 1 %, но во время магнитной бури может составить несколько процентов, а наиболее энергичные частицы от вспышек попадают на Землю спустя 2–4 ч.

В качестве новейших результатов, отображающих физику явлений на Солнце и у Земли в период солнечной вспышки, рассмотрим пример в цепи: ***солнечная вспышка — всплески высокоэнергетической радиации — геомагнитное поле и магнитные бури.***

На рис. 1.34, цв., представлен общий поток рентгеновского излучения Солнца, получаемый со спутников серии GOES в режиме реального времени. Солнечные вспышки видны в виде всплесков интенсивности. Во время мощных вспышек происходят нарушения радиосвязи в ВЧ-диапазоне на дневной стороне Земли. Степень этих нарушений зависит от мощности вспышки. Возникший радиационный удар может вызывать нарушения и поломки в аппаратуре космических аппаратов, приводить к опасному облучению космонавтов и получению повышенной дозы радиации пассажирами и экипажами реактивных самолётов на высоких широтах. Данные о мощности потока протонов высоких энергий поступают с космического корабля “ACE” в режиме реального времени. Соответствующий уровень радиации по шкале NOAA (S1-S5) от слабого до экстремального указан на правой оси координат.

Известно, что после мощных вспышек примерно через 10–15 мин к Земле приходят протоны высоких энергий (≈ 10 МэВ). Усиление потока солнечного ветра и приход ударных фронтов корональных выбросов вызывают сильные вариации геомагнитного поля — магнитные бури. Лучше всего эти изменения видны на долготном компоненте магнитного поля Земли. Данные, поступающие с космических аппаратов серии GOES в режиме реального времени,

представлены на рис. 1.35, где показан пример развития мощной геомагнитной бури наивысшего балла — 9, которая произошла 15 июля 2000 г. через сутки после вспышки 14 июля [http://www-astron.univer.kharkov.ua/sw/swnow_d.htm].

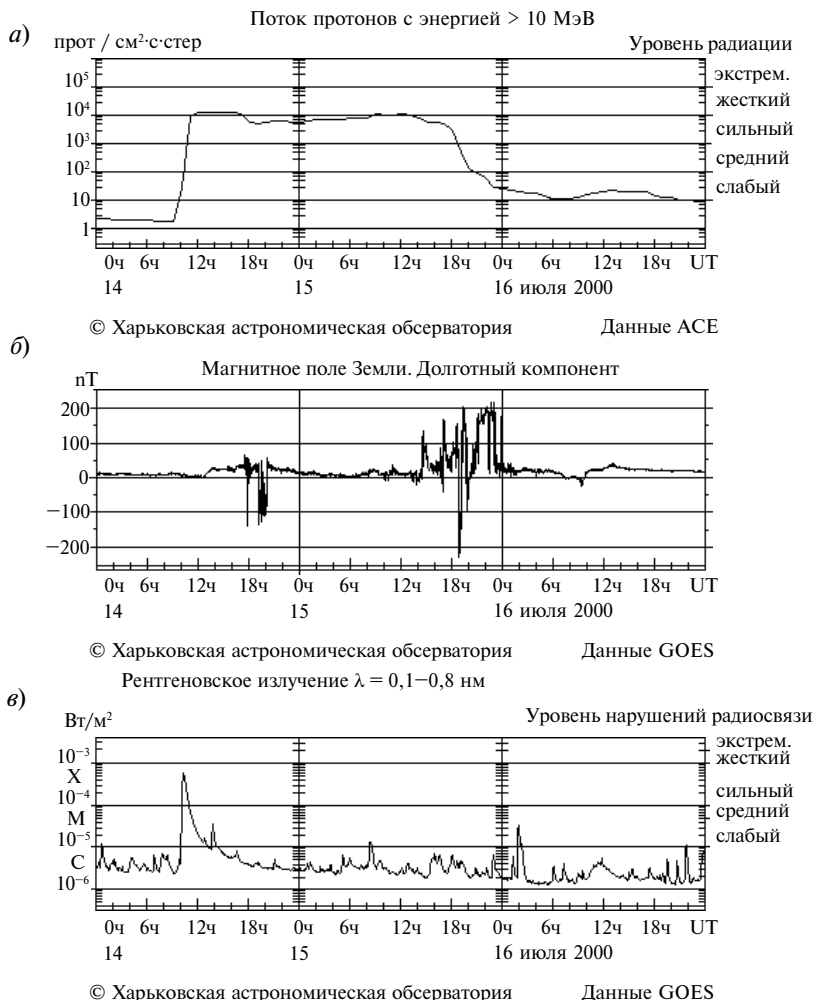


Рис. 1.35. Поток протонов высоких энергий (а), магнитное поле Земли (б) и вероятный уровень нарушений радиосвязи по шкале NOAA (R1-R5) (в), полученные со спутников серии GOES в течение 14–16 июля 2000 г. [по данным Харьковской астрономической обсерватории. http://www-astron.univer.kharkov.ua/sw/swnow_d.htm]

Читателям должна быть интересна одна из последних информации о вспышке на Солнце и последовавших за ней магнитных возмущениях на Земле, по данным журнала “Мир науки” [Мир науки. 1990. Т. 34, № 1. С. 32]. Как мы упоминали, активность Солнца измеряется числом пятен. До сих пор рекордным считался 1957 г., когда в среднем за месяц их было 250. В 1989 г. к середине марта их число приблизилось к 200. Данные журнала относятся к 22-му циклу СА. Из сообщений, прозвучавших на “Международном симпозиуме по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии” в 1995 г. (ЭМС-95) [Сборник докладов. СПб., 1995. 264 с. Ротапринт, 26–30.06.95.], можно сделать вывод о следующих итогах этого возмущения. Магнитные бури 1989 г. привели к авариям в энергосистемах в США и Канаде, а именно — к понижению живучести национальных энергосистем; в геомагнитном поле по всей территории США при вспышке индуцировались электрические токи, которые за 2 мин разрушили энергосистемы, что выразилось в повреждении мощных трансформаторов на АЭС и нанесении ущерба в несколько млрд. долларов. Все беды связаны с внезапностью и эффектом накопления напряженности поля в двигателях энергоустановок. Сделано неутешительное заключение: необходимы усиленная защита энергосистем и организация дорогостоящего мониторинга за состоянием естественного электромагнитного излучения в системе солнечно-земных связей [IV Российская научно-технич. конф. “Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов”. ЭМС-96. СПб., 1996. С. 116]. Необходимо подробное описание характера регистрируемых параметров ГМП на обсерваториях, т.е. тех УНЧ-колебаний Земли, которые вероятнее всего являются причиной и иллюстрацией солнечно-земных связей, а именно:

- Как правило, наиболее интенсивная часть бури длится от 2 до 12 ч, в течение которых ΔH ГМП на поверхности меняется в пределах нескольких сотен нТл, а магнитное склонение (D°) — приблизительно в пределах градуса. Возмущения H в десятки нТл могут существовать в течение суток.

- Сильные бури (с $\Delta H \approx 1900$ нТл, $\Delta Z \approx 1100$ нТл, $\Delta D \approx 5^\circ 28'$, Потсдам, 16.04.38) бывают один раз в 10–20 лет. Общая частота возникновения бурь, например с 1875 по 1927 г., равнялась 313 (ΔH от 150 до 300 нТл, $\Delta D \approx 30'$), число бурь с большим изменением $\Delta D \approx 60'$ и $\approx 150 \div 300$ нТл равно 60. То есть в среднем наблюдалось 7–8 бурь в год. При этом корреляция с 11-летним циклом СА — достоверна, но во время минимума активности корреляция снижается [Биогенный магнетит. 1989. Т. 1. С. 131–132].

- Во время максимума СА небольшие вспышки могут происходить ежечасно, а очень большие — ежемесячно; нужно отметить и случайный характер бурь с интенсивностью ≈ 150 нТл.

- Когда облако плазмы сталкивается с магнитопаузой, магнитосфера внезапно сжимается и ΔH ГМП возрастает, извещая о начале магнитной бури. Резкое возрастание, называемое **внезапным началом**, происходит в данном районе в течение нескольких минут и может достигать 100 нТл или более на поверхности Земли.

- По мере того, как облако солнечных частиц продолжает бомбардировать магнитопаузу, буря вступает в свою **начальную фазу**, во время которой значение H остается высоким или может еще возрасти. В это время число захваченных геомагнитным полем частиц увеличивается, что приводит к возрастанию кольцевого тока и соответствующему снижению напряженности H на поверхности Земли.

- С момента снижения напряженности H начинается **главная фаза бури**. В течение главной фазы бури H может снизиться на несколько сотен нТл.

- Со временем, однако, избыток захваченных частиц уменьшается, и поле медленно возвращается в свое нормальное состояние. Эта последняя стадия главной фазы известна как **фаза восстановления**.

- Морфология магнитной бури не всегда следует такой четко определенной картине (бывают бури, начинающиеся постепенно, а не внезапно).

- Наблюдали [Walcott, 1978], что голуби, которые были выпущены вблизи магнитных аномалий, возмущающих локальное поле на $3000 \div 5000$ нТл, значительно хуже ориентировались относительно дома, чем голуби, выпущенные в тех районах, где аномалий не было. Как видно, такие аномалии на порядок превышают значения H , наблюдаемые во время умеренных бурь, и лишь немногим больше, чем во время сильных. Тем более, возмущения ГМП во время умеренных бурь существенно превышают “нормальные геовозмущения”, которые влияли на ориентацию и поведение птиц [Скайлс, 1989].

Можно привести примеры наблюдений автора (В.В. Александрова), иллюстрирующие результаты корреляции поведенческих двигательных реакций карповых рыб с геомагнитными возмущениями в мае 1993 г. на лабораторной модели [Биофизика. 1995. Т. 40, вып. 4, С. 771–777] и нарушение биоритмов вертикальных миграций озерного зоопланктона во время умеренной бури в северо-западном регионе России, Карельский перешеек [Александров, 1985]. Подробно этот вопрос обсуждается в разделе об экологической роли ЭМП Земли.

Следует отметить, что во время смены полярности или в другие периоды пониженной напряженности ГМП, когда магнитопауза приближается к Земле, а авроральная зона распространяется до более низких широт, частота и сила магнитных бурь, регистрируемых на поверхности, должны увеличиваться.

Численная оценка геомагнитной и солнечной активности

Для характеристики степени солнечной или геомагнитной активности вводятся различные индексы. Каждый из них вычисляется по результатам измерений и характеризует только часть сложной картины активности, поэтому выбор конкретного индекса — задача нелегкая и требующая предварительного исследования процессов или явлений на Земле. В нашу задачу не входит детальное рассмотрение процесса выбора индексации степени возмущенности в системе солнечно-земных связей, для этой цели существуют специальные публикации [Дубов, Хромова, 1992]. Тем не менее, для практических задач необходимо иметь представление хотя бы об индексах геомагнитной активности.

Для такой оценки разработано более 20 различных геомагнитных индексов — *локальные*, вычисляемые по данным одной обсерватории, и планетарные, характеризующие возмущения ГМП в целом или только в северном и южном полушариях, вычисляемые по данным многих магнитных обсерваторий. С помощью таких индексов характеризуют колебания ГМП за сутки, за 3-часовые интервалы, ежечасные значения и т.д., но при этом учитывают средне-, высоко- и низкоширотность обсерватории, где ведут наблюдения. Рекомендуются следующие индексы: C , K , K_p , A_p , AE , Dst .

Индекс C — локальная среднесуточная оценка возмущенности ГМП по шкале: 0 — спокойный день, 1 — слабо возмущенный, 2 — сильно возмущенный день.

Индекс K — трехчасовая оценка возмущенности в баллах (от 0 до 9). За сутки дается восемь значений K . Но следует учесть, что для разных пунктов регистрации эти баллы соответствуют различной величине возмущения. Так, для приполярных станций балл 9 соответствует амплитуде вариаций ГМП — 2500 нТл, а для низкоширотных обсерваторий максимум лежит в пределах 300 нТл (введен Дж. Бартельсом в 1938 г.).

K_p — планетарный индекс возмущенности, вычисляемый по данным на 13 среднеширотных обсерваториях в поясе $60 \div 44^\circ$ северной и

южной широты в баллах $0 \div 9$, его особенность состоит в том, что шкала неравномерна и значение индекса не следует усреднять по времени. Считается, что сумма K_p индексов за сутки ($\sum K_p$) характеризует скорость солнечного ветра. Определяется с точностью до $\frac{1}{3}$:

“4 —” означает 3 и $\frac{2}{3}$, 4.0 означает 4 ровно, “4+” означает 4 и $\frac{1}{3}$.

Индекс A_p — среднесуточная планетарная характеристика возмущенности ГМП с линейной шкалой, выражается в нТл. Рассчитывается по K_p -индексу и представляет собой эквивалентную осредненную амплитуду колебаний напряженности ГМП на средних широтах.

Индекс AE — мера геомагнитной активности в высоких широтах, отражает изменение ионосферных электрических токов, измеряется в нТл, а исчисляется за 2,5-минутные и 1-часовые промежутки. Меняется от 0 до 3000 нТл.

Индекс Dst — характеризует интенсивность симметричного кольцевого тока, возникающего в экваториальной зоне во время магнитосферной бури. Фактически это среднее значение горизонтальной компоненты ГМП $H_{ср}$ по данным нескольких широтных станций, измеряется в нТл. В магнитоспокойные дни Dst меняется в пределах ± 20 нТл, а во время магнитной бури достигает резких отрицательных аномалий ($400 \div 500$ нТл).

Поскольку аномальному состоянию Космической Погоды и последствиям магнитных бурь в энергосистемах и в физиологическом состоянии здоровья населения планеты в настоящее время уделяется пристальное внимание, в ноябре 1999 г. NOAA ввел новые шкалы параметров, индексирующих состояние магнитосферы и ГМП (пояснения в табл. 1.2, 1.3, 1.4).

Шкалы параметров Космической погоды по классификации “NOAA Space Weather” (см. стр. 96)

Шкалы описывают изменения состояния окружающей среды для трех типов воздействия: геомагнитные бури, солнечная радиация интенсивности явления, как в ураганах, смерчах, и нарушении радиосвязи. Здесь перечислены такие же уровни интенсивности явления, как в ураганах, смерчах и землетрясениях, которые показывают силу явления и указывают возможные эффекты на каждом уровне. Указана также частота таких событий и даны величины интенсивности физических параметров.

**Шкала силы геомагнитных бурь по классификации
“NOAA Space Weather”**

Балл	Возможные эффекты	Физические величины	Средняя частота (1 цикл = 11 лет)
		K_p индекс определяется каждые 3 часа	Число бурь с указанным значением K_p ; (число штормовых дней)
G 5 Экстремально суровый (Extreme)	Энергетические системы: возможные разрушения энергетических систем и повреждения трансформаторов. Системы управления космическим кораблем (КК): обширный поверхностный заряд, проблемы с ориентацией, связью и слежением за космическими кораблями (КК). Другие системы: токи через трубопроводы достигают сотен ампер, один или два дня невозможно высокочастотная связь во многих районах, ухудшается точность спутниковых систем навигации, низкочастотная радионавигация выходит из строя на несколько часов, полярные сияния видны вплоть до экватора.	$K_p = 9$	4 за цикл (4 дня за цикл)
G 4 Суровый или жёсткий (Severe)	Энергетические системы: возможны проблемы со стабильностью напряжения, частичные разрушения энергетических систем и отключение защитных систем. Системы управления КК: поверхностный заряд и проблемы слежения и ориентации, необходима коррекция. Другие системы: наведенные токи в трубопроводах требуют мер защиты, спорадическое прохождение ВЧ радиоволн, ухудшение спутниковой навигации на несколько часов, отказ низкочастотной радионавигации, полярные сияния видны до тропиков.	$K_p = 8$, включая и 9	100 за цикл (60 дней за цикл)

Балл	Возможные эффекты	Физические величины	Средняя частота (1 цикл = 11 лет)
		K_p индекс определяется каждые 3 часа	Число бурь с указанным значением K_p ; (число штормовых дней)
G 3 Сильный (Strong)	Энергетические системы: необходима коррекция напряжения, ложные срабатывания систем защиты и высокий “газ в масле” в масляных трансформаторах. Системы управления КК: поверхностный заряд на элементах КК, увеличение сноса с орбиты КК и проблемы ориентации, требующие коррекции. Другие системы: перерывы в спутниковой навигации и проблемы низкочастотной радионавигации, прерывания ВЧ радиосвязи, полярные сияния видны до средних широт.	$K_p = 7$	200 за цикл (130 дней за цикл)
G 2 Умеренный (Moderate)	Энергетические системы: воздействие на высокоширотные энергетические системы. Системы управления КК: необходимы корректирующие действия с центров управления; отличия от прогнозируемого орбитального сноса КК. Другие системы: ухудшение распространения ВЧ радиоволн на высоких широтах, полярные сияния видны до широты 50 градусов.	$K_p = 6$	600 за цикл (360 дней за цикл)
G 1 Малый (Minor)	Энергетические системы: слабые флуктуации в энергетических системах. Системы управления КК: небольшие влияния на системы управления КК. Другие системы: полярные сияния видны на высоких широтах (до 60 градусов); влияние на начало миграций животных.	$K_p = 5$	1700 за цикл (900 дней за цикл)

Таблица 1.3

**Шкала уровней солнечной радиации по классификации
“NOAA Space Weather”**

Балл	Возможные эффекты	Физическая величина	Средняя частота (1 цикл = 11 лет)
		Уровень потока частиц (ионов) с энергией >10MeV *	Число событий с указанным значением потока (число штормовых дней**)
S 5 Экстремально суровый (Extreme)	Биологические: неизбежное высокое радиационное облучение космонавтов при работе в открытом космосе; высокий уровень радиации для пассажиров и экипажа коммерческих реактивных самолетов на высоких широтах (примерно в 100 раз выше, чем при рентгене грудной клетки). Системы управления КК: потеря некоторых спутников, сбои в электронике, приводящие к потере контроля, значительные шумы в видеоданных, звёздные датчики неспособны определить объект, локальные повреждения солнечных батарей. Другие системы: невозможна связь в ВЧ диапазоне на высоких широтах, ошибки в системах навигации делают её чрезвычайно затруднительной.	10 ⁵	Около 1 за цикл
S 4 Суровый или жёсткий (Severe)	Биологические: неизбежное радиационное облучение при работе в открытом космосе; повышенное радиационное облучение пассажиров и экипажа коммерческих реактивных самолетов на высоких широтах (примерно в 10 раз выше, чем при рентгене грудной клетки). Системы управления КК: сбои электронной памяти, шумы в каналах изображений, проблемы в системах ориентации по звёздным датчикам и ухудшение работы солнечных батарей. Другие системы: нарушение ВЧ радиосвязи в полярных районах и увеличение ошибок навигации в течение нескольких дней.	10 ⁴	3 за цикл

Балл	Возможные эффекты	Физическая величина	Средняя частота (1 цикл = 11 лет)
		Уровень потока частиц (ионов) с энергией $>10\text{MeV}$ *	Число событий с указанным значением потока (число штормовых дней**)
S 3 Сильный (Strong)	Биологические: радиационная опасность для космонавтов при работе в открытом космосе; пассажиры и экипаж коммерческих реактивных самолётов на высоких широтах подвергаются небольшому облучению (примерно как при рентгене грудной клетки). Системы управления КК: одиночные сбои, шумы в видеосистемах, локальные повреждения открытых узлов/детекторов и падение мощности солнечных батарей. Другие системы: ухудшение распространения ВЧ радиоволн через полярную область и ошибки в определении координат в системах навигации.	10^3	10 за цикл
S 2 Умеренный (Moderate)	Биологические: никаких. Системы управления КК: редкие одиночные сбои. Другие системы: небольшое воздействие на распространение ВЧ радиосигнала через полярную область и ухудшение навигации в полярных районах.	10^2	25 за цикл
S 1 Слабый (Minor)	Биологические: никаких. Системы управления КК: никаких. Другие системы: небольшие нарушения ВЧ связи в полярных районах.	10	50 за цикл

* Средний поток за 5 мин. Поток частиц измеряется в единицах $\text{с}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$

** Эти события могут длиться более одного дня.

Таблица 1.4

**Шкала уровней нарушений радиосвязи по классификации
“NOAA Space Weather”**

Балл	Возможные эффекты	Физическая величина	Средняя частота (1 цикл = 11 лет)
		Балл рентгеновской вспышки (мощность потока лучей*)	Число событий (число штормовых дней)
R 5 Extreme Чрезвычайно суровый	ВЧ радиодиапазон: полное отсутствие ВЧ связи на дневной стороне Земли, длящееся несколько часов. Нет ВЧ контакта с морскими судами и самолётами в воздухе. Навигация: НЧ навигационный сигнал, используемый в морских и авиационных системах, прекращает функционировать на дневной стороне в течение многих часов, приводит к потере положения. Повышенное количество ошибок в спутниковой навигации в течение нескольких часов на дневной стороне, которое может распространяться и на ночную сторону Земли.	$X20(2 \times 10^{-3})$	Меньше чем 1 за цикл
R 4 Severe Суровый или жёсткий	ВЧ радиодиапазон: прекращение связи в ВЧ диапазоне на один или два часа в большинстве регионов на дневной стороне Земли. Потеря ВЧ радиоконтакта в течение этого времени с морскими судами и самолётами во время полётов. Навигация: исчезновение низкочастотного навигационного сигнала приводит к увеличению ошибок в определении координат морских судов и самолётов в течение одного-двух часов. Возможны небольшие сбои в спутниковой навигации на дневной стороне Земли.	$X10(10^{-3})$	8 за цикл (8 дней за цикл)

Балл	Возможные эффекты	Физическая величина	Средняя частота (1 цикл = 11 лет)
		Балл рентгеновской вспышки (мощность потока лучей*)	Число событий (число штормовых дней)
R 3 Strong Сильный	ВЧ радиодиапазон: широкомасштабные нарушения связи в ВЧ диапазоне, потеря радиоконтакта с морскими судами и авиацией на освещенной стороне Земли. Навигация: падение низкочастотного навигационного сигнала примерно на один час, влияющее на ориентацию морских судов и авиации.	$X1(10^{-4})$	175 за цикл (140 дней за цикл)
R 2 Moderate Умеренный	ВЧ радиодиапазон: ограниченные потери ВЧ радиосигнала на дневной стороне, потеря радиоконтакта на десятки минут с морскими судами и самолетами. Навигация: падение низкочастотного навигационного сигнала на десятки минут, влияет на точность определения координат морских судов и самолетов.	$M5(5 \times 10^{-5})$	350 за цикл (300 дней за цикл)
R 1 Слабый Minor	ВЧ радиодиапазон: небольшие ослабления ВЧ радиосигнала на дневной стороне, редкие потери радиоконтакта с судами и самолетами. Навигация: ослабление низкочастотного навигационного сигнала на короткие промежутки времени, влияет на точность определения координат в мореходстве и авиации.	$M1(10^{-5})$	2000 за цикл (950 дней за цикл)

* Поток измеряется в диапазоне $0,1 \div 0,8$ нм, в $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Оригинал описаний шкал космической погоды находится на сайте: <http://www.sec.noaa.gov/NOAA scales/>.

Ранее рассмотрена классификация и индексация состояния магнитосферы Земли при сильных планетарных ответных реакциях как биосферы, так и технических средств систем связи и энергоснабжения на вспышечную активность Солнца. Но это ярко выраженное воздействие. Тем не менее, существует класс геомагнитных колебаний в УНЧ-диапазоне, незначительных по интенсивности, но имеющих большое биологическое значение. Это так называемые *жемчужины*, или пульсации ГМП типа *ps1*.

Эти пульсации наблюдаются в спокойные и тихие периоды магнитной активности после магнитных бурь. Они лежат в частотном диапазоне $0,2 \div 5$ Гц, близком к диапазону биоритмов человека и длятся от минут до многих часов. В качестве примера индексы *ps1* вычислены по каталогу данных, собранных в обсерватории Борок Института физики Земли РАН за 1978 г. Они могут использоваться как в физике солнечно-земных связей, так и в исследованиях влияния переменного электромагнитного поля Земли на людей и биосферу в целом [Матвеева, 1998, с. 897–899].

Подробности физической интерпретации явления *жемчужин* рассматривались во многих работах, например в [Гульельми, Троицкая, 1973, с. 117].

Пульсации этого типа наблюдаются после магнитных бурь при умеренной и спокойной магнитной активности, обладают квазистабильной частотой в диапазоне $0,2 \div 5,0$ Гц и длительностью колебательного режима от нескольких минут до многих часов. Области пространства, охваченные пульсациями, весьма обширны (от десятков градусов по широте и долготе до практически глобального распространения).

Существует несколько способов построения индексов по данным пульсаций *ps1*. Один из них основан на расчете энергии, выделенной в магнитосфере при возбуждении *ps1*, это *P*-индекс. Среднесуточные значения *P*-индекса получены по данным непрерывной записи *ps1* в обсерватории Борок за 1963–1964 и 1966–1968 гг. Более простым и весьма оперативным индексом активности геомагнитных пульсаций *ps1* может служить *N*-индекс. Он дается в виде суточной активности пульсаций *ps1*, где за единицу активности принимается 15-минутный интервал, в котором *ps1* наблюдаются более 5 мин. Таким образом, *N*-индекс равен количеству 15-минутных интервалов за каждые обозначенные сутки по мировому времени (UT). Этот индекс использовался при исследовании суточных, сезонных и циклических вариаций *ps1*.

В заключение заметим, что в геофизической обсерватории Борок имеется непрерывная запись пульсаций типа *psI*, а также других типов пульсаций начиная с июля 1957 г., обсерватория продолжает проводить эти записи. По мере апробации предложенных индексов пульсаций и заинтересованности научной общест-венности в них возможна публикация за любой период, начиная с 1957 г. [Геофизическая обсерватория Борок Объединенного института физики Земли им О.Ю. Шмидта, 152742. п/о Борок, Ярославская область или по E-mail emma@borok.uniyar.ac.ru, а также emma@geophys.yaroslavl.su].

Для современного читателя — пользователя сети Интернет приводим краткий перечень буквенных обозначений основных понятий и терминов, вошедших в табл. 1.2–1.4:

W — наблюдательное относительное число солнечных пятен в американской системе наблюдений;

F10.7 — поток радиоизлучения на длине волны 10,7 см;

X_{bcs} — фоновый поток мягкого рентгена в диапазоне 1–8 Å = = (12,5–1кэВ);

A = 10^{-8} , *B* = 10^{-7} , *C* = 10^{-6} , *M* = 10^{-5} , $X \geq 10^{-4}$ Вт/м²; *B* = 4,8 = $4,8 \cdot 10^{-7}$ Вт/м²; *M* = 8,4 = $8,4 \cdot 10^{-5}$ Вт/м².

S_p — суммарная площадь пятен в миллионных долях полусферы Солнца;

A_p — предварительный планетарный A-индекс (по станциям западного полушария); *A_p* = 26 ÷ 39 — малая магнитная буря; *A_p* = 40 ÷ 69 — умеренная; *A_p* = 70 ÷ 99 — большая; *A_p* = ≥ 100 — очень большая;

A_{msc} — *A_k*-индекс, вычисленный по предварительным значениям *K*-индекса обсерватории ИЗМИР РАН;

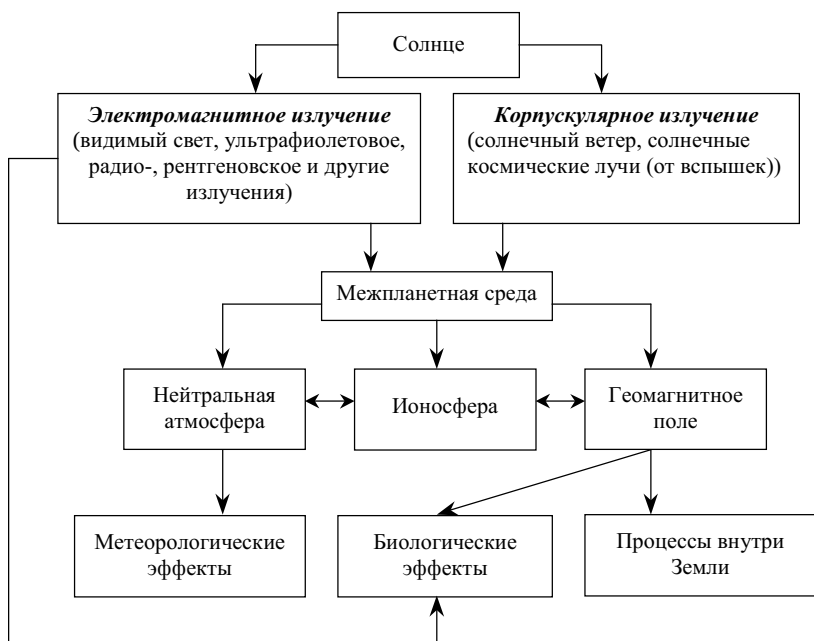
AR — активная область, номер *AR* дается по американской системе наблюдений;

P_t — солнечные протоны с энергией *E* > 10 МэВ; p.f.u. — солнечные единицы потока частиц — пр/см²·с·стер.

Время всегда мировое, гринвичское — UT; [<http://www.izmiran.rssi.ru/space/solar/notations>]

Заканчивая обзор современных представлений о солнечно-земных геофизических связях, целесообразно привести схему таких связей по данным [Физика космоса. 1986. С. 631], а также “Словарик Космической погоды” [Space Weather] и список электронных адресов, где можно почерпнуть самые новые сведения.

Блок-схема системы солнечно-земных связей



Словарик Космической погоды

Aurora — полярное сияние — разноцветное переливающееся свечение в северном небе, которое вызвано выбросами солнечного вещества, ударяющего по магнитосфере Земли. Оно также известно как Северное Сияние, в южном полушарии оно называется Южное Сияние.

Corona — солнечная корона — внешняя атмосфера Солнца, очень разреженная и горячая с температурой в несколько миллионов градусов.

CME — Coronal Mass Ejection — корональные выбросы — гигантские выбросы ионизованного газа из Солнца. Они могут содержать в себе до 10 миллиардов тонн солнечного вещества и лететь со скоростью до 2000 км в секунду.

Coronal hole — корональные дыры — темные области в солнечной короне, которые хорошо видны на рентгеновских изображениях Солнца. Корональные дыры располагаются в областях

с “открытой” магнитной конфигурацией, где магнитное поле не препятствует движению солнечного ветра. Поэтому высокоскоростной солнечный ветер исходит из корональных дыр. Корональные дыры располагаются чаще всего в полярных областях Солнца. На снимке корональная дыра проходит почти по меридиану.

Coronagraph — коронограф — специальный телескоп, который использует диск, закрывающий яркий солнечный свет. Благодаря этому коронограф позволяет видеть внешнюю, слабо светящуюся разрежённую атмосферу Солнца, а также звёзды и планеты, которые расположены у самого солнечного диска.

Full halo coronal mass ejection — ореол коронального выброса — корональный выброс, летящий к Земле. По мере того как этот «пузырь» газа становится все больше и больше, кажется что он окутывает Солнце, формируя ореол вокруг нашей звезды. На коронографе SOHO, был виден диск, закрывающий Солнце. Размер Солнца показан белым кругом.

Geomagnetic field — геомагнитное поле — см. магнитосфера.

Geomagnetic storm — геомагнитная буря — изменения земного магнитного поля, вызванные солнечной активностью. Полярные сияния, нарушения радиосвязи, аварии энергетических систем и нарушения в работе космических аппаратов могут быть вызваны такими штормами.

Magnetosphere — магнитосфера — область космического пространства, окружающего Землю, которая создана магнитным полем нашей планеты. Она защищает нас от многих типов частиц и радиации, летящей к Земле от Солнца вместе с солнечным ветром.

Solar flare — солнечные вспышки — солнечные вспышки являются огромными взрывами на поверхности Солнца. Энергичные частицы из вспышек могут создавать угрозу радиационного облучения для космонавтов и космических кораблей за пределами защитного слоя земной магнитосферы. Солнечные вспышки это не корональные выбросы, хотя они часто происходят вместе.

Solar wind — солнечный ветер — поток ионизованного газа, который летит от Солнца к Земле. Солнечный ветер дует все время, хотя он наиболее интенсивен в течение нескольких дней после корональных выбросов.

Sunspot — солнечные пятна — темные пятна на Солнце. Солнечные пятна — это более холодные области с мощными магнитными полями. В этих полях накапливается энергия для мощных взрывов, таких как солнечные вспышки и корональные выбросы.

Sunspot number — числа Вольфа, или число солнечных пятен — число пятен на видимом диске Солнца — наиболее общая характеристика солнечной активности.

Ссылки на веб-сайты

1. http://www.sec.noaa.gov/SWN/sw_dials.html
2. http://www.sec.noaa.gov/rt_plots/dregion.html 222
3. <http://iki.cosmos.ru/forecast/>
4. <http://www.izmiran.rssi.ru/space/solar/forecast/>
5. <http://nauka.relis.ru/06/0205/06205002.htm>
6. <http://www.who.ch/emf/> [Цифры и факты]
7. <http://www.scimednet.org> [Международная научно-медицинская сеть]
8. <http://www.maik.ru> [МАИК “Наука, интерпериодика”]
9. <http://www.sec.noaa.gov/today.html> [Ежедневный прогноз космической погоды]
10. <http://www.SpaceWeather.com>
11. http://science.nasa.gov/newhome/headlines/ast09mar99_1.htm
12. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/default.stm> [Горячие новости о СА]
13. http://solar.physics.montana.edu/YPOP/ProjectionRoom/latest_SXT_full.html
14. http://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/eptoms/images/display_aero/y2002/display_aero.jpg
15. <http://www.univer.kharkov.ua/astron/sw/swnow.htm>
16. <http://soho.nascom.nasa.gov/pickoftheweek/>
17. <http://www.wdcb.ru/stp/cyc23.html>
18. <http://forecast.izmiran.rssi.ru/> *Вторичный максимум 23 цикла наступил в ноябре 2001 г. с $W^* = 115,6$. Минимум 23 цикла СА был отмечен в декабре 2008 г. начало 24 цикла СА с вероятностью 85 % должен был быть в январе 2009 г, но окончательные данные начала его обсерватория ИЗМИРНА получит не ранее января 2010 г. Наиболее вероятное время максимума текущего цикла наступит в феврале — июне 2013 г. [<http://www.sw.pc.noaa.gov/>» <http://sidc.oma.be/>» <http://www.izmiran.ru>»].

Адреса электронной почты, по которым можно получить информацию о состоянии космической погоды:

1. Петрукович Анатолий apetruko@iki.rssi.ru
2. Ишков Виталий Никитич ishkov@izmiran.rssi.ru

**ЭЛЕКТРОФИЗИКА АКВАЛАНДШАФТА
И СРЕДСТВА ЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

Раздел посвящен основным, определяющим свойствам водной среды, которые формируют условия для функционирования внутренних и внешних ЭМ полей в гидросфере. В течение последних двух-трех десятилетий были открыты новые, удивительные свойства воды, которые заставляют ученых в смежных областях науки (в химии, физике, биологии, медицине и электронике) уделять ей пристальное внимание. И, безусловно, прав Ричард Фейнман, написавший: “Если через тысячу лет обратятся к истории XIX века, то открытия Дж. Максвелла сочтут величайшим событием, а Гражданскую войну в США, происходившую в то время, провинциальным эпизодом ” [Фейнман. 1968. С. 181].

2.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ГИДРОСФЕРЕ

2.1.1. Электрофизические процессы в акваториях и их роль в системе познания природы

2.1.2. Макроскопические электромагнитные характеристики водной среды

2.1.3. Естественные электрические и магнитные поля акваторий

2.1.4. Ритмичность флуктуаций электрического поля

2.1.1. Электрофизические процессы в акваториях и их роль в системе познания природы

В этом разделе:

Рассмотрены закономерности и механизм формирования региональных и локальных электрических и магнитных полей в водоемах, возникновение функциональных геофизических зон, их динамика и ритмы как следствие экзогенных и эндогенных причин,

свойственных водным самоорганизующимся и саморегулирующим-ся экосистемам.

Последовательно изложены электромагнитные методы экспериментального исследования и оценки качества водной среды открытых крупных акваторий, лабораторное моделирование гидрофизических и биологических явлений и процессов в воде, описана новая аппаратура.

Показана перспектива развитая экспресс-контроля и мониторинга экологического состояния крупных естественных водоемов и искусственных водохранилищ.

Прежде всего мы должны рассмотреть свойства самой воды и ее экологическую роль в открытых системах и зададимся рядом вопросов:

Каково участие воды в жизнедеятельности организма?

До недавнего времени полагали, что функции воды в живом организме ограничиваются растворением веществ с целью обеспечения химических реакций. Одним из первых, кто усомнился в такой ограниченной роли воды, был лауреат Нобелевской премии А. Сент-Дьердьи. Он предположил, что вода является регулятором многих жизненно важных процессов в организме. Теперь мы уже говорим о структурированной воде в организме, а кроме того, ее фазовые переходы сопровождаются также изменением и биологических функций, при которых поглощается или выделяется тепло и возникают электрические токи. При реакциях синтеза в организмах животных и растений на каждый грамм воды выделяется свыше 12 ккал тепла.

Какую роль играет вода в образовании электрической энергии в живом организме?

Все биологические процессы сопровождаются участием электрической энергии. Так, при переходе молекулы воды из льдоподобного состояния в жидкое, т.е. при осуществлении механической работы сокращения мышц, необходим электрический импульс. При обратной реакции выделяется такое же количество электричества. Поэтому сам по себе переход воды из одного состояния в другое не является источником электричества. Источником электрической энергии может быть только синтез воды. Известно, что в среднем в день человеческий организм синтезирует около 500 см³ метаболической воды. Происходит это за счет либо распада жиров, либо соединения кислорода с водородом. Кислород, необходимый для этой реакции, доставляется при дыхании, а водород образуется в результате естественной реакции электролиза в клеточной протоплазме.

При образовании одной молекулы H_2O выделяется энергия, эквивалентная 9,5 эВ. Интересно, что такой принцип получения электрической энергии был использован американскими космонавтами Г. Купером и Ч. Конрадом при полете космического корабля "Джемини-5". Синтез воды был основным источником электрической энергии для всех систем корабля. Несколько позже экспериментально было обнаружено существование межклеточных электрических токов, которые, по всей вероятности, несут организму достаточную энергию; до недавнего времени медики не принимали во внимание этого при составлении физиологических норм питания.

Участвует ли вода в нервной деятельности?

Импульсы в нервной системе передаются в организме посредством электрохимических процессов, передвижением ионных электрических токов. Известно, что нервные волокна проводят электрический ток примерно в 60 млн. раз медленнее, чем металл, и это связано с химическими реакциями в молекуле H_2O (разложение на гидроксил и водород и снова воссоединение) и с перемещением атомов.

Какова роль воды в происхождении жизни?

В 70-х годах прошлого столетия биофизик и генетик Френсис Харри Комптон Крик (Crick), Нобелевский лауреат, и его сподвижники высказали веский аргумент в пользу космического происхождения жизни на Земле, суть которого состоит в понимании соотношений ионов водорода и кислорода, заполняющих среду обитания. По мнению Ф. Крика и его соавторов, соотношение пропорций различных элементов в земной коре и морской воде в значительной мере определяется их ионным потенциалом, т.е. величиной заряда соответствующего иона, деленной на его радиус. При малом ионном потенциале ион водорода в молекуле воды притягивается к иону кислорода сильнее, чем ион взаимодействующего с водой элемента, и последний остается в воде почти свободным. Так ведут себя по отношению к воде щелочные и щелочноземельные металлы. Если ионный потенциал сильнее, водород несколько сдает свои позиции, и образуются гидроокисные соединения, обычно нерастворимые. Такое поведение типично для большинства элементов в центральной части Периодической системы, в частности, для переходных металлов, к числу которых относится и молибден. Если, наконец, ионный потенциал высок, водород в значительной мере вытесняется и образуются обычно хорошо растворимые окислы.

Аргумент этот опровергался учеными бывшего СССР, но проблема остается не решенной [Природа. 1976. № 11. С. 132]*.

Таким образом, еще раз можно упомянуть добрым словом Д.И. Менделеева, который в свое время говорил о неисчерпаемой роли воды в природе. И, пользуясь возможностью открыто писать о бессмысленной растрате такого дара Природы, как вода, сошлюсь на реплику чл.-кор. РАН А.А. Сидорова, который на Общем собрании РАН справедливо возразил академику В.Л. Макарову по поводу второстепенной роли геологических недр в оценке богатства страны и первостепенной роли “мозгов” [Вестник Российской Академии Наук. 2004. Т. 74, № 1. С. 71–72]. Вода — неотъемлемая субстанция земных недр, первейшее и наиболее экологически безопасное наше богатство.

2.1.2. Макроскопические электромагнитные характеристики водной среды

Отличие геофизики водного ландшафта от геофизики земной коры и атмосферы состоит в том, что сумма абиотических электромагнитных факторов, вторгающихся в жизнь, в лимнических и морских системах должна исследоваться и учитываться не только как неживой компонент биосферы, но и как носитель физического воздействия на живое вещество природы. Здесь должны рассматриваться не только общие физические закономерности, свойственные нашей планете, но и исследоваться тонкие, локальные характеристики среды и ее обитателей для каждого полного или неполного комплекса любого ранга.

Напомним, что геомагнитное поле и земные электрические токи в совокупности с внешними (сторонними) силовыми полями обуславливают разнообразные электрофизические явления в природных открытых водных системах. В таких системах электромагнитные свойства воды меняются от точки к точке и могут быть представлены как функции пространственных координат, что в свою очередь обуславливает неоднородности в распределении и распространении электромагнитных полей искусственного и естественного происхождения (см. разд. 1.1.3).

Для установления взаимосвязей, характеризующих электрофизические процессы, протекающие в природных водоемах, и создания в последующем соответствующей теории электромагнитного поля гидросферы, требуется выбрать определенную совокупность

*[Зенин С.В. Развитие информационных представлений о структурном состоянии воды. См. литературу к введению, № 7, тезисы № IV, с. 28. СПб, 2006].

физических характеристик. Эти характеристики должны отличаться достаточной универсальностью, а следовательно, и способностью количественно отражать многообразие процессов. В качестве основных характеристик нами используются диэлектрическая проницаемость и электрическая проводимость воды.

Следует отметить, что многообразие электрофизических процессов в гидросфере крайне велико. Оно обусловлено комплексом меняющихся естественных и антропоферных ее компонентов (ионных, коллоидных, биогенных включений, гетерогенных примесей сточных вод и т.д., которые создают переменную концентрацию потенциалообразующих примесей в первоначально естественно-однородной среде) и связанным с этим появлением неоднородности электрической проводимости, электродиффузионных, электрокинетических и других процессов, сопровождающихся генерацией внутреннего электрического поля воды.

Электромагнитные свойства водных масс зависят и от внешних воздействий, которые приводят к колебанию плотности зарядов в локальных объемах, к возникновению механических перемещений и внутриводных конвективных движений, к образованию вихревых сгустков в водной среде. Динамическая неоднородность среды и ее нестабильность в этом случае проявляются в циклической периодичности смещений заряженных частиц — в возникновении и исчезновении иерархии микровихрей, вовлекающих в тепло- и массообмен водные ассоциаты самой разнообразной структуры.

Особенно следует остановиться на проблеме неравновесности природных водных экосистем, проявляющейся в флуктуациях электрического поля. Естественные флуктуации электрического поля в проводящих средах (атмосфера, вода) проявляются как хаотическое изменение потенциалов, токов и зарядов, обусловленное дискретной природой электричества. Флуктуации электрических характеристик среды — процесс случайный и зависящий от беспорядочного теплового движения носителей заряда, неоднородности концентрации ионов и коллоидных частиц, распространения электромагнитных волн, генерируемых электрическими установками, и т.д. Например, электрические флуктуации могут резко возрасти за счет медленной случайной перестройки структуры проводника под действием внешнего тока с частотой менее 1 кГц, превышая на несколько порядков флуктуации, обусловленные только тепловым движением [ФЭС. 1983. С. 819]. Поэтому в статистической физике электрические флуктуации рассматриваются как особый класс процессов, характеризующих неравновесность открытых систем, в которых количественная оценка флуктуаций основана на методах математической статистики и теории вероятности. Свойства открытых систем описываются с

помощью неравновесных их характеристик (кинетических коэффициентов), например, электропроводимости, вязкости и других, которые пропорциональны так называемым экстенсивным параметрам (внутренней энергии U , энтропии S и т.д.) — интегралам по времени от временных корреляционных функций потоков физических величин. Так, электропроводимость пропорциональна интегралу от корреляционных функций плотностей токов.

В общем случае существует связь между флуктуациями физических величин в равновесном состоянии и неравновесными свойствами системы при внешнем возмущении. Связь эта определяется **флуктуационно-диссипативной теоремой**, установленной Х. Калленом и Т. Уэлтоном в 1951 г. (США) [ФЭС, 1983, с. 820]. Внеземные источники генерации электромагнитного поля, проникающего в воду, обуславливают его флуктуации, частота которых соизмерима с частотой гидродинамических колебаний и турбулентных пульсаций. В этом случае возникают методические трудности в разграничении источников генерации поля, которые могут быть разрешены разработкой и применением специализированных технических средств (см. разд. 2.2).

Крупномасштабное механическое движение самой воды в магнитном поле Земли приводит к возникновению электродвижущей силы, функционально связанной с мощностью возмущающего фактора и частотой его колебаний.

Диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость и электрическая проводимость воды как основные характеристики, отражающие особенности электрофизики природных водоемов*

Электрические свойства воды исследуются уже около столетия. Даже краткий обзор современных сведений о них не позволит всесторонне ознакомить читателя с состоянием изученности данного вопроса. Поэтому следует обратить внимание на опубликованные в последнее время монографии, где можно почерпнуть необходимые сведения [Заринский, Ермаков, 1970; Богородский и др., 1971; Эйзенберг, Кауцман, 1975; Попов и др., 1979; Грилихес, Филановский, 1980; Kalmijn, 1981]. Тем не менее, имеющихся сведений об этих свойствах в природных объектах еще недостаточно. Так,

*Вопрос об электромагнитных свойствах твердой фазы воды не рассматривается ввиду достаточно хорошего освещения его в специальных публикациях.

например, диэлектрическую проницаемость приходится до сих пор для расчетов всюду принимать одинаковой, как для дистиллированной воды, и применять теорию лишь к растворам низкой концентрации при атмосферном давлении. На электрические свойства жидких систем большое влияние оказывают летучие компоненты (пары чистой воды, двуокись углерода и др.). Это влияние также не может считаться изученным.

Диэлектрическая проницаемость ϵ . Для проводящих сред (водные растворы электролитов) плотность тока проводимости обычно превышает плотность тока смещения, а для диэлектриков оправдывается обратное соотношение. Поэтому основной электрической характеристикой чистых диэлектриков (сред, не содержащих ионных примесей) является ϵ , а проводящих растворов — электрическая проводимость (частота измерения $10^6 \div 10^7$ Гц). Величину ϵ определяют полярные свойства молекул вещества, температура, концентрация и свойства примесей, а также частота внешнего поля, на которой осуществляется измерение. Для воды диэлектрическая проницаемость ϵ сильно уменьшается с ростом температуры*, в переменном поле она имеет температурный максимум; при постоянной температуре значение ϵ уменьшается с ростом частоты поля. Частотная дисперсия ϵ воды и льда рассмотрена в работах [Богородский и др., 1971; Эйзенберг, Кауцман и др., 1971; Александров, 1973]. При измерениях ϵ воды на частотах $10^5 \div 10^8$ Гц температурный коэффициент ее равен в среднем $0,35^\circ\text{C}^{-1}$ (расчеты автора по материалам Р. Хиппеля). В работе [Эйзенберг, Кауцман и др., 1971] приводятся данные о температурном коэффициенте $(d\ln \epsilon_0/dt)_p$, полученном из уравнения Малмберга и Мариотта $\epsilon_0 = 87,740 - 0,40008t + 9,398 \cdot 10^{-4}t^2 - 1,410 \cdot 10^{-6}t^3$, который равен (и приблизительно постоянен) $-4,55(\pm 0,03)10^{-3}^\circ\text{C}$ в интервале температур от 0 до 100°C . При рассмотрении макроскопических проявлений свойств среды необходимо заметить, что упомянутая частотная дисперсия ϵ , а равно и других электрических характеристик, не связана с собственными колебаниями ионов, молекул, атомов и электронов вещества. Эта дисперсия монотонно изменяется с частотой, что справедливо и для многокомпонентных сред.

В области дисперсии ϵ оказывается сложной величиной и выражается комплексным числом. Действительная (ϵ') и мнимая (ϵ'') части относительной диэлектрической проницаемости для каждого индивидуального вещества характеризуются наибольшей изменчивостью в

*Р. Чанг пишет об обратном эффекте, что вызывает сомнение.

определенном диапазоне частот, период колебания которых близок к времени релаксации (рис. 2.1). Степень чистоты воды обуславливает значение ϵ : наличие суспензированных или ионных примесей влечет за собой резкое возрастание тангенса угла диэлектрических потерь. Поэтому высокочастотный химический анализ (на основе измерения электрических свойств растворов) в настоящее время разработан недостаточно, поскольку основным затруднением при его выполнении является приготовление чистых эталонных веществ [Заринский, Ермаков, 1970]. Иллюстрируя изложенное, приведем некоторые результаты экспериментальных измерений диэлектрических свойств воды.

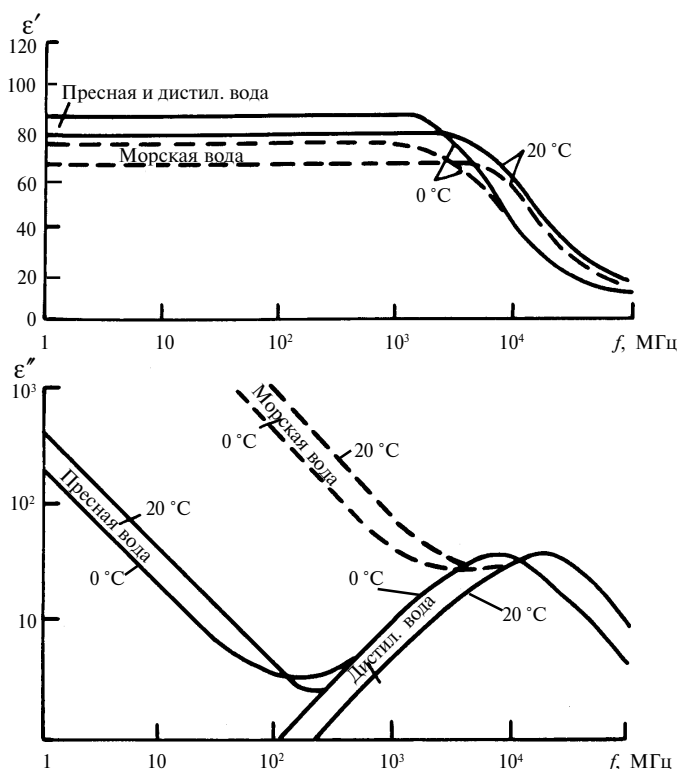


Рис. 2.1. Изменчивость диэлектрической проницаемости воды в зависимости от ионного состава исследуемой среды и частоты измерений. Сплошная линия — пресная и дистиллированная вода, штриховая — морская [Saxton, Lane, 1952]

Расчеты J.A. Saxton и J.A. Lane [Saxton, Lane, 1952; Александров, 1973] показывают, что диэлектрические свойства дистиллированной, пресной и морской воды идентичны для частот от 1 до $2 \cdot 10^4$ МГц и линейно зависят от температуры в диапазоне от 1,5 °C ($\epsilon' = 87$) до 45 °C ($\epsilon'' = 70$) (см. рис. 2.1). В.В. Богородским с соавторами показано, что с ростом концентрации раствора значение ϵ сначала медленно возрастает, а затем, достигнув некоторого предела, резко падает, и максимальное значение ϵ и скорость ее уменьшения с ростом концентрации тем больше, чем тяжелее ионы электролита [Богородский и др., 1971; Александров, 1973]. Так как пресная и морская вода представляет собой малоконцентрированные растворы электролитов, то значения ϵ у них несколько больше, чем у дистиллированной воды.

Авторы так объясняют изменчивость значения ϵ с ростом концентрации электролита: при увеличении концентрации ионных носителей наблюдается рост пространственного объемного заряда, т. е. идет деформация его. Под действием переменного внешнего поля ионные заряды индуцируют локальные поля, направленные против вектора приложенного поля. Напряженность “внутреннего поля” возрастает, диэлектрическая проницаемость увеличивается.

По данным авторов работы [Но, Hall, 1973], пресная вода на частоте измерения 2,652 ГГц при атмосферном давлении и разной температуре характеризуется следующими данными:

$t, ^\circ\text{C}$	5,50	15,00	24,00
ϵ'	80,52	79,57	77,44
ϵ''	20,03	13,75	10,18

В.В. Богородский с соавторами [Богородский и др., 1974] при радиолокационных зондированиях пресных озер Карельского перешейка полагали, что значение ϵ (~ 81) практически не зависит от давления на глубинах до 50 м, что позволяло принимать неизменной скорость распространения радиоволн (радиолокационный сигнал) $c_b = 33,3$ м/мкс и получить достоверные данные о глубинах и других характеристиках объекта. Однако, если принимать во внимание неоднородность воды (что в настоящее время стало наблюдаться даже в ранее олиготрофных озерах), значение ϵ необходимо специально контролировать в лабораторных условиях. Так, например, авторские измерения ϵ проб ладожской воды с глубин 150 и 200 м дают значения 75,6 и 72,2, соответственно; использована уникальная аппаратура конструкции ВНИИнаучприбор образца 1970–1980-х годов с частотой измерения 1,5 кГц, данные измерений приведены к температурному стандарту [Александров, 1973; 1985] (рис. 2.2).

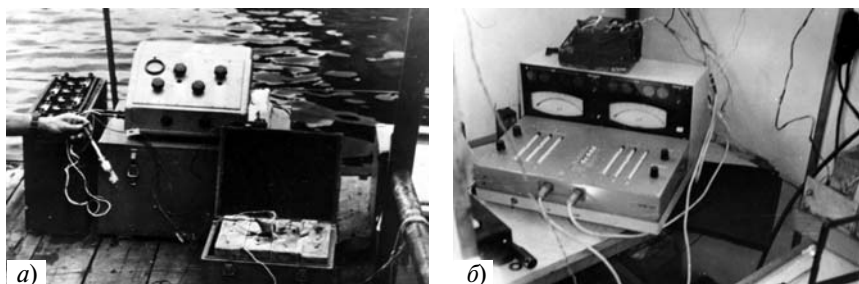


Рис. 2.2. Кондуктометрическая аппаратура конструкции ВНИИнаучприбор (1972–1980 гг.):
а — образец полевого назначения; *б* — образец лабораторного назначения с автономным питанием КД-1

Следует отметить, что высокая диэлектрическая проницаемость воды (около $78,3 \div 78,5$ при 25°C) почти в 4 раза больше, чем у ацетона ($\epsilon = 20,9$), в 15,6 раз больше, чем у хлороформа ($\epsilon = 4,7$), и в 35 раз больше, чем у бензола ($\epsilon = 2,3$). Поэтому некоторые химические реакции в указанных растворителях идут быстрее, чем в воде [Леенсон, 1982].

Оуэн и др. [Эйзенберг, Кауцман и др., 1971] измерили коэффициент зависимости ϵ_0 от давления и нашли, что значение $(d\ln\epsilon_0/dp)_T$ увеличивается от $45,1 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ при 0°C до $52,4 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$ при 70°C .

Авторы (Руше и Гуд, 1966) получили отрицательные результаты [Эйзенберг, Кауцман и др., 1971]. Измерения ϵ чистой воды с помощью СВЧ-диэлькометра проводились Л.И. Киваевой [Физико-химические аспекты..., 1979] (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Диэлектрическая проницаемость чистой воды [Киваева, 1979]

$t, ^\circ\text{C}$	24	20	20	10	10
Частота СВЧ поля, ГГц	9,75	9,37	2,81	9,37	2,81
ϵ'	54,5	61,6	77,1	55,1	80,1
ϵ''	30,9	31,5	12,6	36,6	16,2
ϵ_0	78,5	81,5	80,5	84,5	83,8

* ϵ' и ϵ'' — действительная и мнимая части относительной диэлектрической проницаемости для каждого индивидуального раствора.

Магнитная проницаемость μ и магнитная восприимчивость χ_m воды

Вода — диамагнитное вещество и по классификации [Яворский, Детлаф, 1974] относится к группе “аномальных” диамагнетиков. Способность веществ намагничиваться под действием внешнего магнитного поля характеризуется *магнитной восприимчивостью* χ_m . Величина эта для указанной группы веществ очень мала, отрицательна и зависит от температуры (табл. 2.2) [ФЭС, 1964, с. 517].

Таблица 2.2

Магнитная восприимчивость воды [ФЭС, 1964]

Фазовое состояние среды	Температура, К	$\chi_m \cdot 10^6$
Вода жидкая	293	–12,97
Вода жидкая	273	–12,93
Вода твердая	273	–12,65
Тяжеловодородная вода жидкая	276,8	–12,76
Тяжеловодородная вода твердая	276,8	–12,54

Авторы работы [Калинников, Ракитин, 1980] дают $\chi_m = -13 \cdot 10^{-6}$.

Рост температуры от 5 до 70 °С обуславливает изменение χ_m чистой воды от $-2,9 \cdot 10^{-6}$ до $-0,62 \cdot 10^{-6}$; авторы работы [Викторина и др., 1971] пользовались в качестве эталона бидистиллятом с $\chi_m = -0,72 \cdot 10^{-6}$.

Все исследователи магнитных свойств воды отмечают существенную зависимость ее магнитной восприимчивости от вида и концентрации примесей. Например, даже естественно растворенный O_2 зачастую обладает парамагнетизмом, который может превышать диамагнетизм воды.

В этом случае магнитная восприимчивость раствора (природной воды) обусловлена ионными и молекулярными компонентами и их связью с растворителем (водой).

Как правило, парамагнетизм раствора (соединения) слабее парамагнетизма исходных веществ. В работе [Викторина и др., 1971] исследовался парамагнетизм “модифицированной воды”, представляющей собой раствор тяжелых молекул аномального компонента (молекулярная масса около $150 \div 180$) в обычной воде. Для столбика модифицированной воды с низким содержанием аномального компонента магнитная восприимчивость более $-0,38 \cdot 10^{-6}$. Полученные данные, указывающие на снижение диамагнитных свойств раствора по сравнению с чистой обычной водой (бидистиллят,

$\chi_m = -0,72 \cdot 10^{-6}$), можно интерпретировать как результат влияния парамагнетизма молекул аномального компонента. Значение магнитной восприимчивости в объеме воды χ_v при 20 °C (293 K) в системе СГС равно: $-7,2 \cdot 10^{-7}$ (безразмерная); в системе СИ $\chi_v = -9 \cdot 10^{-6}$ (безразмерная). На практике магнитную проницаемость μ для всех модификаций воды при различных частотах, температурах и концентрациях растворов считают величиной постоянной, т. е. пользуются для расчетов магнитной постоянной μ_0 . Величина μ_0 имеет такую же размерность, как абсолютная магнитная проницаемость — генри на метр (Гн/м).

Практическая значимость изменчивости χ_m в природных водах в настоящее время учитывается при использовании их в качестве теплоносителя в энергетических установках. Известно, что после специальной обработки природной воды ее свойства как теплоносителя значительно улучшаются в связи с возникновением так называемого противонакипного эффекта. При этом принимается, что именно диамагнитная восприимчивость определяет противонакипный эффект. Смысл этого эффекта был выяснен в работах [Йовчев, 1970; Викторина и др., 1971], где были использованы официальные справочные данные констант ионных компонентов. В результате исследований было установлено, что диамагнитная восприимчивость воды зависит преимущественно от диамагнитной восприимчивости сульфатных и бикарбонатных анионов, которые и определяют противонакипный эффект. Противонакипный эффект, как функция диамагнитной восприимчивости, позволяет дать предварительную оценку пригодности данного вида воды для обработки ее магнитным полем. Диамагнитная восприимчивость воды понижается с увеличением содержания в ней солей. Как показали авторы работы [Викторина и др., 1971], накипный эффект образуется на стенках установки за счет кристаллизации карбонатов, сульфатов и силикатов при наличии в воде ферромагнитных компонентов — окислов железа и их гидратов. При пропускании такой воды через магнитную установку ферромагнитные частицы намагничиваются, что обуславливает кристаллизацию солей в самом объеме воды, а не на стенках. Следствием этого является уменьшение накипи на стенках. Намагниченные ферромагнитные частицы, по всей вероятности, являются центрами кристаллизации. При отсутствии ионов железа противонакипный эффект не обнаружен.

Известно, что магнитная восприимчивость всех соединений, и воды в частности, состоит из диа-парамагнитных составляющих. При $\chi_m = -12,0 \cdot 10^{-6}$ (эксперимент) вклад парамагнитного компонента

воды равен $\chi_p = 1,07 \cdot 10^{-6}$ [Ромашкан, 1979]. Несмотря на то, что χ_m в природных водах в настоящее время учитывается лишь при использовании их в качестве теплоносителя в энергоустановках, выявились новые интересные данные о зависимости χ_m от воздействия на воду слабых магнитных полей, сравнимых по магнитной индукции с геомагнитным (порядка $B = 1,2 \cdot 10^{-4}$ Тл, т. е. “двойное геомагнитное поле” [Галаницкий, 1974; Семихина, 1979]). Это наталкивает на мысль о возможности “естественной магнитной обработки” природной воды, протекающей в узких заливах и протоках, своеобразных “каналах”, географически расположенных в районах с высокой геомагнитной напряженностью. Например, такой район находится в Кондопожском заливе Онежского озера, он ориентирован в направлении с северо-запада на юго-восток, где за счет постоянно действующего стока от коллекторов кондопожского целлюлозно-бумажного завода и естественного уклона дна к юго-востоку загрязненная вода, пройдя более чем 30-километровый путь, попадает в Онежское озеро. Под влиянием магнитного поля изменяется смачиваемость водой поверхности кристаллических твердых тел — окислов и минералов — в результате чего усиливается адсорбция примесей, особенно сульфатных и биокarbonатных анионов, которые в основном и определяют диамагнитную восприимчивость воды [Александров, 1985].

В последнее десятилетие появилось огромное число публикаций, свидетельствующих о взаимодействии живых объектов (их тканей) с внешними источниками магнитных полей. Зачастую они трактуются как факты существования “биомагнитных” полей. Этот вопрос, мы полагаем, тяготеет также к проблемам выше упомянутого эффекта омагничивания воды. Именно наличие ферромагнетиков в живых тканях приводит к изменению их магнитной восприимчивости, к “способности” живого объекта пользоваться своим внутренним магнитным компасом. Хорошим примером, иллюстрирующим физическую природу явления, может считаться обнаруженное Р. Блейкмором в 1975 г. перемещение бактерий по магнитным силовым линиям в болотных водах штата Массачусетс [Blakemore, Frankel, Kalmijn, 1980]. Позже, в 1979 г. Блейкмор доказал методами мессбауэровской спектроскопии, что “магнитные бактерии” содержали частицы природного ферромагнетика ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), которые в процессе метаболизма накапливаются ими из растворенных в воде ионов железа*.

Подобные бактерии были вскоре обнаружены и в океане, и, наконец, ферромагнитные частицы после рентгеновского

*Подробные и новые данные о природе “биомагнетизма” см. в ч. 3 настоящего издания.

микроанализа были найдены в глазах и головном мозге голубей и пчел. Таким образом, изучение магнитной восприимчивости воды и живых тканей, обусловленной их ионным составом, по всей вероятности, конкретизирует в ближайшее время научные представления о многих загадочных явлениях в магнитобиологии.

Сведений о дисперсии μ воды в переменных полях, т. е. $\mu = f(\omega)$, очень мало [ФЭС, 1964, с. 517].

Удельная электрическая проводимость χ . Эта характеристика воды и водных растворов наиболее изучена [Александров, 1973; Попов и др., 1979; Грилихес, Филановский, 1980].

Природные воды представляют собой в основном растворы смесей сильных электролитов. Это проводящие среды второго рода, поскольку электрические заряды в растворах под действием внешнего электрического поля переносятся ионами. Теория ионной проводимости дает известное уравнение для расчета величины χ :

$$\chi = \sum v m_i F z^{\pm} (u_0^{+} + u_0^{-}) c^{-1} \quad (2.1)$$

или в практических единицах СИ:

$$\chi = 10^4 \sum v m_i z^{\pm} (u_0^{+} + u_0^{-}), \text{ См/м.} \quad (2.2)$$

Для расчета по таким формулам необходимы данные по основным водорастворимым компонентам природных вод, которые приведены в специальных таблицах, например в монографиях Ф.Н. Фритча (1963 г.), В.В. Скорчеллетти (1970 г.), Р. Чанга (1980 г.), и в справочной литературе. Наличие электрической проводимости даже у совершенно чистой воды, лишенной каких-либо примесей, объясняется частичной диссоциацией ее на ионы H^{+} и OH^{-} . При 25 °С концентрация диссоциированных ионов H^{+} и OH^{-} в воде составляет всего $1,004 \cdot 10^{-7}$ моль/л. Концентрация молекул (H_2O) в воде $C_{\text{H}_2\text{O}} = 10^9$ мкг/л и обуславливает проводимость совершенно чистой воды, которая по теоретическим оценкам дает значение $\chi \approx 3,8 \cdot 10^{-6}$ См/м. Соприкосновение воды с воздухом приводит это значение чистой воды к величине $0,8 \cdot 10^{-5} \div 0,8 \cdot 10^{-4}$ См/м.

В полярных жидкостях степень диссоциации веществ всегда выше, чем в неполярных, что обуславливает и более высокую их проводимость.

Чистая вода является плохим проводником электричества. При температуре 18 °С у совершенно чистой воды $\chi = 3,8 \cdot 10^{-6}$ См/м [ФЭС. 1964. С. 517], у дистиллированной воды — $2 \cdot 10^{-4}$, у ладожской — $(7 \div 8) 10^{-3}$ и у морской $3 \div 7$ См/м.

Ранее было показано, что при измерении электрических свойств среды наблюдается их дисперсия в зависимости от частоты, на

которой идут измерения. Поэтому деление веществ и природных водных растворов на проводники и диэлектрики является условным. В самом деле, земля (сухая или влажная), пресная и морская вода, помещенные в переменное электромагнитное поле, могут характеризоваться либо проводящими, либо диэлектрическими свойствами. Сущность качественного различия между проводниками и диэлектриками состоит в следующем.

При гармонически изменяющемся внешнем поле (например, электромагнитное поле радиочастотного диапазона), действующем на раствор, известно соотношение

$$(i_{\text{пр}} / i_{\text{см}})_{\text{макс}} = \chi / (\omega \epsilon); \quad (2.3)$$

В идеальном диэлектрике $\chi = 0$, и в такой среде токи проводимости отсутствуют, а существует лишь ток смещения; в идеальном проводнике $\chi \rightarrow \infty$, и здесь, наоборот, существует ток проводимости (ток смещения пренебрежимо мал). Для соотношения (2.3) возможны два случая: 1) $\chi / (\omega \epsilon) \ll 1$ или $\epsilon \omega \gg \chi$, тогда среда характеризуется как диэлектрик, и 2) $\chi / (\omega \epsilon) \gg 1$, или $\epsilon \omega \ll \chi$, тогда среда характеризуется как проводник [Александров, 1973; 1985].

Рассмотренные критерии по формуле (2.3) включают частоту электромагнитного поля ω . Видно, что с ростом частоты измерения ω проводящие вещества приобретают диэлектрические свойства. Приближенный расчет по формуле (2.3) позволяет перейти к так называемой критической частоте $f_{\text{кр}}$, т. е. частоте, ниже которой можно пренебречь токами смещения по сравнению с токами проводимости (табл. 2.3) [Заринский, Ермаков, 1970].

Таблица 2.3

Расчетные значения $f_{\text{кр}}$ для некоторых жидких сред

Вещество	χ , См/м	ϵ_r	$f_{\text{кр}}$, Гц
Ртуть	$1 \cdot 10^6$	1	$1,8 \cdot 10^{16}$
Вода морская	4	80	$0,9 \cdot 10^9$
Водный раствор хлористого калия с концентрацией 0,01 моль	0,1	80	$2,2 \cdot 10^7$
Вода (бидистиллят)	$1 \cdot 10^{-4}$	80	$2,2 \cdot 10^4$

Для жидких диэлектриков, например для бензола, имеющих малую величину ϵ_r и исчезающе малую величину χ , значение $f_{\text{кр}}$ еще меньше. Эти ориентировочные оценки показывают, что для хорошо проводящих растворов основной электрической характеристикой,

измеряемой на частотах $\sim 10^6 \div 10^7$ Гц, является электрическая проводимость, а не диэлектрическая проницаемость, и наоборот.

В промежуточных состояниях вклад, вносимый токами проводимости и токами смещения в полный ток, определяется физико-химическими свойствами конкретных сред. По всей вероятности, в пресной воде ток смещения играет более существенную роль, чем в морской. Учет частоты показывает, что на низких частотах морская вода ($\chi / \varepsilon \omega \approx 1 \div 10^{-4}$) является проводником, а на сверхвысоких

($\chi / \varepsilon \omega \approx 1 \div 10^{10}$) становится отчетливо выраженным диэлектриком. Оценка дисперсии электропроводимости в зависимости от рабочей частоты измерения выполнена в работе [Заринский, Ермаков, 1970].

Анализ электромагнитных свойств воды, льда и снега, проведенный в работе [Богородский и др., 1971], показал, что, несмотря на сложный характер зависимости их от частоты электромагнитного поля измерения, можно выделить так называемый “спокойный диапазон частот”, в котором свойства этих сред практически не зависят от частоты. Для дистиллированной и пресной воды и образовавшихся из них снега и льда он занимает область от 10^7 до $3 \cdot 10^8$ Гц (при $\lambda = 30 \div 1$ м). Для морской воды и ее льда он лежит в области $50 \cdot 10^9$ Гц (при $\lambda = 60$ см). В работе Ф. Эме [Эме, 1967], однако, есть указание на то, что при частоте измерения 10^4 Гц электрические характеристики пресной воды не зависят от частоты. При кондуктометрических измерениях следует обратить внимание на возможность несовпадения результатов, если применяются установки с очень высоким напряжением ($\sim 2 \cdot 10^7$ В/м). В этом случае скорость движения ионов в растворе достигает 0,1 м/с, время релаксации уменьшается до $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ с (по сравнению с $\tau \sim 10^{-7}$ с для растворов с $C \approx 0,01$ моль), и ион начинает двигаться, не испытывая влияния со стороны ионной атмосферы. Тогда электрическая проводимость возрастает, что известно под названием эффекта Вина (W. Wien, 1927).

Континентальные водоемы отличаются большим разнообразием в химическом составе вод, условиями температурного режима, морфометрией и т. д. Поэтому электрическая проводимость в естественных условиях изменяется в широких пределах в зависимости от концентрации главных ионов, температуры воды в момент измерения, гидростатического давления в точке измерения. Тем не менее, основные экспериментальные и теоретические работы по учету этих факторов касаются морской воды [Воробьев, 1963; Александров, 1973; Попов и др., 1979]. Пресноводные объекты только в последние десятилетия начинают обследоваться в целях охраны окружающей среды, поэтому сведения об их удельной электрической

проводимости весьма скудны. В этом отношении следует отметить монографию Н.И. Воробьева [Воробьев, 1963], в которой рассмотрены вопросы концентрационных и температурных влияний на кондуктометрическую характеристику природных вод. Обычно удельная электрическая проводимость вод суши, т. е. растворов с незначительной концентрацией электролитов ($0,1 \div 0,001$ моль), колеблется от $0,1 \cdot 10^{-2}$ до $2,4 \cdot 10^{-2}$ См/м. Минеральную часть воды составляют основные потенциалобразующие ионы: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . Этими ионами в основном и обусловлено значение χ природных вод. Присутствие иных ионов, например, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{3+} , Al^{3+} , NO_3^- и других, существенно не влияет на величину χ , так как они довольно редко встречаются в воде в значительных количествах. Кремневая кислота и органические вещества в виде коллоидов не оказывают существенного влияния на измерения χ . На это следует обратить особое внимание. Загрязненные воды, например, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности, насыщены органическими компонентами, индикация их только методом измерения удельной электрической проводимости может оказаться неполноценной.

В ходе длительных наблюдений было установлено, что целесообразно контроль качества воды осуществлять также, применяя электрополюметрию загрязненных водных масс, содержащих органические примеси (см. ч. 4). Незначительное изменение значения χ вызывает присутствие в воде углекислоты и других растворенных газов (исследования В. Кито, цит. по [Воробьев, 1963]). Есть сведения об уменьшении величины χ чистой воды в 2–3 раза, если пробу оставить в соприкосновении с воздухом в течение суток (Дебнер, 1927, цит. по [Александров, 1973]). Подобные замечания, касающиеся покоящейся и движущейся воды, сообщались в других работах. Такие явления пока либо не находят объяснений, либо их связывают с процессами структурной релаксации воды, содержащей растворенные компоненты. Природные воды (рН от 5,5 до 9,0) содержат незначительное количество водородных и гидроксильных ионов. Например, при рН = 5,5 концентрация ионов водорода равна $3,01 \cdot 10^{-6}$ моль/л. И несмотря на высокую подвижность ионов водорода, их вклад в суммарную электрическую проводимость не превышает $0,1 \div 0,2$ %.

Температурный коэффициент электрической проводимости изменяется в пределах $2,1 \div 3,0$ % на $1^\circ C$ для различных образцов природной и специально приготовленной воды, т. е. при изменении температуры воды от 0 до $30^\circ C$ значение χ приблизительно удваивается. Для ладожской воды, например, температурный коэффициент в диапазоне температур $5 \div 18^\circ C$ по результатам обработки около 300 проб равен $2,41\% \cdot ^\circ C^{-1}$ (рис. 2.3) [Александров, 1973; 1985].

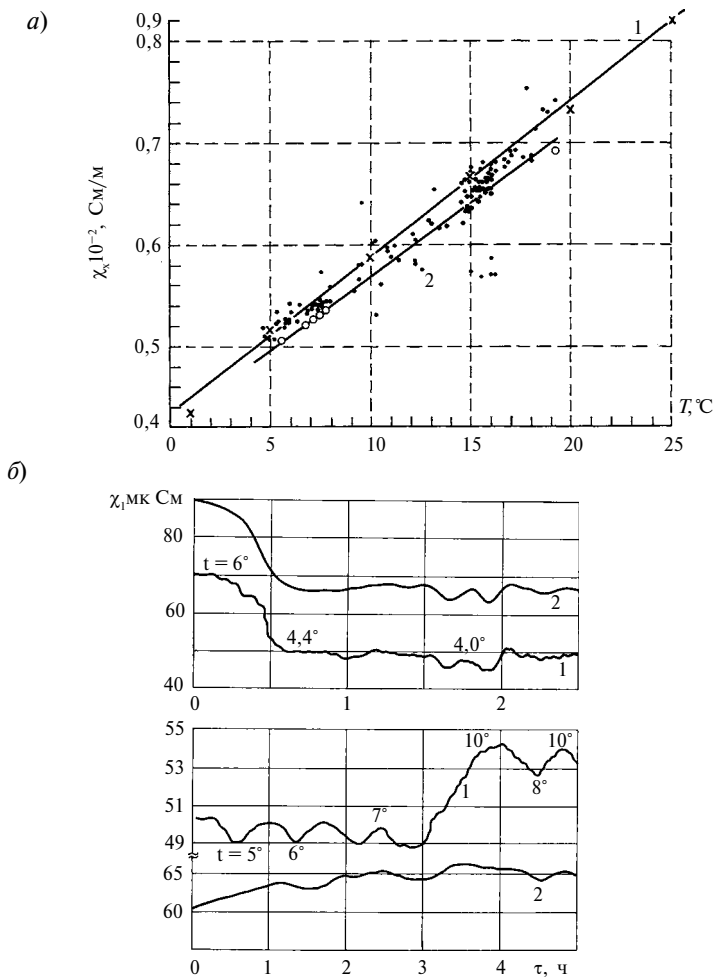


Рис. 2.3. Высокоточные измерения удельной электрической проводимости воды Ладожского озера: а — зависимость χ от температуры: 1 — в диапазоне $1 \div 25$ °С, основная погрешность 1 % (эталон, глубина 200 м); 2 — в диапазоне $6,8 \div 19,2$ °С, основная погрешность 4 %; б — записи значения χ в поверхностном слое с чувствительностью 0,2 %; от о. Ускалання до о. Пусунсари; то же от о. Пусунсари до г. Приозерска; 1 — непосредственная запись, 2 — с поправкой на температуру

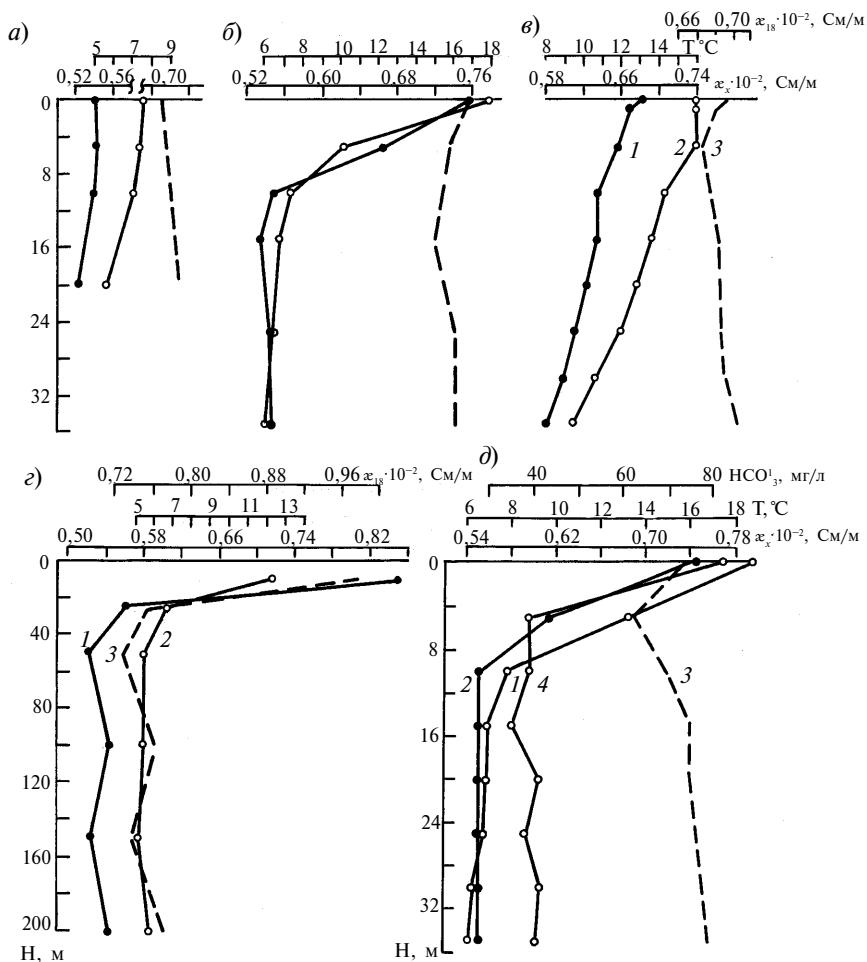


Рис. 2.4. Распределение электропроводности, температуры воды и концентрации главного иона HCO_3^- в Ладожском озере: а — период начала летнего прогрева; б и в — период штилевой погоды и формирования слоя скачка гидрофизических характеристик в районах с различными глубинами; в — период перемешивания (зал. Рыбный); д — связь электропроводности воды с концентрацией главного иона HCO_3^- (зал. Рыбный). Июль—август 1967 г.

На примере измерения поверхностной удельной электрической проводимости воды можно убедиться в динамических свойствах поверхностной пленки. На рис. 2.3,б даны впервые полученные кривые непрерывной записи χ с чувствительностью 0,2 % в Ладожском озере методом буксирования зонда на пути от о. Ускалания до о. Пусунсари и от о. Пусунсари до Приозерска в 1971 г. Температурная поправка введена с учетом $\alpha = 2,41 \text{ \%} \cdot \text{°C}^{-1}$ и градуировочного графика рис. 2.3,а [Александров, 1973; Филановский, Александров, Артамонов, 1977]. По кривым 1 и 2 видно, что значение χ несколько увеличивается в направлении к Приозерску. Однако колебания находятся в пределах $(1 \div 2) \cdot 10^{-6} \text{ См/см}$, что соответствует колебаниям ионной концентрации в пределах $(1 \div 2) \cdot 10^{-6} \text{ ммоль/л}$. Это может объясняться колебаниями концентраций CO_2 в поверхностном слое воды.

Под поверхностью раздела проводимость воды характеризует изменчивость фоновых физико-химических свойств озера. Она колеблется в Ладожском озере в пределах $(0,5 \div 4,0) \cdot 10^{-2} \text{ См/м}$ (при введении поправок на температуру), среднее для озера значение χ_{18} равно $0,71 \cdot 10^{-2} \text{ См/м}$, за исключением загрязняемых районов; среднее значение χ_{18} на поверхности равно $0,712 \cdot 10^{-2}$, на глубине 20 м — $0,733 \cdot 10^{-2}$ и на глубине 25 м — $0,707 \cdot 10^{-2} \text{ См/м}$. В качестве эталонной взята вода с глубины 200 м, которую в лабораторных условиях использовали для построения эталонной зависимости $\chi = f(T)$ в диапазоне $1 \div 25 \text{ °C}$ с основной погрешностью 1 %. Аналогичная функция в полевых условиях с погрешностью 4 % получена для диапазона $6,8 \div 19,2 \text{ °C}$ (см. рис. 2.3,а) [Александров, 1973]. Примеры типичного распределения значений χ и T показаны на рис. 2.4 для акватории залива Рыбного и открытого озера: а — период начала летнего прогрева; б — период штилевой погоды с ярко выраженным слоем скачка гидрофизических характеристик; в — период начавшегося перемешивания и сглаживания градиентов указанных характеристик; г — период штилевой погоды в относительно удаленной от загрязнения зоне с большими глубинами ($\varphi = 61^\circ 24', 9 \text{ с.ш.}$ и $\lambda = 30^\circ 25', 6 \text{ в.д.}$).

Изменение χ в течение 19 ч на различных глубинах в заливе Рыбном показано на рис. 2.5,а. Видно, что оно определяется в основном суточным ходом температуры. Сезонный ход температуры — постепенный прогрев воды с июня по август — обусловил соответствующий рост χ , что позволило построить график связи $\chi = f(T)$ для акватории залива Рыбный на различных глубинах (рис. 2.5,б). Интересный случай резкого уменьшения проводимости в слое $0 \div 19 \text{ м}$ был зафиксирован в открытом озере на суточной станции с глубиной 220 м в 17 ч 24.08.68 г. и в 8 ч 25.08.68 г. ($\varphi = 61^\circ 23', 9 \text{ с.ш.}$ и $\lambda = 30^\circ 26', 2 \text{ в.д.}$), что было обусловлено как температурной, так и гидрохимической инверсией на поверхности воды [Александров, 1973].

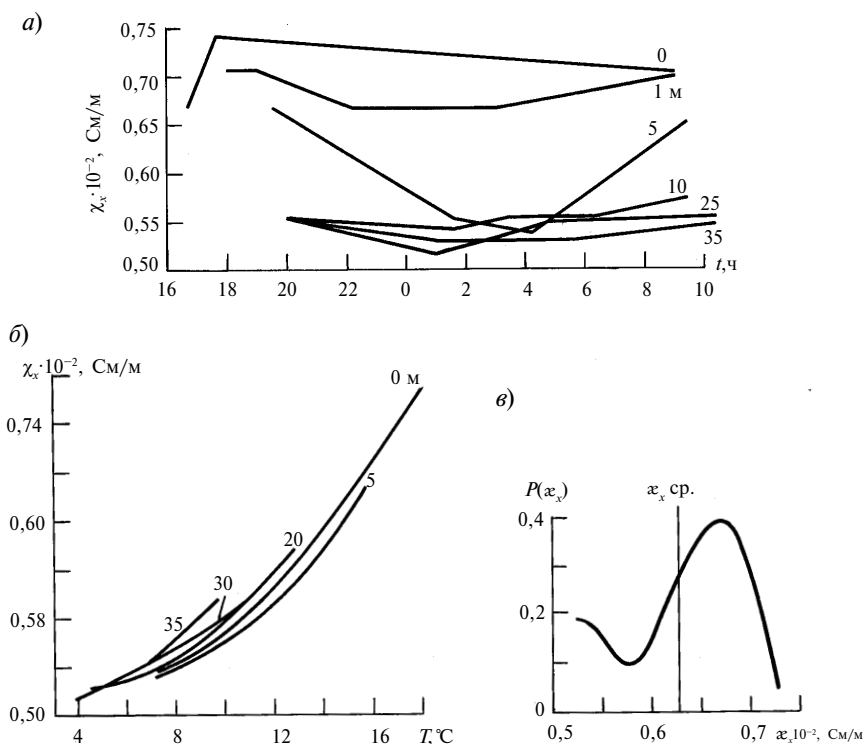


Рис. 2.5. Суточные и сезонные колебания электропроводности воды Ладожского озера на поверхности и на различных глубинах:
 а — суточные колебания; б — график связи $\chi = f(T)$ для летнего сезона в заливе Рыбном на глубинах 0 ÷ 35 м; в — функция распределения χ в слое 0 ÷ 5 м для периода весна—осень

Автором проводилась специальная оценка влияния главнейшего иона HCO_3^- , растворенного железа и концентрации кислорода в воде на значения проводимости. В среднем по всем данным (более 300 измерений) на долю ионов HCO_3^- приходится 30 ÷ 40 % от суммарной электропроводности, это ионы, определяющие χ .

В открытом озере, находящемся вне существенного влияния материкового стока, содержание общего железа невелико — 0,02 ÷ 0,04 мг/л; в районе устья р. Вуоксы — 0,11 ÷ 0,18 мг/л; в заливе Рыбном и бухте Щучьей содержание его возрастает в 12–20 раз и достигает 0,33 ÷ 0,64 мг/л. Как показали сопоставления вертикального

распределения железа и электропроводимости, последняя очень чувствительна к малейшему изменению содержания железа. Однако ввиду незначительного количества железа в воде, оно мало влияет на общую электропроводимость, а полученная зависимость требует дополнительной проверки.

Распределение кислорода O_2 (мг/л) по вертикали в основном обратно пропорционально температуре и, как следовало ожидать, электропроводимости, однако наиболее четко это прослеживается лишь до глубин 10 м. Ниже глубины 20 м иногда наблюдается прямая зависимость, что обуславливается большим влиянием коллоидных частиц и таких компонентов, как железо, которые в сумме действуют в одном направлении.

Значения фоновой характеристики проводимости воды были статистически обработаны. Использовано более 300 измерений за 1967–1970 годы, при этом не учитывались данные для участков, загрязняемых промышленными сточными водами Приозерского завода. Поскольку значения χ для слоев от 0 до 5 м и от 15 м до дна значительно отличаются, средние значения были рассчитаны для этих слоев отдельно (табл. 2.4 и рис. 2.5, в).

Таблица 2.4

Статистическая оценка измерений удельной электрической проводимости воды Ладожского озера за период 1967–1970 гг.

Слой, м	Доверительный уровень	Среднее статистическое значение χ , См/м	Среднее квадратическое отклонение S , См/м	Вероятное отклонение отдельного измерения от среднего r , См/м	Доверительный интервал, См/м	Число наблюдений	Выборка
0 ÷ 5	0,5/0,9	$0,628 \cdot 10^{-2}$	$0,055 \cdot 10^{-2}$	$\pm 0,037 \cdot 10^{-2}$	$\frac{(0,628 \pm 0,037)10^{-2}}{(0,628 \pm 0,090)10^{-2}}$	297	91
15-дно	0,5/0,9	$0,57 \cdot 10^{-2}$	$0,056 \cdot 10^{-2}$	$\pm 0,040 \cdot 10^{-2}$	$\frac{(0,57 \pm 0,040)10^{-2}}{(0,57 \pm 0,092)10^{-2}}$	297	91

Для слоя 0 ÷ 5 м дополнительная обработка позволила построить вероятностную кривую функции распределения проводимости (рис. 2.5, в). Распределение близко к нормальному закону, однако имеющееся искажение можно отнести за счет июньских данных (переходный гидрологический сезон), которые вносят наибольшие отклонения от математического ожидания. Коэффициент асимметрии $S_k = 1,56$ (смещение вправо), коэффициент эксцесса $E_x = 2,6$

(кривая имеет пологую вершину), кривая распределения близка к χ^2 -распределению. Фон распределения проводимости на глубинах более 15 м, где градиенты гидрофизических элементов незначительны, характерен тем, что средняя величина χ ниже, чем в поверхностном слое. Это можно объяснить повышенной минерализацией поверхности за счет постоянного стока в озеро с побережья и наличием скачка плотности воды, обусловленного градиентом температуры.

Особый интерес вызывает вопрос о влиянии давления на значение χ воды в естественных условиях. Разработан он недостаточно, сведения зачастую противоречивы, поскольку натурных экспериментов было очень мало, а лабораторные данные имеют трудно определяемые погрешности. В основном работы касались учета влияния гидростатического давления на электрическую проводимость морской воды и специально приготовленных электролитов. Теоретические расчеты не могут быть достаточно убедительными, поскольку коэффициент сжимаемости природных вод не определен с достаточной точностью. В значительной степени это связано с удивительными аномалиями воды и временем релаксации чистой воды $\tau \approx 10^{-12}$ с [Miller et al., 1977]. Показано, что при изменении давления происходит изменение структуры жидкости, т. е. появляется так называемая компонента сжимаемости, или $K_{\text{стр}}$ — структурная (релаксационная) компонента сжимаемости. Эта сжимаемость исчезает при времени, меньшем чем время структурной релаксации жидкости ($\tau \approx 10^{-12}$ с), и существует лишь K_{∞} , т.е. компонента сжимаемости воды, близкая к сжимаемости льда. Оказывается, что одна из аномалий воды при комнатной температуре заключается в чрезвычайно большом вкладе $K_{\text{стр}}$ в общую сжимаемость: для воды при $T = 20^\circ\text{C}$ отношение $K_{\text{стр}}/K_{\infty} \approx 1,5$, а для большинства других жидкостей подобное соотношение лежит в пределах $0,3 \div 0,7$. Другая аномалия воды — значительный отрицательный температурный наклон структурного вклада в сжимаемость $K'_{\text{стр}}$, приводящий к уменьшению сжимаемости с ростом T° . При 20°C отношение $K'_{\text{стр}}/K'_{\infty} \approx -4,5$ [ФЭС. 1983. С. 633–634; ХЭС. 1983. С. 505; Букин, 1988, с. 926–931].

Таким образом, вопрос достаточно сложен, и в настоящее время мы можем опираться на приближенные данные, исходя из публикаций, обзор которых дан в работах [Александров, 1973; Попов, Федоров, Орлов, 1979; Александров, 1985]. Ограничимся здесь только основными выводами. Так, Ф.А. Хорн и Д.Р. Фрайзингер показали,

что эффект давления весьма ощутим и сравним с температурным в диапазоне давлений $\sim 7,1 \cdot 10^4$ кПа.

По данным их работы В.В. Александровым (1973 г.) был определен приблизительный коэффициент давления в диапазоне температур $0 \div 15$ °С; электрическая проводимость морской воды с увеличением давления на $1 \cdot 10^4$ кПа (1000 м) возрастает на 1 %; при более высоких температурах это увеличение меньше. На основании упомянутых исследований пока можно полагать, что положительный коэффициент давления для χ равен ~ 1 % на 1000 м. В практике при расчетах изменения электрической проводимости в зависимости от глубины влияние давления следует учитывать, начиная с 1000 м и выше. Например, для оз. Байкал изменения величин ϵ и χ на максимальных глубинах следует ожидать в пределах 1 %. Вопросами расчета влияния давления на значение χ морской воды на больших глубинах занимался Д.М. Филиппов [Филиппов, Олейников, 1978], измерениями электрических и других свойств дистиллированной и природной воды в специальных автоклавах под высоким давлением — группа Ф.А. Летникова.

Электрическая проводимость воды является одной из универсальных ее характеристик при изучении физики водоемов. Без знания ее не может быть решен большой круг технических задач в радионавигации, при контроле концентрации примесей, расчете плавучести подводных кораблей, расчете структуры электромагнитных полей в слоистых средах и т.д. Поэтому, учитывая эту универсальность, автор выполнил специальные расчеты проводимости морской и пресной воды открытых водоемов, применив ряд упрощенных методов расчета, а также высокоточный — на основе теории ионных растворов.

Метод расчета и картирования электропроводящих характеристик воды в морях и озерах

Большой круг инженерно-технических задач, возникающих при использовании радионавигационных систем и приемо-передающих установок в морях и крупных озерах, решается на базе предварительного изучения электропроводимости подстилающей поверхности. Обеспечение Гидрографической службы флота данными по электропроводимости воды для различных морей и океанов возможно только при расчете этой характеристики, поскольку прямых измерений еще выполнено недостаточно. Успешность надводной радиосвязи и точность определения места объекта пеленгации

с помощью радионавигационных систем обусловлены учетом электрических и магнитных свойств подстилающей поверхности. По трассам радиосвязи или радиопеленгования необходимо точно знать значения χ воды, которые вводятся в расчетные уравнения для определения фазовых скоростей и дальностей распространения радиоволн.

Аналитические методы расчета проводимости воды на основании учета химического состава воды, температуры и давления сложны и громоздки [Сопах, 1958; Brown, 1962; Воробьев, 1963; Фритч, 1963; Siedler, 1963; Horne, Courant, 1964; Зубов, 1968; Скорчеллетти, 1970; Чанг, 1980]. Автор обработал натуральные измерения температуры и солености воды в морях и океанах и получил следующие эмпирические формулы для расчета проводимости воды с постоянными числовыми коэффициентами:

1) для районов океана с холодными водными массами при диапазоне температур $2 \div 12$ °C и солености $18 \div 38$ ‰

$$\chi = 1,61 + 7,75 \cdot 10^{-2}(S-18) + 4,6 \cdot 10^{-2} T + 2,6 \cdot 10^{-3}(S-18)T; \quad (2.4)$$

2) для преобладающей части Мирового океана с диапазоном температур $7 \div 30$ °C и солености $24-38$ ‰

$$\chi = 2,51 + 9,4 \cdot 10^{-2}(S-24) + 7,3 \cdot 10^{-2}(T-7) + 2,2 \cdot 10^{-3}(S-24) \cdot (T-7). \quad (2.5)$$

Программа расчетов по этим формулам для ЭВМ была составлена В.В. Косаревым. Предложенные формулы позволяют вести расчет с точностью до $1 \cdot 10^{-2}$ См/м при условии, что современные массовые измерения дают точность по температуре $\pm 2 \cdot 10^{-2}$ °C, а по солености $\pm 2 \cdot 10^{-2}$ ‰. Для решения практических инженерных задач точность расчета может быть на порядок ниже ($\approx 5 \cdot 10^{-1}$ См/м). В результате механизированной обработки на табуляграмме значение удельной электрической проводимости воды для заданных горизонтов выдается с точностью до $1 \cdot 10^{-2}$ См/м [Александров, 1973]. Поскольку поправка на измерение проводимости за счет давления, согласно опубликованным данным и расчетам автора, не превышает 1 % на $1 \cdot 10^4$ кПа и примерно равна $2 \cdot 10^{-2}$ См/м на глубине 600 м, то расчет χ на ЭВМ типа ЭВ-80 по формулам (2.4), (2.5) можно проводить до глубины 500 м без учета давления [Александров, 1973; Попов, Федоров, Орлов, 1979].

*В настоящее время точность расчёта можно повысить, используя современные ЭВМ.

Использование предложенных формул вместо расчетов по таблицам с незначительными потерями в точности ($\approx 1 \cdot 10^{-3}$ См/м) дает весьма значительную экономию времени. Практическая проверка формул была осуществлена автором при расчете электропроводимости воды и составлении карт морей и океанов, изданных Управлением Гидрографической службы ВМФ.

Методика построения карт удельной электрической проводимости воды была разработана автором и послужила основой для составления карт Чукотского, Черного, Средиземного и Карибского морей, северной части Атлантического и Тихого океанов. Для повышения точности различных инженерных расчетов при использовании карт электропроводимости воды необходимо учитывать сезонные колебания этой характеристики, а в полевых условиях вносить коррективы с помощью имеющихся у штурмана измерительных средств.

До недавнего времени предполагалось, что учет электропроводимости воды при обслуживании радионавигационных систем важен лишь для морских акваторий. Это ошибочное мнение было опровергнуто при геодезических работах на оз. Байкал в 1982 г. Однако здесь потребовалась высокая точность расчета проводимости воды. Такие расчеты ранее были выполнены для Ладожского озера на основе теории ионной проводимости растворов [Филановский, Александров, Артамонов, 1977]. В основу этого расчета было взято известное соотношение:

$$\chi = \lambda_{C_i} C_i 10^{-3},$$

где

$$\lambda_{C_i} = \lambda_{\infty} - \frac{(B_1 \lambda_{\infty} + B_2) \sqrt{J}}{1 + \alpha B \sqrt{J}} \quad \text{и} \quad J = \frac{(\sum C_i \cdot Z_i^2)}{2}. \quad (2.6)$$

Здесь C_i — концентрация отдельного иона, ммоль/л; λ_{∞} — эквивалентная проводимость при бесконечном разбавлении; λ_{C_i} — эквивалентная проводимость при концентрации C_i ; Z_i — заряд иона; α — температурный коэффициент проводимости. Коэффициенты $B_1 = 0,2300$, $B_2 = 60,65$, $B = 0,1216$, полученные Р. Робинсоном и Р. Стоксом (1963 г.) на основе теории сильных электролитов Фуюсса—Онсагера, позволили вести расчет с погрешностью ниже 0,1 %. Для ладожской воды расчетное значение $\chi_{18} = 67,8 \cdot 10^{-6}$ См/см; экспериментально с точностью не ниже 2 % этому соответствует значение проводимости $\chi_{18} = (65-67) 10^{-6}$ См/см, которое получено кондуктометром КД-1 (см. рис. 2.2).

Аналогичный расчет проводимости поверхностной воды выполнен автором для оз. Байкал. Полученный результат $\chi = 1,13 \cdot 10^{-2}$ См/м был проверен непосредственно на акватории, где удалось принять решение по оптимальному выбору средств координирования гидрографических работ и с высокой точностью (относительная погрешность $\approx 4 \cdot 10^{-5}$) выполнить расчеты фазовой скорости радиоволн при их распространении над пресноводной поверхностью [Александров, 1985]. Внедрение результатов расчета χ в радиогеодезические работы на оз. Байкал выполнил А.И. Безобразов, сотрудник Управления Гидрографической службы ВМФ, и автор искренне признателен ему.

2.1.3. Естественные электрические и магнитные поля акваторий

Основные закономерности электромагнетизма Земли и околоземного пространства известны [Почтарев, 1966; Рикитаки, 1968; Bullard, Parker, 1970; Оль, 1971; Блюх, Николаенко, 1977; Яновский, 1978; Моффат, 1980; Физика космоса, 1986]. Однако космические и наземные исследования последнего десятилетия внесли много нового в представления о механизме взаимодействия внешних и внутренних источников изменчивости суммарного электромагнитного поля Земли, которые регистрируются современной аппаратурой. Поэтому многие вопросы теории электромагнитного поля Земли гипотетического характера подвергаются пересмотру и переосмысливанию.

Напомним, что Земля и околоземное пространство находятся в сфере действия электромагнитных полей системы солнечно-земных связей, которые обуславливают космическую ритмику электрических и магнитных эффектов на Земле. Внеземные источники (все виды солнечного излучения, лунные приливные воздействия, внутrigалактические и внегалактические высокоэнергетические источники возмущения электромагнитного поля Земли) рассмотрены в части I настоящего издания.

В этом разделе несколько подробнее ознакомимся с земными источниками изменчивости поля, обуславливающими его неоднородность на поверхности Земли и в воде. Необходимо только ввести некоторые терминологические понятия, использование которых в практике изучения электромагнитных явлений в воде поможет исключить возможные ошибки и неопределенности в интерпретации результатов.

В 1973 г. опубликован ГОСТ 18 451-73 — ГОСТ 18 458-73 “Океанология. Термины и определения”, касающийся электромагнитных

явлений в океанах и морях. Этот ГОСТ справедлив и для пресноводных акваторий:

“48. Стационарное геомагнитное поле в океане (море). Магнитное поле естественного происхождения в толще вод океана (моря) и над ним, включающее вековые вариации.

49. Квазистационарное электрическое поле в океане (море). Электрическое поле в толще воды, обусловленное течениями, электрофильтрационными и электрохимическими процессами в придонной области и береговой зоне океана (моря), а также другими процессами.

50. Электромагнитное поле в океане (море). Естественные переменные магнитное и электрическое поля в океанах (морях), обусловленные космическими и земными причинами.

51. Геомагнитные вариации в океане (море). Магнитная составляющая электромагнитного поля в океане (море), обусловленная процессами в магнитосфере и ионосфере Земли.

52. Поля теллурических токов в океане (море). Электрическая составляющая электромагнитного поля в океане (море), обусловленная процессами в магнитосфере и ионосфере Земли.

53. Электромагнитные пульсации в океане (море). Переменное электромагнитное поле в океане (море) с частотой от нескольких герц, обусловленное преимущественно грозовой деятельностью.

54. Электромагнитное поле морских волн. Вариации магнитного и электрического полей, возникающих при волнении.”*

Узаконенная терминология в области электрометрических и магнитометрических исследований на суше также правомерна при их проведении в гидросфере, но необходимо использовать особенности методики работ на воде (см. разд. 2.2.2).

Естественные источники флуктуаций $\Delta\varphi$ и локальных неоднородностей потенциалов поля в воде формируют квазипеременный электрический фон водной среды.

*Не вполне обосновано выделение в самостоятельный раздел изучения электромагнитного поля только поверхностного волнения. Сюда следует включить учет полей, индуцируемых внутренними волнами, турбулентными и вихревыми движениями. Полагаю необходимым внести в ГОСТ специальное терминологическое разъяснение (или определение): **55. Квазистационарное электрическое поле** в океанах, морях и водоемах суши, обусловленное трофогенным слоем (скоплением пелагических планктонных вертикально мигрирующих организмов). См. стр. 666

К макроскопическим электромагнитным характеристикам воды относятся и силовые поля, обуславливающие разнообразные электрофизические свойства природных открытых водных систем. Естественные водные растворы характеризуются присутствием частиц с зарядами противоположного знака, создающих локальные электрические поля высокой напряженности. Это дало основание многим исследователям при описании свойств растворов электролитов учитывать в основном свойства отдельных ионов и образуемых ими ионных атмосфер. Такой способ описания растворов электролитов получил название электростатического и наиболее ярко отражен в классической теории Дебая—Хюккеля, которая применима к растворам с концентрацией $0,001 \div 0,01$ моль. К настоящему времени воду принято считать средой изотропной, но неоднородной, т. е. в некоторой точке пространства ее электромагнитные свойства не являются тензорами и не зависят от направления внешнего электромагнитного поля, но они меняются от точки к точке и могут быть представлены как функции пространственных координат (см. разд. 2.1.2)

Какова роль воды в формировании электрических эффектов и в их влиянии на планетарные теллурические и атмосферные поля?

Электрическая природа гидросферы Земли определяется наличием свободных объемных зарядов, переносимых ионами, ионными парами и всевозможными заряженными частицами (коллоидами), которые образуются в каждой точке пространства в результате диссоциации растворяющихся веществ и комплексообразования ионогенных групп органического и минерального происхождения, флуктуирующих зарядов живых организмов и т. д., находящихся в свою очередь под воздействием системы гидродинамических полей с различными амплитудно-частотными характеристиками.

Вода является универсальным и инертным растворителем, так как молекулы ее отличаются большой устойчивостью в том отношении, что они остаются неизменными в условиях, в которых другие молекулы распадаются на ионы. Тщательными исследованиями показано, что в 1 т чистой воды содержится всего около 0,1 мг ионов H^+ и 1,7 мг ионов OH^- . Поэтому чистая вода является плохим проводником электричества, располагая небольшим количеством заряженных частиц для образования тока между двумя электродами. Хотя молекула воды и оказывает сопротивление распаду на ионы, сама по себе она имеет много общего с ионами. Исходя из структуры молекулы воды, ее определяют как ион кислорода (O^-) с присоединенными к нему двумя ионами водорода (H^+). Такое сочетание придает молекуле воды свойство, или тенденцию,

ориентироваться в электрическом поле своим положительно заряженным концом по направлению к отрицательному полюсу и отрицательно заряженным — к положительному полюсу. Степень разделения заряда внутри молекулы воды очень велика, что обусловлено ее большим дипольным моментом, и, как известно, объясняет аномально высокую диэлектрическую проницаемость и способность растворять вещества, молекулы которых соединены ионной связью. Ионные связи сравнительно слабы, при растворении они нарушаются и практически не восстанавливаются, так как кулоновские силы притяжения между разобщенными и противоположно заряженными ионами уменьшаются в ϵ раз по сравнению с вакуумом. Кроме того, обратная кристаллизация затруднена из-за естественного стремления положительных ионов присоединиться к отрицательной (кислородной) конечности молекулы воды и отрицательно заряженных ионов — к положительной (водородной) конечности молекулы.

Растворяющая способность воды усиливается, кроме того, за счет комплексообразования ее молекул, связанного с водородными связями. Эти связи электростатичны: два атома водорода делят свои электроны с атомом кислорода, обнажая свои ядра, каждое из которых несет положительный заряд (протон) и оказывает притяжение на любой единичный, или непарный электрон. Атом кислорода имеет два непарных электрона, поэтому молекула воды способна образовывать четыре водородные связи. Таким образом, две дипольные молекулы воды, соединенные в комплекс, обладают вдвое большей способностью нейтрализовать электрическое поле, чем те же две молекулы в отдельности. Удвоенный дипольный момент объясняет аномально высокую диэлектрическую проницаемость воды и ее растворяющую способность. В работе [Bastin—Merkeman, 1966] имеется замечание по поводу процесса нейтрализации ионов. Если этот процесс идет достаточно медленно (не быстрее, чем период полураспада), то учитывать следует только движение ионов. В этом случае при наличии разных скоростей движения ионов можно показать, что распределение потенциала происходит под действием наименее подвижных ионов, тогда как ионный ток обусловлен лишь самыми подвижными ионами. В слабом внешнем электромагнитном поле Земли в проводящей водной среде возникают градиенты удельной электрической проводимости. Это приводит к возникновению в объеме воды электрических сил и механических перемещений в направлении градиента. В этом, по нашему мнению, состоит механизм возникновения внутриводных конвективных движений, образования вихревых сгустков, пульсирующих с частотой внешнего поля. Динамическая неоднородность водоема проявляется в циклической периодичности перемещения заряженных частиц — возникновении

и исчезновении иерархии микровихрей, обуславливающих тепло- и массообмен, перераспределение органического вещества и пелагических организмов.

Таким образом, имеется физическая основа формирования собственного электрического поля водоема, который следует рассматривать как самостоятельный целостный источник и аккумулятор естественной электроэнергии, вмещающий в себе всевозможные виды электрических колебаний и проявляющийся как динамическая система в локальном, а возможно, и в региональном масштабе (в зависимости от его мощности). Не исключена вероятность возникновения поля, связанного с движением полярной молекулы воды под воздействием внешнего источника. Внешнее поле приводит полярную молекулу в движение вращательного типа, которое влечет за собой изменение положения частиц жидкости в объеме. Возникает вихревая структура жидкости.

Изменение электрического состояния частиц, обладающих зарядом, во времени или пространстве порождает электрические токи, которые всегда сопровождаются магнитными полями. В изотропных средах величины ϵ , χ и μ являются скалярными, что позволило связать уравнения векторные величины единого электромагнитного поля (система уравнений Дж. Максвелла).

При рассмотрении поля собственно водного объекта вне связи его с интенсивными внешними полями высоких частот и энергий будем считать указанные скалярные величины лишь функциями пространственных координат среды.

Сначала рассмотрим раздельно постоянное электрическое и постоянное магнитное поля. Будем считать, что плотности электрических зарядов δ электрических токов $\bar{j}$ в каждой точке среды остаются неизменными во времени. Тогда и электрическое, и магнитное поля должны быть постоянными во времени; для проводящей немагнитной среды это может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \epsilon \bar{E} &= 4\pi\chi, \operatorname{div} \mu \bar{H} = 0, \\ \operatorname{rot} \bar{E} &= 0, \operatorname{rot} \bar{H} = \frac{4\pi}{c} \chi(\bar{E} + \bar{E}^{\text{ст}}), \end{aligned} \quad (2.7)$$

и поскольку здесь вихрь поля $\bar{E}$ равен нулю, электрическое поле становится потенциальным:

$$\bar{E} = -\operatorname{grad} \varphi^*. \quad (2.8)$$

*Знак минус в формуле (2.8) объясняется тем, что градиент потенциала направлен в сторону быстрого возрастания потенциала, а вектор $\bar{E}$ — в сторону его быстрого падения.

Постоянное электрическое поле может быть статическим, когда отсутствуют пространственные и линейные токи (всюду $j = 0$), или стационарным, когда есть электрические токи ($j \neq 0$).

Из теории известно, что потенциальное электростатическое поле, описываемое уравнениями (2.7), при отсутствии сторонних факторов может длительно существовать только в вакууме. Длительность существования такого поля, или время его распада, определяется временем релаксации среды. Поясним это примером.

Процесс нейтрализации объемных электрических зарядов внутри проводника называют релаксацией объемных зарядов. Время τ , в течение которого плотность объемных зарядов в проводниках уменьшается в e раз по сравнению со своим начальным значением, составит

$$\tau = \varepsilon / (4\pi\chi). \quad (2.9)$$

Это время называется временем релаксации. Время релаксации для воды (при $\varepsilon \approx 80, \chi = 1 \cdot 10^{-4}$ См/м) равно примерно $6 \cdot 10^{-5}$ с, а для металлов $\sim 10^{-18}$ с, т. е. практически ничтожно. Закон распада поля с учетом τ выражается уравнением:

$$E = E_0 e^{-t/\tau}. \quad (2.10)$$

Однако нужно отметить следующее важное обстоятельство: с количественной стороны этот закон для воды, обладающей ионной электрической проводимостью, нуждается в экспериментальной проверке, так как известно, что в подобных воде средах процессы протекают значительно медленнее, чем при времени релаксации τ , вычисленном по обычным значениям статической диэлектрической проницаемости ε и стационарной электропроводности χ . Наибольший интерес для электрометрии представляют проводящие среды. В таких средах, как было показано выше, не могут длительно существовать ни статические объемные заряды, ни статические электрические поля, т. е. в реальных условиях поля стационарные ($j \neq 0$).

Теперь рассмотрим *переменное электромагнитное поле*. В общем виде при отсутствии объемных зарядов и сторонних полей оно дается системой уравнений

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{\vec{H}} &= \frac{4\pi}{c} \left(\chi \vec{E} + \frac{\varepsilon}{4\pi} \dot{\vec{E}} \right); \quad \operatorname{div} \mu \vec{H} = 0; \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{1}{c} \mu \dot{\vec{H}}; \quad \operatorname{div} \varepsilon \vec{E} = 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

и может быть периодическим и аperiodическим. Переменное электромагнитное поле является нестационарным, хотя практически его часто рассматривают как квазистационарное, основываясь на незначительности индуктивных токов и токов смещения. При указанном

упрощении уравнения переменного поля совпадают с уравнениями стационарного, что и позволяет их называть квазистационарными полями. Квазистационарный ток, протекающий в незамкнутых проводниках, замыкается токами смещения, протекающими в диэлектрической среде.

Основное уравнение потенциального поля в однородно-изотропной среде в виде

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = \Delta \varphi = \operatorname{div} \bar{E}^{\text{ст}} \quad (2.12)$$

показывает, что его структура не зависит от электропроводимости и определяется исключительно расположением возбуждающих источников и распределением стороннего поля $\bar{E}^{\text{ст}}$. Заряды в такой среде существуют только при наличии стороннего поля.

Однако еще раз напомним, что водная среда является средой неоднородной, в ней всегда могут существовать частицы с нескомпенсированным зарядом, и она характеризуется электрическими свойствами $\chi(x, y, z)$ и $\epsilon(x, y, z)$, заданными скалярными функциями пространственных координат. Основное уравнение потенциального поля в неоднородной проводящей среде

$$\Delta \varphi = -(\operatorname{grad} \varphi, \operatorname{grad} \ln \chi). \quad (2.13)$$

Если написать его решение в виде

$$\varphi = \varphi_o + \frac{1}{4\pi} \int \frac{(\operatorname{grad} \varphi, \operatorname{grad} \ln \chi) dv}{r} \quad (2.14)$$

или

$$\bar{E} = \bar{E}_o - \frac{1}{4\pi} \int \frac{(\bar{E}, \operatorname{grad} \ln \chi) \bar{r} d\bar{v}}{r^3}, \quad (2.15)$$

то оно приведет к интегральному уравнению относительно скалярной функции φ или ее градиента и явится универсальной формулой для нахождения структуры стационарного поля от любых источников в любой изотропной среде (неоднородной, слоистой и т. д.), физический смысл второго члена уравнения (2.14) или (2.15) заключается в том, что в зонах неоднородности под действием электрического поля собираются электрические заряды, образуя в тонких зонах поверхностные заряды, а в объемных зонах — объемные заряды. И в случае слоисто-изотропного строения водоема, т. е. его неоднородности, электрические параметры среды (эффективные параметры) меняются от точки к точке даже в тех областях, где истинные значения χ и ϵ остаются постоянными. Поскольку электрическая неоднородность среды порождает аномальную структуру потенциального поля, приходится вводить понятие эффективной электрической проводимости.

Наличие свободных ионов и других заряженных частиц в среде, находящейся в равновесии (рассмотрим для простоты случай, когда магнитное поле постоянно), и при отсутствии всякого движения обуславливает то, что они находятся под действием осмотических сил. Токовая система образуется тогда лишь при наличии стороннего электрического поля $\vec{E}^{\text{ст}}$. За счет сил $\vec{E}^{\text{ст}}$ появляются в неподвижной среде токи проводимости (токи объемных зарядов). Перемещение среды в магнитном поле возбуждает в ней переменное электромагнитное поле, и система токов усложняется (вопрос рассмотрен в разд. 2.4.5). Таким образом, вода при своем движении возбуждает собственное электрическое поле, изменяя систему теллурических токов и выделяя этим водный объект на фоне стационарных полей, обусловленных другими явлениями. Известна роль воды и восходящих токов при образовании грозových разрядов. Движение подземных вод, их фильтрация через горные породы, водопады, разбрызгивание струй, приливные течения, электрокинетические явления и другие явления сопровождаются образованием локальных возмущений. Если в лаборатории такие эффекты невелики, то в природных условиях при больших массах воды наблюдаются значительные поля. Так, сопоставление между собой электропрофилей над рудной залежью, над подземным потоком и в поперечном профиле через речное русло и пойму показывает, что электрические поля водных объектов распространяются на большие расстояния, чем у рудных залежей [Козловский, 1957]. Водопады, например, вызывают искажение нормального (фонового) поля атмосферы, создавая значительные градиенты обратного направления на сравнительно большой высоте от Земли. Это связано не только с движением самой массы воды, но и с образованием баллоэлектрического эффекта (эффект Ленарда) при разбрызгивании капель, с разрывом двойных электрических слоев на новых межфазных поверхностях и с неравномерным распределением зарядов на каплях воды. Мельчайшие частицы воды в воздухе над поверхностью, как правило, заряжаются отрицательно, но их число и полярность могут изменяться в зависимости от минеральных солей и других включений [Темникова, 1968; Фридрихсберг, 1984; Маргулис, 1984].

Расчет плотности объемного заряда при распылении жидкости по экспериментальным данным выполнил Д. Бланчард [Blanchard, 1955]. Подземные воды обуславливают аномальные магнитные эффекты в теллурическом поле, что позволяло издавна отыскивать водные источники и сейчас используется в гидрогеологических изысканиях для водоснабжения. Нужно отметить, что напряженность и дальность распространения электрического возмущения водных

объектов зависят от их мощности. По замечанию А.П. Козловского [Козловский, 1957], в горных реках электрическое поле значительно сильнее, чем на равнинах, но утверждение это требует контроля, так как мнение А.П. Краева иное. Замечена и сезонная изменчивость электрических полей речных объектов. Другие виды движения воды в геомагнитном поле (ветровое волнение и зыбь, внутренние волны, сейши, вихревые пульсации — турбулентность и т. д.) также сопровождаются электрическим эффектом (см. разд. 2.2.4).

Помимо динамически оформленных локальных возмущений, существует еще большая группа квазистационарных потенциальных электрических полей локального характера. К ним относятся возмущения местных источников в земной коре или в гидросфере, и проявляются они на ограниченных участках поверхности. Здесь мы только назовем источники таких возмущений, более подробно они будут рассмотрены в следующих разделах:

1) концентрационно-диффузионные и адсорбционные процессы при электрохимическом взаимодействии вещества в водной среде. Образование устойчивых электролитических неоднородностей в объеме объекта и в контактных зонах;

2) электрокинетические явления в проводящей среде, обуславливающие образование локальных электрических возмущений как в самой среде, так и на контакте вода—грунт, вода—берег; седиментационные (трибополяризационные) поля (эффект Дорна); суспензионный эффект и эффект Квинке; геологические источники возмущения. Такие локальные возмущения устойчивы, зависят от свойств и состава взвесей, а также от осадочного материала, образующего грунт и прибрежную полосу;

3) жизнедеятельность бактерий, фито- и зоопланктона, приводящая к возникновению электродвижущих сил и локальных неоднородностей в местах скопления планктеров. Локальные возмущения импульсного характера обусловлены жизнедеятельностью электрических животных (электрические скаты, угри и т. п.) (см. ч. 3);

4) возникновение разности потенциалов вблизи границы раздела вода—лед в процессе замерзания воды. Процесс сопровождается упорядочением структуры воды, т. е. изменением ориентации диполей молекул воды, связанным с расположением протона. Отрицательные ионы при отвердении включаются в решетку растущего льда в результате процесса адсорбции. Явление это протекает благодаря существованию электрического поля, создаваемого поляризованным слоем молекул воды в этой области, и известно еще как эффект Воркмана—Рейнольдса. Процесс разделения зарядов непрерывен,

и пока замерзание воды продолжается, во внешней цепи (измерения велись катодным вольтметром с входным сопротивлением более 10^{14} Ом) может поддерживаться заметный ток. Как показали Воркман и Рейнольдс, разность потенциалов (в пределах 100 В) зависит от концентрации и природы растворенного вещества [Workman E.J., Reynolds S.E., 1950];

5) возникновение аperiодических колебаний теллурического поля в связи с распространением в воде естественных гидроакустических волн;

6) возникновение гравитационной электродвижущей силы (незначительна по амплитуде) за счет разницы в давлении на больших глубинах (океаны, оз. Байкал).

Кроме естественных нестационарных теллурических полей и локальных возмущений, в воде могут наблюдаться аномальные электрические эффекты за счет искусственных источников (антропоферные факторы): современные технические средства выработки всех видов энергии и ее трансформации на огромные расстояния, средства связи, транспорт, промышленные предприятия, изымающие природное сырье и возвращающие его в окружающую среду, как правило, в водоемы в виде, непригодном для его утилизации живыми организмами и т.д. — все это является источником новых физических полей, в частности, электрических, несвойственных природе:

гальвано-коррозийные процессы в прибрежных районах возле гидротехнических сооружений и затонувших металлических объектов;

всевозможные гидродинамические поля при движении плавсредств (например, электрическое поле кильватерной струи) [Александров, Зайцев, 1978];

электромагнитное излучение приемо-передающих радиостановок связи;

блуждающие токи промышленного происхождения, концентрирующиеся в районе линии передач электроэнергии (подводные кабели; электрифицированные дороги и т. д.);

интенсивные и устойчивые поля электрохимического потенциала акваторий, подверженных загрязнению сточными водами;

инфразвуковая гидроакустическая и звукохимическая кавитация искусственного происхождения.

Безусловно, вклад каждого из перечисленных факторов неравноценен. Следует помнить, что имеются основополагающие факторы образования и существования электрических полей и второстепенные. Тем не менее, суммарный эффект оказывается достаточно существенным, чтобы говорить об обобщающем электрическом свойстве среды, связанном с ее физико-химическими

и динамическими неоднородностями, их изменчивостью в пространстве и времени. Издавна рассчитываемые и измеряемые традиционно теллурические поля и токи существенно изменяются за счет тех естественных и искусственных источников локального возмущения, о которых было сказано выше. Ранее они не учитывались ни при расчетах, ни в специально организованных экспериментальных работах, их расценивали как источники помех. Это не “помеха”, это — реально существующие физические поля, с ролью которых нельзя не считаться. Именно поэтому автор сосредоточил свои силы на изучении этих полей, рассчитать и предсказать их невозможно, нужны были направленные и целеустремленные экспериментальные работы. Но в эксперименте обычно наблюдается интегральная картина флуктуации поля от различных источников — пульсирующих устойчивых и неустойчивых, затухающих и др. Это приводит к суперпозиции полей и генерированию максимума энергии поля на различных частотах. В этом методическая сложность эксперимента в природных условиях (см. разд. 2.4). Сложность здесь заключается еще и в отсутствии к настоящему моменту “критерия нормального поля (фонового поля)”.

Вопрос о критерии нормального поля остается открытым. Поэтому в настоящее время целесообразно такой критерий устанавливать отдельно для каждого объекта исследования (море, крупное озеро). Важнейшим моментом здесь является необходимость разработки и принятия единой методики измерения и обработки данных, иначе материалы оказываются несравнимыми. С этим автор уже столкнулся при анализе данных по измерению электрического поля в морях, где наиболее интенсивно развивались электрофизические исследования. Но, как мы уже убеждаемся, подобные исследования крайне необходимо проводить и в крупных пресноводных континентальных водоемах [Александров, 1985].

Заканчивая обзор о формировании фоновых электрических характеристик континентальных водоемов, еще раз подчеркнем, что для водной среды характерны неоднородность проводящих и диэлектрических свойств, наличие нескомпенсированных зарядов, неограниченное воздействие внешних силовых электромагнитных полей. Это обуславливает не только аномальную структуру электрического поля в различных частях водоема, но приводит и к первичным гидрофизическим явлениям и процессам — к возникновению конвективно-вихревых движений в жидкости в соответствии с известным эффектом Зеемана–Лармора–Лоренца. Электрофизика водного ландшафта поэтому крайне многообразна. В качестве

примеров можно рассмотреть электрополюметрические данные для пресноводных озер Северо-Западного региона России (табл. 2.5), полученные автором в течение 1966–1985 гг. при зондировании естественного поля поверхностных и глубинных слоев дипольным или многоэлектродным методами (см. разд. 2.2). Из данных таблицы видно, насколько необходимо детальное изучение ритмов электрического поля в гидросфере, локальных характеристик естественной и антропоферной природы. Эти поля несут незаменимую информацию о естественном и экологически нарушенном состоянии водного объекта в целом и его отдельных частей. Электродинамические процессы в озерах автор рассматривает как составную часть общих электромагнитных явлений и процессов на планете Земля, а сами озера — как модельные природные системы, удобные для сбора фундаментальных сведений, характеризующих гидросферу в целом [Александров, 1992, с. 136].

Таблица 2.5

**Электрополюметрические данные для пресноводных озер
Северо-Запада России**

Поля и источники их неоднородности	Амплитуда	Период или частота
<i>Собственные колебания водной среды</i>		
Квазистационарные поля		
а) подводный рельеф		
до 5 м	$(3 \div 8)10^{-4} \text{В/м}$	
10 ÷ 15 м (перепады глубин)	$1 \cdot 10^{-4} \text{В/м}$	
30 ÷ 40 м	$(2 \div 10)10^{-4} \text{В/м}$	
б) донные отложения(грунт)		
по отношению к воде:		
песок	$-4 \div -5 \text{ мВ}$	
ил	$2 \div 3 \text{ мВ}$	
плита	$-10 \div -15 \text{ мВ}$	
в) контактная зона вода—берег:		
травянистый берег	$8 \cdot 10^{-4} \text{В/м}$	
песчаный берег	$1 \cdot 10^{-3} \text{В/м}$	
скальный берег	$5 \cdot 10^{-3} \text{В/м}$	
г) долгопериодные волны	$(5 \div 7)10^{-4} \text{В/м}$	20 ÷ 25 мин
(возможно, связаны с	$(10 \div 15)10^{-4} \text{В/м}$	60 мин
собственными колебаниями Земли)	$30 \cdot 10^{-4} \text{В/м}$	75 ÷ 98 мин
Флуктуирующие поля		
а) электроповерхностные явления (колебание поля и проводимости воды)	$1,25 \cdot 10^{-1} \text{В/м}$ $(1 \div 5)10^{-6} \text{См/см}$	Апериодические колебания

Поля и источники их неоднородности	Амплитуда	Период или частота
<i>Собственные колебания водной среды</i>		
б) гидродинамические явления: течения открытых акваторий	$(0,5 \div 30)10^{-4}$ В/м	Апериодические колебания
течения в эстуариях некрупных рек	$(3 \div 5) \cdot 10^{-4}$ В/м	То же
поверхностные волны до 3 баллов	$(1 \div 6)10^{-3}$ В/м	$0,2 \div 1$ Гц
волны зыби	$0,6 \cdot 10^{-3}$ В/м	$3,3 \div 19,6$ мин
турбулентность в слое $1 \div 5$ м	$(0,2 \div 6)10^{-4}$ В/м	$0,014 \div 2$ Гц
вихревые сгустки потока (дивергенция поля)	$20 \div 700$ мкВ/м ²	$0,015 \div 1,25$ Гц
субаквальные потоки	$1,4 \cdot 10^{-3}$ В/м	
в) биоэлектрические поля планктонных сообществ	До $20 \cdot 10^{-3}$ В/м	$7 \div 9$ ч
г) поля плывущего человека (в 1 м от установки)	2,5 мВ	Пропорционально скорости
Ориентировочное значение постоянной составляющей озерной котловины*	$0,51 \cdot 10^{-3}$ В/м	
<i>Внешние естественные воздействия на водную среду</i>		
Атмосферно-электрические поля		
а) ветровые пульсации (типа <i>pc1</i> — <i>pc2</i>)	$(4 \div 6) \cdot 10^{-6}$ В/м	$0,25; 0,2; 0,14;$ $0,1$ Гц
б) грозовые разряды	$(1 \div 1,5) \cdot 10^{-3}$ В/м	$0,06 \div 0,2$ Гц
в) движение облаков	$(3 \div 4) \cdot 10^{-3}$ В/м	
Магнитотеллурические поля		
а) вариации теллурических токов (типа <i>pc1</i> и <i>pi1</i>)	$(3 \div 8) \cdot 10^{-5}$ В/м	
б) геомагнитные региональные возмущения		
на суше	> 150 нТл	Буря в течение 2 ч
на воде (уровень напряженности ЭП, модуль)	> 30 нТл	То же
<i>Антропогенные воздействия на водную среду</i>		
Поля водных масс, содержащих химические загрязняющие вещества	$-(3 \div 5)10^{-3}$ В/м	
Поля, индуцируемые ЛЭП	$\sim 10^{-3}$ В/м	50 Гц
Поля неионизирующих излучений (УВЧ, радиоволны и др.)	$\sim 10^{-3} \div 10^{-2}$ В/м	Частота соответствует частоте колебаний источника

*Критерий нормального поля водоема (локальное значение)

2.1.4. Ритмичность флуктуаций электрического поля

Изучение динамики электрических явлений в воде может идти двумя путями в зависимости от задач исследований, и это вопрос принципиальный. С одной стороны, гидросфера — среда, в которой флуктуируют генерируемые внешними источниками электромагнитные пульсации в ритме космических воздействий и дают информацию о планетарных процессах, с другой — сама водная среда является источником гидродинамических ритмов, сопровождающихся электрическими эффектами. Таким образом, в этом разделе мы рассмотрим схему естественной ритмики электрических колебаний, которые могут быть зарегистрированы в открытой системе современной аппаратурой.

Космический (внешний) и земной (внутренний) источники генерирования поля, его неоднородности изучаются на протяжении двух веков, и, как уже упоминалось, многие явления еще не объяснены и требуют глубоких исследований.

Внеземные источники. Взаимодействие Солнца (солнечной плазмы) и космических частиц с геомагнитным полем на расстоянии нескольких радиусов Земли (это пограничная область, находящаяся примерно в 100 тыс. км от Земли и именуемая магнитосферой) обуславливает образование гидромагнитных волн, которые индуцируют планетарные магнитотеллурические флуктуации внешнего происхождения (см. разд. 1.3). Это магнитотеллурическое поле флуктуирует адекватно периодическим и аperiodическим колебаниям магнитогидродинамических процессов в околоземном пространстве. По сухопутным наземным данным амплитуды колебаний напряженности электрического и магнитного полей (составляющие магнитотеллурического поля) в средних широтах равны примерно $1 \cdot 10^{-7} \div 3 \cdot 10^{-5}$ В/м и $0,2 \div 5,0$ нТл, соответственно; в море амплитуда электрического поля равна $(0,5 \div 1,5) 10^{-5}$ В/м [Александров, Зайцев, 1978; Kalmijn, 1981], а в крупных озерах $(3 \div 8) 10^{-5}$ В/м [Александров, 1973]. Процессы в магнитосфере приводят в возбужденное состояние земную ионосферу, что влечет за собой колебания напряженности главного геомагнитного и теллурического полей, т. е. к колебаниям полей чисто земного (внутреннего) происхождения. Ритмы этих колебаний укладываются в очень широкий частотный спектр — от $2,5 \cdot 10^{-9}$ до $50 \cdot 10^3$ Гц.

Приливно-отливные эффекты в гравитационном поле системы Солнце—Земля—Луна обуславливают изменчивость магнитотеллурического поля собственно земного происхождения. Известны вековые, 22-летние, 11-летние, 6–7-летние, 2–3-годовые и

годовые колебания, связанные с активностью Солнца; 27-суточные циклы возникновения магнитных бурь и возмущений, связанные с вращением Солнца вокруг собственной оси; суточные и полусуточные колебания поля, связанные с вращением Земли; 160,01-минутные колебания магнитного поля Солнца, связанные с изменением фазы максимума скорости истечения плазмы (от 23 до 3 ч мирового времени); бухтообразные возмущения и пульсации — правильные синусоидальные колебания амплитудой в несколько нанотесл с периодами от десятков секунд до нескольких минут и др. Вопрос о внутрисуточных ритмах в планетарном масштабе рассматривается специально в разделе 2.4.5. Поскольку природа колебаний электрического и магнитного полей Земли генетически связана с внеземными космическими источниками, в настоящее время их изучают как традиционными наземными методами, так и с использованием космической техники. Так, например, с помощью ИСЗ “Интеркосмос-10” было установлено, что для пульсаций с периодом $8 \div 10$ с максимум спектральной плотности приходится на 1 ч 47 мин 50 с мирового времени, для пульсаций с периодом 1,8 (2) с максимум спектральной плотности наблюдается на Земле и в ионосфере в 4 ч 51 мин 45 с и т. д. Интересно, что такие же пульсации регистрировались электрометрической установкой и в воде озер в период развитого ветрового волнения, поэтому серьезными вопросами остаются и методическая чистота эксперимента, и комплексность исследования, которые позволят установить истинный источник возбуждения измеряемых сигналов (см. разд. 1).

Спектр природных электромагнитных колебаний, которые имеют исключительно важное значение в научной и практической деятельности, рассмотрен в [Александров М.С., Бакленева З.М. и др., 1972]. Показано, что колебания эти охватывают диапазон частот от тысячных долей герца до $30 \div 50$ кГц, но границы диапазона окончательно еще не установлены. По официальной терминологии Института радиотехники и электроники АН СССР к указанному диапазону частот применено обобщающее понятие — “сверхнизкие частоты” (СНЧ) [Александров М.С., Бакленева З.М. и др., 1972]. Этот диапазон в известной мере условно разделен на следующие поддиапазоны:

1) ниже 5 Гц — диапазон частот колебаний теллурических токов и микропульсаций магнитного поля Земли. Нижняя его граница обусловлена возможностями антенной техники, верхняя — близостью нижней резонансной частоты земного шара;

2) $5 \div 50$ Гц — диапазон, охватывающий практически весь спектр наблюдаемых резонансных частот земного шара и ограниченный верхним пределом частоты силовой сети;

3) 60 Гц — 3 кГц — диапазон ограничен нижним пределом частоты силовой сети Североамериканского континента (60 Гц) и нижней критической частотой волновода Земля—ионосфера, которая обычно охватывает спектр $1,5 \div 4,5$ кГц в зависимости от состояния ионосферы и свойств подстилающей поверхности;

4) $3 \div 50$ кГц — для этого диапазона характерен волноводный тип распространения радиоволн в сферическом волноводе Земля—ионосфера.

Для задач гидрофизики используется самый первый диапазон СНЧ, поскольку естественное электрическое поле флуктуирует даже в условиях интенсивных турбулентных процессов в полосе частот не выше 5 Гц. Выше 5 Гц энергия процесса настолько мала, что измерения практически затруднены и нецелесообразны.

В настоящее время найдена тесная связь между электрическими и магнитными флуктуациями естественных электрических и магнитных полей с периодами от 1 с до 1 сут.

Колебания напряженности магнитного поля в диапазоне частот $0,001 \div 5$ Гц называют микропульсациями, амплитуды их не превышают 100 нТл.

В свободном пространстве в волновой зоне вариации напряженностей магнитного H и электрического E полей связаны соотношением

$$\Delta E / \Delta H = 120\pi \text{ Ом.} \quad (2.16)$$

Причины микропульсаций: 1) магнитогидродинамические волны в ионосфере и нижней экзосфере, вызванные взаимодействием порывов “солнечного ветра” с магнитосферой Земли; 2) магнитные бури; 3) циклотронные колебания ионов во внутреннем радиационном поясе Земли; 4) тормозное излучение электронов в зоне полярных сияний; 5) потоки космических частиц, особенно глубоко проникающих в магнитное поле Земли в полярных областях; 6) потоки метеоров; 7) движение электрических зарядов в атмосфере; 8) морское волнение [Crews, Futterman, 1962; Beal, Weaver, 1970; Larsen, 1971; Александров М.С., Бакленева и др., 1972; Александров, Зайцев, 1978; Исследование геомагнитного поля..., 1978; Морское магнитотеллурическое..., 1978; Проблемы морских..., 1980; Фундаментальные проблемы морских..., 1980]*.

Микропульсации весьма разнообразны по частоте, форме и интенсивности колебаний и проявляют себя по-разному на различных географических широтах и в различные часы местного и мирового времени.

*Современный взгляд на проблему см. с. 156 настоящего издания

По рекомендации Международной ассоциации геомагнетизма и аэронавтики для микропульсаций приняты классификация и условные обозначения (наименования), приведенные в табл. 2.6 [Александров М.С., Бакленева З.М. и др., 1972].

Таблица 2.6

Классификация и обозначения различных типов микропульсаций

Тип колебаний	Период, с	Частота, Гц	Обозначение
Длительные квазигармонические	$0,2 \div 5$	$5 \div 0,2$	<i>pc1</i>
	$5,1 \div 10$	$0,1 \div 0,196$	<i>pc2</i>
	$10,1 \div 45$	$0,0222 \div 0,099$	<i>pc3</i>
	$45,1 \div 150$	$0,00666 \div 0,022$	<i>pc4</i>
	$150,1 \div 600$	$0,00166 \div 0,0066$	<i>pc5</i>
Нерегулярные	$1 \div 40$	$0,025 \div 1$	<i>pi1</i>
Шумоподобные или импульсные	$40 \div 150$	$0,0066 \div 0,025$	<i>pi2</i>

В настоящее время для пульсаций типа *pc5–pc2* выявлены основные их особенности, которые подробно рассмотрены в работах [Александров М.С., Бакленева и др., 1972; Александров, Зайцев, 1978].

Учет особенностей колебаний типа *pc5–pc2* весьма важен при постановке длительных (например, суточных) наблюдений за изменчивостью электрического поля водоема и его связью с наземными магнитными и атмосферно-электрическими пульсациями и гидродинамическими флуктуациями в воде. Исключительно необходим учет их при изучении электробиологических явлений в лимнических системах.

Как уже упоминалось, диапазон флуктуаций электромагнитных колебаний $0,2 \div 5$ Гц представляет наибольший интерес с точки зрения гидрофизики, поэтому необходимо оценить хотя бы приближенно вклад этих колебаний в изменчивость напряженности электрического поля в Земле, тем более что в полосе частот $0,6 \div 4$ Гц даже на участках записей продолжительностью 1 ч всегда можно найти цуги колебаний разной полярности на всех частотах данного диапазона, что установлено на специальном геофизическом полигоне в Гарме [Журавлев, Сидорин, 1978].

Эти микропульсации занимают промежуточное положение между более высокочастотными колебаниями, обусловленными пульсациями пространственного заряда в нижней ионосфере и разрядами атмосферного электричества, и пульсациями *pc2–pc5*, которые возбуждаются геомагнитными микровариациями (круговыми токами

в ионосфере). Они изучены наиболее подробно, хотя колебания напряженности магнитного поля в этом диапазоне частот наиболее слабы [Александров М.С., Бакленева и др., 1972].

В обзорах [Александров М.С., Бакленева и др., 1972; Александров, Зайцев, 1978] даны значения напряженности электрического поля в Земле, возбуждаемого колебаниями типа *pc1* в диапазоне частот $0,3 \div 0,5$ и $0,5 \div 2,5$ Гц, а также колебаниями типа *pi1* в диапазоне частот 0,06 Гц и ниже. Как правило, эти значения не превышают $1 \cdot 10^{-7}$ В/м, т. е. очень малы.

Однако летом атмосферерики (грозовые разряды) дают местные амплитуды до $1 \cdot 10^{-4}$ В/м, а напряженность поля “жемчужин” (*pi1f* = 0,06 Гц) во время сильных магнитных бурь достигает также $1 \cdot 10^{-4}$ В/м. Эти амплитуды на порядок выше средних амплитуд непосредственно теллурических (земных) токов на суше и на море, но соизмеримы по порядку с амплитудами возмущений локального происхождения в пресноводных акваториях даже в условиях штилевой погоды, а также с электрическими эффектами биологической природы. Поэтому при интерпретации измеряемых сигналов необходимо учитывать эти колебания, хотя вероятность их появления, как это следует из изложенного, возрастает либо в период гроз, либо в период очень сильных магнитных бурь (полярных сияний).

Земные токи связаны с флуктуациями магнитного поля Земли [Краев, 1965; Александров М.С., Бакленева и др., 1972; Морские электромагнитные..., 1976; Александров, Зайцев, 1978]. В любой данный момент времени теллурические токи образуют вихри на поверхности Земли. Например, в 18 ч по гринвичскому времени существуют четыре вихря с центрами: 1) в северной части Атлантического океана с направлением против часовой стрелки, 2) в южной части Атлантического океана с направлением по часовой стрелке, 3) в северной части Тихого океана с направлением по часовой стрелке и 4) в южной части Тихого океана с направлением против часовой стрелки. Коэффициент корреляции между вариациями геомагнитного поля и земными токами равен 0,833; днем средние амплитуды микропульсаций A (в нТл) и потенциалов φ в Земле связаны равенством

$$A = \varphi \cdot 10^{-6} \text{ В/м} \quad (2.17)$$

в широком диапазоне амплитуд микропульсаций (от 0 до 500 нТл) с погрешностью ± 10 % [Александров М.С., Бакленева и др., 1972].

Известно, что среднее значение напряженности теллурического поля равно нулю, амплитуды его обычно колеблются около $(0,3 \div 1) 10^{-6}$ В/м, но в средних широтах на суше достигают $1 \cdot 10^{-5}$ В/м, а в море $(0,5 \div 1,5) 10^{-5}$ В/м. В крупных озерах средняя проекция

напряженности поля на меридиан составляет по модулю приблизительно $3 \cdot 10^{-5}$ В/м, а проекции на параллель — приблизительно $8 \cdot 10^{-5}$ В/м [Александров, Зайцев, 1978]. Теллурические токи в морской воде в несколько сот раз сильнее, чем в литосфере (электропроводимость морской воды в среднем в 10^4 раз выше, чем в Земле). Частота колебаний этих токов $0,011 \div 0,02$ Гц и не зависит от их амплитуды; наблюдаются они чаще всего в $22 \div 01$ ч по местному времени.

Спектральная плотность земных токов в диапазоне частот $1 \div 5$ Гц (колебания *рсI*) монотонно спадает с ростом частоты по закону, близкому к гиперболическому, на средних и высоких географических широтах.

Сравнение изменений горизонтальной составляющей электрического поля и вертикальной составляющей магнитного поля позволяет ориентировочно судить об удалении от источника этих изменений. Так, для частот $0,001 \div 0,1$ Гц величина $\Delta E / \Delta H \approx 10 \text{ Ом} < 120 \pi$; следовательно, источник флуктуаций поля на этих частотах — магнитный диполь, расположенный в ионосфере. Для частот $0,01 \div 0,1$ Гц величина $\Delta E / \Delta H \approx 100 \text{ Ом}$, а для частот ~ 1 Гц импеданс равен $\Delta E / \Delta H = (1 \div 3) 10^5 \text{ Ом}$. В этом случае микропульсации на этих частотах вызваны пульсациями электрического заряда, возможно, в нижней ионосфере [Александров М.С., Бакленева и др., 1972].

Вода, как полупроводящая среда, в значительной степени определяет условия распространения и затухание электромагнитных колебаний, поэтому важно оценить, реальна ли возможность зафиксировать проникновение пульсаций внешних источников на глубины водоема, где ведутся электрофизические измерения. Примером служит рис. 2.6, показывающий, на какой глубине фиксируется электрическое поле волны определенной частоты в морской воде при условии, что за меру взято 13 % напряженности. Если в качестве меры взять 2 % напряженности поля волны, то глубина проникновения увеличивается примерно в 2 раза. Глубинное проникновение космической радиации значительно больше, чем радиоволновой (рис. 2.6,б) [Краев, 1965]. Несмотря на экранирующую роль морской воды, на глубинах от 100 до 200 м в Черном море и Атлантическом океане сотрудниками МГИ АН Украины были отмечены четкие шумановские резонансы в электромагнитных пульсациях в полосе частот $10 \div 94$ Гц и более слабо в полосе частот $110 \div 190$ Гц [Проблемы морских..., 1980].

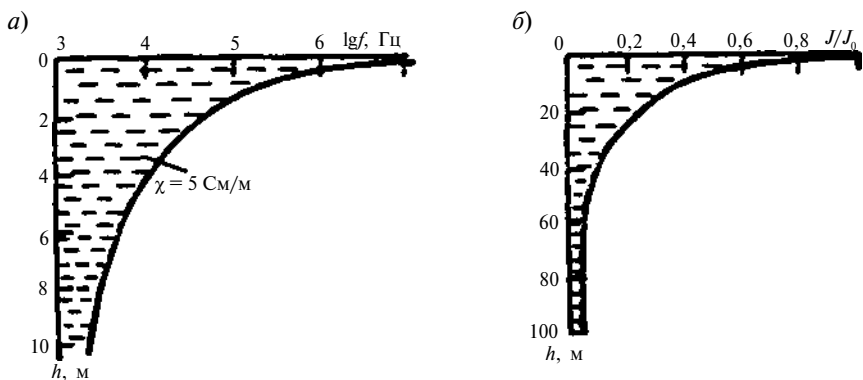


Рис. 2.6. Проникновение электромагнитных волн в водную среду: *а* — проникновение радиоволн в морскую воду на различных частотах; *б* — проникновение космической радиации в морскую воду

В середине 60-годов прошлого века П.А. Виноградов проводил специальные исследования короткопериодных колебаний теллурического поля со льда оз. Байкал. При тщательно подготовленном эксперименте ему удалось установить, что они с точностью до ошибок отсчета имеют один и тот же период на глубинах 5 и 1110 м и амплитуда их с глубиной убывает незначительно (93 ÷ 99 % от амплитуды на поверхности озера). Кроме того, с учетом электрической проводимости воды подтвердилось мнение, что убывание амплитуды колебаний с глубиной вызвано поглощением энергии волны водами Байкала и что источники их находятся не внутри Земли, а вне ее. Начало возбуждения таких микропульсаций на поверхности и глубине 1100 м — одновременное, ход их — параллелен, периоды — равны. При этом цуги (микропульсации) развиваются в основном в период с 12 до 20 ч мирового времени [Виноградов, 1957]. В дополнение к материалам П.А. Виноградова можно привести примеры из собственной практики автора. Нами проводились многократные длительные (суточные и многочасовые) наблюдения на озерах Северо-Запада России за флуктуациями электрического поля в поверхностных и глубинных слоях с помощью вертикально и горизонтально ориентированных электродных установок. Регистрируемые короткопериодные колебания, как правило, интерпретировались гидродинамическими возмущениями в среде — пульсациями течений, турбулентными вихрями, волнением; бывали случаи, когда они наблюдались вне связи с гидродинамическими источниками — при штилевой погоде. Однако синхронных измерений магнитного поля не проводилось, поэтому оснований для

увязывания этих колебаний с внешними источниками не было. В 1980 г. на оз. Красном (Ленинградская область) был проведен синхронный эксперимент: в течение суток на специальной неподвижной многоэлектродной установке в воде регистрировались флуктуации электрического поля на глубинах $1 \div 2$, $2 \div 3$ и $4 \div 6$ м, а на суше велись непрерывные записи элементов земного магнетизма. Частотный диапазон измеряемых сигналов был ограничен измерительным трактом аппаратуры — от 0,5 Гц и ниже. Поэтому высокочастотные колебания не были зарегистрированы. При внимательном изучении электро- и магнитограмм обнаружилось, что они содержат идентичные пульсации с различными частотами, приуроченные к одному моменту местного (московского) времени. Приводим краткую таблицу с этими данными (табл. 2.7).

Из приведенных данных можно предполагать, что колебания вызываются (по крайней мере, в более чем 50 % случаев) одним источником — магнитосферными возмущениями. Известно, что наиболее регулярная часть спектра теллурических токов имеет периодичность $15 \div 80$ с ($0,066 \div 0,0016$ Гц), которая используется в магнитотеллурическом зондировании для поисковых геологоразведочных работ [Справочник геофизика, 1969; Александров М.С., Бакленева и др., 1972; Морское магнитотеллурическое..., 1978]. Известно также, что океанские волны долгих периодов могут явиться источником серьезных электрических помех на указанных частотах, индуцируя флуктуации с амплитудами, порядок которых соизмерим с амплитудами теллурического поля. В этом случае морская геофизика стоит перед невозможностью исключения гидродинамических помех при решении прикладных задач. В нашем примере, не исключая возможности генерирования указанных пульсаций гидродинамическим источником, мы можем предположить о вероятности существования общего — планетарного — источника генерирования как электрических, так и гидродинамических колебаний, используя схему: внешнее электрическое поле возбуждает в проводящей среде градиенты проводимости, возникают перераспределение объемных электрических зарядов и механические перемещения частиц в направлении градиентов, появляются внутриводные конвективные движения и вихревые образования, пакеты, пульсирующие с частотой внешнего поля. Движение частиц самой среды возбуждает собственные электрические пульсации (МГД-эффект). Возникает иерархия электродинамических колебаний (или вихрей) по типу самоподдерживающегося динамо. Известный в физике эффект Зеемана—Лармора—Лоренца является своеобразным пусковым механизмом для начала вихреобразования в воде.

Микропульсации электрического и магнитного полей в оз. Красном и на побережье 14–15.08.1980 г.

Дата, время	Гидрометеорологические условия	Тип колебаний	Период τ , с	Частота f , Гц	Озеро (глубина, м)	Суша (поверхность)
14.08	Ветер 2÷3 м/с	Шумоподобные $pi2$	105÷106	0,01	Есть (1÷2)	Есть
15 ⁰⁰ ÷16 ⁰⁰ 17 ⁰⁶	Волнение 1 балл	Квазигармонические $pc3$	25	0,04	Есть (2÷3)	Есть
	Ветер 3 м/с		42	0,023		
	Волнение 1 балл	Квазигармонические $pc5$	240	0,004	Есть (2÷3)	Есть
18 ⁰³ ÷18 ⁰⁶	Ветер 0,5÷1 м/с					
	Слабое волнение					
Заход Солнца	Штиль	Нерегулярные $pi1$	20	0,05	Есть (2÷3)	
15.08	Штиль	Шумоподобные $pi2$	50	0,02	Есть (2÷3)	
	Течения нет	Квазигармонические $pc3$, $pc4$	40÷42	0,023÷0,025	Есть (2÷3)	
11 ¹² ÷2 ⁰⁰ 5 ⁰⁰ ÷5 ³⁷	Штиль	Высокочастотные “Пакеты” $pc1$	60	0,016	Есть (2÷3)	
Восход Солнца			<1	>1		
7 ⁰⁰	Волнения и течения нет	Нерегулярные $pi1$	15	0,066	Есть (1÷2) 2÷3	
8 ⁴⁵	Ветер 1÷2 м/с	Квазигармонические $pc3$	25	0,04	Есть (2÷3)	Есть
			30	0,033		
9 ⁰⁰ ÷10 ⁰⁰ 9 ³⁸	Волнение, $\tau = 1,4$ с,	Квазигармонические $pc3$	24÷25	0,04	Есть (2÷3)	Есть
	1÷2 балла	Нерегулярные $pi1$	10÷14	0,1÷0,07	Есть (2÷3)	
		Квазигармонические $pc3$, $pc4$	30	0,033	Есть (2÷3)	
			40	0,025		
			90	0,011		
10 ⁰⁰ ÷11 ⁰⁰ 11 ⁰⁴	Рябь, слабый ветер. Облачность	Квазигармонические $pc3$	42	0,023	Есть (2÷3)	Есть
	Рябь, ветер 1 м/с, течения нет;	Квазигармонические $pc4$, $pc2$	60	0,016	Есть (1÷2)	
	Солнце		5÷10	0,2÷0,1	Есть (2÷3)	

Гидродинамические источники движения воды открытых водоемов, связанные с изменчивостью гидрометеорологических факторов, являются причиной локальных возмущений магнитного и электрического полей. Эти причины и обуславливают ритмику полей, не связанную с планетарными геомагнитными процессами.

Морские магнитогидродинамические эффекты проявляются значительно сильнее, чем в пресной воде, поэтому они изучены в большей мере на морях и океанах [Шулейкин, 1968; Морские электромагнитные исследования, 1976; Александров, Зайцев, 1978; Исследование геомагнитного поля..., 1978; Морское магнитотеллурическое..., 1978; Проблемы морских..., 1980; Фундаментальные проблемы морских..., 1980; Изучение глубинного строения..., 1981].

Например, сильное морское волнение примерно в 5 баллов вызывает микропульсации магнитного поля у поверхности Земли до 100 нТл на высоте в пределах 30 м над уровнем океана [Crews, Futterman, 1962]. Океанские волны долгого периода ($10 \div 30$ с), амплитудой всего в несколько сантиметров могут индуцировать поля примерно 0,1 нТл или больше, аналогичные амплитуды индуцируют ветровые волны высотой 1 м (3 балла) [Beal, Weaver, 1970]. Теоретические расчеты Н.Т. Beal и J.T. Weaver [Beal, Weaver, 1970] показывают, что внутренние океанские волны с длинами более 200 м могут индуцировать поля не менее 0,1 нТл, что может быть измерено магнитометрами. В слое 100 м в океане 800-метровая волна с периодом 5,5 мин и амплитудой 10 м индуцирует магнитное поле до 1 нТл как на высоте 50 м над уровнем океана, так и на глубине 300 м ниже его [Beal, Weaver, 1970]. В пресной воде специальные исследования электрических эффектов, вызванных динамикой водоема, до 60-х годов не проводились. Опубликованная в 1959 г. работа П.А. Виноградова по наблюдениям теллурического поля в водах Байкала [Александров, 1973] коснулась лишь бегло и косвенно локальных электрических возмущений с периодом $2 \div 7$ с и амплитудой $(0,1 \div 0,8)10^{-6}$ В/м, которые автор связывал с течениями на глубинах. Однако контроля измерителями течений не проводилось, поэтому эти флуктуации, как мы полагаем, могут быть вызваны с той же вероятностью и внеземными источниками. Систематические исследования динамики электрического поля пресноводных акваторий под воздействием гидрологических факторов (ветровое волнение и зыбь, течения, турбулентные вихри, внутренние волны, сейши и т. д.) начал проводить Институт озераведения АН СССР (бывшая Лаборатория озераведения ЛГУ им. А.А. Жданова) с 1965 г. Работы эти освещены в публикациях автора (В.В. Александров, 1968, 1970, 1973, 1977, 1978, 1980, 1981). Подробно

гидродинамические источники возмущения поля рассмотрены в разделе 2.4 настоящего издания.

Рассматривая проблему геофизических ритмов мы не анализировали внутригалактические и внегалактические высокоэнергетические источники возмущения электрического поля Земли и биосферы, поскольку они еще недостаточно изучены. Однако результаты их воздействия известны и зарегистрированы. Выяснение причин возникновения динамики электромагнитных полей системы Солнце—Земля и их способности оказывать прямое воздействие на условия жизни на Земле — вопрос не схоластический, он теснейшим образом связан со всеми областями человеческой деятельности. Континентальные крупные водоемы являются своеобразным зеркалом, отражающим все последствия как внешних (космос), так и внутренних (Земля) электромагнитных воздействий на экологические условия окружающей среды, а в конечном счете — на экологию человека (см. ч .1).

2.2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

- 2.2.1. Электрополюметрия — новый перспективный метод изучения водоемов**
- 2.2.2. Измерительные электродные системы**
- 2.2.3. Зондирующие устройства и их назначение**
- 2.2.4. Метрологическая оценка электрополюмеров, анализ помех и способы их снижения при полевых исследованиях**
- 2.2.5. Принципиальные способы электрополюметрии акваторий**
- 2.2.6. Новые средства измерений электрических и магнитных полей**

2.2.1. Электрополюметрия — новый перспективный метод изучения водоемов

Для изучения гидрологии озер и их экосистем, как показал опыт морских исследований, целесообразно использовать методику естественного поля, которую здесь назовем электрополюметрией водоемов. Термин *электрополюметрия* применяется в данном тексте с учетом рекомендаций ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

Метод естественного поля (электрополюметрия) ранее был разработан для наземной геофизической разведки природных ресурсов. В гидрофизических исследованиях озер такая методика до 1965 г. не применялась. В настоящее время этот подход получил существенное развитие. Повысился уровень техники измерений, внедрены новые методические приемы и аппаратура с повышенной точностью измерений.

Электрополюметрия водоемов имеет целый ряд преимуществ перед активными традиционными геофизическими методами: безопасность в экологическом отношении, скрытность, оперативность, возможность беспрепятственного исследования любых площадей и глубин акваторий и др. В некоторых случаях электрополюметрия может оказаться наиболее информативным полевым экспресс-методом для исследования качества воды, санитарно-биологического состояния акватории, для слежения за динамикой пелагических и донных организмов, для обнаружения геологических и геохимических неоднородностей на дне котловины водоемов, всевозможных предметов в их глубоководной части и других специальных поисковых работ.

Следует подчеркнуть, что электрополюметрия в гидрофизике — весьма перспективный метод. На его основе создается аппаратура с высокими метрологическими характеристиками. Имеются новые технические разработки Морского гидрофизического института АН Украины (Севастополь), Сибирского НИИ метрологии, Всероссийского НИИ метрологии им. Д.И. Менделеева. И в то же время в 1981 г. на семинаре “Магнитометрические и электрометрические методы и аппаратура в морских исследованиях” (Москва, ИЗМИР РАН) отмечалось, что пока “...отсутствует надежная метрологическая база для создания электрометров”.

В течение 1970—1980 годов наблюдался весьма результативный подъем научных исследований динамики геоэлектрического поля в водной среде [Александров, 1973; Абрамова и др., 1978; Александров, 1980; Александров, 1981; Александров, 1985]. Это было связано с расширением разведочных геофизических работ на шельфе и в абиссальных районах океана. В настоящее время уже хорошо известно, что геологическое электромагнитное зондирование подводного ложа океана, усовершенствование новой техники, применяемой для решения различных задач в морской и пресной воде, сопряжены с определенными трудностями при создании высокоточной и чувствительной аппаратуры. Эти трудности обусловлены значительными электромагнитными помехами, вызванными разнообразными источниками возмущений нормального геоэлектрического

поля, и в первую очередь, гидродинамическими (течения, поверхностные и внутренние волны, турбулентные пульсации линейных и вихревых перемещений среды [Беляев и др., 1974; Богородский и др., 1981; Агасян, Николаева, 1986]).

Изученность этого вопроса неравноценна. Электрические поля, индуцированные в проводящей среде крупными квазистационарными течениями, изучались давно [Арх, 1962; Cox et al., 1970; Гаценко, 1970; Исследование геомагнитного поля, 1978; Сочельников, 1979; Кукушкин, Карнаушенко, 1981; Изучение глубинного строения..., 1981], и на основе этого были созданы соответствующие приборы для определения скорости потока: электромагнитный измеритель течений — в бывшем СССР (ЭМИТ), геоэлектрокинетогрaф — в США (G.E.K.) и другие приборы [Сысоев, Волков, 1957; Арх, 1962; Cox et al., 1970; Гаценко, 1970; Thorpe et al., 1973; Ryokborst, 1976; Сочельников, 1979]. Электрические поля длиннопериодных волн, турбулентных пульсаций почти не изучены, и поэтому опубликованные в разные годы материалы о динамических характеристиках электрических полей, вызванных волновыми и вихревыми процессами, не только приветствовались научной общественностью, но и способствовали постановке специальных исследований [Горская и др., 1972; Фонарев, 1968; 1981; Бондаренко и др., 1978; Морское магнитотеллурическое ..., 1978; Изучение глубинного строения..., 1981]. Тщательно проведенные экспериментальные работы дали более точные сведения об истинных физических характеристиках электрического поля, обусловленного динамикой воды. Стала быстро совершенствоваться измерительная техника, появились специальные установки типа глубоководной автономной станции для измерения электрического и магнитного полей на дне океана [Клековкин и др., 1979; Клековкин и др., 1982; Кукушкин и др., 1985], типа “свободно падающего вращающегося зонда” конструкции США [Александров, 1981], отечественного “электрополемера” конструкции В.И. Лопатникова [Лопатников, 1973]. Созданы новые установки, в которых стала применяться более совершенная технология электролитических контактных проводников тока, в результате которой громоздкие и длинные кабельные измерительные линии заменялись короткими, а контакт электродного чувствительного элемента с внешней средой (водой) осуществлялся без температурных и электрохимических погрешностей [Клековкин и др., 1979; Фонарев, 1981; Клековкин и др., 1982; Семенов и др., 1983]. В данном сообщении целесообразно упомянуть и об уникальном приборе, сконструированном в Институте земного магнетизма и распространения радиоволн РАН

(1976), с помощью которого измерялась дивергенция естественного электрического поля в ограниченном объеме. Регистрация флуктуации плотности объемного заряда этим прибором с учетом знания величины геомагнитного поля в точке наблюдения позволяла перейти непосредственно к расчету ротора скорости пульсирующего потока в глубинах водоема (см. разд. 2.2.6).

Результаты измерений электрокинетических эффектов в воде, обуславливающих возмущение поля, могут методически оцениваться экспериментатором весьма различно:

1) переменную напряженность электрического поля водоема можно рассматривать как интегральную характеристику среды. Исследование изменения ее во времени и в пространстве отражают динамическое состояние водоема в его неразрывной связи с внешними и биосферными источниками генерации полей;

2) электрополюметрию, например, гидродинамических источников на поверхности и в глубинах, следует рассматривать как один из наиболее эффективных подходов к решению фундаментальной задачи изучения гидрофизики водоемов, тем более что он имеет теоретическое обоснование [Шерклиф, 1967; Повх, 1974; 1976; Семенов и др., 1981]. Прикладное значение этого метода состоит в том, что оперативно решаются проблемы гидрологии открытых акваторий — установление закономерностей распределения энергии гидродинамического поля по частотам, определение перемещений в пространстве вихревых цепочек, выявление структурных функций высших порядков для пульсирующего поля и т.д. Это особенно ценно для изучения полей скоростей течений в труднодоступных глубоководных слоях, где другие инструментальные методы неприменимы [Фонарев и др., 1969].

В дальнейшем рассмотрим второй подход — оценку турбулентного состояния водной среды на примере типичного пресноводного озера в Ленинградской области (Карельский перешеек, оз. Красное), влияния волновых поверхностных процессов, береговой и донной геолого-геоморфологической структуры крупного водного объекта (Ладожское, Онежское озера) и др.

Решающая причина пассивного развития электрополюметрического исследования гидрофизики водоема кроется в отсутствии четко разработанных методов измерения электрофизических характеристик водной среды. Здесь повинны также инерция и нежелание принять новое большинством практических специалистов, добывающих необходимую информацию непосредственно в природных условиях. Поэтому рассматриваемую проблему все еще приходится относить к “молодой научной проблеме” и соглашаться с

необходимостью пропагандировать азы методики измерений. К настоящему моменту основы такой методики разработаны, и здесь описываются методы, принципиальные способы и новые средства электрометрии акваторий, метрологические требования к обеспечению достоверности результатов измерений, способы снижения технических погрешностей при полевых работах и т.д.

Учебно-познавательная направленность книги заложена в специальном разделе, посвященном моделированию электрокинетических явлений в лабораторных условиях (гидродинамические явления, управление движением твердофазных примесей, поведение и активность водных организмов в условиях искусственно создаваемых режимов электрического и магнитного воздействия).

2.2.2. Измерительные электродные системы

Обычно измерение естественного электрического поля в разведочной геофизике осуществляют регистрацией естественной разности потенциалов. Определение напряженности поля по данным измерений ведется в соответствии с известными инструкциями [Справочник геофизика, 1969; Семенов, 1980]. На практике зачастую достаточно пользоваться измеренными величинами потенциала или градиента, не производя утомительных пересчетов в напряженность, или применять специально рассчитанные и откалиброванные зонды.

Измерение поля в воде и на поверхности земли существенно отличается. Вода — среда флуктуирующая, поэтому при прочих равных условиях необходимо учитывать дополнительные, не свойственные земной поверхности, колебания поля. Если в морском магнитотеллурическом зондировании и разведочной геофизике эти колебания рассматриваются как помеха, то в гидрофизических исследованиях они несут основную положительную информацию. Для гидрофизики важно знать, каковы источники флуктуаций поля, каковы закономерности формирования фоновых колебаний, каковы методологические способы разделения флуктуаций по принадлежности к источникам. Поэтому здесь нельзя ограничиться лишь регистрацией суперпозиции полей, необходим последовательный, скрупулезный путь идентификации источников поля.

Смоделировать природные явления, которые мы наблюдаем в водоеме, сложно. Они протекают в системах неравновесных, содержащих электрически заряженные частицы. Частным случаем неравновесных систем являются электрохимические системы. В неравновесных

системах наряду с понятием “концентрация частиц” следует учитывать переменное локальное электрическое поле. Полагают, что определяемые этим полем числовые характеристики системы “также будут иметь пространственные и временные осцилляции” [Шноль, 1980; Шноль, Коломбет и др., 1982; Ильницкий, 1985]. Исходя из этого положения, лабораторное моделирование природных электрофизических явлений в целом нецелесообразно, хотя некоторые конкретные источники генерации поля могут быть достаточно успешно смоделированы (см. разд. 2.3). Именно поэтому автор полагает, что не следует стремиться к измерению средних величин характеристик поля (амплитуд, периодов), поскольку по всему объему флуктуирующей среды существуют пространственно-временная нестабильность и неоднородность поля в трехмерном пространстве. Отсюда следует существенный методический вывод: при исследовании электрических характеристик водоема нельзя добиваться воспроизводимости результатов, это приводит лишь к затягиванию экспериментальных работ и трате сил. В ряде случаев (см. разд. 2.3.1–2.3.3) локальные поля оказываются достаточно стабильными, и желаемая воспроизводимость измерений позволяет выполнить расчеты усредненных характеристик и ввести статистические оценки. Для этого оператору необходимо грамотно оценить продолжительность квазистационарности наблюдаемого явления и связанное с ним электрическое поле с тем, чтобы применить соответствующие методы математической обработки результатов.

При идентификации источников полей в натурных условиях автор использовал: 1) свой многолетний опыт, 2) классификацию источников флуктуаций поля Земли в КНЧ-диапазоне (см. ч. 1), 3) результаты лабораторного моделирования, 4) сопоставление с другими физическими характеристиками исследуемого источника (например, акустическими, температурными, скоростными, химическими), 5) результаты направленного, “калибровочного эксперимента”.

Следует все же заметить, что изучение электрического поля водоема может преследовать не только сугубо гидрофизические цели. Наблюдения за изменчивостью поля и проводимостью воды могут способствовать познанию явления в целом. В этом случае они успешно будут использованы в радиотехнике, навигации и др. Здесь отпадает необходимость в идентификации источников поля. Обработка результатов ведется по общепринятым методам математической статистики.

Для исследования электрического поля в жидкой среде возможно применение бесконтактного и контактного способов. Существуют

бесконтактные измерители-преобразователи индуктивного типа [Гордиенко и др., 1975] и емкостного [Павловский, Поляков, 1967]. Известные в настоящее время бесконтактные первичные измерители — чувствительные элементы — могут обеспечить измерение напряженности электрического поля в воде в пределах десятков мкВ/м.

Контактный метод измерений имеет ряд преимуществ по сравнению с бесконтактным. Благодаря возможности применения длинной измерительной линии (базы) и использования высокочувствительной регистрирующей аппаратуры контактным методом можно измерить напряжения (разность потенциалов) в десятые-сотые доли мкВ в широком диапазоне частот при достаточно простых конструкциях чувствительного элемента (электрода).

Недостатком контактного метода является сложность отделения сигнала в области инфранизких частот от собственной электродвижущей силы электродов (ЭДС). Реальная чувствительность контактного метода измерений электрического поля в области инфранизких частот значительно ниже и определяется главным образом стабильностью собственной ЭДС (φ_0) электродов и степенью ее компенсации.

Если исходить из предположения скомпенсированной ЭДС φ_0 электродов и считать, что электроды установлены в заданных точках измерений, то значение φ_0 при измерении суммарного, т.е. результирующего напряжения, определяется из соотношения

$$\varphi_0 = \Delta\varphi_0 + \varphi_0(t), \quad (2.18)$$

где $\Delta\varphi_0$ — нескомпенсированная часть ЭДС_{соб} электродов, определяемая погрешностью компенсации; $\varphi_0(t) = \varphi_s(t) + \eta(x)$. Здесь $\varphi_s(t)$ обусловлена влиянием внешних условий на электроды, а $\eta(x)$ — режимом измерения поляризационного эффекта на электродах [Тарбеев и др., 1976]. Дрейф ЭДС пары электродов зависит от изменения собственных потенциалов каждого электрода. Он включает в себя также изменения потенциалов, возникающих непосредственно во внутреннем растворе электродной системы, и потенциалов, возникающих на границе между внутренним раствором и внешней средой (водой) в электродах закрытого типа.

Создание электрода теоретически возможно из любого химического элемента, способного обмениваться с внешней средой простыми ионами. Однако на практике очень редко изготавливают электроды из активных элементов, так как в этом случае трудно предотвратить непосредственное химическое взаимодействие электрода с жидкой

средой. Чаще всего применяют электроды, которые представляют собой комбинацию инертного или активного электрода с каким-либо веществом, так называемые полужелезоды. Например, готовят чувствительную систему электрод—ионообменная пленка (или мембрана) [Морф, 1985].

В течение последних 30 лет разными исследователями разрабатывались и внедрялись разнообразные электродные системы [Фрумкин и др., 1952; Скорчеллетти, 1970; Духин, 1975; Тютюнова, 1976; Горина, Рывкина, 1978; Petiau G., Morat P., 1978; Мейтис, 1984; Лукианец и др., 1985; Морф, 1985; Агасян, Николаева, 1986]. Существенный вклад в разработку электродных систем для применения их в гидрофизических исследованиях внесли советские специалисты: Б.Н. Кабанов, Д.И. Лейкис, Э.С. Севастьянов (Институт электрохимии АН СССР); В.И. Лопатников (МГИ АН УССР); А.Г. Понсов, М.М. Богородский, В.В. Новыш (ИЗМИР РАН); С.Я. Антонов, М.Ю. Горина, В.А. Тарасов, Ю.В. Тарбеев (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева); Л.В. Подгорных (ВНИИ океангеологии)*.

В экспериментальных работах (особенно в период 1966—1995 гг.) автор использовал систему электродов, разработанную Л.В. Подгорных. Другие конструкции электродов (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева — завод «Эталон») применялись как дублирующие и служили контрольными, эталонными образцами для калибровки и поверки изготовленных автором датчиков поля. Как выяснилось, последние оказались пригодными для решения поставленных задач не только в морской, но и в пресной воде. Эти датчики более просты в изготовлении, сравнительно дешевы. Они могут быть рекомендованы для массового производства с учетом некоторых современных технических возможностей, допускающих применение других материалов и иное конструктивное оформление.

Основные требования для создания электрохимической ячейки (зонда) из двух идентичных полужелезодов следующие. Полужелезод должен быть изготовлен из инертного материала, устойчивого к растворяющей способности воды, быть индикаторным по отношению к какому-либо распространенному в природной воде аниону (Cl^- или SO_4^{2-}), обладать низким температурным коэффициентом, низкой стабильной собственной ЭДС_{соб} по отношению к стандартному нулевому потенциалу, низкой магнитной восприимчивостью, обладать чувствительностью не ниже 10^{-5} В/м и т.д. Поэтому в качестве основы электрода был взят свинец.

*Аббревиатура сохранена как было принято до изменения политико-экономического статуса России для облегчения библиогр. поиска

Относительный электродный потенциал E_0 свинцовой пары в водных растворах, являющийся мерой способности электродов передавать катионы в раствор, оказывается наименьшим и равным $-0,126$ В [Мелвин—Хьюз, 1962; Рабинович, Хавин, 1978, 392 с.]. Свинец — диамагнетик, его магнитная восприимчивость мала по абсолютному значению ($\chi_m < 0$) и не зависит от температуры, высока его проводимость. В качестве твердой ионообменной мембраны целесообразно было применить хлорид свинца. Известно, что эта соль обладает достаточно низкой растворимостью в водных растворах (низка величина показателя активности хлорида свинца), реакция пленки из хлорида свинца определяется произведением растворимости $ПР_{PbCl_2} = 1,6 \cdot 10^{-5}$; эта величина значительно больше, чем у хлорида серебра ($ПР_{AgCl} = 1,8 \cdot 10^{-10}$), но достаточна для сохранения стабильности пленки при контакте с водными растворами. Кроме того, электронная структура свинца такова, что он ($Pb(II)$), имея радиус $r = 0,12$ нм, является более сильным окислителем для хлора, например, чем катион Mg^{2+} , хотя и имеет такой же заряд и гораздо больший радиус r . Свинец лучше связывает анион Cl^- [Мейтис, 1984]. Устойчивую труднорастворимую ионообменную пленку на свинцовом электроде получают путем гальванического анодирования его в электролитической ванне. Затем готовится неполяризующийся электрод (полуэлемент).

Готовый металлический электрод, покрытый солью $PbCl_2$, помещают в керамический стакан из тонкодисперсной керамики марки Ф-7, заполняют стакан гелем из 3%-ного раствора агар-агара и насыщенного раствора хлористого калия и герметизируют. Конструкция полуэлемента в разрезе и его внешний вид показаны на рис. 2.7. Раствор хлорида калия — нереакционноспособный электролит, ионы которого переносят ток между соприкасающимися внутренним (электродным) и внешним естественным (окружающей средой) растворами. При измерении разности потенциалов между точками среды (электродами) образуется электролитическая — концентрационная цепь Доннана:

Рб	I		III	II	Рб
	$PbCl_2$, твердая фаза	$KCl(C_1)$, жидкая фаза	$MeCl(C_2)$, 1 раствор или вода	$KCl(C_1)$, $PbCl_2$, 2 жидкая фаза, твердая фаза	

а)

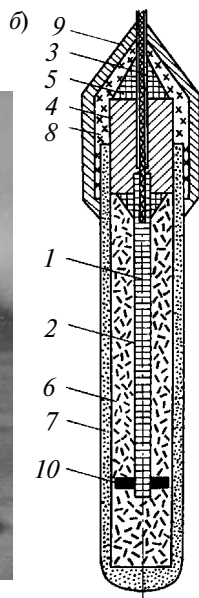
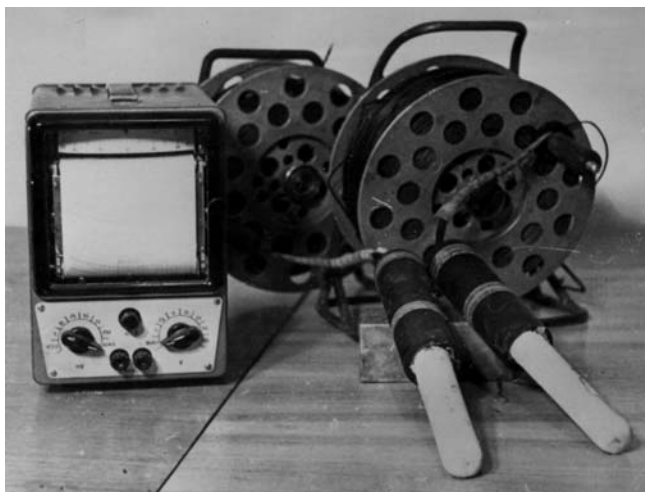


Рис. 2.7. Измеритель-преобразователь электродного типа
(конструкция Л.В. Подгорных):

а — внешний вид электрода; б — вид чувствительного элемента в разрезе: 1 — свинцовый стержень; 2 — пленка соли хлористого свинца; 3 — сталежелезный провод; 4 — резиновая пробка; 5 — слой стиракрила; 6 — агар-агар с насыщенным раствором хлористого калия; 7 — керамический стакан; 8, 9 — изоляционное покрытие; 10 — предохранительная шайба

где I — свинцовая-хлорсвинцовая электродная система, находящаяся во внутреннем растворе KCl концентрации C_1 (в нашем случае — насыщенный раствор), представляет собой первый полуэлемент (электрод в сборе) или первую электролитическую цепь электролитического первичного измерителя поля; II — аналогичный второй полуэлемент (электрод в сборе) или вторая электролитическая цепь электролитического первичного измерителя поля, III — внешний раствор, содержащий любое металлическое соединение $MeCl(C_2)$ с концентрацией C_2 и возможными концентрациями C_1^I и C_1^{II} на границах раздела 1 и 2 между внутренними растворами электродов или раствором электролитического контакта (жидкостного соединения) в зондирующем устройстве, если таковой имеется (см. разд. 2.2.6, “Вихремер”).

Высокая концентрация хлористого калия в электродах необходима по следующей причине. При очень высокой концентрации соли вся вода оказывается вовлеченной в гидратные оболочки, в которых она теряет свои обычные свойства, в частности способность к эстафетной передаче ионов H^{1+} и OH^{1-} . Это особый случай высокой степени упорядоченности структуры воды, при которой диффузия идет от электрода во внешнюю среду [Майрановский, 1975]. Таким путем ликвидируется один из источников нежелательной поляризации электрода, а также обеспечиваются стабильность работы ионообменной пленки и ее защита от разрушения. Полупроницаемая стенка керамического стакана в некоторой степени способствует деполяризации электрода за счет снижения миграционной скорости ионов внешней среды.

Ввиду того, что концентрация электролита в полуэлементе существенно превышает концентрацию внешнего раствора (природная вода), существует потенциал диффузии $\Delta\varphi_d$, возникающий на срезах электролитических цепей. Помимо ЭДС_{соб} электродной пары, появление $\Delta\varphi_d \neq 0$ обуславливает неравновесность системы. Погрешность за счет потенциала жидкого соединения измерить или точно рассчитать невозможно [Мейтис, 1984], но ее величина в 1 мВ оказывает такое же влияние на результаты потенциометрии, как и погрешность в 1 мВ в измеренном потенциале. На практике необходимо как можно быстрее произвести выравнивание $\Delta\varphi_d$ за счет выдержки электродов в исследуемой среде. Измерения начинают после установления значений $\Delta\varphi_d$, близких к постоянному значению.

Технические характеристики электродов, применяемых в Институте озерадения в 1965–1975 гг., даны в табл. 2.8. Как видно, технологические характеристики электродов $\text{Pb}|\text{PbCl}_2$ не уступают хорошо известным $\text{Ag}|\text{AgCl}$ -электродам, а в некоторых случаях и превосходят их. Так, термический и концентрационный коэффициенты $\text{Ag}|\text{AgCl}$ -электродов равны примерно 0,35 мВ/град и 0,50 мВ/С %, коэффициент давления — примерно $2 \cdot 10^{-2}$ мВ/кПа [Лейкис, Кабанов, 1956; Двойной слой..., 1981].

Таблица 2.8

Характеристика электродных полуэлементов конструкции ВНИИ океан-геологии (Л.В. Подгорных) и модернизированных в Институте озероведения АН РФ (В.В. Александров)

Характеристика	Электрод Pb PbCl ₂ ВНИИ океангеологии	Электрод Pb PbCl ₂ ИОЗ РАН
Длина керамического стакана, мм	195	220*
Диаметр стакана, мм	25	25*
Длина свинцового стержня, мм	105	180
Площадь соприкосновения с гелем, мм ²	525	1440
Электрическое сопротивление постоянному току, Ом	Не более 60	Не более 70**
Дрейф ЭДС _{собр} во времени, мВ/ч	0 ± 0,1	0 ÷ 0,05 ± 0,2
Температурный коэффициент ЭДС _{собр} , мВ/град	0 ± 0,08	0 ± 0,08
Изменение ЭДС _{собр} в зависимости от давления, мВ/кПа	Не более ± 1·10 ⁻⁴	Не более ± 1·10 ⁻⁴
Постоянная времени, с	0,1	0,1

* В работах 1980–1995 гг. применялся аналогичный электрод с габаритными размерами 70x10 мм.

** Не выше, чем у кальцийселективных микроэлектродов [Lanter, Steiner et al., 1982].

Электродные характеристики для пары идентичных датчиков регистрировались в насыщенном растворе хлорида калия или в воде по схеме:

Pb	I		III		II		Pb
PbCl ₂ ,	KCl(C ₁)		KCl(C ₂)		KCl(C ₁), PbCl ₂		
твердая	жидкая	1	раствор или	2	жидкая	твердая	
фаза	фаза		вода		фаза	фаза	

На рис. 2.8 показаны результаты лабораторных испытаний электродных пар (систем). Видно, что ЭДС_{собр} во времени изменяется линейно, максимальный градиент достигает значения 0,1 ÷ 0,2 мВ/ч. При низкой и высокой температуре величина ЭДС_{собр} изменяется с различной крутизной. В диапазоне температур, наблюдаемых в реальных условиях, температурный коэффициент ЭДС_{собр} не превышает 0,03 мВ/град. Испытания по определению температурного коэффициента были проведены автором также и на кафедре геофизических

методов разведки ЛГУ для ознакомления ее сотрудников (проф. А.С. Семенов) с применяемыми электродами, результаты аналогичны; обнаружен определенный гистерезис при сопоставлении данных, полученных при нагревании и охлаждении первичных температур до первоначальной температуры (см. рис. 2.8,з); участок ординаты CD в цикле должен быть в пределах 0,5 мВ; если его значения превышают 0,5 мВ, то пара полуэлементов неудачна — стабильность ЭДС_{соб} и срок службы невелики.

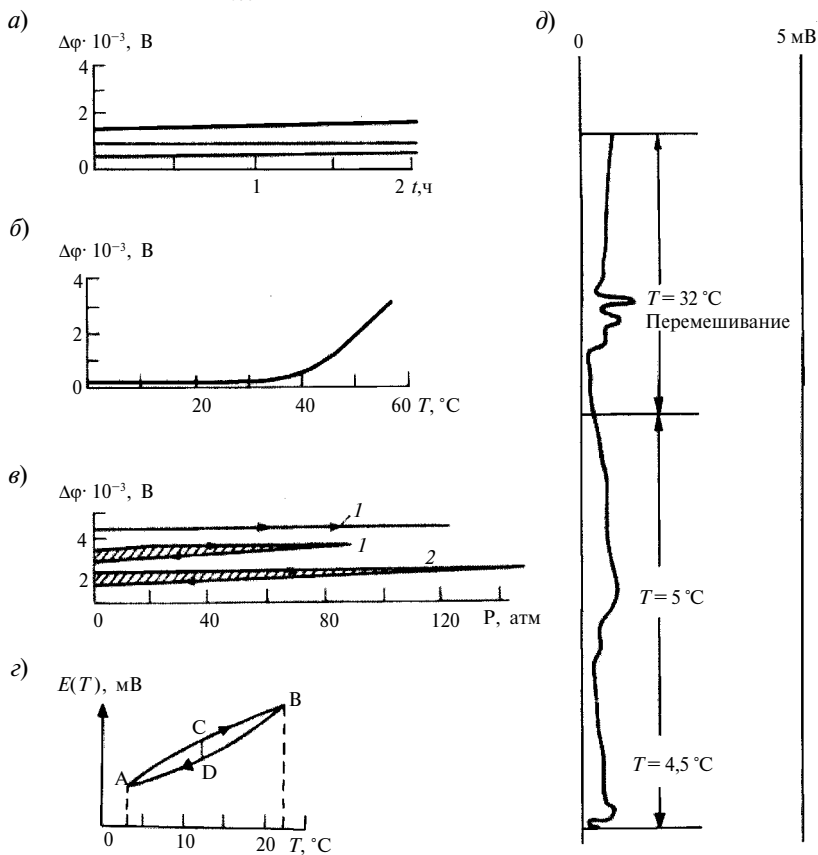


Рис. 2.8. Зависимость собственных ЭДС электродов $\text{Pb}|\text{PbCl}_2$ от различных факторов:

а — от времени; б — от температуры; в — от давления для двух (1, 2) модификаций электродов; з — зависимость ЭДС_{соб} электродной пары при температурном контроле в режиме нагревание—охлаждение; д — термический контроль в полевых условиях перед измерением, на участке с $T = 32^\circ\text{C}$ — перемешивание

Воспроизводимость ЭДС_{сое} пары полуэлементов получена в пределах значений, допустимых для неполяризующихся электродов, при этом показана независимость их характеристик от химического состава и концентрации контролируемой среды (воды) (см. рис. 2.8, д). Тем не менее, регулярная поверка электродов в период полевых работ необходима, поскольку ионный обмен между гелевой средой полуэлемента и водой приводит к изменению ЭДС_{сое} и нарушению чувствительности системы. Поскольку собственный шум электродов Pb|PbCl₂ исключительно мал (на 1 ÷ 2 порядка меньше по сравнению с наиболее приемлемыми с этой точки зрения Ag|AgCl-электродами), а, кроме того, в диапазоне интересующих нас инфранизких частот (0,5 ÷ 5 Гц) измеряемый полезный сигнал очень мало зависит от ЭДС_{сое} электродов, реальная чувствительность контактного метода по напряженности ЭП оценивается примерно величиной 5 ÷ 10 мкВ/м [Petiau, Morat, 1978; Тарасов, 1980].

Особый интерес вызывает учет влияния высокого давления на изменение ЭДС_{сое} электродов, при котором происходят ускоренное выщелачивание промежуточной гелевой среды, нарушение химического равновесия электродной системы, увеличение отношения шум/сигнал и возможно механическое нарушение герметичности датчиков.

Использованные в наших измерениях электроды могут работать на больших глубинах с гарантией от повреждений: пористый керамический стакан обеспечивает непрерывное уравнивание гидростатического давления вне и внутри его, ликвидируя избыточное давление на электрод. В морских условиях Л.В. Подгорных проводил испытания датчиков до глубины 1500 м, Александров В.В. (автор) — на Ладожском озере до 240 м и на Байкале до 1000 м. В обоих случаях были получены аналогичные результаты: разность потенциалов между парой близко сведенных электродов за счет разности давлений не превышала погрешности измерений (± 1 мВ), а градиент давления равнялся примерно $1 \cdot 10^{-4}$ мВ/кПа. Опыт полевых испытаний электродов для расчета коэффициента давления подробно описан в работе [Александров, 1973]. Основной рекомендацией по результатам испытаний является искусственное обжатие электродов путем опускания их на максимальную глубину водоема после их изготовления. В итоге ЭДС_{сое} электродов будет мало зависеть от давления или результат не выйдет за погрешность измерения в 1 мВ.

Вопрос об учете влияния давления на электроды включает в себя оценку не только статического, но и динамического воздействия

окружающей среды. Большую работу по измерению и оценке так называемой “динамической барочувствительности электродов” различной конструкции выполнил сотрудник ИЗМИР РАН СССР М.М. Богородский, который показал, что в мелководной зоне морей ЭДС_{сое} датчиков может оказаться нестабильной за счет переменного давления на них при волнении [Богородский, 1980; Богородский, Коротаев и др., 1981].

Для повышения точности измерений применяют различные способы компенсации ЭДС_{сое} электродной пары — с помощью специальных компенсационных мостовых электронных схем или с помощью вращающихся контактно-запорных устройств в электродных системах для модуляции входных сигналов и применения измерительной аппаратуры переменного тока. В настоящее время имеется целый ряд оригинальных инженерных решений этой проблемы, которые существенно продвинули методику измерения поля в воде [Тарасов, 1980; Клековкин, Селятицкий, 1980–1982]. К сожалению, основную экспериментальную работу по сбору материала пришлось выполнять без такой аппаратуры, тем более, что она пока еще не поступает в массовое производство. Благодаря содружеству с ВНИИМ им. Д.И. Менделеева значительную часть работы мы провели, используя новые электродные системы, разработанные метрологами для контактных измерений в корабельных условиях. К ним относятся хлорсеребряные, хлорталлиевые и другие типы первичных преобразователей (номенклатура их: МО-17-01, М-148). В последние годы применялась аппаратура МО-67 (Киев). Высокие метрологические характеристики этих приборов позволили провести поверочные работы по оценке свойств применявшихся в 1965–1975 гг. электродов, выполнить расчеты погрешностей измерений (см. разд. 2.2.2–2.2.4). Некоторые виды готовых электродных систем конструкции ВНИИМ им. Д.И. Менделеева показаны на рис. 2.9. Чувствительные элементы их описаны в работах [Тарасов, 1960; Горина, Барабанова, 1976; Горина, Барабанова, 1979]. Следует отметить, что рассмотренные системы $Pb|PbCl_2$ исключительно просты в изготовлении по сравнению с приборами МО-17-01, М-148 и др., в которых предусмотрены камеры компенсации давления, блоки глубиномера, температурного контроля и т.д., поскольку назначение последних — не исследование природных процессов, а техническое обеспечение ВМФ. Однако опыт использования простых и дешевых материалов (химически чистый свинец, керамические фильтры) при несложной технологии изготовления

датчиков, а также их достаточно высокие метрологические характеристики позволяют рекомендовать применять их и для задач обороны и для методических исследований в ВМФ.

2.2.3. Зондирующие устройства и их назначение

Зондирующие устройства в зависимости от задач измерения подразделяются на потенциальные и градиентные. В электрофизиологических исследованиях существуют соответствующие аналоги измерения — моно- и биполярное отведение потенциала.

Зондирующее устройство (в дальнейшем — зонд) представляет собой блок из двух электродов, помещенных в диэлектрический кожух из винипласта или оргстекла. Расстояние между электродами подбирается так, чтобы обеспечить максимальную чувствительность в зависимости от электрического поля источника. Применялись зонды с 1-, 2-, 5-, и 10-метровыми базами (L). При измерении электрической напряженности с размерностью В/м на выходе зонда получаем разность потенциалов в вольтах (В), поэтому коэффициентом преобразования зонда должна быть размерная величина метр (м). Длина измерительной линии зонда должна быть всегда известна точно и указана в расчетах.

Крепление электродов в корпусе зонда осуществляют с помощью герметичных разъемов, что позволяет быстро их заменять в случае необходимости, а также регулярно производить проверку их ЭДС_{соб} в электролитической ванне. Наиболее поздние по конструкции зонды имели специальные камеры, в которых находились либо насыщенный раствор KCl, омывающий электрод при транспортировке и хранении, либо вода озера в период между вертикальными зондированиями среды. На рис. 2.9,а показан образец зондов ранних модификаций.

Поисковый 10-метровый зонд представляет собой капроновый трос с закрепленными электродами в диэлектрических обтекателях и грузами-противовесами, опускаемый с кормы судна или бортовых стрел (рис. 2.10) в период режима буксирования со скоростью 5 ÷ 10 узлов. Непременным условием работы с такими зондами является использование механической лебедки с подвижным токосъемным устройством, обеспечивавшим непрерывную регистрацию данных.

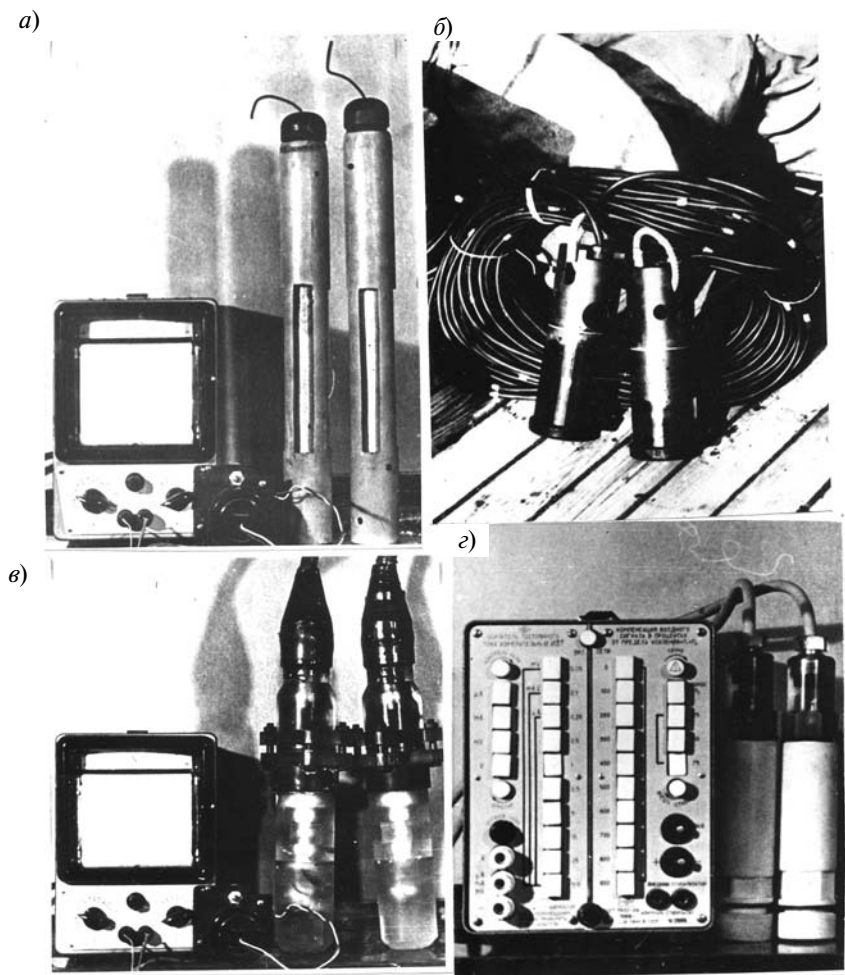


Рис. 2.9. Зондирующие устройства:

а — модификация зонда для буксирования за судном или вдоль борта (Институт озераведения, 1970–1973); *б, в, з* — электроды конструкции ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (хлорсеребряные и хлорталлиевые)

В период комплексных гидрофизических съемок, когда обследовались трассы, пересекающие акватории Ладожского или Онежского озер, необходимо было расположить по возможности близко друг к другу все измерительные устройства (датчики удельной электрической проводимости и температуры, оптического прозрачногомера

воды, оксиметра, электрополемера) для того, чтобы получить наиболее корректные данные. С этой целью зонды-электрополемеры буксировались вдоль судна с помощью “выносных стрел” на расстоянии не менее 5 м, где влияние поля судна вносит несущественные погрешности в полезный сигнал (рис. 2.10). Следует отметить, что такой буксируемый зонд это своеобразная модификация отечественного электромагнитного измерителя течений (ЭМИТ) или зарубежного геомагнитного электрокинетографа (ГЕК) системы фирмы O.R.E. модели 150A (Ocean Research Equipment). И, безусловно, не от хорошей жизни появляются такие модификации, так как приобрести необходимую аппаратуру сложно. Конструктивная особенность наших зондов обуславливалась необходимостью исследований полей загрязненной воды, поиска геофизических и техногенных источников искажения фона электрического поля озер, но не задачей изучения скорости течений (см. ч. 3, 4).

Принципиально новый измеритель пространственных производных потенциала электрического поля — многоэлектродный зонд-установка “Вихремер”, сконструированный в ИЗМИР РАН. Принцип измерения, конструкция и испытания первого советского макета прибора рассмотрены в разделе 2.2.6, и здесь же отметим, что его отличительной особенностью являются применение электролитических жидкостных контактов в электродной системе и совмещение измерительной схемы и блока усиления сигналов в единый погружаемый контейнер (рис. 2.11).



Рис. 2.10. Приспособление для выноса зонда за борт э/с “Лимнея”. 1973–1975 гг.

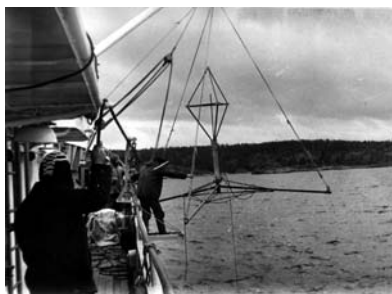


Рис. 2.11. Макет установки “Вихремер” перед погружением на глубину 30 м. Э/с “Талан”. 1978 г.

2.2.4. Метрологическая оценка электрополюмеров, анализ помех и способы их снижения при полевых исследованиях

При измерении квазистационарного электрического поля обязательно определяют суммарную погрешность ЭДС_{соб} электродных систем и ее нестабильность (“поляризацию”). Оценка погрешностей электролитических первичных измерительных преобразователей (табл. 2.9) и экспериментальные исследования амплитудно-частотной характеристики электродных систем подробно описаны в работе В.А. Тарасова [Тарасов, 1980].

Таблица 2.9

Состав погрешностей электролитических первичных измерительных преобразователей (ИП) [Тарасов, 1980]

Инструментальные погрешности	Погрешности, связанные с искажением измеряемого ЭП
1. Нестабильность нулевого уровня первичного ИП а) неисключенный компонент ЭДС _{соб} электродных систем б) разность диффузионных потенциалов 2. Собственный шум 3. Изменение импеданса 4. Нелинейность амплитудно-частотной характеристики	1. Электрическое поле гальванических источников 2. Электрическое поле индукционного происхождения 3. Искажение поля непосредственно корпусами первичных ИП

В общем случае ЭДС_{соб} электродов изменяется случайно и, как известно, весьма плавно. В.Н. Митрофановым было показано, что максимальная погрешность от нестабильности ЭДС_{соб} электродов определяется максимальной скоростью ее изменения (при линейной временной поляризации) [Митрофанов, 1968]. Допустимая скорость изменения ЭДС_{соб} электродов оказалась прямо пропорциональной частоте исследуемого поля; в этом случае за счет роста скорости поляризации электродов возрастает и ошибка измерения истинного поля, если использовать принцип компенсационного способа измерения.

Процесс поляризации электродов, обусловленный физико-химическими реакциями при контактировании их со средой, приводит к тому, что возникшее при этом добавочное поле уменьшает амплитуду сигнала первоначального поля, вызвавшего ток. Кроме того, наблюдается сдвиг фазы первичного сигнала, характерный для гармонического процесса. Для постоянного поля ($\omega = 0$), как было показано В.Н. Митрофановым, погрешность измерения из-за

поляризации электродов минимальна, и исследования проводятся с максимальной чувствительностью при измерениях компенсационной аппаратурой. Компенсационный способ измерения, таким образом, целесообразен при исследовании локальных квазистационарных полей.

Относительная погрешность и сдвиг фазы, возникающие при измерении электрического поля компенсационной аппаратурой, определяются выражениями:

$$\delta = 1 - \sqrt{\frac{K^2 (K^2 + \omega^2)}{\omega^2 (K + P)^2 + (K^2 + \omega^2)^2}}, \quad (2.19)$$

$$\Delta\Theta = \arctg \frac{\omega(KP - \omega^2)}{K(K^2 + \omega^2) + \omega^2(K + P)}, \quad (2.20)$$

где P — скорость поляризации электродов (эксперимент); ω — частота измеряемого поля; K — скорость компенсации для различных частот измеряемого поля; $\Delta\Theta$ — сдвиг фазы поля, определяемый как $\arctg(-P/\omega)$.

Расчеты [Тарасов, 1980] показывают, что при измерении значений φ контактными ИП электродного типа относительная погрешность δ , обусловленная искажением поля электродами, может составить несколько процентов, причем с уменьшением длины измерительной линии (базы) эта погрешность возрастает при одних и тех же габаритах датчиков. Суммируя изложенное, можно отметить, что для снижения значения $\Delta\varphi_d$, входящего в нулевой уровень электродной системы, целесообразно электролитические контакты в системе заполнять раствором, близким по концентрации к таковой во внешнем растворе (воде); это может снизить значение $\Delta\varphi_d$ до десятых-сотых долей мВ (десятые, сотые доли процента). Однако относительная погрешность контактных электродных систем при измерении потенциалов ЭП может составить единицы-десятки процента (см. разд. 2.2.1–2.2.3). Относительная погрешность тех же систем, применяемых в специальных корабельных условиях, может достигать также единиц-десятков процента [Тарасов, 1980].

В качестве конкретного примера приведем расчет относительной погрешности измерений градиента потенциала электрического поля, связанного с диффузионно-адсорбционными (электролитическими) процессами на контакте условно чистых и загрязненных водных масс в районе выпуска сточных вод целлюлозно-бумажными заводами (Приозерский или Кондопожский заводы). Достоверный сигнал,

связанный с примесями сточных вод — минимальная амплитуда — равен 2 мВ (эксперимент). Зондирующее устройство при опускании регистрирует сигналы ошибок:

Волнение 3 балла (h волн = $0,75 \div 1,5$ м) $\varphi = 0,03$ мВ (эксперимент)	Флуктуации электромагнит- ного поля Земли $0,05 \div 0,06$ мВ (эксперимент)	Температурный дрейф при максимально возможной разнице $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ $0,3$ мВ (паспорт электродов)	Дрейф ЭДС _{соб} за 1 ч работы $0,1$ мВ (паспорт электродов)

При горизонтальном зондировании состав погрешностей пополнится ошибкой за счет динамического приращения поля при боковых рывках и смещения курса судна, равной 0,5 мВ (эксперимент), но поправка на ΔT уменьшится до 0,03 мВ, так как перепады температуры по горизонтали для зонда $L = 10$ м не достигают значения более 1°C . В этом случае относительная погрешность измерений $\delta_{\text{сум}} = 37\%$. Максимальная погрешность при буксировании зонда может достигнуть и 50 %, но в то же время падать до 10 % и менее, когда граница между чистыми и загрязненными водами регистрируется сигналом 5 мВ и более (границы не размыты).

Все это справедливо при условиях: 1) зонд находится вне влияния электрического поля судна, 2) глубина в районе зондирования превышает 10 м и исключает погрешности за счет геоморфологии дна, 3) в районе работ отсутствуют мощные источники электромагнитных аномалий, 4) исключены грозовые разряды и т.д. [Александров, 1985]. Другие источники поля (трубопроводы, геологические объекты, речные эстуарии и др.) могут регистрироваться при погрешностях в пределах 1–2 % в силу своей достаточно четкой локальности и обособленности на фоне слабо флуктуирующего поля водоема, когда работы проводятся с учетом рекомендуемых автором ограничений (разд. 2.2.5, 2.2.6, ч. 4).

Анализ помех и способы их снижения при проведении исследований в полевых условиях

В зависимости от цели измерения тот или иной источник неоднородности поля может выступать либо как генератор полезного сигнала, либо как побочный источник искажения изучаемого поля

*Только в случае несоблюдения методических ограничений, введенных автором — см. ч. 3.

(“помеха”). К таким источникам относятся биообъекты, гидродинамические пульсации, донные электрические эффекты, геомагнитные флуктуации в воде и т.д. Приведем ряд примеров, поясняющих это утверждение:

- Долгопериодные приливные колебания и волны Россби, внутренние волны и турбулентность, крупные “долгоживущие” вихри с диаметром десятки-сотни километров (“ринги”) электрически проявляют себя на глубинах океана около 4,5 км и вносят искажения в сигналы, посылаемые магнитотеллурической аппаратурой (МТЗ). С другой стороны, при измерении полей морских течений прибором ЭМИТ теллурические токи вносят погрешности, достигающие 100 %.

- Для определения эквивалентной проводимости донных осадков в океане и глубинного зондирования подводных участков литосферы с успехом могут использоваться электромагнитные поля волн и течений [Фонарев, 1981].

- Опыт показывает, что экспериментально определенный коэффициент затухания электромагнитных волн в диапазоне 20–200 Гц на глубинах океана до 300 м хорошо совпадает с расчетным. Однако на глубинах свыше 300 м (300–800 м и более) расчетные и экспериментальные коэффициенты затухания существенно различаются. Этот факт можно объяснить тем, что поля внутреннего гидродинамического источника сравнимы по амплитудно-частотным характеристикам с полями внешнего — атмосферного — источника [Кукушкин, Карнаушенко, 1981].

Таким образом, полезный сигнал и помеха меняются местами в зависимости от задачи экспериментальной работы, а реализация экспериментальных исследований зачастую ограничивается комплексом внешних факторов.

Характерным примером в этом смысле может служить измерение удельной электрической проводимости морской воды в полевых условиях. Осредненные значения градиента χ в зависимости от пространственных компонент пульсации скорости течений обычно определяют исходя из предположения о том, что в пространстве и времени проводимость распределена по нормальному закону. Допущение это, видимо, справедливо при волнении моря 2–3 балла, так как при большем волнении (4–5 баллов и более) рассчитанные значения энергетических спектров для производных скорости и проводимости по всему массиву данных изменялись на 4–5 порядков [Беляев, Озмидов, 1974]. С аналогичными методическими трудностями автору пришлось столкнуться при электрометрическом контроле районов загрязнения. Волнение свыше 3 баллов обуславливало искажение фона настолько, что полезный сигнал выделить было практически очень трудно. Поэтому были введены методические

ограничения при использовании электрометрических средств измерения (см. ч. 4) [Александров, Зайцев, 1978].

При обследовании больших площадей акваторий в целях контроля качества воды или изучения струйных потоков в эстуариях и устьях рек (см. разд. 2.2.4, 2.2.6) необходим методический учет искажения полезного сигнала индукционными помехами. Такие помехи наблюдаются при измерениях с помощью буксируемых зондов во время поворотов судна, когда изменяется направление движения измерительной двухэлектродной линии значительных размеров (более 5 м) относительно геомагнитного поля. Нами проведены специальные измерения на “методических полигонах” в Ладожском и Онежском озерах, где были выдержаны требования: ближайшие участки с мелководьем и береговой чертой находились не ближе 1 мили, а глубины на полигоне превышали 30 м во избежание влияния морфологии дна.

Координаты Ладожского полигона:

$\varphi^{\circ} = 61^{\circ}05'00'' - 61^{\circ}10'00''$ с.ш., $\lambda^{\circ} = 30^{\circ}20'00'' - 30^{\circ}30'00''$ в.д.

Координаты Онежского полигона (Кондопожская губа):

$\varphi^{\circ} = 62^{\circ}00'00'' - 62^{\circ}05'00''$ с.ш., $\lambda^{\circ} = 34^{\circ}27'00'' - 34^{\circ}32'00''$ в.д.

Выбранное место полигона не препятствовало строгому удерживанию судна на курсах $360^{\circ} - 180^{\circ}$, $90^{\circ} - 270^{\circ}$ и на всех промежуточных четвертных курсах, а также была свобода поворотов (циркуляции) судна на взаимно обратных галсах. Судно буксировало по этим направлениям зондирующие устройства при благоприятной гидрометеорологической обстановке (отсутствие ветра и волнения). Велась непрерывная запись флуктуаций естественного поля и эхолотирования дна. На обоих самописцах отмечались время, курсы, точки поворота и направления радиуса циркуляции судна при поворотах. Предполагалось, что методические требования однородности среды (отсутствие электрического поля градиента концентрации, интенсивных гидродинамических возмущений и геологических аномалий поля) сохраняются на протяжении экспериментов. В Ладожском озере средние глубины полигона составляли $130 \div 140$ м, курсы буксирования зондов выдерживались точно, и наблюдаемые индукционные аномалии поля были устойчивы. В среднем они оценивались как $1 \cdot 10^{-4}$ В/м. В Онежском озере средние глубины полигона равнялись $50 \div 60$ м, и амплитуды индукционного сигнала в краевых точках его колебались от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1,5 \cdot 10^{-4}$ В/м, в среднем около $1,3 \cdot 10^{-4}$ В/м. Дополнительная информация об индукционных помехах была получена в периоды многократных методических рейсов и специальных съемок, которые подтвердили порядок амплитуды сигнала и обусловили необходимость учета этой погрешности в задачах контроля среды.

Конкретные примеры индукционных аномалий электрического поля при изменении направления движения буксируемого зонда на

испытательном полигоне в Ладожском озере 21 июня 1975 г. представлены на рис. 2.12.

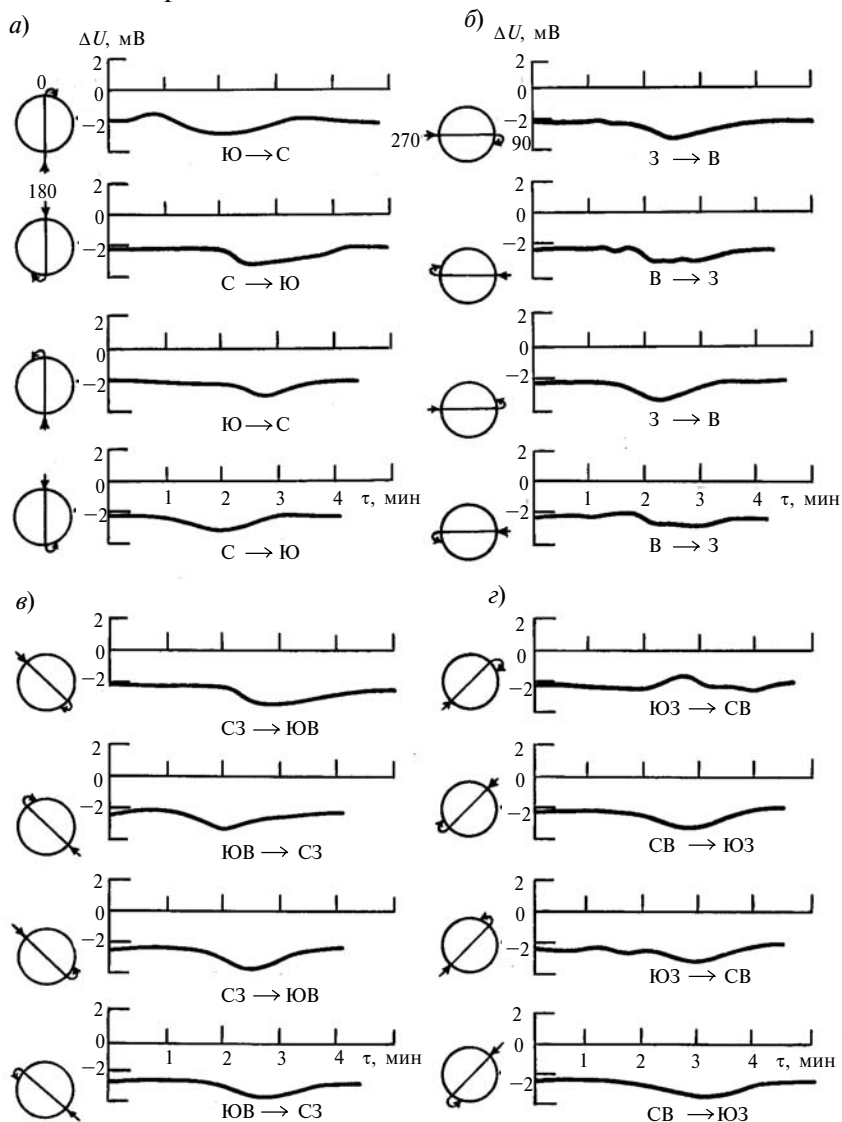


Рис. 2.12. Индукционные аномалии электрического поля при испытаниях на ладожском полигоне 21 июня 1975 г.: а — основные курсы С-Ю; б — основные курсы 3-В; в — промежуточные курсы СЗ-ЮВ; з — промежуточные курсы ЮЗ-СВ

При обследовании загрязняемых акваторий зачастую необходимо менять курсы судна, зонд описывает циркуляцию, возникает ЭДС индукции в измерительной линии, нужно поэтому знать порядок погрешности. Целесообразно при обработке заведомо исключать сигналы, зафиксированные в точках поворота [Александров, Зайцев, 1978].

При движении зонда в воде на электродах за счет трения возникает незначительное электростатическое напряжение. При точных измерениях такую ЭДС трибополяризации следует учитывать. Установлено: а) ЭДС трибополяризации является величиной квазипостоянной при неизменной скорости движения; б) средний уровень потенциала пропорционален скорости движения; в) ускорение движения обуславливает импульсное изменение уровня потенциала.

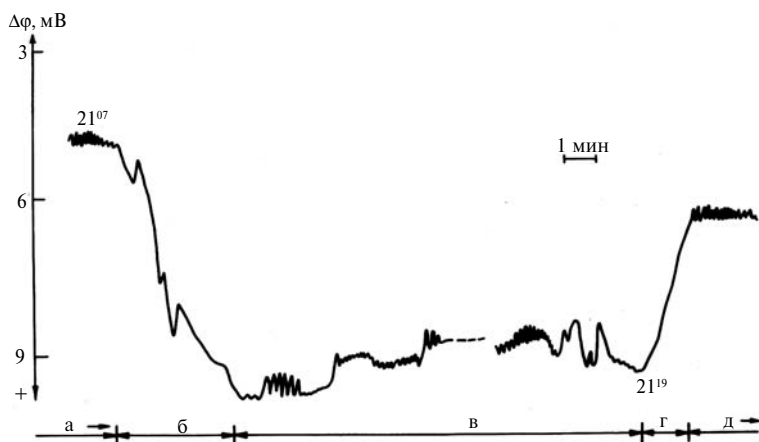


Рис. 2.13. Эффект трибополяризации на электродной буксируемой установке, смонтированной у борта судна на выносных стрелах

На Ладожском озере были проведены измерения трибополяризационного эффекта. На рис. 2.13 представлен характерный пример трибополяризации электродов при буксировании градиент-зонда, смонтированного и закрепленного на выносных стрелах у борта судна. До остановки судна, начальный момент которой приходится на 21 ч 07 мин, уровень поля находился в пределах $5 \cdot 10^{-3}$ В* в течение нескольких часов.

*Для простоты приводим данные прямо с ленты, не производя пересчета на градиент в В/м.

После остановки двигателя судно стало медленно терять скорость, но продолжало еще двигаться с отрицательным ускорением. До полной остановки прошло 4 мин, в течение которых уровень поля повысился до $10 \cdot 10^{-3}$ В, а приращение составило $5 \cdot 10^{-3}$ В. Далее в течение 8 мин судно не двигалось, и за это время уровень колебался в пределах $(9 \div 10)10^{-3}$ В. В 21 ч 19 мин дали ход, и до установления режима буксирования прошло около 2 мин. За это время уровень поля снова снизился и установился в пределах $6 \cdot 10^{-3}$ В, градиент составил $4 \cdot 10^{-3}$ В.

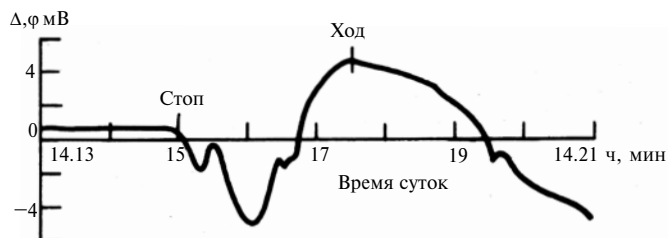
По характеру левой и правой частей приведенной записи можно заметить, что после увеличения скорости судно не вышло на прежний ходовой режим, в результате чего уровень поля по записи стал отличаться от первоначального на $1 \cdot 10^{-3}$ В. Этот результат следует обязательно принимать во внимание при обработке материала, поскольку при исключении из общей картины поля участков с временными остановками на общей диаграмме могут оказаться необъяснимые скачки уровня поля. В этом случае неизбежны искажение истинного уровня поля и появление нежелательных погрешностей.

Бортовой зонд всегда давал идентичную запись при эффекте трибополяризации в зависимости от того, к каким клеммам были подключены электроды, а именно: при остановке — либо повышение, либо понижение уровня поля; при ходе, — наоборот, понижение или повышение уровня, соответственно. Это обусловлено тем, что зонд, закрепленный вдоль борта на двух выносных стрелах, при снижении скорости хода и остановках практически не опускался глубоко, и ни один из электродов не мог касаться дна. Зонд, буксируемый за кормой, также подвержен эффекту трибополяризации, и при остановках фиксировалось изменение уровня поля в пределах $(2 \div 8)10^{-3}$ В. Однако в этом случае запись поля имела иногда иную картину при остановках: сначала уровень поля понижается, затем повышается, это объясняется тем, что сначала наблюдается уменьшение потенциала трибополяризации при остановке, а затем фиксируется касание дна хотя бы одним из датчиков. Общая длина линии буксируемого зонда примерно 50 м, и при остановках судна он сначала переходит в вертикальное положение, затем приближается ко дну и даже может его коснуться на малых глубинах.

Пример эффекта трибополяризации для условий штилевой погоды на Ладожском озере дан на рис. 2.14,а (непосредственно с ленты, без пересчета на градиент). Буксировался зонд за кормой. От полной остановки до вновь начавшегося движения уровень сигнала изменился скачком на $5 \cdot 10^{-3}$ В. При переходе от условия дрейфа судна, когда зонд практически был в вертикальном положении, до

установившегося режима буксирования на полном ходу, когда зонд приобрел горизонтальное положение, трибополяризационный эффект может достигать $6 \cdot 10^{-3}$ В в течение примерно 1 минуты (см. рис. 2.14,б).

а)



б)



Рис. 2.14. Эффект трибополяризации на электродной буксируемой установке за кормой судна в штилевую погоду на Ладожском озере: а — режим: остановка—ход; б — режим: дрейф—полный ход

Изменение скорости буксирования также сказывается на характере записи электрического поля. При увеличении скорости хода с малой до средней и потом до полной происходит увеличение амплитуд сигнала в 3–4 раза.

Трибополяризационный эффект (амплитуду сигнала) удавалось снизить, меняя длину буксирного троса, на котором крепился зонд, перемещаемый за кормой. Аналогичные меры по предотвращению помех при буксировании зондов рекомендованы в работе [Проблемы морских..., 1980], а также целесообразно бифилярное крепление зонда к тросу [Александров, Зайцев, 1978, с. 215–218]. Эффект трибополяризации важно учитывать при вертикальных зондированиях, подбирая скорость движения зонда так, чтобы обеспечить минимум погрешностей.

Была проведена оценка реакции электродов при их опускании: глубина 12 м, приращение градиента потенциала $3 \cdot 10^{-3}$ В/м, скорость опускания 0,4 м/с; реакция зонда — $7,5 \cdot 10^{-3}$ В/м·с. Таким

образом, при скорости движения зонда, заданной механической лебедкой в 1 м/с, можно ожидать изменения истинного сигнала на $7,5 \cdot 10^{-3}$ В/м, т.е. при такой скорости измеряемый фоновый сигнал может оказаться завышенным в несколько раз или на порядок. Оптимальный вариант погружения — скорость $V = 0,01$ м/с, в этом случае трибополяризационная реакция датчиков не выйдет за пределы их пороговой чувствительности (10 мкВ).

Специальные работы по учету возможных радиопомех при измерении естественного поля были проведены в штилевую погоду. Вертикальный зонд с размерами электродной измерительной линии 2 м служил “приемной антенной” и опускался в слои $0 \div 2$ и $3 \div 5$ м. Воспринимались сигналы судовой радиостанции на частоте 470 кГц. Измерительная электрометрическая аппаратура регистрировала флуктуации поля в полосе частот не выше 3 Гц.

Результаты измерения показали, что сигналы естественного поля модулируются искусственными (радиоволнами) на глубинах $0 \div 5$ м при общей глубине места 12 м. В слое $0 \div 2$ м колебания естественного фона, модулированные серией радиосигналов из трех точек и тире, оказываются по амплитуде в 3–4 раза выше, чем фоновые (рост с 300 мкВ до 1,2 мВ), и частота их отличается от естественной. В слое $3 \div 5$ м колебания естественного фона были близки к пороговой чувствительности установки и представляли собой плавную кривую, на фоне которой выделялись серии коротких (точки) и длинных (тире) сигналов, причем участок записи, включающий радиосигнал, характеризовался спадом уровня естественного фона, но амплитуда модулированных колебаний была значительно меньше, чем в слое $0 \div 2$ м. Таким образом, вертикальное зондирование среды в период работы судового радиопередатчика нецелесообразно (рис. 2.15).

Источники помех искусственного происхождения, влияющие непосредственно на регистрирующую аппаратуру, описаны достаточно подробно в специальной литературе [Инструкция ..., 1963; Семенов, 1980] и, безусловно, учитываются оператором, поэтому здесь они не рассматриваются.

2.2.5. Принципиальные способы электрополеметрии акваторий

Способы электрополеметрии акваторий в наших исследованиях разрабатывались в разное время с учетом известных приемов в наземной геофизике и личного опыта автора, приобретенного в морских экспедициях.

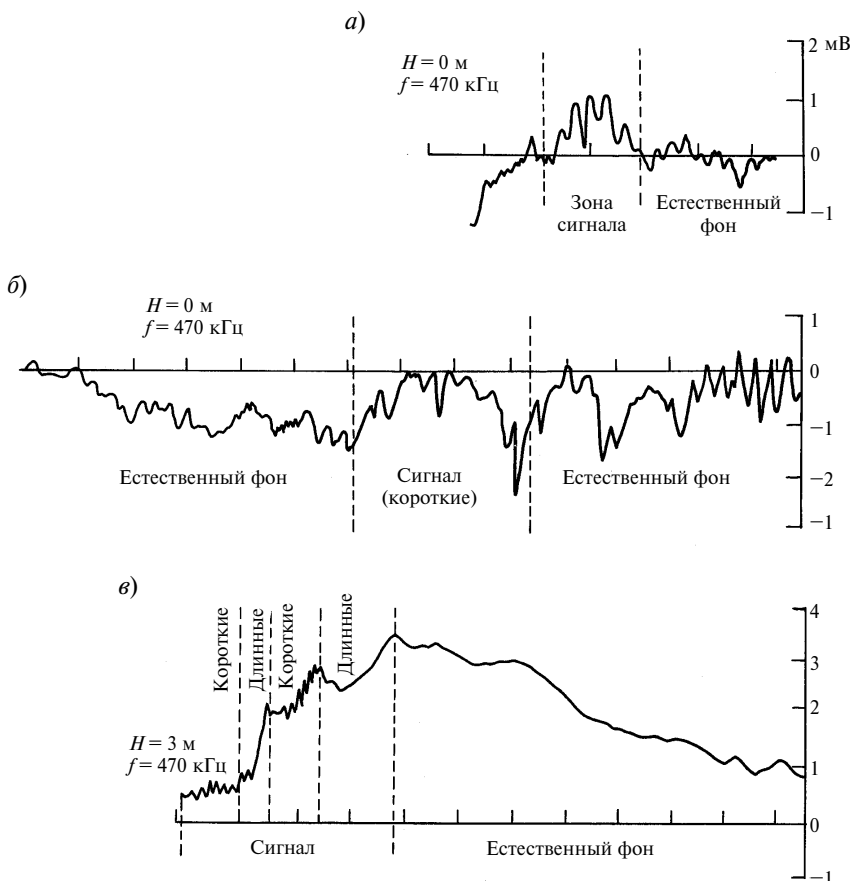


Рис. 2.15. Искажение естественного фона флуктуаций электрического поля при работе судовой радиостанции:

а — на поверхности воды; б — в слое $0 \div 2$ м; в — в слое $3 \div 5$ м

Общая структура способов электрополюметрии представлена на схеме:

Приемы зондирования среды

Потенциал-зондирование		Градиент-зондирование		
1) $\varphi = f(t)$	2) $\varphi = f(L)$	3) $\frac{d\varphi}{dL_x} = f(t)$	4) $\frac{d^2\varphi}{dL^2} = f(x)$	5) $\frac{d\varphi}{dL_{x,y,z}} = f(t)$
$L = \text{const}$	$L \neq \text{const}$	Одномерное	$x = \text{var}$	Многомерное

Потенциал-зондирование: 1) измерение осуществляется в дальней точке пространства от центрального (нулевого) электрода при неизменной длине измерительной линии (базы) L в течение длительного отрезка времени; 2) измерение осуществляется с равномерным перемещением поискового (индикаторного) электрода от центрального (нулевого) электрода до дальней точки пространства при переменной длине измерительной линии (базы) L с наименьшими затратами времени.

Градиент-зондирование: 3) измерение осуществляется с помощью короткой измерительной линии $L = \text{const}$, ориентированной по одному координатному направлению неподвижно, в ближней точке пространства от источника поля в зависимости от его излучаемой мощности в течение длительного отрезка времени; 4) измерение осуществляется с помощью короткой измерительной линии (базы) $L = \text{const}$ в движении в направлении переменной координаты x ($x = \text{var}$) в течение времени, обеспечивающего надежный контакт с источником поля или средой, возмущенной источником; 5) измерение осуществляется с помощью коротких измерительных линий (баз) по трем взаимно перпендикулярным координатным направлениям $L = x = y = z = \text{const}$ в стационарных условиях в ближней от источника поля зоне в течение длительного отрезка времени (вариантом трехкомпонентной градиент-установки является многоэлектродная дивергентная установка “Вихремер”, см. разд. 2.2.6).

В разделах 2.2.2–2.2.4 представлен лишь один пример принципиальной конструкции измерительных систем, но существуют весьма многочисленные методики по изготовлению других чувствительных элементов, которые также могут использоваться для решения упомянутых задач. Отметим только, что именно с помощью рассмотренных электродных систем были изготовлены различные зондирующие устройства — полемеры, которые позволяли беспрепятственно измерять электрические поля в воде на различных глубинах и на обширных по площади акваториях [Александров, 1985].

В зависимости от задач исследования применяются и различные способы (приемы) зондирования среды. Связь этих способов с целями исследований показана на схеме:

Цели и задачи зондирования

I. Изучение изменчивости поля в пространственном масштабе	II. Изучение изменчивости поля во временном масштабе	III. Изучение изменчивости поля в пространственно- временном масштабе
1) Профильные съемки по одному азимутальному направлению	4) Потенциал- зондирование на длинных линиях $\varphi = f(t) \quad L = \text{const}$	7) Градиент- зондирование короткими линиями в движении $\frac{d^2\varphi}{dL^2} = f(x)$
2) Галсовые съемки (полигон параллельных профилей)	5) Одномерное градиент-зондирование $\frac{d\varphi}{dL_x} = f(t)$	
3) Радиальные съемки (полигон азимутальных направлений)	6) Многомерное градиент-зондирование $\frac{d\varphi}{dL_{x,y,z}} = f(t)$	

I. Изучение пространственной неоднородности поля:

1) профильные съемки применяются, как правило, для зондирования поверхностного слоя воды на больших расстояниях (галсы вдоль и поперек озера, крупного залива) или для обнаружения крупных стационарных источников неоднородности (геологические объекты), а также для изучения природы индукционных помех и т.д.;

2) галсовые съемки применяются для изучения “нормального фона” (части акватории), для обнаружения локальных случайных источников поля, для оценки влияния береговой зоны в направлении открытой акватории и т.д.;

3) радиальные съемки применяются для изучения устьев рек, обнаружения случайных объектов в лагунах и бухтах, особенно съемки со льда, со шлюпок и катеров на чистой воде.

II. Изучение флуктуационной части естественного поля:

4) потенциал-зондирование $\varphi = f(t)$ при $L = \text{const}$ применяется для изучения флуктуаций поля при возможно высокой чувствительности (длинные базы L) (оз. Ладожское, Андижанское водохранилище);

5) градиент-зондирование $\frac{d\varphi}{dL_x} = f(t)$ применяется для изучения флуктуаций поля в одной точке в ближней зоне от источника,

например, в зоне встречи речных и озерных вод, как это применялось в устье рек Тихой и Вуоксы (Ладожское озеро) или р. Ангары (оз. Байкал), а также в узкостях и проливах для обеспечения комплексного изучения водообмена, турбулентных потоков и т.д.;

б) градиент-зондирование $\frac{d\phi}{dL_{x,y,z}} = f(t)$ применяется для получения спектральных характеристик поля, как правило, связанных с гидродинамическим источником (оз. Красное).

III. Пространственно-временная неоднородность поля:

7) градиент-зондирование $\frac{d^2\phi}{dL^2} = f(x)$ — наиболее эффективный прием изучения пространственно-временной изменчивости электрического поля, например, для получения планшета изолиний равного градиента потенциала в координатах время—глубина (плоскостной двумерный разрез). Применялось в Ладожско-Онежском бассейне как экспресс-метод контроля качества воды, для обнаружения крупных неоднородностей поля, связанных с природными или антропоферными источниками его возмущения, с миграцией планктона.

Общие замечания по технологии измерений

Все электрополюметрические измерения по выбранному участку (объекту), намеченные на определенный отрезок времени, начинаются и заканчиваются контрольными определениями значений ЭДС_{соб} электродных систем. При обследовании значительных площадей акватории или проведении длительных наблюдений вводятся промежуточные контрольные измерения ЭДС_{соб} для оценки стабильности дрейфа во времени или учета данных возмущений поля.

При полигонных съемках все наблюдения на выбранных участках акватории приводятся к условно выбранному нулевому уровню — потенциалу “нулевого электрода”. Необходимо следить за возможным смещением этого уровня, иначе появляются грубые ошибки при построении графиков потенциала $\Delta\phi = f(x)$, отнесенные к первоначальному уровню, или при построении карт эквипотенциальных линий. Значение “нулевого уровня” корректируется введением поправки за счет дрейфа ЭДС_{соб} со своим знаком при условии ее стабильности. По официальным методическим требованиям в наземных условиях разведочной геофизики [Якубовский, Ляхов, 1964] допустимая погрешность за счет поляризации электродов не должна превышать 5 мВ на 1 км профиля. При аналогичных

полигонных съемках на озерах применяемые электродные системы обеспечивали поляризационную погрешность в пределах 1 мВ на 1 км [Александров, 1973].

Поскольку к настоящему времени в целом отсутствует “критерий нормального поля” для водных объектов (см. разд. 2.4), следует помнить об относительности измерений, которые соотносятся (“привязываются”) с определенным участком акватории. Полученные профили и карты эквипотенциалей для разных участков больших по площади объектов, таких как Ладожское или Онежское озера, сравнивать нужно с большой осторожностью, помня о локальности выбранного нулевого уровня.

При измерениях следует придерживаться разработанной схемы (системы) подключения зондирующих устройств к регистрирующей аппаратуре и промежуточным механизмам (лебедкам) во избежание ошибок измеряемой разности потенциалов.

В наземных условиях при профилировании обследуемой площади или вертикальном зондировании в шурфах и шахтах допустимая невязка не должна превышать 5–10 % при спуске—подъеме или прямом и обратном ходе зондирования. В условиях флуктуирующей водной среды добиться такой невязки очень трудно. Поэтому целесообразно данные профилирования или вертикального зондирования (спуск—подъем) обрабатывать отдельно, не осредняя, если кривые $\Delta\varphi$ имеют различную эпюру.

При измерениях по схеме $\varphi = f(t)$ при $L = \text{const}$ (большие измерительные линии) необходим температурный и электрохимический контроль проб воды вблизи как “нулевого”, так и “индикаторного” электродов, поскольку возможны ошибки за счет непредвиденных локальных возмущений поля. Целесообразно измерять единым блоком температуру и удельную электрическую проводимость воды, концентрацию растворенного кислорода и рН воды.

При измерениях по схеме $\frac{d^2\varphi}{dL^2} = f(x)$ — вертикальное зондирование — необходимо избегать касания дна индикаторным электродом, поскольку при этом не только появляется скачок разности потенциалов на границе грунт—вода, но и возможна нежелательная поляризация электрода (см. разд. 2.2.4). В результате такой поляризации последующие измерения при подъеме зонда, как правило,

не воспроизводят кривую распределения градиента $\frac{d^2\varphi}{dL^2}$, а в исходное состояние электроды придут через значительный промежуток времени ввиду незначительного дрейфа ЭДС во времени (0,1 мВ/ч).

Рекомендуется поэтому подвешивать концевой диэлектрический груз, обеспечивающий сохранение ЭДС_{собр} зондирующего устройства, а также вести контроль глубины погружения зонда (по глубиномеру, блок-счетчику лебедки или размеченному кабелю с учетом его отклонения от вертикали).

При измерениях по схеме $\varphi = f(t)$ с экспедиционного судна необходим учет изменения компасного курса (КК°) за счет “дрейфа” корпуса вокруг якоря под действием ветра и течения, а также периодичности таких смещений для введения поправок в измеряемый сигнал или предварительной фильтрации частоты смещений при расчетах на ЭВМ.

При всех измерениях с судна (корабля) необходим учет искажения естественного фона электрическим компонентом электромагнитного поля судна (корабля) как по глубине, так и по площади. Методика учета поправок рассмотрена в разделе 4.2.5.

Типы измерительных установок

1. Измерения при буксировании зонда и его погружении с судна, стоящего на якоре, осуществляются по схеме $\frac{d^2\varphi}{dL^2} = f(x)$, $L = \text{const}$ (рис. 2.16, а и в).

2. Измерения при погружении потенциал-зонда с судна, стоящего на якоре, или профилировании акватории со льда, а также с движущегося судна (катера, шлюпки) от центрального закрепленного неподвижно “нулевого электрода” осуществляются по схеме $\varphi = f(L)$, $L = \text{var}$ (рис. 2.16, б; рис. 2.17).

3. Измерения жестко закрепленными потенциал-зондами (длинные горизонтальные или вертикальные линии) с борта судна, стоящего на трех якорях, и с помощью буйкового якорного устройства выполняются по схеме $\varphi = f(t)$, $L = \text{const}$ (рис. 2.18). Установка на рис. 2.18, б имела два якоря, что привело к появлению нежелательных помех за счет “дрейфа судна”. В работах периода 1970–1980 годов этот опыт был учтен, и судно крепилось всегда на три якоря или за береговые предметы.

4. Измерения в стационарных условиях с помощью коротких вертикальных или длинных горизонтальных линий, размещенных в узкостях и проливах, осуществляются по схеме $\frac{d\varphi}{dL} = f(t)$, $L = \text{const}$ (рис. 2.19). Модификация установки — многоэлектродная контролирующая система из вертикальных зондов — смонтирована в проливе (рис. 2.19, в).

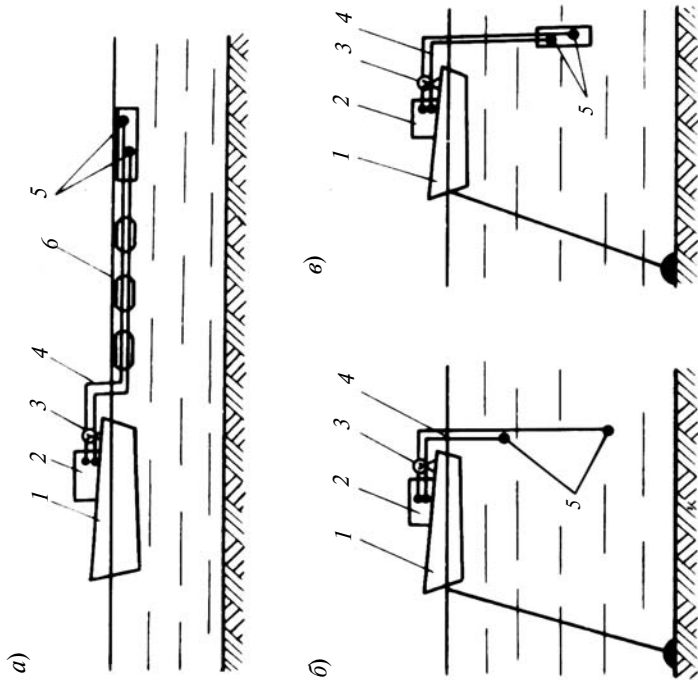


Рис. 2.16. Градиент- и потенциал-зондирование среды:
a — поверхность акватории; *б, в* — вертикальное зондирование;
 1 — судно; 2 — регистратор; 3 — лебедка; 4 — линии связи; 5 — зонд; 6 — поплавки

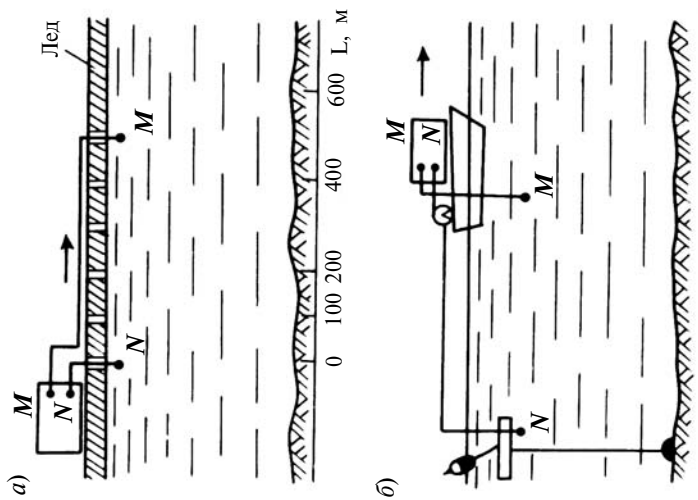


Рис. 2.17. Потенциал-зондирование от стационарного электрода.
 Профилирование: *a* — со льда; *б* — по галсам на катере; *N* — электрод сравнения; *M* — поисковый электрод

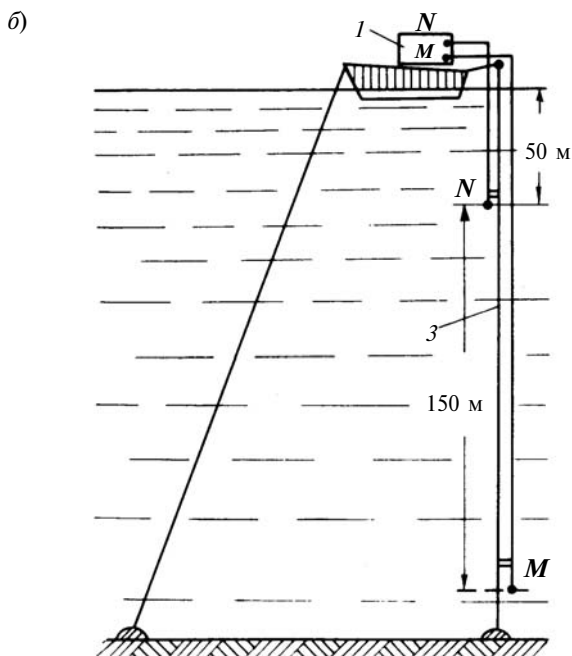
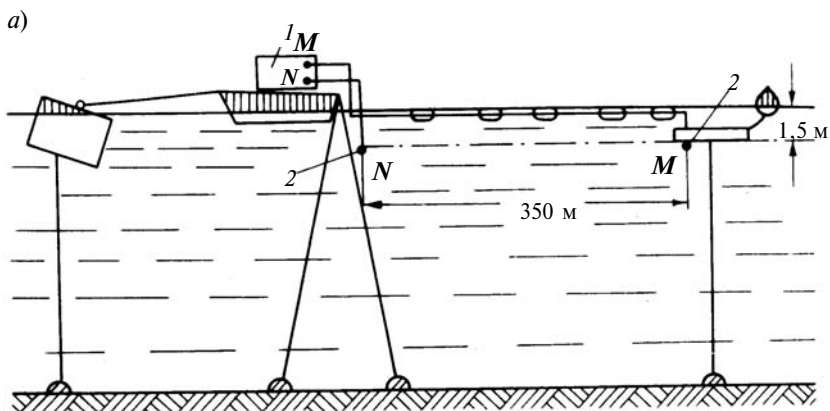


Рис. 2.18. Установка для исследования флуктуаций электрического поля в течение длительного времени:

a — в поверхностном слое воды; *б* — в глубинных слоях акваторий; 1 — регистратор; 2 — электродный зонд; 3 — линии связи

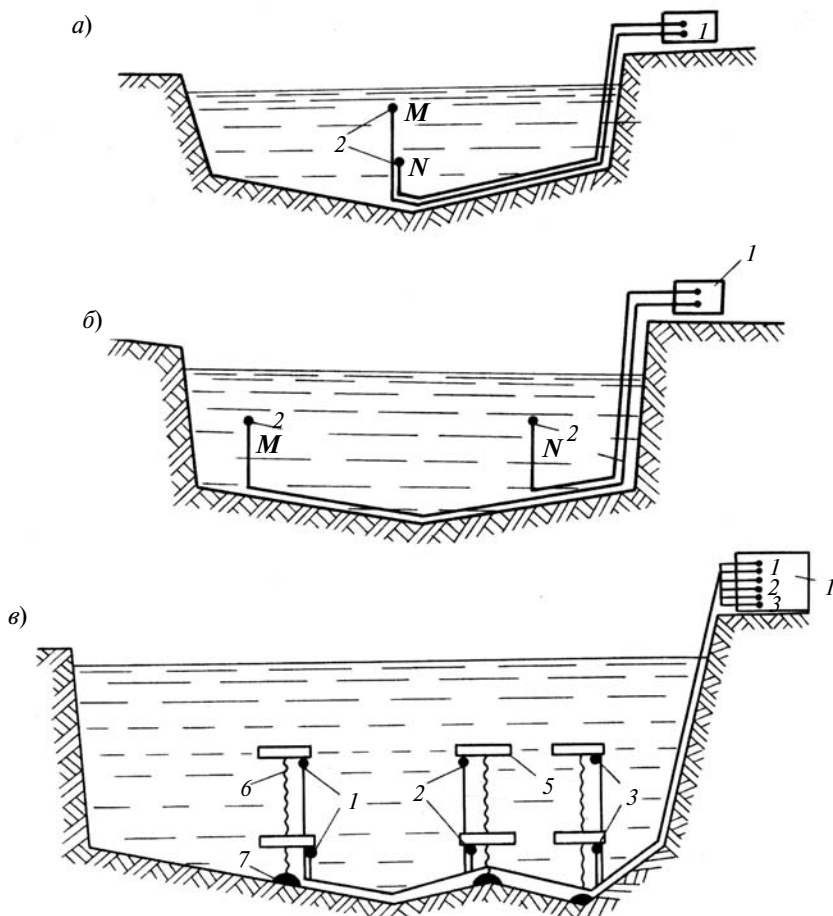


Рис. 2.19. Контролирующие установки в узкостях и проливах:
a — вертикальный диполь; *б* — горизонтальный диполь (ворота);
в — следящая система из вертикальных диполей (3 пары), *1* — регистратор;
2 — зонд; *5* — буйки; *6* — якорь-тросы; сплошные линии — линии связи

Специальные установки для исследования электрического поля корабля (судна)

Для этой цели применялись разнообразные модификации рассмотренных выше установок. На рис. 2.20, *a–г* представлены типы установок для изучения ЭП корабля на стоянке. Судно крепится на 2–3 якорях или на растяжках втугую — за береговые предметы.

Шлюпка (катер), стоящая на якорях, ведет потенциал-зондирование судна с каждого борта, в отдельности от носа до кормы в точках 1—4 и 1'—4' (см. рис. 2.20,а); аналогично измеряется поле градиент-зондом (см. рис. 2.20,в). Потенциал-зондирование ведется по размеченному тросу или маркированному кабелю строго в направлении диаметральной плоскости корабля — от носа и от кормы, а затем — в направлении миделя.

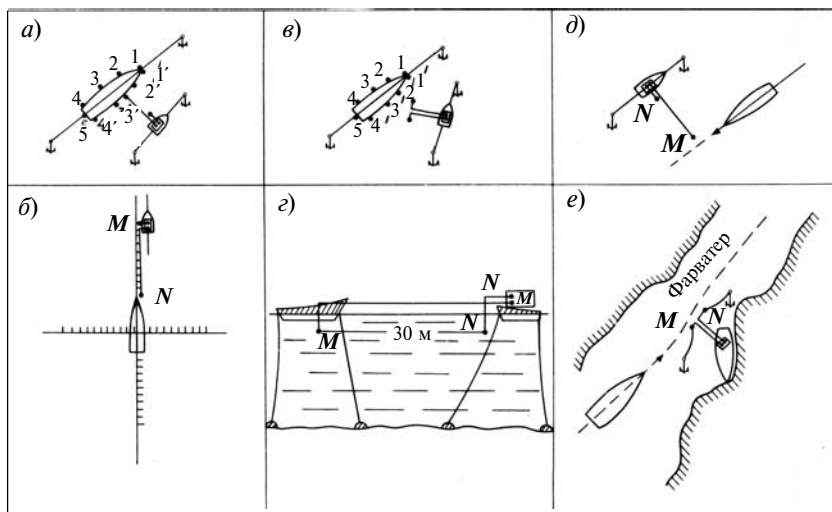


Рис. 2.20. Установка для исследования электрического поля судов (кораблей) на стоянке (а, б, в, г) и в движении (д, е)

С помощью шлюпки (катера) отводится подвижной электрод от корпуса вместе с оператором и регистратором, “нулевой электрод” остается у корпуса корабля. Передвижение электродов осуществляется в тонком поверхностном слое 0—0,3 м (см. рис. 2.20,б). На рис. 2.20,г дана схема установки исследования затухания поля судна по глубине с помощью потенциал-зонда, когда электрод, находящийся у борта судна, постепенно погружается, а “нулевой электрод” остается в точке возле регистратора, или с помощью градиент-зонда (длинная база L), опускающегося одновременно с бортов судна и вспомогательного катера. Этот способ позволил получить исключительно высокие результаты и определить вид функции затухания поля судна в зависимости от глубины (см. разд. 4.2.5).

Аналогично изучались поля других различных предметов — объектов гидрографической обстановки акваторий, разрушенного штормом водовода и нового водовода Приозерского целлюлозного завода и т.д.

Большой практический интерес представляет исследование возмущения естественного электрического фона водоема движущимися объектами. Для этой цели использовались три модификации стационарных зондирующих установок:

а) судно движется заданным курсом мимо потенциал-зонда, расположенного перпендикулярно к курсу. Зонд зафиксирован жестко на притопленном буге и катере (шлюпке);

б) аналогично размещают и градиент-зонд и закрепляют его на двух притопленных бугах в районе фарватера (рис. 2.20, *д* и *е*);

в) градиент-установка типа “воротец”. Электроды фиксируются жестко либо на притопленных бугах, либо один — на катере с регистратором, другой — на буйке; расстояние между электродами не превышает длины корпуса обследуемого объекта (рис. 2.21, *а*).

Градиент-зонд размещается так, чтобы фарватер проходил ортогонально линии MN и примерно на равном удалении от электродов ($\varphi^\circ = 61^\circ 30' 0''$ с.ш. $\lambda^\circ = 30^\circ 14' 7''$ в.д. — Якимварский залив). Электроды жестко крепятся на притопленных бугах, измерительные линии подводятся на исследовательское судно — к регистратору (см. рис. 2.21, *б, в*).

В обоих случаях движущийся объект проходит “воротца” примерно по центру во взаимно обратных направлениях. Амплитудно-частотный сигнал регистрируется для условий, когда ширина “воротец” минимальна и когда она максимальна, при которой поле естественного фона не искажается движущимся объектом [Александров, 1973].

Все рассмотренные типы установок могут быть модифицированы оператором в зависимости от условий проведения эксперимента: морфометрии акватории, состояния погоды, имеющейся аппаратуры и вспомогательных материалов. При использовании длинных измерительных линий желательно иметь кабель нейтральной плавучести; при его отсутствии следует использовать пенопластовые поплавки с зажимами для удержания провода (кабеля) на плаву во избежание провисания его и зацепления за скалистый грунт. Необходимо учитывать и ряд ограничений для проведения методических работ, например, при использовании шлюпок, малотоннажных катеров, при отсутствии топографо-геодезического обеспечения и др. Так, для проведения радиальной съемки по схеме $\varphi = f(L)$, $L = \text{var}$ с помощью растягиваемого геофизического провода (типа ПСМО) по галсу при ветре более двух баллов необходимо использовать моторный катер (шлюпку), иначе сохранить заданное направление не удастся, индикаторный электрод смещается, и ошибка в определении места достигает 50 м.

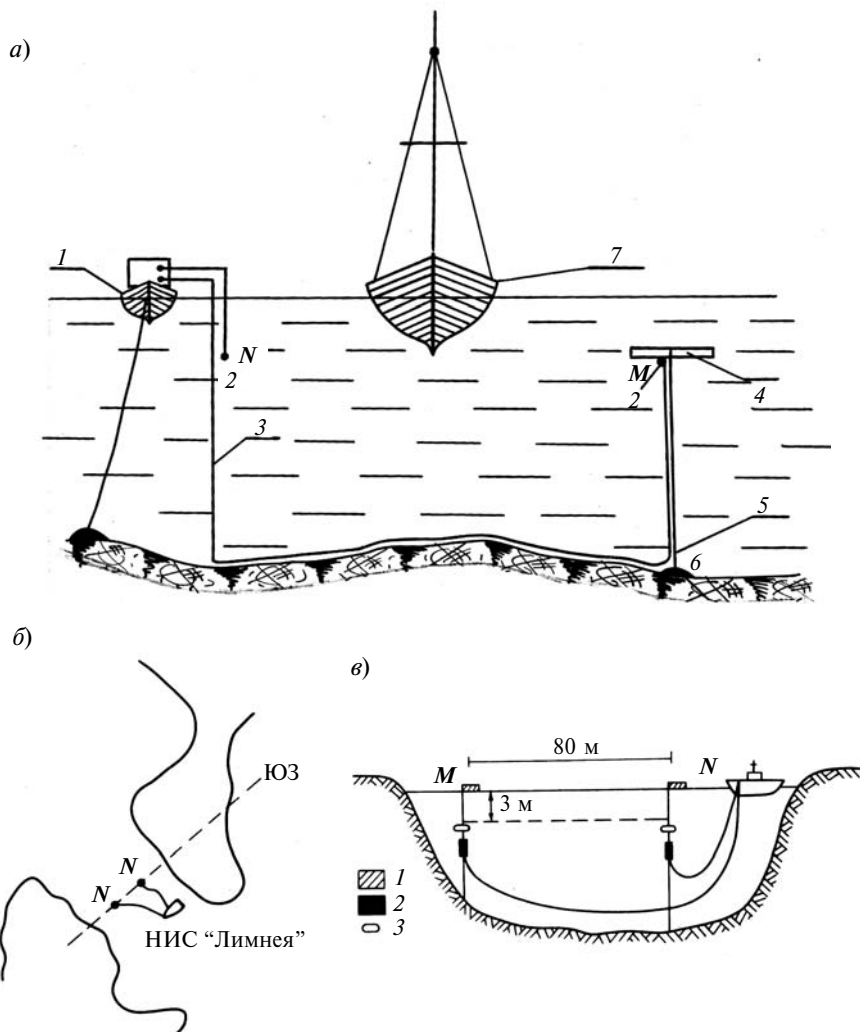


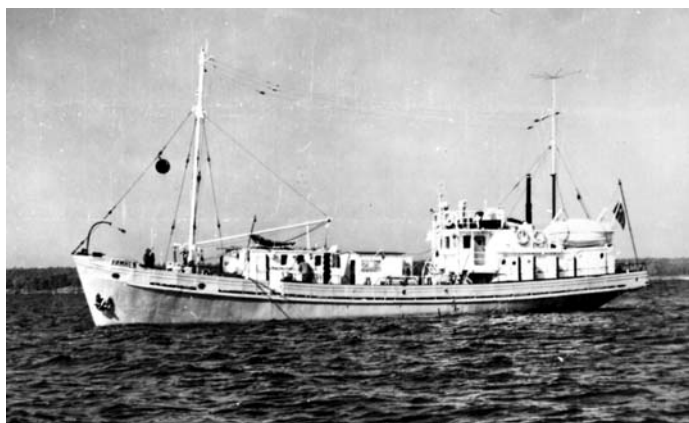
Рис. 2.21. Реальный контроль прохождения судов установкой типа "воротца":

a — диполь MN — ширина ворот; *1* — регистратор; *2* — электроды; *3* — линии связи; *4-6* — буйковое устройство; *б, в* — фарватерная установка в Якимварском заливе: *1* — контрольные буй; *2* — электроды; *3* — буй подвеса электродов

а)



б)



в)



Рис. 2.22. Экспедиционные суда “К. Дерюгин” (а), “Лим-
ня” (б) и “Талан” (в) Института озерадения

Для проведения высокоточных съемок по обнаружению затонувших объектов, по контролю состояния трубопроводов, по поиску подводных источников инфильтрации и т.д. необходимо использовать геодезическое оборудование, так как навигационная привязка точек измерения по их плановому положению весьма груба. Для изучения флуктуаций поля по схеме $\varphi = f(t)$, $L = \text{const}$ или

$\frac{d\varphi}{dL_{x,y,z}} = f(t)$ не следует применять установки, жестко связанные с корпусом исследовательского судна, поскольку даже в штилевую погоду судно не остается неподвижным, что ведет к появлению ложных периодических флуктуаций поля на записях приборов, усложняет впоследствии обработку материала. В разделе 2.2.5 рассмотрены некоторые источники помех, учитывая их, оператор может ввести ограничения при исследованиях.

Рассмотренные методические приемы измерений выполнялись в экспедиционной работе в озерах на различных плавсредствах. Первая плавучая лаборатория была оборудована на шлюпочном катамаране в в/ч № 99795, с ее помощью были выполнены работы в заливе Рыбный Ладожского озера в 1966–1968 годах. Далее работы велись на э/с “К. Дерюгин”, э/с “Лимнея” и э/с “Талан” Института озераведения (рис. 2.22).

Метрологическое обеспечение электрометрии акваторий

Во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и в СНИИМ (Сибирский научно-исследовательский институт метрологии) разработаны специальные установки для поверки средств измерения напряженности $\bar{E}$, которые наиболее полно учитывают всевозможные источники погрешностей измерения во время стендовых испытаний. Поверочные системы включают:

специальные электролитические ванны, в которых напряженность поля определяют косвенно, зная полный ток, омическое сопротивление электролита и геометрические размеры ванны;

электролитические первичные измерительные преобразователи (электродные системы);

регистрирующие приборы высокого класса точности [Тарбеев, Тарасов и др., 1976].

Такие установки — устройства поверки — бывают двух типов: для измерения напряженности $\bar{E}$ и разности потенциалов $\Delta\varphi$.

Рабочие средства измерения могут обеспечить измерения напряженности с погрешностью $5 \div 10 \%$:

Переносные средства измерения
градиентов потенциалов ЭП

$0,001 \div 10$ мВ/м,
 $10^{-5} \div 5 \cdot 10^3$ Гц, $\delta = 5$ %
Прямые измерения

Измерители напряженности
электрического поля

$0,001 \div 10$ мВ/м,
 $10^{-5} \div 5 \cdot 10^3$ Гц, $\delta = 10$ %
Прямые измерения

Специальная мера напряженности ЭП в замкнутом и в свободном объемах может обеспечить погрешность в 1 и 5 %, соответственно, для тех же амплитуд и частот [Тарасов, 1980].

В реальных условиях открытых водоемов измеряется относительный потенциал водных масс или его градиент, зависящий от химических реакций, протекающих в среде, и от ее динамических характеристик. Этот квазистационарный потенциал в диапазоне инфранизкочастотных колебаний при установленной мере В/м не разделяется на составлявшие. Поэтому измерения перераспределения плотности объемного заряда в среде, связанного с внутренними процессами в водоеме, целесообразно вести в полосе частот $0 \div 5$ Гц. Флуктуации же поля, связанные с геомагнитными возмущениями, надежнее регистрировать в полосе частот $5 \div 10$ Гц и выше, тем более, если стоит задача прогностических рекомендаций.

Многофакторность регистрируемого сигнала в воде требует рациональной методики измерения, комплексности электрометрических работ. Электрические измерения необходимо вести синхронно с магнитометрическими и при глубоководном зондировании, сопровождать термо- и барометрией. В зонах возможной существенной неоднородности поля концентрационного потенциала необходимо выполнять контрольные гидрохимические определения. Со временем это будет облегчено применением ионоселективной потенциометрической аппаратуры. Скорость погружения (или буксирования) приборов следует регулировать исходя из информативности регистратора и желаемого минимального масштаба изучаемых неоднородностей поля.

Для измерения разности потенциалов в водной среде с помощью электрических зондов требуется регистрирующая аппаратура с большим входным сопротивлением — несколько единиц-десятков МОм. В электроразведочной геофизике обычно применяется автокомпенсационный способ измерения, заключающийся в автоматической компенсации измеряемых величин самой электронной схемой приборов. В основе принципа измерений лежат преобразование постоянного или медленно меняющего поля в переменный сигнал, усиление его и синхронизация измерений. При воздействии сверхнизкочастотного естественного электромагнитного

поля Земли на входе электролитического измерителя возникает флуктуационное напряжение инфранизкой частоты. В зависимости от его конструкции величина электрического сигнала на выходе лежит в пределах $10 \div 100$ мкВ (при очень слабых источниках), следовательно, для усиления сигнала должны применяться усилители с коэффициентом усиления не менее $10^4 \div 10^5$. Таким требованиям отвечают современные операционные дифференциальные усилители, в которых в качестве согласующих элементов применяются полевые транзисторы с входным сопротивлением в сотни МОм и малым выходным сопротивлением и интегральные микросхемы для усиления сигналов.

На протяжении всех лет экспериментальных исследований применялись различные приборы — от переносных стрелочных автокомпенсаторов до самых современных микровольтметров, измеряющих ЭП в полосе инфранизкочастотных колебаний, в комплекте с самопишущими потенциометрами и нуль-индикаторами или быстродействующими осциллографами. Именно поэтому при высокой разрешающей способности электрополемеров регистрирующая аппаратура не всегда этому соответствовала, а данные измерений могли бы быть значительно (на порядок) точнее.

Общей задачей при организации полевых работ являлось: комплектование блоков с предварительным усилением сигналов и блоков с записью их на диаграммную бумагу или осциллограмму. Предпочтение отдавалось приборам автономного электропитания от сухих элементов или аккумуляторов и приборам со стандартными согласующими устройствами между блоками усиления и регистрации.

Для интересующихся историей проблемы измерений, отметим, что применялись промышленные усилители низкой частоты в комплекте с самопишущими регистраторами: автокомпенсатор ЭСК-1 и самописцы Н349, Н392, Н390, Н372, Н700; микровольтметры В2-15, рН-340, рН-673 и ЭВ-74 и самописцы ЭПП-09, КСП-4, Н338-4П, Н326-3; милливольтметры самопишущие Ф115-Н341, И37-Н37, Н361, Н381, Н39; калибраторы Р33, Р330; автономная измерительная система МО-67; кондуктометрическая аппаратура конструкции ВНИИнауцприбор — ММЗЧ-64 с комплектом датчиков УК-02/1 и КД-1 с буксируемым датчиком проводимости воды ЯП-1.

При обработке экспериментального материала мы различаем два аспекта в получении итогового результата. Если водоем (или достаточно крупная часть его) рассматривается как целостный объект, в который включены какие-то локальные возмущения, то осуществляется общегеофизический полевой подход к обработке измерений — построение графиков функций распределения характеристики

поля, планов, карт, разрезов и т.д. в соответствии с методами и требованиями типовых инструкций [Комаров, 1957; Инструкция по электроразведке, 1963; Справочник геофизика, 1961–1963; Фритч, 1963; Якубовский, Ляхов, 1964; Семенов, 1980]. Но водоем — флуктуирующая система, поэтому обработка результатов ведется также и с применением теории случайных процессов (см. ч. 2, 3). К флуктуирующим источникам относятся гидродинамические поля, поля биообъектов, поля движущихся предметов и др. К таким полям применимы статистические оценки, разработанные в математической статистике с учетом известных положений о квазистационарности процессов и о допущении справедливости эргодической гипотезы. К статистическим оценкам относятся корреляционные функции и функции спектральной плотности, вычисляемые по записям волнообразных, вихревых или других флуктуирующих процессов и заменяющие собой истинные характеристики квазистационарных процессов.

При обработке большого объема исходной информации, полученной при записи гидродинамических флуктуаций поля $\Delta\phi$ в “биологически активных слоях” озер, были использованы методические указания пособия, разработанного в Ленинградском отделении Государственного океанологического института (ЛОГОИН) [Рожков, Трапезников, 1969], применена специальная программа расчетов на быстродействующих ЭВМ Ю.П. Клеванцева. Расчеты проведены в волновой лаборатории ЛОГОИН.

Для обработки результатов синхронной регистрации гидродинамических и электрометрических колебаний в поверхностном слое воды была использована программа расчета взаимно-корреляционной функции, разработанная М.А. Александровым и М.Р. Горещкой (Институт проблем управления АН СССР), а также программа расчета спектральной функции, разработанная Ленинградским политехническим институтом (СПбГПУ) на языке ФОРТРАН-4. Расчеты статистических оценок выполнены в ИПУ АН СССР и в Московском геологоразведочном институте.

2.2.6. Новые средства измерений электрических и магнитных полей

Гидрофизические характеристики морских и пресных водоемов

До настоящего времени изучение тонкой слоистой структуры водоемов не получило достаточно широкого распространения и применения в гидрологии. Поэтому остаются еще не выясненными особенности циркуляции и конвективного перемешивания водных

масс, условия энерго- и массообмена с учетом физических характеристик водной среды. Существующие же расчетные модели, разработанные для идеализированных условий, не позволяют получить удовлетворительные ответы на эти вопросы. Достоверные сведения о динамике жидкости могут быть получены лишь за счет внедрения соответствующей аппаратуры, отличающейся надежностью, повышенной чувствительностью.

Впервые использование измерительного комплекса, который удовлетворял изложенным выше требованиям, было осуществлено совместными усилиями ВНИИФТРИ, ИЗМИР РАН, Института озераведения в 1976–1980 годах. Во ВНИИФТРИ были разработаны измерительно-регистрирующие блоки комплекса для измерения гидрофизических характеристик водных масс, в ИЗМИР РАН — электрополемер для измерения пространственных производных естественного электрического поля воды в ограниченном объеме, в Институте озераведения — градиентомер-полемер. Идеология экспериментальных работ состояла в том, чтобы с помощью новой аппаратуры измерить гидродинамические характеристики среды с точностью, которую не обеспечивает гидрометеорологическая аппаратура, а также добиться максимальной синхронизации регистрируемых данных с учетом сопутствующих гидрометеорологических условий. При этом предполагалось, что гидродинамические процессы в турбулентных потоках имеют физическую связь со скоростью, давлением, температурой, а внутреннее единство протекающих процессов проявляется в одинаковости пространственных и временных масштабов пульсаций, обусловленных турбулентностью [Баскаков, 1976].

В задачу экспериментальных исследований входило:

- вертикальное зондирование водных слоев высокочувствительными термометрами и измерителем скорости звука;

- запись флуктуаций температурного поля в различных слоях озера (квазиоднородный слой, слой скачка плотности воды и придонный в глубоководной впадине);

- запись пульсаций составляющих скорости потока в различных слоях озера (квазиоднородный, слой скачка плотности, придонный);

- дискретные измерения скоростей потока микровертушкой;

- получение синхронных записей флуктуаций температуры, вертикального компонента скорости потока, напряженности естественного электрического поля, средней скорости течения и скорости ветра в различных условиях на акватории Ладожского озера.

Состав измерительного комплекса аппаратуры ВНИИФТРИ:

пьезокерамический преобразователь пульсаций скорости потока в диапазоне $0,2 \div 200$ Гц с пороговой чувствительностью $0,25$ мм/с;

кварцевый термометр измерений пульсаций и средних значений температуры воды с точностью $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ °С при пороговой чувствительности измерителя $5 \cdot 10^{-4}$ °С. Максимальная погрешность $0,7$ %;

измеритель скорости звука — пульсаций и средних значений с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-2}$ м/с и соответствующей эквивалентному изменению температуры $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ °С, с пороговой чувствительностью 1 кГц·м⁻¹·с. Основная погрешность $0,5$ %;

измеритель скорости течений в частотном диапазоне $0 \div 0,2$ Гц с пороговой чувствительностью $0,1$ см/с. Основная погрешность 2 %.

Описание аппаратуры и методы обработки результатов рассмотрены в публикации автора [Александров, 1981, с. 200–221]. Физические характеристики измерялись на якорных стоянках в заливах, вблизи островов и на открытой акватории, а также в дрейфе на глубинах более 100 м и в режиме буксирования преобразователей при скорости хода 5 узлов.

Электрополемер конструкции ИЗМИР РАН “Вихремер”

Устройство предназначено для изучения пространственной структуры гидродинамических неоднородностей водных масс, обуславливающих изменение плотности заряда в ограниченном объеме жидкости. Поскольку уравнения электродинамики имеют члены, содержащие вторые производные, сумма которых равна лапласиану, возникла идея создать установку, измеряющую не градиенты электрического поля (что выполнялось ранее), а их изменчивость, т.е. регистрировать вторые производные электрического поля. В этом случае от лапласиана можно перейти к определению параметров вихря. Зная параметры дивергентного электрического поля, можно перейти к построению поля (гидродинамического) в воде.

Таким образом, появилась перспектива нового методологического подхода к проблеме турбулентных явлений — использование динамики электрического поля для индикации турбулентности. Применение нового электрополеметрического метода может значительно расширить наши представления о свойствах вихревых структур в озерах, а использование современных микроэлектронных устройств и способов передачи и регистрации электрических сигналов обеспечит оперативность и автономность исследований. Известно, что оценка дивергенции электрического поля $\bar{E}$ в среде (лапласиан потенциала этого поля Φ) может быть выполнена путем одновременного измерения потенциала ЭП в нескольких

точках среды [Альпин, 1966]. В работе [Шерклиф, 1967] рассмотрена возможность измерения ротора скорости движения жидкости по измерению дивергенции индуцированного электрического поля, т.е. по измерению зарядов в ней. Теоретическую разработку принципа измерения дивергенции поля выполнили Г.А. Фонарев и В.Ю. Семенов. Их расчеты показали, что наиболее благоприятным местом измерения зарядов в воде являются объекты, расположенные в высоких широтах, где горизонтальный компонент магнитного поля Земли невелик. Поэтому Ладожское озеро является достаточно репрезентативным объектом для измерений, где $\bar{B}_{x,y} = 0,14 \cdot 10^{-4}$ Тл.

Если заряды в жидкости связаны только с ее вихревым движением, то дивергенция поля по закону магнитной гидродинамики равна [Шерклиф, 1967] :

$$-\operatorname{div} \bar{E} = \bar{B}^{\circ} \cdot \operatorname{rot} \bar{v}. \quad (2.22)$$

Здесь $\bar{v}$ — скорость движения жидкости; $\bar{B}^{\circ}$ — магнитное поле Земли.

Таким образом, измерение дивергенции электрического поля в воде должно соответствовать определению скалярного произведения магнитного поля Земли на величину ротора скорости движения воды. Зная величину магнитного поля Земли в точке наблюдения, можно вычислить значение ротора скорости в направлении вектора магнитного поля.

В настоящее время относительное изменение разности электрических потенциалов в водной среде можно измерить с точностью в пределах одного микровольта, а измерение значения ротора скорости для конкретного случая (например, для 7-электродной установки) может быть выполнено с чувствительностью примерно $0,1 \text{ с}^{-1}$ при расстоянии между электродами в 1 м и при величине магнитного поля $0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл (рис. 2.23). При таком методе измерения вихря скорости его чувствительность может быть повышена либо за счет увеличения размеров установки, либо за счет измерений в сильном искусственном магнитном поле. Последний вариант, уже реализован в задачах измерения расходов жидкости [Повх, 1974], и он не представляет для нас принципиального интереса. Поэтому стояла задача создать установку с ориентацией на естественные магнитные поля, в которых вихревое движение жидкости создаст реально измеряемое значение ротора скорости [Семенов, Фонарев, 1978]. Геометрические размеры измерительной установки, очевидно, определяют и размеры исследуемых вихрей. Подбор размеров последней определяется задачей исследования, но следует помнить, что конструкция ее должна быть достаточно прочной при малом весе и обеспечивать необходимую чувствительность.

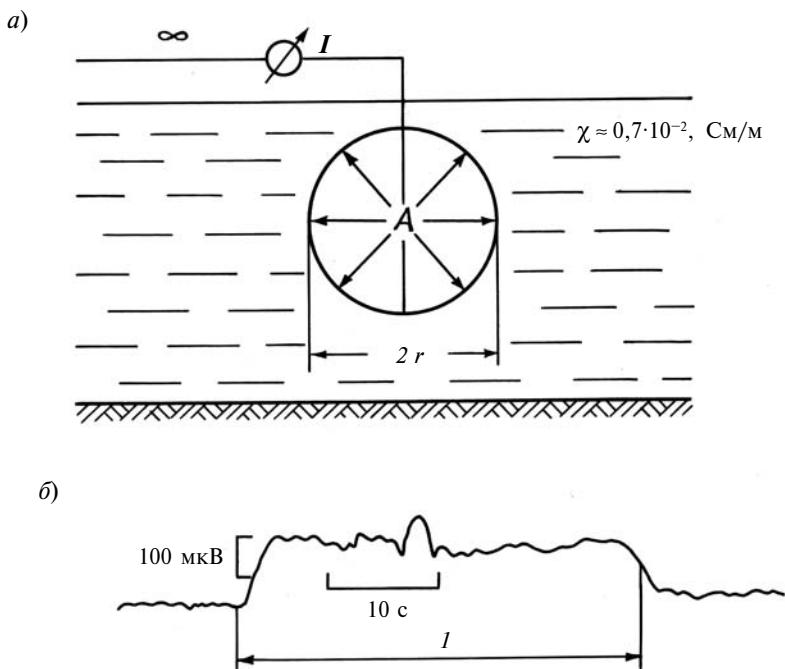


Рис. 2.23. Тарирование установки “Вихремер”:
 а — схема установки; б — импульс напряженности поля, полученного за счет искусственно созданного ротора скорости; I — область существования вихревого течения воды, вызванного искусственно

Создание установки, измеряющей дивергенцию электрического поля в воде, позволит исследовать тонкую структуру естественно-го электрического поля в озере. Источником исследуемых полей будет являться сам водный объект, а не магнитотеллургические возмущения ионосферного происхождения. С помощью этой установки могут исследоваться все поля, порождаемые объемными зарядами в воде, в частности вихревого движения воды, электрокинетические эффекты, связанные с диффузией примесей, коагуляцией и другими физико-химическими явлениями в воде, и, возможно, поля, обусловленные жизнедеятельностью гидробионтов. Поскольку измеряемая такой установкой величина разности потенциалов не зависит от ориентации прибора в пространстве, размещение его можно осуществить на дне или на буйковой станции или опускать с борта судна. Возможности исследований такой установкой будут зависеть от ее пороговой чувствительности.

Макет многоэлектродной измерительной установки, предложенной в ИЗМИР РАН для исследования изменения плотности объемного электрического заряда в воде, является первым отечественным вариантом аппаратуры данного назначения, он условно назван «Вихремер». Основные технические характеристики установки подробно рассмотрены в отчетах ИЗМИР РАН и Института озероведения [1976; 1978].

Полевые испытания прибора «Вихремер» были проведены в Якимварском заливе на гидрофизическом полигоне ($\varphi^{\circ} = 61^{\circ}29'3$ с.ш. $\lambda^{\circ} = 30^{\circ}14'2$ в.д.). Они заключались в градуировании установки путем измерений искусственно созданных электрических полей — бездивергентных (потенциальных), волновых и вихревых, в регистрации собственных шумов установки, а также в тарировании прибора в открытом озере с помощью искусственно созданного вихря с известным ротором скорости. Испытания макета и расчеты показали, что макет многоэлектродной установки «Вихремер» измеряет дивергенцию электрического поля в воде с погрешностью в пределах 20 %. Результаты измерений следует интерпретировать как меру плотности электрического заряда в измеряемом объеме, которая может быть связана с вращением жидкости в магнитном поле Земли [Александров, 1980; Александров, 1981; Семенов, Зайцев, Филатов, 1981; Александров, 1985].

Современные измерители электрических и магнитных полей

• Измеритель электростатического поля ИЭСП-01. Предназначен для измерения напряженности электростатического поля в свободном пространстве при производственном контроле, аттестации рабочих мест по условиям труда (по СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03) и для определения электростатического потенциала экрана монитора при сертификации мониторов по ГОСТ 50949-01. Изготовитель: ФГУП НПП «Циклон-Тест», г. Фрязино, Московская обл.

Технические характеристики:

Диапазон измерений напряженности	1 ÷ 180 кВ/м
Диапазон измерений потенциала	1 ÷ 18 кВ
Основная погрешность измерений:	
с диском и измерительной	
пластиной	10 %
со съемной антенной	20 %
Габаритные размеры измерителя	270 × 80 × 45 мм

- Измеритель напряженности электростатического поля СТ-01. Предназначен для измерения напряженности электростатического поля при обеспечении контроля за биологически опасными уровнями электростатических полей в соответствии с требованиями СанПиН 2.2.2542-96 и для определения электростатического потенциала экрана монитора при сертификации мониторов по ГОСТ 50949-01. Изготовитель: ФГУП НПП “Циклон-Тест”, г. Фрязино, Московская обл. 1999 г.

Технические характеристики

Диапазон измерений напряженности	0,3 ÷ 180 кВ/м
Основная погрешность измерений	± 15 %
Масса, не более	1,1 кг

- Измеритель переменных электрических полей ИЭП-05. Предназначен для измерения уровня низкочастотных электрических полей на рабочих местах с компьютерной техникой. Изготовитель: ФГУП НПП “Циклон-Тест”, г. Фрязино, Московская обл.

Технические характеристики

Диапазон частот измеряемых сигналов:	
полоса I	5 Гц ÷ 2 КГц
полоса II	2 КГц ÷ 400 КГц
Уровни измеряемой напряженности:	
полоса I	10 ÷ 2000 В/м
полоса II	1 ÷ 200 В/м
Основная погрешность измерений, не более	20 %
Масса с дисковым пробником, не более	0,9 кг

- Измеритель переменных магнитных полей ИЭП-05. Предназначен для измерения уровня низкочастотных магнитных полей на рабочих местах с компьютерной техникой. Изготовитель: ФГУП НПП “Циклон-Тест” г. Фрязино, Московская обл.

Технические характеристики

Диапазон частот измеряемых сигналов:	
полоса I	5 Гц ÷ 2 КГц
полоса II	2 КГц ÷ 400 КГц
Уровни измеряемой напряженности:	
полоса I	100 ÷ 2000 нТл
полоса II	10 ÷ 200 нТл
Основная погрешность измерений, не более	20 %
Масса, не более	0,75 кг

- Трехкоординатный магнитометр Холла. Автономный управляемый микропроцессором прибор позволяет измерять составляющие магнитной индукции по трем осям координат и определять результирующее значение индукции. Измеряются напряжение смещения базовой линии и ток, протекающий через датчики Холла. Изготовитель: РНЦ “Курчатовский институт”. Москва.

Технические характеристики

Диапазон измерений:

с шагом дискретности 0,001 Тл	0,001 ÷ 4,095 Тл
с шагом дискретности 0,002 Тл	0,002 ÷ 8,191 Тл

Примечание: о новой зарубежной аппаратуре фирмы “NARDA” см. библиографическую ссылку [490].

2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

2.3.1. Волновые колебания, течения, движение наносов и седиментация в каналах

2.3.2. Субаквальная фильтрация в резервуарах

2.3.3. Управление движением твердофазных примесей в электролитах под действием магнитного поля на тонкослойной модели водоема

Изучение процессов электромиграции, массообмена (взаимной диффузии электролита и растворителя), газообмена, переноса твердофазных примесей показало целесообразность использования электромагнитных методов при моделировании гидромеханических и электрокинетических явлений в жидкости.

Для моделирования ряда частных случаев гидрофизических явлений в лабораторных условиях применялись электрополюметрический и магнитогидродинамический методы. Воспроизведение на физической модели движения дисперсных сред под воздействием различных факторов преследовало цель получить качественную и количественную оценку состояния жидкости. Условия эксперимента подбирались так, чтобы движение жидкости имитировало состояние водной среды, близкое к естественному.

Воспроизводились и анализировались явления:

волновые колебания, течение и движение наносов в каналах; субаквальная фильтрация в резервуарах аквариумного типа;

вихревые потоки и перенос примесей под воздействием магнитогидродинамических сил в электролитических кюветах.

2.3.1. Волновые колебания, течения, движение наносов и седиментация в каналах*

Одиночные волны. Опыты проводили в специальном гидродинамическом лотке, в котором создавались одиночные прогрессивные волны высотой от 1 до 50 см. Неподвижный электрод (N) жестко крепился на диэлектрической подставке в 10 см от дна канала (лотка), подвижный (M) — на пенопластовом поплавке притапливался в трехсантиметровом слое у поверхности воды. Поплавок имел шток, который вставлялся в трубку для ограничения смещения электрода в горизонтальной плоскости при прохождении волны; трение штока о трубку было уменьшено за счет смазки. Регистрация велась через усилитель постоянного тока осциллографом Н-700 с разрешающей способностью 0,05 мВ. Высота волны фиксировалась с точностью до 0,5 см, период вычислялся по тарировочной таблице с использованием высоты уровня воды под колоколом волнопродуктора. Под действием одиночной волны в вертикально размещенной электродной установке индуцировался импульсный сигнал (испытывались два варианта: установка с подвижным электродом на поплавке и установка с жестко закрепленными электродами (рис. 2.24).

Полученные экспериментальные данные $\Delta\varphi = f(h_{\text{волн}})$ аппроксимируются линейной зависимостью. Уравнение регрессии имеет вид: $h = 7,52 \Delta\varphi - 2,43$, где h — высота волн, см, $\Delta\varphi$ — разность потенциалов, мВ; коэффициент корреляции $r(h, \Delta\varphi) = 0,92 \pm 0,02$ (рис. 2.24, в). Результаты испытаний позволяют рекомендовать применение электрометрических датчиков для разработки волнографной системы многоступенчатого типа, что весьма удобно при исследовании характеристик внутренних волн и диссипации энергии поверхностного волнения на глубинах [Александров, 1973; 1985]. Эти результаты послужили основанием для дальнейшего исследования спектральных характеристик гидродинамического источника на поверхности и в объеме озера методом электрополюметрии.

*Работы проведены в гидролотках в/ч № 99795 (1966—1970 гг.) и Главной экспериментальной базы Государственного гидрологического института (1966 и 1980 гг.).

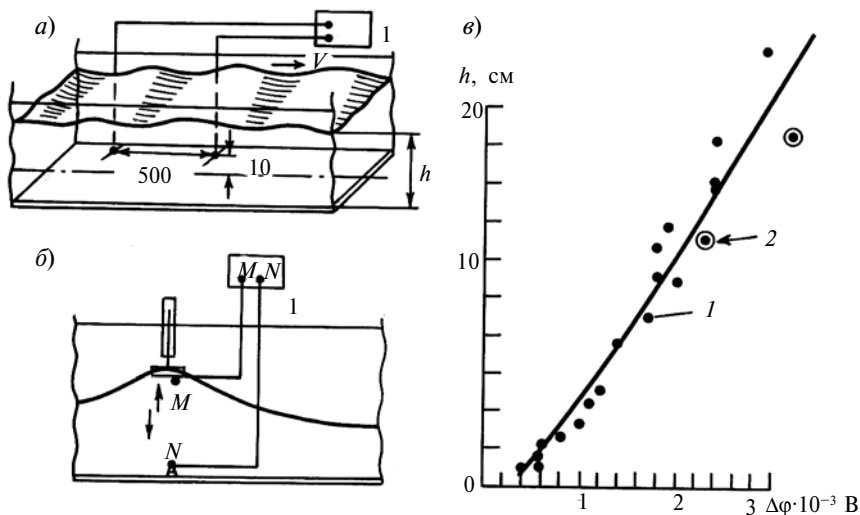


Рис. 2.24. Моделирование электрокинетических явлений:

a — измерения разности потенциалов $\Delta\phi$ скорости потока; *б* — измерения $\Delta\phi$ одиночной волны; *в* — зависимость скачка $\Delta\phi$ от высоты волны в установке с подвижным электродом; 1 — экспериментальные точки; 2 — то же с применением дополнительного поплавка

Течение. Потенциал потока с различными скоростями моделировался как функция его скорости $\Delta\phi = f(V)$ или ускорения $\Delta\phi = f(dv/dt)$. Использовались электродные установки различных модификаций: осесимметричные или ортогональные к оси канала в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Лотки заполнялись водой примерно до половины их высоты, что позволяло менять уровень и скорости потока от 0,05 до 1,2 м/с с режимом течения от ламинарного до турбулентного. Скорости потока рассчитывались по тарифовочной таблице. Регистрация потенциала потока велась типовой аппаратурой (самопишущие милливольтметры постоянного тока типа КСП-4, Н-39, Н-381 и др. без дополнительного усиления сигналов) (см. рис. 2.24, *a*). Опыты показали, что при неизменной длине измерительной электродной линии в установившемся потоке: 1) потенциал потока флуктуирует в пределах средних фоновых значений для данной конкретной скорости; 2) появление ускорения регистрируется импульсным изменением уровня потенциала; 3) потенциал турбулентного потока имеет четко выраженный пульсирующий характер.

Амплитуда пульсаций и их периодичность зависят от степени турбулентности, но при невозможности повысить коэффициент усиления регистратора необходимо выбрать оптимальную длину электродной линии (т.е. обеспечить максимальную чувствительность установки). Так, при скорости $0,5 \div 1,0$ м/с и длине электродной линии $L = 15$ см амплитуды пульсаций были в пределах $0,05 \div 0,1$ мВ, но при скорости $0,4 \div 0,5$ м/с и $L = 1$ м амплитуды возрастали до $0,2$ мВ. При дальнейшем увеличении скорости частота пульсаций растет, но амплитуда практически не меняется, даже при увеличении длины электродной линии до 4 м. Применение аппаратуры с более высокой разрешающей способностью позволит получить результаты, по точности превышающие различные механические измерения.

На фоне турбулентного установившегося потока со скоростью в пределах $1,2$ м/с всегда можно создать возмущение диэлектрическими предметами (камни, песок и т.д.), которое регистрируется на однородно флуктуирующем уровне поля в виде серии знакопеременных импульсов. Например, при длине $L = 15$ см и ее ориентации ортогонально оси потока в горизонтальной плоскости было создано препятствие движению потока на расстоянии 10 см от датчиков, в установке был индуцирован импульсный сигнал $0,6 \div 1,1$ мВ. Установившийся турбулентный поток дополнительно возмущали диэлектрическими предметами — уровень потенциала изменялся серией импульсов амплитудой $0,5 \div 1,0$ мВ.

Наносы. В гидрологических исследованиях одной из важных проблем остается задача учета движения наносов в реках, эстуариях, каналах. Опишем серию опытов по измерению неоднородности электрического потенциала течения при внесении в поток примесей в виде камней и песка, которая была проведена в 1980 г.

1. Электроды расположены в 15 см друг от друга горизонтально, ортогонально оси потока, примерно в средней части столба воды. Скорость потока $0,17$ м/с. Горсть песка, опущенная у датчиков, создает в среднем скачок разности потенциалов $0,15 \div 0,25$ мВ ($\text{grad } \varphi = (1 \div 2)10^{-4}$ В/м).

2. Электроды расположены по оси потока в 100 см друг от друга в средней части столба воды. Скорость потока $0,17$ м/с. Горсть песка, опущенная у одного из датчиков, создает скачок разности потенциалов до $0,7$ мВ ($\text{grad } \varphi = 7 \cdot 10^{-4}$ В/м). При скорости течения около $1,2$ м/с всплеск от искусственно созданного селевого потока регистрировался серией знакопеременных импульсов амплитудой до $0,4$ мВ ($\text{grad } \varphi = 3 \cdot 10^{-4}$ В/м). При той же скорости течения

поток дополнительно перемешивали, и в лоток вносили партию песка (объемом 10 дм³). В нескольких опытах зарегистрировали импульсное изменение потенциала течения амплитудой до 0,7 ÷ 1,2 мВ, причем знак импульса зависит от локализации примесей вблизи одного или другого датчика.

3. Электроды расположены аналогично предыдущему опыту, но на расстоянии друг от друга 4 м. Песок вносили в том же объеме, но на различном расстоянии от индикаторного датчика, скорость течения около 1 м/с. На расстоянии от индикаторного датчика в 1 м получен спадающий по интенсивности сигнал от 2 мВ до 0 с периодом 65 с, а на расстоянии в 3 м — сигнал той же формы, но интенсивностью от 1,2 мВ до 0 и с периодом 81 с. Импульс имеет положительный знак по отношению к фону, что, по всей вероятности, связано с адсорбцией катионов на поверхности отрицательно заряженных частиц песка и пыли (см. разд. 4.2.2).

4. Весьма трудоемка в гидрологии оценка размеров фракций наносов по скорости оседания примесей в специальных фракциометрах.

Нами были получены четкие записи эффекта Дорна (см. ч. 4) при оседании партии песка весом 1,5 г. Специальные градуировочные работы не производились, но, по всей вероятности, эту методику следовало бы испытать на различных образцах наносов.

2.3.2. Субаквальная фильтрация в резервуарах

Практическая значимость разработки четкого методического приема обнаружения и исследования всесторонних характеристик субаквальных источников воды сомнению не подлежит. Безусловно, такой методический прием должен быть комплексным, поскольку явление разгрузки подземных вод через ложе водоема обусловлено многими факторами. Одним из компонентов такой методики может послужить электрометрия. В этом случае аналогом скорости истечения и габаритов факела разгружающихся подземных вод является электрический потенциал струи (потенциал протекания, или фильтрационно-электрический эффект). Простейший вариант моделирования такого эффекта предполагает измерение скачка разности потенциалов струйного течения непосредственно вблизи источника; измерения же его изменчивости в пределах объема воды, подверженного действию факела, позволяет оценить скорость и масштабы затухания истечения.

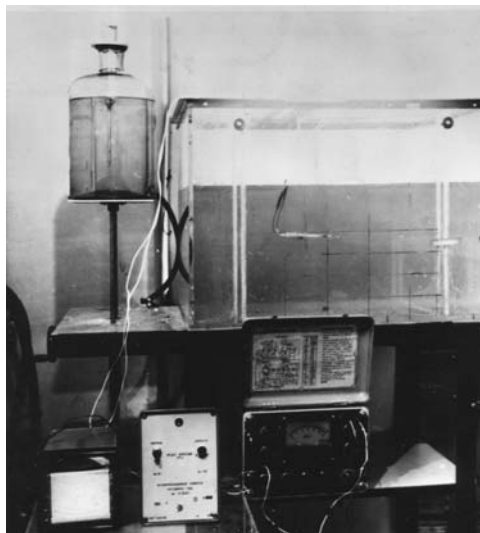
Имитация фильтрационного электрического скачка разности потенциалов на лабораторной модели подводного факела разгружающегося источника, струя которого имела известные скорости и физико-химические свойства воды, была произведена в 1971–1972 гг. автором и сотрудниками Гидрометеорологического института [Александров, Юровский, 1973; Александров, Зайцев, 1978].

Эксперименты выполнялись на малогабаритной модели, состоящей из основного резервуара $50 \times 50 \times 70$ см (оргстекло) и вспомогательного сосуда, помещенного на подъемнике с плавным ходом, обеспечивающим регулирование напора в пределах высоты 1,5 м. Изменение уровня вспомогательного сосуда и положения электродов осуществлялось при помощи гидрометрических игл с точностью до 0,01 см. Плотностная стратификация создавалась путем электроподогрева жидкости и контролировалась с точностью до 0,05 °С. На модели в области дна бассейна, куда подается струя фильтрующейся воды, была предусмотрена смена насадок двух типов — открытый и закрытый грифон. Грифон заполнялся песком с размерами фракций $1 \div 2$ мм, образуя диафрагму. Двухэлектродная установка (элементарный вариант) была оформлена в виде съемного легкого держателя, с помощью которого электроды устанавливались в любой из трех ортогональных плоскостей относительно магнитного меридиана. Расстояние между электродами сохранялось постоянным (10 см), но они могли перемещаться в любую точку бассейна по градуированным направляющим. Измерителями поля служили неполяризующие дисперсную среду (воду) электроды (см. разд. 2.2.2). Регистрация велась комплектом типовой аппаратуры в диапазоне частот менее 0,3 Гц и разрешающей способностью не ниже 0,01 мВ. Измерительная установка неподвижно размещалась над источником параллельно оси факела так, чтобы один из электродов находился в струе, а другой вне ее, или симметрично оси факела так, что оба электрода не попадали в зону его непосредственного воздействия (рис. 2.25). Опытный пуск подводного факела длился $20 \div 30$ с, что исключало временной фактор спонтанной поляризации электродов.

В простейшем варианте исследовался электрокинетический потенциал подводного источника, вода которого по физико-химическим свойствам не отличалась от воды, заполнявшей объем основного резервуара. В другом случае моделировались условия, близкие к натурным: вода источника дополнительно подсаживалась в соответствии с химическим составом водоносных горизонтов бассейна Ладожского озера компонентами NaHCO_3 , NaCl , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, CaSO_4 в количестве до 1 г/л, основной же резервуар заполнялся водопроводной (фактически озерной) водой с минерализацией

около 60 мг/л^* . Идея экспериментов сводилась к предварительной оценке дебита источника Q по его электрометрическим характеристикам ($\text{grad } \Phi, \chi$) и внешнему магнитному полю ($\vec{B}$).

а)



б)

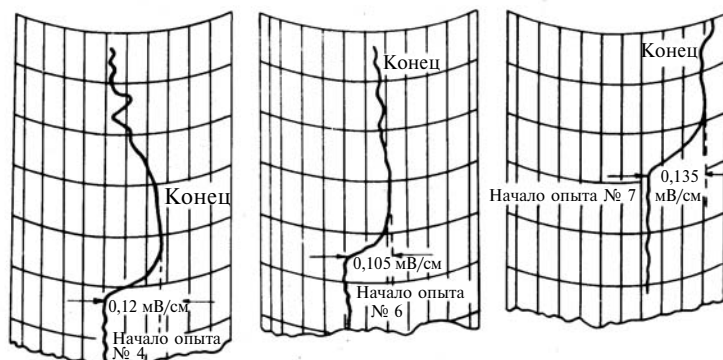


Рис. 2.25. Общий вид лабораторной установки (а) моделирования субаквальной фильтрации и образцы записей сигнала (б)

*Следует отметить, что приток подземных вод в Ладожское озеро, оценивающийся только в зоне интенсивного водообмена, составляет около $1240 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$, или около 10 % общего подземного стока пресных вод бассейна озера [Куделин, Зекцер и др., 1971].

Серия из 20 опытов по установлению связи $\text{grad } \varphi = f(Q)$ была проведена в условиях равенства температур и плотностей воды в обоих сосудах (5,5 °С). Качественная картина обнаружения электрического эффекта разгружающегося источника показана в виде записей $\text{grad } \varphi$ на рис. 25,б. Измерения изменчивости этого поля в объеме резервуара в течение непрерывного действия источника позволили построить пространственную модель факела в виде изолиний равного градиента (рис. 2.26, цв.), которые отражают гидродинамическое состояние струи. Модель “факела в разрезе” показывает, что струя поднимается к поверхности, а затем постепенно растекается в горизонтальной плоскости аналогично всплывающей струе, имеющей начальное количество движения. Такие струи относят к ослабленным струйным системам с вертикальной осью подъема. Флуктуационная природа поднимающегося столба воды такова, что явление можно рассматривать только как осредненное по времени. Деформация факела (наблюдаются пульсации градиента поля на высоте 15, 25 и 35 см) свидетельствует о том, что жидкость в поднимающемся столбе достигает поверхности «в многочисленных небольших порывах», как образно заметил еще в 1930 г. А.М. Роун (Rawn) [Sharp, 1969], а флуктуации потока передаются в некоторой степени последующему распространению жидкости в объеме резервуара. Наблюдаемый ритм пульсации $\Delta\varphi$ определяется, видимо, возрастающей ролью трибоэлектрического эффекта по мере удаления от грифона.

По поводу чистоты эксперимента можно сделать следующие замечания. Принципиальный результат, полученный в общем на малогабаритной модели и с небольшими скоростями истечения факела, показал возможность применения электрометрии для поиска и обнаружения подводных источников фильтрации и инфильтрации на дне акваторий. Однако измеряется суммарный сигнал, источниками которого являются: гидродинамическое истечение струи (магнитогидродинамический эффект), электрокинетические явления, сопутствующие фильтрации жидкости через пористую диафрагму на границе раздела вода—донные отложения (см. разд. 4.4.4), а также замедление скорости струйного потока за счет поверхностных и массовых (гравитационных) вязкостных сил. Расчеты ожидаемого сигнала, индуцируемого в установке за счет магнитогидродинамических сил, по формуле $\Delta\varphi = \chi [\bar{v} \cdot \bar{B}]$ при скоростях истечения несколько сантиметров в секунду (см. ч. 4) показали, что он сопоставим с электрокинетическим (фильтрационным), и выделение его в чистом виде затруднено.

Оцениваемые электрокинетические эффекты при движении оформившейся струи в воде резервуара: диэлектрическая проницаемость ϵ принимается для воды 80; удельная проводимость χ может быть измерена (или рассчитана по ионному составу воды); перепад давления поддается учету; вязкость либо измеряется, либо берется в справочниках; разность потенциалов измеряется; расчет дзета-потенциала выполняется на основе уравнения Гельмгольца—Смолуховского.

В результате можно оценить неизвестную скорость жидкости, фильтрующей через дно, а отсюда дебит источника

$$Q = \frac{\Delta\varphi(\chi_1 + \chi_2)\Delta L}{\Delta B_x \cdot \chi_1}, \quad (2.23)$$

где Q — дебит источника; $\Delta\varphi$ — разность потенциалов; χ_1 и χ_2 — удельные электрические проводимости подземных вод и вод бассейна, соответственно; ΔL — электродная измерительная линия; ΔB_x — горизонтальная компонента геомагнитного поля региона*.

Для более точных расчетов необходимо учитывать влияние и электростатического заряда и диффузного слоя ионов (катионов), связанных с твердой поверхностью частиц и стенок капилляров, и перемещение порового раствора (подземной воды) в тонких пленках. Когда вода перемещается в тонких пленках на поверхности отрицательно заряженных глинистых частиц или между ними, наблюдается первоначальная тенденция перемещения большего числа катионов по сравнению с анионами, в направлении низкого давления (см. на рис. 2.25,б смещение $\text{grad } \varphi$ в положительную сторону). Причиной этого является присутствие в системе большего числа катионов по сравнению со свободными анионами. Эта тенденция обуславливает быстрый прирост положительного заряда со стороны низкого давления и уменьшение его в стороне высокого давления. Суммарный градиент электростатического потенциала вызовет силу, действующую на ионы в системе, большая часть которой передается раствору, снижая его скорость примерно на 50 % по сравнению со скоростью свободного потока [Kemper, 1961]. Эти явления сопряжены с адсорбцией ионов на частицах — с изменением концентрации исходного раствора диафрагмой. Поскольку потенциал

*Количественную оценку дебита источника Q выполнил М.С. Коротаев в 1973 г.

потока стремится к изменению направления движения катионов на обратное и к возрастанию скорости движения анионов, окончательный эффект увеличения потенциала потока проявляется в уменьшении скорости потока жидкости. При этом число катионов в жидкости превышает число анионов. Расчеты Кемпера для тонких пленок толщиной $3 \div 30$ нанометров показали, что влияние ионов, ассоциирующихся с заряженной поверхностью, приводит не только к уменьшению скорости истечения потока, но и к изменению направления движения его в тонких пленках, прилегающих к твердой поверхности, т.е. против градиента давления.

Проведение исследования в небольшом объеме представляется нам перспективным для решения сформулированной задачи. Для конкретизации свойств электрического эффекта подводного факела целесообразно исследовать его тонкую структуру — систему вихрей в струе и частотный спектр их пульсаций на фоне окружающей жидкости, а также ионный обмен на границах разделов вода — донные отложения и внешняя поверхность факела — окружающая жидкость.

2.3.3. Управление движением твердофазных примесей в электролитах под действием магнитного поля на тонкослойной модели водоема

В природных условиях турбулентная диффузия примесей определяется не только физико-химическим взаимодействием их с окружающим раствором (водой), но и динамическими особенностями гидрологического режима акватории. К таким особенностям относится вихревая структура водной среды (см. разд. 2.4.6). Система мелкомасштабных вихрей локального происхождения вовлекает примеси в динамическое перемешивание при вертикальном обмене (плотностная конвекция) и приводит к их трансформации за счет физико-химического взаимодействия (см. разд. 4.2.2–4.2.4). Крупномасштабные вихри, охватывающие всю акваторию объекта, способствуют перераспределению примесей, перенося их на значительные расстояния от источника. Однако свойства природных вихреобразований в натуре не могут быть исследованы вне влияния побочных факторов (морфометрические характеристики водоема, система водного питания и т.п.). Поэтому их целесообразно изучать в идеализированных условиях, применяя методы физического моделирования вихревых течений.

Рассмотрим возможности метода лабораторного моделирования динамики дисперсной среды и диффузии примесей под действием течений электролита, возбуждаемых магнитогидродинамическими (МГД) силами. В слоях электролита толщиной $1 \div 2$ см при кондуктивно подведенном токе плотностью $1 \div 10$ А/см² и внешнем постоянном магнитном поле напряженностью $79,6(10 \div 10^2)$ А/м возникают течения со скоростями в пределах 1 см/с. Теоретические основы применения метода даны в работах [Бондаренко, Гак, 1978; 1984].

Сотрудники Агрофизического института ВАСХНИЛ и автор с помощью указанного метода смоделировали относительно простейшие условия для вихреобразования в однородной жидкости и перемещения примесей по поверхности. Для моделирования процессов переноса примеси применяли заполненные 1N водным раствором CuSO_4 кюветы прямоугольной (200×300 мм) или овальной (280×135 мм) формы с закрепленными на их концах электродами. Плотность тока, создаваемая источником постоянного тока, не превышала 0,1 А/см².

Источниками неоднородного магнитного поля служили наборы кольцевых магнитов диаметром 30, 52 и 75 мм, магниты прямоугольной формы (2×8 см), а также магнитофоры (магнитоэластичная резина). Вертикальная составляющая $\bar{H}_z$ для магнитофоров на расстоянии 1 см равняется примерно $79,6 \cdot 10^2$ А/м, а для магнитов из феррита бария — до $79,6 \cdot 10^3$ А/м.

Для получения картины распределения скоростей движения жидкости и моделирования процесса распространения примеси на поверхность электролита наносился порошок ликоподия с размером частиц $5 \div 10$ мкм. В опытах каждая частица являлась датчиком скорости жидкости при фоторегистрации их движения. Полученные на фотографии треки от каждой частицы показывали направление и скорость в данной точке.

Экспериментальные результаты по возбуждению вихревых потоков различной геометрии с использованием некоторых типов источников неоднородного магнитного поля показаны на рис. 2.27–2.30. Вихреобразование создавали в прямоугольной или овальной кювете (аналог замкнутого водоема) с помощью кольцевого или полукольцевого магнитов, намагниченных в осевом направлении.

На рис. 2.27,*а* показана система пары вихрей (вихревой диполь, ортогональный к направлению движения тока), один малый кольцевой магнит; на рис. 2.27,*б* — система четырех вихрей (один полукольцевой магнит). На рис. 2.28,*а* показана система течений из двух пар вихрей в центре объекта (два малых кольцевых магнита), на

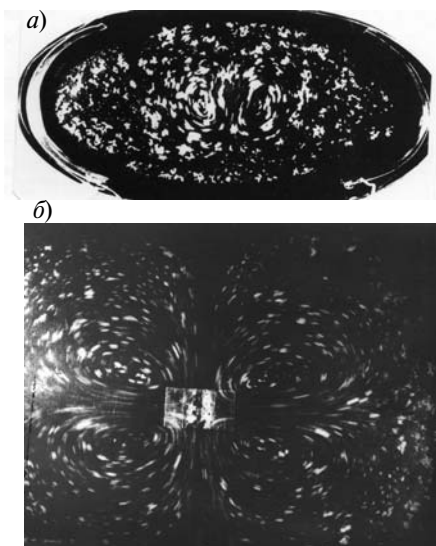


Рис. 2.27. Моделирование МГД-течений:

a — система пары вихрей, $J = 180$ мА, $V = 0,2$ см/с; *б* — система четырех вихрей, $J = 250$ мА, $V = 0,5$ см/с

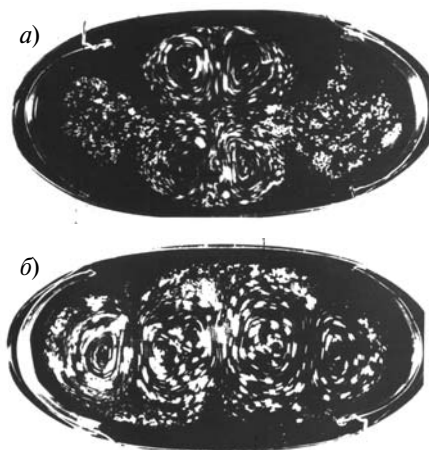


Рис. 2.28. Моделирование МГД-течений:

a — система из двух пар вихрей в центре объекта, $J = 180$ мА, $V = 0,25$ см/с; *б* — система из двух пар вихрей, расположенных по продольной оси кюветы, $J = 180$ мА, $V = 0,28$ см/с

рис. 2.28,б — из двух пар вихрей, расположенных по продольной оси объекта (три малых кольцевых магнита). Применение трех колец, обращенных ко дну кюветы одноименной полярностью, приводит к образованию трех пар вихрей, слабо взаимодействующих между собой при плотности тока до 1 мА/см² (рис. 2.29,а,б). При увеличении плотности тока скорость жидкости увеличивается, профили вихрей деформируются, и при плотности тока 100 мА/см² скорость возрастает настолько, что число Рейнольдса становится более критического (более 2000). Это приводит к потере устойчивости течения и распаду вихрей на более мелкомасштабные, перенос и диффузия примесей ускоряются.

Наряду со стационарными процессами можно наблюдать и динамику формирования вихря во времени, производя съемку через различные интервалы времени. Так, удалось наблюдать развитие вихревого течения, перенос и локализацию примесей, изображенных на рис. 2.30, где показано положение сгустков через 15, 30 с и 1,5 мин после включения тока.

Возможно смоделировать картину течений, масштаб которых соизмерим с размером всей системы, и сопутствующие им вихревые течения,

масштаб которых соизмерим с расстоянием между кольцами, если их расположить одноименными полюсами вверх.

С помощью магнитофоров с линейчатой структурой моделировались стоковые течения в прямоугольной кювете (рис. 2.31), а также ветровые течения с помощью плоского магнита, расположенного над поверхностью электролита; как было показано в работе [Александров, Гак, Гиндия, 1980], эпюра МГД-сил изменяется по экспоненциальному закону. Это позволяет наблюдать движение жидкости в вертикальной плоскости и оценить обмен примесей в стратифицированном водоеме.

Применение метода лабораторного моделирования позволяет воспроизводить широкий спектр изменения скоростей течения (от 10^{-3} до 10^2 см/с), изменяя их плавно в зависимости от плотности тока и напряженности магнитного поля, не нарушая структуру потока никакими механическими источниками.

Относительная простота и наглядность метода могут послужить основанием для широкого внедрения его в практику лабораторного исследования разнообразных задач гидрофизики и гидрологии.

Подводя некоторые итоги обзора собственных авторских работ по внедрению сформированной и стройной методики изучения водных экосистем, можно отметить:

Разработаны принципиальные основы электрометрии для исследования гидрофизических и электрофизических процессов, на базе которых может быть оценено экологическое состояние акваторий.

Практическая реализация способов электрометрии в водных средах представляет собой весьма сложную задачу, поскольку водоемы — неравновесные системы. Использование традиционных

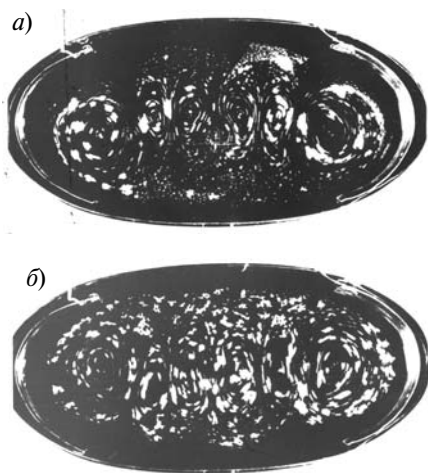


Рис. 2.29. Моделирование МГД-течений: *а* — система из трех вихрей, $J = 180$ мА, $V = 0,14$ см/с; *б* — система из трех вихрей, $J = 180$ мА, $V = 0,11$ см/с

статистических методов в неравновесных и флуктуирующих системах для сбора и анализа информации по крупным массивам наблюдений, как показывает опыт, неприемлемо. Для получения достоверных результатов об источниках поля необходима предварительная фильтрация данных.

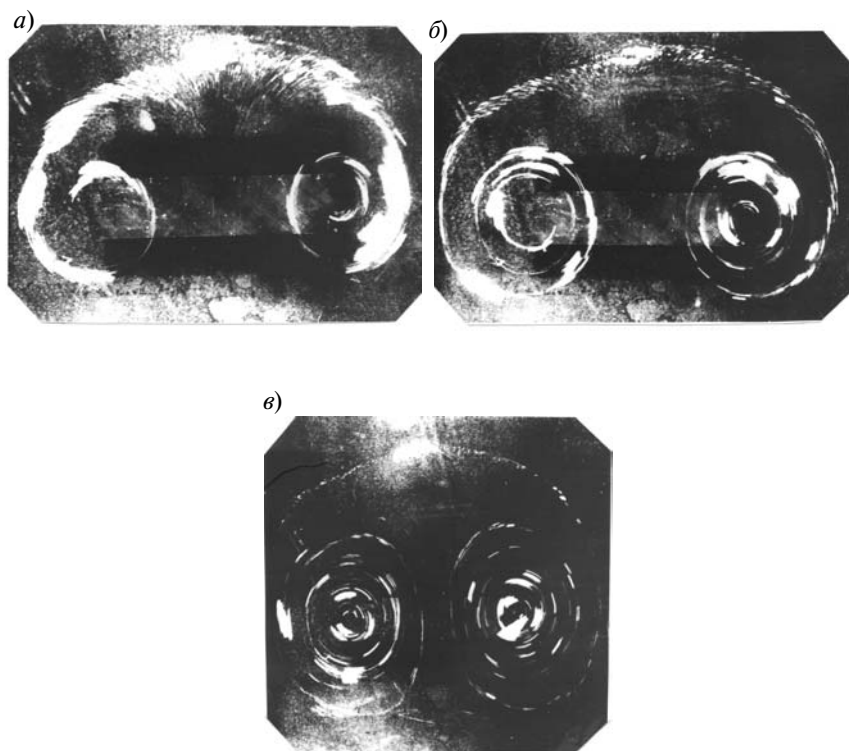


Рис. 2.30. Моделирование развития вихревого МГД-течения во времени: *a* — через 15 с; *б* — через 30 с; *в* — через 1,5 мин после включения тока; $J = 180$ мА, $V = 0,15$ см/с

В результате критического рассмотрения и оценки существующих бесконтактных способов электрополюметрии установлена необходимость широкого использования контактных способов исследования полей. Эти способы отличаются повышенной чувствительностью и точностью измерений.

Разработаны и метрологически оценены электродные измерительные системы и зондирующие устройства различного

назначения. Внедрены способы электрополюметрии и соответствующие измерительные установки, предназначенные для исследования полей с учетом конкретных источников возмущения. Внедрены специальные установки исследования электрических полей судов (кораблей) в стационарных условиях и в движении.

Проведено исследование основных источников погрешностей измерений в полевых условиях. Выполнен анализ помех, выявленных в реальной обстановке на специальных полигонах в Ладожском и Онежском озерах (индукционные, трибополяризационные, радиопомехи и т.д.). Показана необходимость учета воздействия природных факторов в стендовых испытаниях при разработке метрологического обеспечения электрополюмеров. Даны методические рекомендации для определения уровня минимальных погрешностей за счет введения определенных ограничений при эксперименте и при выполнении конкретных прикладных задач.

Рассмотрены новые средства измерений гидрофизических характеристик морских и пресных водоемов, разработанные ИЗМИР РАН и ВНИИФТРИ. Электрополюмер ИЗМИР РАН — первая отечественная многоэлектродная стационарная установка — позволяет отделить электрический сигнал гидродинамической природы от геомагнитных пульсаций в воде.

Показана возможность исследования механики жидкости и ее электрофизических свойств с помощью электромагнитных методов на физических моделях. Получены качественные и количественные соотношения между гидродинамическими характеристиками движущейся дисперсной среды и генерируемым при этом электрическим сигналом в измерительной установке (волны, течения, перенос примесей, субаквальная фильтрация).



Рис. 2.31. Моделирование стокового МГД-течения с помощью эластичных магнитов с линейчатой структурой, $J = 320$ мА, $V = 0,3$ см/с

2.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЗОН АКВАТОРИЙ

- 2.4.1. Комплексный электрофизический подход к оценке структуры нормального геофизического поля акваторий**
- 2.4.2. Береговая зона, рельеф дна и донные отложения — стационарные факторы возмущения электрического поля водных масс. Новые аспекты**
- 2.4.3. Гидродинамические поля и их вклад в колебательный режим теллурического поля**
- 2.4.4. Вихревая структура электрического поля в биоактивных слоях водоемов**

Раздел посвящен ландшафтно-геофизической диагностике акваторий по результатам электрофизических исследований. Дается наиболее полный объем сведений о новых экспериментальных результатах, характеризующих структуру прибрежных и глубинных ландшафтов, изменчивость проводящих свойств водных масс, электрические поля течений в крупных озерах (Ладожское, Онежское).

Дается обоснование необходимости введения понятия *“обобщенный критерий нормального электрического поля водоемов”* ввиду постоянно существующей флуктуационной части его, связанной с нестационарностью природных процессов и собственными колебаниями Земли.

Представлен уникальный материал, характеризующий закономерности распределения функций спектральной плотности энергии электрических полей, обусловленных гидродинамическими источниками (волновые и вихревые процессы, турбулентные пульсации) и метеорологическими условиями в переходном слое воздушная—водная среда.

2.4.1. Комплексный электрофизический подход к оценке структуры нормального геофизического поля акваторий

Проведение электрометрических съемок на больших территориях водоемов требует предварительного изучения дифференциальных характеристик поля, на базе которых представляется возможным установить аномальные возмущения.

В приповерхностном слое воды наиболее активно протекают физико-химические, биологические, гидродинамические и другие процессы. Этот слой непосредственно соприкасается с весьма неустойчивым и неоднородным приводным слоем воздуха, что обуславливает пространственную и временную нестабильность физических характеристик по всей акватории. Поэтому при изучении локальных возмущений электрического поля водоемов возникает необходимость введения критерия, характеризующего так называемое *“нормальное состояние электрического поля водоема”*. Этот критерий будем называть *“нормальное фоновое поле объекта”* [Александров, Зайцев, 1978].

Для того, чтобы уяснить конкретный смысл этого критерия, далее рассматриваются: поверхностная пленка воды и ее электрический потенциал, послойное распределение электрического потенциала воды от поверхности до дна, флуктуационная часть электрического и геомагнитного полей, не связанная с гидродинамическими возмущениями.

Физико-химические явления в поверхностной пленке воды акваторий

Поверхностная пленка воды — это одна из экологических ниш в водоеме, в ней концентрируется микрофлора, на нее воздействуют такие элементарные акты, как естественная флокуляция, сопровождающаяся электризацией пленки за счет всплывающих пузырьков, и многое другое. Совокупное действие таких факторов приводит к необходимости количественно оценить поверхностный потенциал воды, величина которого к настоящему времени достоверно не установлена и по данным разных авторов [Кочурова, 1979; Кизим, Добрыднев, 1981] оценивается от 30 до 300 мВ. Существует разное мнение и по поводу знака поверхностного потенциала [Двойной слой..., 1981; Сотскова, 1981]. На основе модели молекулы воды Роулинсона и Попла был рассчитан дипольный момент молекул поверхностного слоя и экспериментально измерен температурный коэффициент поверхностного потенциала воды. На границе раздела вода—воздух величина $d\chi/dT$ составляет примерно $-3,1 \cdot 10^{-4}$ В/К для бидистиллированной воды ($\chi = 2,0 \cdot 10^{-6}$ См/см) в температурном интервале $298 \div 323$ К. Эти данные свидетельствуют о положительном знаке поверхностного потенциала воды [Кизим, Добрыднев, 1981].

Таким образом, в указанном интервале температур отмечается уменьшение поверхностного потенциала воды примерно на 8 мВ. Для границы раздела чистая вода—воздух характерно распределение

заряженных частиц по одну сторону пленки — в жидкой фазе, причем поверхностный контактный слой содержит катионы за счет адсорбции, а для раздела вода — воздух в присутствии поверхностно-активного электролита характерен отрицательный скачок потенциала на границе [Богуславский, Ягужинский, 1975]. При контакте воды с жидкими углеводородами адсорбция идет по другой схеме: катионы и анионы распределяются по обе стороны от границы, анионы — в воде, катионы — в растворе электролита*. Пленку раздела двух несмешивающихся жидкостей (вода — углеводороды) можно аппроксимировать бислойной мембраной толщиной $6 \div 8$ нм. В природных условиях, например, такие мембраны формируются за счет молекул фосфолипидов. Особое свойство бислойных мембран состоит в барьерной функции, они препятствуют: 1) проникновению заряженных частиц ионов и электронов; 2) проникновению нейтральных частиц. На границе вода—воздух структура первого слоя все время нарушается непрерывным процессом испарения и конденсации молекул воды. Расчеты в работе [Пчелин, 1970] показывают, что лишь небольшой процент молекул воды ориентирован так, что неполярная фаза (воздух) оказывается положительной по отношению к поверхности воды. В таком случае образование последующих слоев сильно затруднено.

Необходимо отметить, что подобные адсорбционные процессы протекают в живых организмах, например, при поглощении клеткой веществ, при ферментативных актах и др. Можно предположить, что таким же образом происходит дополнительная ионизация пленки — формирование микропотенциалов, генерируемых бактериальной флорой, пико- и микропланктоном, органическими продуктами их жизнедеятельности. Явление это должно быть выражено ярче в мезотрофных и эвтрофных пресноводных акваториях, морях и океанах. Так, на оз. Сиверском (см. разд. 2.5.3) автор обнаружил резкий скачок разности потенциалов в тончайшем (несколько мм) поверхностном слое воды, и, как оказалось после обработки проб бактериопланктона, это было обусловлено аномально высокой концентрацией бактерий в этом слое в период суточного цикла наблюдений. К сожалению, эти наблюдения не удалось повторить на других водоемах.

*Адсорбция — концентрирование вещества из объема фаз на поверхности раздела между ними, например из газа или раствора на поверхности или в объеме микропор твердого тела или на поверхности жидкости. Физическая адсорбция — результат проявления дисперсионных сил и сил электростатического характера. Если адсорбция сопровождается химической реакцией адсорбата с адсорбентом, она называется хемосорбцией [Химич. энцикл. словарь. М., 1983, с. 12].

В настоящее время полагают доказанным [Богуславский, Ягужинский, 1975], по крайней мере для молекул воды, что вязкость бислойной поверхностной мембраны является единственной силой, тормозящей продвижение заряженных частиц через физико-химический барьер. Однако еще нет сведений о том, всегда ли связаны потоки воды и ионные потоки, поэтому неизвестно, насколько полно заменяется гидрофобная оболочка на сольватную при переходе иона из водной фазы в мембрану. Таким образом, на границе раздела фаз существует межфазный скачок поверхностного потенциала, изменчивость которого зависит именно от присутствия заряженных частиц и концентрации реагирующих молекул. Скорость переноса (кинетика процесса обмена) лимитируется движением зарядов через объем мембраны.

Вопрос о нестабильности границы раздела исследуется уже более полувека, и разрабатывался он ранее в целях уяснения механизма газового обмена. В теории газовой абсорбции этот вопрос трактовался с различных точек зрения (пленочная концепция Льюиса и Уайтмена, микровихревая концепция структуры поверхности раздела фаз Хигби и Данкверта и др.). Исследования в течение последнего десятилетия прошлого века позволяют трактовать существование пленки в статистическом смысле. Считают, что пленка существует всегда, но что при этом ее структура постоянно претерпевает изменения путем обмена с жидкостью, находящейся непосредственно под поверхностью. При этом предполагается стохастический (вероятностный) характер существования пленки, согласующийся с идеей о турбулентном потоке жидкости [Metzger, Dobbins, 1967]. В этом случае поверхностная пленка чистой воды рассматривается не как мембрана (типа бислойной липидной мембраны), а как активный слой толщиной примерно в 10^3 раз больше, который имеет не мономолекулярное строение с одной и той же неизменной жидкостью под ним, а представляет собой целую зону, в которой молекулы ориентированы [Drost-Hansen, 1967]. Ориентирование происходит в направлении поляризации, и этот слой может простирается в глубину на 10^{-5} см [Metzger, 1967]. Именно этой ориентацией молекул объясняют то поверхностное натяжение и предел упругости, которые свойственны поверхности чистой воды. Но из-за высокой поверхностной энергии пленки чистота ее не может сохраниться — идет адсорбция примесей.

При наличии примесей, например поверхностно-активных веществ (ПАВ), величина поверхностной упругости возрастает, а поверхностное натяжение ослабевает, ПАВ снижают скорость

восстановления чистой пленки*. Нестабильность пленки и объяснение экспериментальных результатов получили обоснование в работах Б.В. Дерягина и Ю.В. Шулепова (1976 г.). Эти авторы дали теоретическое построение спонтанной поверхностной поляризации (образования постоянного электрического дипольного момента) при адсорбции полярных молекул на поверхности коллоидных частиц из окружающей среды. Согласно этой теории, при достаточной плотности адсорбированных молекул поверхность может приобретать тангенциальную составляющую вектора поляризации (постоянный дипольный момент), которая возрастает при увеличении концентрации адсорбированных молекул и величины дипольного момента молекулы и убывает с увеличением энергии, зависящей от угла наклона молекулы к поверхности.

Мерой электрофизической устойчивости поверхностной пленки является дзета-потенциал в двойном электрическом слое на границе раздела фаз (см. разд. 4.2.2). В электрооптических измерениях за электрическую характеристику границы раздела дисперсной фазы и дисперсионной среды (воды) принимают величину отношения дипольного момента заряженной частицы к единице ее поверхности [Войтылов, 1977]. Такая характеристика применяется при исследовании природных суспензий и коллоидных растворов (бактериальные и вирусные культуры, например). Это особенно показательно, поскольку развитие и жизнедеятельность бактерий в поверхностной пленке воды пока еще не изучены. Известно лишь, что концентрация бактерий в пленке на 2–3 порядка выше, чем в более глубоких слоях (для пленки толщиной 50 мкм) [Романенко и др., 1978]**.

Измерения поверхностного электрического эффекта в макрообъеме в открытой системе, безусловно, сопряжены с методическими трудностями. Однако нами зафиксированы эти эффекты в очень спокойную погоду в шхерных районах Ладожского озера. Величина скачка поверхностного потенциала в $5 \div 10$ -сантиметровом слое воды достигла 2,5 мВ. Источниками этого скачка в первую очередь можно считать микрофлору и природные коллоидные примеси и ПАВ, попадающие на поверхность пленки с атмосферными осадками и за счет смыва органики с почвы.

*Опыт показывает, что восстановление чистоты поверхностной пленки зависит от динамических условий на границе раздела: в природных условиях пленочная проницаемость и газонасыщение тонкого поверхностного слоя обусловлены увеличением амплитуды ряби и скорости смещения частиц вплоть до образования вихрей.

**Наши наблюдения на озере Сиверском (1980 г.) эту точку зрения подтверждают (см. разд. 2.5.3).

Флуктуационные свойства пленки раздела фаз изучались на моделях жидких мембран специальными методами в Институте неорганической химии АН Латвии [Голубев, Пурин, 1978]. Следует отметить, что поляризационные свойства тонких жидких пленок находят практическое применение в технических устройствах для повышения эффективности теплообмена за счет стабилизации проводящей пленки электромагнитным полем ($B \approx 0,1 \text{ Вб/м}^2 \approx 0,1 \text{ Тл}$ и $E = 100 \text{ В/см}$) [Crowley, 1967].

Еще раз напомним читателям, что на примере измерения поверхностной удельной электрической проводимости воды были показаны ранее (см. разд. 2.1.2) динамические свойства пленки. На рис. 2.3,б представлены впервые полученные в 1971 г. кривые непрерывной записи χ с чувствительностью 0,2 % в Ладожском озере методом буксирования зонда на пути от о. Ускалампя до о. Пусунсари и от о. Пусунсари до Приозерска. Температурная поправка введена с учетом $\alpha = 2,41 \text{ \%} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ и градуировочного графика, см. работы [6, 12, 381]. Из данных, представленных кривыми 1 и 2, видно, что значение χ несколько увеличивается по мере приближения к Приозерску. Однако колебания проводимости находятся в пределах $(1 \div 2)10^{-6} \text{ См/см}$, что соответствует колебаниям ионной концентрации в пределах $(1 \div 2)10^{-6} \text{ ммоль/л}$. Это может объясняться колебаниями концентраций CO_2 в поверхностном слое воды.

Рассмотренные электрические свойства жидких поверхностных пленок показывают, что они представляют собой физико-химический барьер водной поверхности озера, от свойств и динамики которого зависят формирование и развитие фоновых характеристик поля в нижележащем объеме воды. Учет явлений в пленке необходим при моделировании различных физических процессов — фильтрационных, магнитогидродинамических вихревых течений в электролитах, кавитационных эффектов в газонасыщенных растворах, миграционных перемещений живых организмов в ограниченных объемах среды, движений дисперсной фазы в сопутствующем потоке воды и многое другое (см. разд. 2.3).

Фоновые характеристики геомагнитного (ГМП) и теллурического полей

Знание фоновых характеристик проводимости воды, поверхностного потенциала пленки еще недостаточно для электрополюметрии акваторий, поскольку электрическое поле сопряжено с

постоянно действующими стационарными и нестационарными источниками магнитного поля Земли и околоземного пространства, которые образуют фон “нормального геомагнитного поля”.

“Нормальное магнитное поле” представляет собой сумму полей

$$B_n = B_o + B_m + B_e, \quad (2.24)$$

где B_n — нормальное поле; B_o — поле однородного намагничивания земного шара (дипольное поле); B_m — поле, вызванное неоднородностью глубинных слоев земного шара (недипольное или материковое поле); B_e — поле, обусловленное внешними нестабильными источниками [Спр. геофизика, 1969]. Таким образом, понятие нормального поля условно (B_e — нестабильно), и на практике за нормальное поле принимают поля различной структуры в зависимости от того, какую часть аномального поля требуется выделить. Например, карта нормального магнитного поля бывшего СССР представляет собой одну аномалию, охватывающую всю его материковую территорию — поэтому полагают, что она соответствует полю $B_n = B_o + B_m$. Все же некоторые отличия в значении напряженности геомагнитного поля для разных регионов имеются, на что указывают данные из работы В.И. Почтарева [1984, с. 32–34] (табл. 2.10).

Таблица 2.10

Нормальные значения напряженности ГМП

Регион	Элементы ГМП				
	$B_n \cdot 10^{-4}$, Тл	$Z \cdot 10^{-4}$, Тл	$H_n \cdot 10^{-4}$, Тл	D°	I_n°
1965 г.					
Онега—Ладога	0,510–0,520	0,490–0,500	0,150–0,140	6–8	73 ÷ 74
Байкал	0,600–0,605	0,560–0,590	0,200–0,180	–2 ÷ –5	70 ÷ 73
1980 г.					
Онега—Ладога	0,515–0,525	—	—	—	—
Байкал	0,605–0,615	—	—	—	—

Здесь B_n — полный вектор нормального поля; Z и H_n — вертикальный и горизонтальный нормальные компоненты поля Земли, соответственно.

Термин “нормальное поле” относится также и к характеристике атмосферно-электрического поля E_a в обычные спокойные и безоблачные дни. Но следует различать двойной смысл термина: 1) в соответствии с эквипотенциальностью поверхностной оболочки Земли $\vec{E}_a$ имеет нормальное, т. е. перпендикулярное направление к земной поверхности, 2) вне сильных возмущений напряженность его лежит в пределах $0 > \bar{E}_a^n > -1$ кВ/м. Это нормальное поле вблизи

Земли искажается рельефом. К сожалению, среднее нормальное атмосферно-электрическое поле Земли неизвестно, поэтому остается неизвестной и величина полного собственного заряда земной поверхности [Краев, 1971]. Допускают на основании наблюдений, что среднее нормальное поле $\bar{E}_0^n$ равно 130 В/м, а на основании этого находят среднюю плотность заряда $\sigma_{\text{ср}} \approx 1,1 \cdot 10^{-9}$ Кл/м² и соответственно электрический заряд земного шара, равный $Q^- = 5,7 \cdot 10^5$ Кл [Краев, 1971]. Является ли полный заряд Земли (земного шара и атмосферы) равным или не равным нулю, до сих пор фактически не установлено. Предположения о том, что Земля обладает собственным зарядом (Эрман, Пельте, Экснер), в настоящее время отвергнуто как противоречащее основным закономерностям атмосферного электричества, и принято условие, что собственный заряд Земли равен нулю. Полагая, что собственный заряд Земли, как космического тела, равен нулю, необходимо допустить существование положительного заряда атмосферы: $Q^+ = -Q^-$. Потенциал земной поверхности ϕ_0 , принятый за условный нуль потенциала, по ориентировочным расчетам равен $-5,4 \cdot 10^8$ В.

Для электрометрического картирования необходимо было получить представление об условном нормальном поле, естественный фон которого мог бы в дальнейшем послужить основой для выделения всевозможных возмущений аномального характера гидродинамической природы (см. разд. 2.4.3, 2.4.4), но в большей мере геолого-геохимической природы (см. разд. 2.4.2). В этом случае измерения в естественных условиях по своей точности и с учетом источников погрешностей должны приближаться к лабораторным, что осуществляется практически очень редко. Тем не менее такие попытки были нами предприняты в 1974 и 1975 годы на Онежском и Ладожском озерах. На Онежском озере произведено профилирование акватории градиент-зондом в штилевую погоду практически через все озеро, от мыса Бесов Нос до Медвежьегорска. Аналогичные измерения, но в меньшем объеме выполнены на Ладожском озере. Было установлено, что при удалении от берегов потенциал естественного поля стремится к нулю, градиент потенциала в открытых частях озер также колеблется в среднем около нуля с амплитудами, редко превышающими $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ В/м (трибополяризационный эффект исключен).



Рис. 2.32. Карта-схема изменчивости уровня потенциала условно “нормального электрического поля” в северной части Ладожского озера:

1 — эквипотенциальные линии, $\Delta\phi$, мВ/м; 2 — изобаты

Специальные наблюдения были выполнены на Ладожском озере для получения данных о вертикальном градиенте поля в слое $0 \div 50$ м, где влияние поверхностного стока с почвы побережья и геохимическое воздействие дна практически не сказывались. Полигон исследований по площади занимал примерно 80 км^2 , глубины в точках измерений были не менее 150 м, влияние крупных островов и побережья озера практически исключалось, так как ближайшая к месту измерения береговая точка материка располагалась приблизительно в трех милях. Влияние посторонних объектов по условиям эксперимента исключалось. Невозмущенный уровень поля измерен в 16 точках с учетом временной поляризации электродов и

введением поправок. Длина измерительной линии равнялась 50 м. Карта-схема распределения градиента потенциала представлена на рис. 2.32. Среднее значение его равно $0,51 \cdot 10^{-3}$ В/м. Величина любопытная, поскольку примерно аналогичные цифры получены нами и ранее (1968–1970 гг.). Таким образом, не исключается возможность существования постоянной составляющей электрического поля для данного региона [Александров, 1985]. Аналогичную мысль высказывает и В.И. Лопатников, по данным которого в Черном море можно выделить постоянную составляющую естественного поля, равную $\approx 1,2 \cdot 10^{-6}$ В/м [Лопатников, 1968]. От выбора среднего уровня нормального поля зависит и наглядность представления пространственной неоднородности аномального поля, обусловленного стационарными источниками возмущения геологической природы. При построении профилей и карт эквипотенциалов поля мы пользовались относительными характеристиками, считая уровнем нормального фона градиент потенциала, равный нулю. Насыщенность изучаемого участка электровозмущающими источниками геологической природы на картах показана сгущением эквипотенциалов. Карты абсолютно аномального электрического поля озер не строились, хотя при необходимости это можно выполнить, используя среднестатистическое значение постоянной составляющей E для изучаемого региона.

Задачи гидрофизики, исследующей аномальные возмущения на фоновом уровне поля, который, как было показано ранее (см. разд. 2.1.4), флуктуирует в широкой полосе частот, значительно сложнее. С этой точки зрения, видимо, целесообразно ставить вопрос о расширении понятия критерия “нормального поля”, поскольку помимо постоянного поля, обусловленного статическими формами рельефа дна и всевозможными внутриземными аномальными источниками, следует учитывать постоянно действующий ритмический фактор, связанный с собственными колебаниями Земли.

Флуктуации электрических полей и собственные колебания Земли

В 1974 г. (с 13 по 17 августа) в Якимварском заливе Ладожского озера в прибрежной полосе проводились длительные наблюдения за флуктуациями электрического поля для учета их при обнаружении движущихся кораблей. Пятисуточные измерения не могут претендовать на полноту сведений, так как они велись с 10 до 20 ч местного времени, тем не менее на записях можно проследить своеобразную долгопериодную ритмику колебаний поля. Короткопериодные флуктуации отфильтрованы при статистической обработке.

Обнаружены следующие долгопериодные колебания в минутах (погрешность расчета $3 \div 5 \%$) (табл. 2.11).

Таблица 2.11

**Долгопериодные колебания естественного
электрического поля в Якимварском заливе в 1974 г.**

Дата	Период наблюдавшихся колебаний τ , мин	Средний характерный период по группе, мин
13 августа	~ 20 ; ~ 25 ; ~ 75 ; ~ 98 ;	54,5
14 августа	$\sim 20,5$; ~ 25 ; $\sim 82,5$; ~ 98 ; ~ 122 ;	54,0
15 августа	~ 15 ; ~ 20 ; ~ 62 ; ~ 75 ;	62,0
16 августа	$\sim 15,5$; ~ 20 ; $\sim 25,2$; $\sim 57-58$;	57,0
17 августа	$\sim 19,4-19,8$; ~ 25 ; ~ 62	62,0

Группа колебаний с периодом около $20 \div 25$ мин имела амплитуды порядка $(5 \div 7)10^{-4}$ В/м, группа с периодами около 60 мин — примерно $(10 \div 15)10^{-4}$ В/м и, наконец, самые долгопериодные колебания периодов $75 \div 98$ мин и более — примерно $30 \cdot 10^{-4}$ В/м. На записях флуктуаций поля можно проследить, как долгопериодные колебания (особенно 62-минутные) отделяются друг от друга группами или сгустками короткопериодных колебаний (по 4–5 всплесков в группе), которые длятся $10 \div 12$ мин, а потом исчезают. Отмеченные долгопериодные колебания не могут быть однозначно связаны с гидродинамическими источниками (волны, течения, вихревые пульсации), поскольку такие периоды не характерны для динамики водных масс данного объекта. По всей вероятности, их источник следует искать в более общих планетарных возмущениях.

Этот вывод может быть подкреплён достаточно точными опубликованными данными, с которыми автор ознакомился уже после проведенной в 1974 г. работы [Собственные колебания Земли..., 1964; Рыкунов, 1967; Монахов, 1977]. Следует отметить следующее. Беньофф (США) открыл 57-минутный сфероидальный период собственных колебаний земного шара в 1954 г. После обработки материалов катастрофического Чилийского землетрясения 1969 г. группа американских геофизиков по результатам записей гравиметров и сейсмографов установила, что частоты сфероидальных колебаний Земли соответствуют теоретически рассчитанным на всех основных сфероидальных тонах порядка n (0,2,3,4,5,... 38). Основному сфероидальному тону $n = 2$ — наиболее медленному, по данным авторов, — соответствует период 54,7 мин (сейсмограф) и 54,98 (гравиметр); при $n = 4$ период равен 25,8 мин; при $n = 5$ период

равен 19,8 и т.д. вплоть до 38-го порядка с периодом $\approx 3,7$ мин; тону нулевого порядка соответствует период 20,46 мин (гравиметр). Микросейсмические исследования интенсивно проводились на протяжении последних 20 лет и в бывшем СССР. В результате было показано, что увеличение уровня сейсмического шума связано с ростом сейсмоактивности Земли и что долгие, четко выделяемые без спектрального анализа периоды совпадают с периодами разных форм и мод собственных колебаний Земли. Так, например, выделялись периоды 15,5 мин (2-й оберто́н сфероидального типа колебаний при $n = 2$), 20,5 мин (основной тон сфероидальных колебаний при $n = 0$) и т.д. [Рыкунов и др., 1978]. Таким образом, к настоящему моменту спектр собственных колебаний Земли изучен достаточно детально*. В работе американских авторов [Собственные колебания..., 1964] было упоминание о наблюдаемых колебаниях с периодами 60, 75, 86 и 100 мин. И вот относительно недавно, в 1982 г., сотрудники НИФИ ЛГУ (ныне СПбГУ) опубликовали работу [Линьков, Петрова и др., 1982], где сообщают о новой аппаратуре, с помощью которой были зарегистрированы долгопериодные колебания Земли при отсутствии землетрясений, а именно: *средние периоды по группе, мин*: 122,7; 98(100); 83(86); 73(75); 62(60).

Исходя из того, что результаты, полученные магнетронным сейсмографом, соответствуют периодам колебаний при отсутствии каких-либо сейсмических возмущений, авторы целиком приписывают их собственным колебаниям Земли. При этом Земля рассматривается в целом, включая ее водную и воздушную оболочки. Эти выводы и наблюдения как нельзя лучше подтверждают наши измерения 1974 г. Есть основания, таким образом, говорить о постоянно действующем планетарном ритмическом источнике долгопериодных колебаний и в земле, и в воде. Эти низкочастотные колебания могут модулировать более высокочастотные гидродинамические, что приводит к мысли о необходимости пересмотреть критерий нормального поля акваторий. Частотный фон, обусловленный планетарными ритмами, по-видимому, соответствует полосе частот от $4,5 \cdot 10^{-3}$ Гц и ниже.

При сейсмической активности Земли генерируются не только долгопериодные ЭМ возмущения, но и аномальное высокочастотное излучение в диапазоне радиоволн [Гохберг и др., 1979]. В периоды, предшествующие землетрясению, специальной аппаратурой в полосе частот $10^4 \div 10^6$ Гц был зарегистрирован устойчивый фон, оценка интенсивности которого на частотах, например, $f = 385$ кГц, дает значение 315 мкВ/м. Максимальное значение сигнала в период возмущения превышает фон до 600 мкВ/м. Фактор ЭМ эмиссий

*См. заключение, "геофизика".

при сейсмической активности, как указывают авторы упомянутой работы, является дальнодействующим. Таким образом, не исключена возможность обнаружения высокочастотных ЭМ колебаний и в воде озер. Это вносит дополнительные сложности при выработке критерия “нормального поля”*.

2.4.2. Береговая зона, рельеф дна и донные отложения — стационарные возмущения электрического поля водных масс. Новые аспекты

Проблемы фундаментальной геологии и геофизики, казалось бы, стоят в стороне от рассматриваемых в данной работе вопросов. Тем не менее, еще раз вспоминается замечание Ричарда Фейнмана, лауреата Нобелевской премии (США): “... Наука приносит пользу только тогда, когда говорит нам о еще непоставленных экспериментах. Она никому не нужна, если позволяет судить лишь о том, что известно из опыта, что только что произошло. Поэтому всегда необходимо распространять идеи за рамки того, на чем они уже опробованы.” [Фейнман, 1968, с.181]. Именно поэтому необходимо распространять идеи за рамки того, что уже когда-то опробовано, в частности отрадно почувствовать, что проведенные автором работы по электрополюметрии в 1970–1980 гг. показали тогда корреляционные связи электрических полей пресноводных водоемов с геологическими структурами подводного ложа крупных озер, а в настоящее время к значимости этих эффектов наука подходит с новых, не феноменологических подходов, а системно. Например, в работе Н.Ф. Афанасьева “Закономерности формирования структуры физических полей в минеральных системах” [Вестник СПбО РАЕН. 1999. Т. 3(4). С. 388–403] формулируются аспекты четырехкомпонентной модели минеральной системы, которая обосновывает “...организационную структуру и соответствие между вещественным, энергетическим, сигнальным и генетическим компонентами”. Первичные элементы такой системы — атомы, геофизические поля, электромагнитное излучение и генетические матрицы, находящиеся в функциональном соответствии и образующие в условиях изменяющейся среды некоторые композиции: между элементами системы допускаются только такие взаимодействия, которые предопределены энергетическим состоянием среды.

При рассмотрении эволюции минеральных систем Н.Ф. Афанасьев отмечает, что приток энергии в геосистему осуществляется за счет циклических явлений в масштабе от Вселенной до Земли, а именно:

*См. текст в разделе заключение, «геофизика».

движения галактики в гравитационном и магнитном полях Вселенной; солнечной системы — в гравитационном и магнитном полях галактики; Земли — в гравитационном и магнитном полях солнечной системы;

притока частиц и тел из космоса;

приливообразующих сил Луны и Солнца;

магнитного взаимодействия солнечного ветра с ГМП;

электрического тока из ионосферы;

внутренних источников энергии, сформированных в результате поляризации вещества под воздействием указанных выше факторов [Н.Ф. Афанасьев. Вестник СПбО РАЕН. 1999. № 3(4). С. 388–403].

При взаимодействии электрического тока геосистемы с ГМП предполагается передача ЭМ энергии по геофизическим волновым на поверхность Земли, где создается ЭМП с характерной для нового состояния минеральной системы структурой: пространственной, временной, спектральной и интерференционной. В этом случае локальные объекты ландшафта — земного и подводного — создают условия для когерентности, порождая интерференцию волн плотности и ЭМ волн, благодаря чему создается зональная концентрация энергии. Так возникают чередующиеся зоны различной энергоактивности, оконтуривающие локальный объект.

Таким образом, наши первые опыты предвосхитили целесообразность исследований ЭМ полей в водных экосистемах, которые в настоящее время могут быть учтены в современном геолого-минералогическом системном моделировании и оказаться весьма полезными в практическом освоении георесурсов.

***Геолого-геоморфологическая особенность
строения водных котловин
и локализация электрических свойств водной среды***

Вопросы теории и практики изменения естественного электромагнитного поля в прибрежной зоне морей и океанов с момента открытия явления «берегового эффекта» детально рассмотрены в многочисленных публикациях как в бывшем СССР, так и за рубежом [Мансуров, 1958; Сенько, 1959; Roden, 1964; Шулейкин, 1968]. В пресноводных озерах экспериментальных работ по изучению изменчивости нестационарных ЭМ полей в прибрежной полосе и на островах не проводилось. В начале 1980-х годов академик В.В. Шулейкин, ознакомившись с некоторыми результатами электрометрических работ Института озераведения у берегов озер, высказал пожелание о необходимости такие исследования расширить и выполнить их на современном техническом уровне. К сожалению,

выполнить это в полной мере не удалось. Проведенные работы коснулись в основном изучения возмущения квазистационарных естественных полей батиметрическими и геологическими неоднородностями в береговой зоне [Александров, 1973; Александров, Зайцев, 1978] и вдали от берегов над резкими поднятиями дна. Измерения поля ($\text{grad } \Phi$) носили методический характер и обеспечивали прикладные исследования экологической направленности, поэтому обнаруженные аномалии его расценивались не с точки зрения познания структуры поля, но как своеобразная “помеха”, которую следовало учитывать при экспресс-контроле качества воды в полевых условиях.

Применялась модификация метода электрополюметрии в виде буксирования градиент-зонда для обследования прибрежных зон, где сильно сказывается влияние локальных морфологических особенностей района. Выполнялось комплексное геофизическое профилирование акватории (электрометрия водной поверхности и эхолотирование дна) с одновременной оценкой информации оператором и судоводителем.

Измерения проводились на обширной акватории Онежского озера и на геофизическом полигоне в Кондопожской губе с координатами: $62^{\circ}05',2 \div 62^{\circ}04',5$ с.ш. и $34^{\circ}25',6 \div 34^{\circ}30',1$ в.д., а также на Ладожском озере. Показания записей эхолота и измеренные значения естественного поля в поверхностном слое воды сопоставлялись точно по времени, и устанавливалась связь аномалий градиента поля с перепадами глубин и крутизной склонов рельефа дна. Характерные примеры иллюстрации связи скачков градиента потенциала с неоднородностью рельефа дна в Кондопожском заливе и Онежском озере на галсе от мыса Бесов Нос до о. Большой Ледниковский представлены на рис. 2.33.

В глубоководной части озера ($80 \div 50$ м) поле на поверхности однородно. При глубине его $30 \div 40$ м и значительных перепадах ($10 \div 15$ м) уже наблюдаются амплитуды градиента примерно $(0,8 \div 1,0)10^{-4}$ В/м (см. участок I, рис. 2.33, а), а при выходе на мелководье, причем с резким перепадом глубин с $30 \div 40$ м до $5 \div 7$ м, отмечаются амплитуды в $(1,5 \div 1,7)10^{-4}$ В/м, и характер записи напоминает запись колебаний типа цугов (см. участок II, рис. 2.33, а). Аналогичная запись представлена для Кондопожского залива при буксировании зонда от устья р. Суны до ст. 22 в районе губы Карбиж (северо-восточный берег). Резкие перепады глубин в районе ст. 18 (рис. 2.34) чуть ли не до 30 м и с толщиной экранирующего слоя воды примерно $10 \div 15$ м приводят к очень значительным колебаниям градиента (до $1 \cdot 10^{-3}$ В/м).

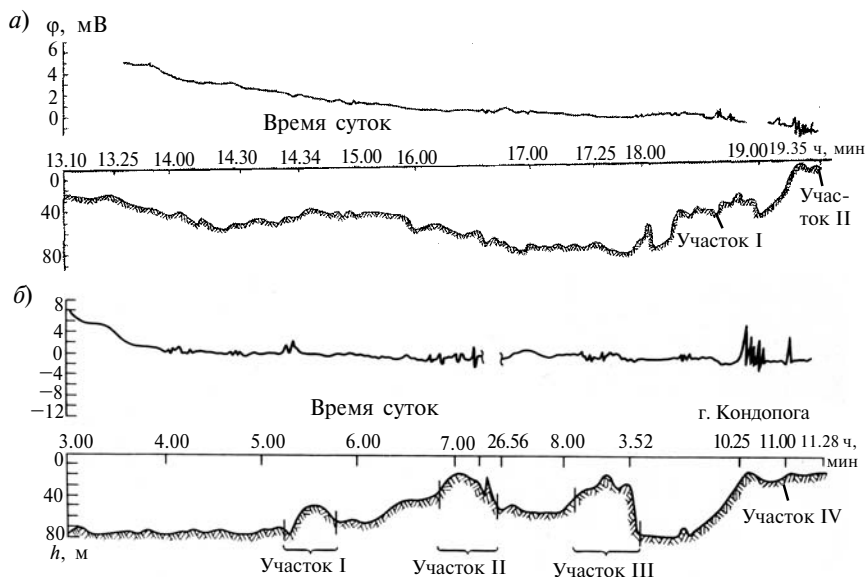


Рис. 2.33. Геофизическое профилирование в Онежском озере:
 а — открытое озеро от м. Бесов Нос до о. Б. Ледниковский; б — Кондопожский залив

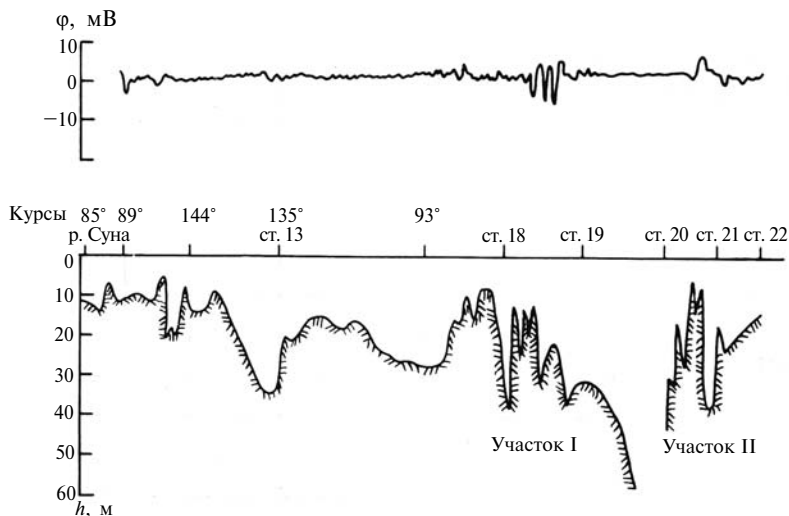


Рис. 2.34. Геофизическое профилирование Кондопожского залива. Курсы переменные от р. Суны до губы Карбиж. Геологические разломы обуславливают аномалии градиента поля в поверхностном слое воды (см. ст. 18).
 16 июля 1973 г.

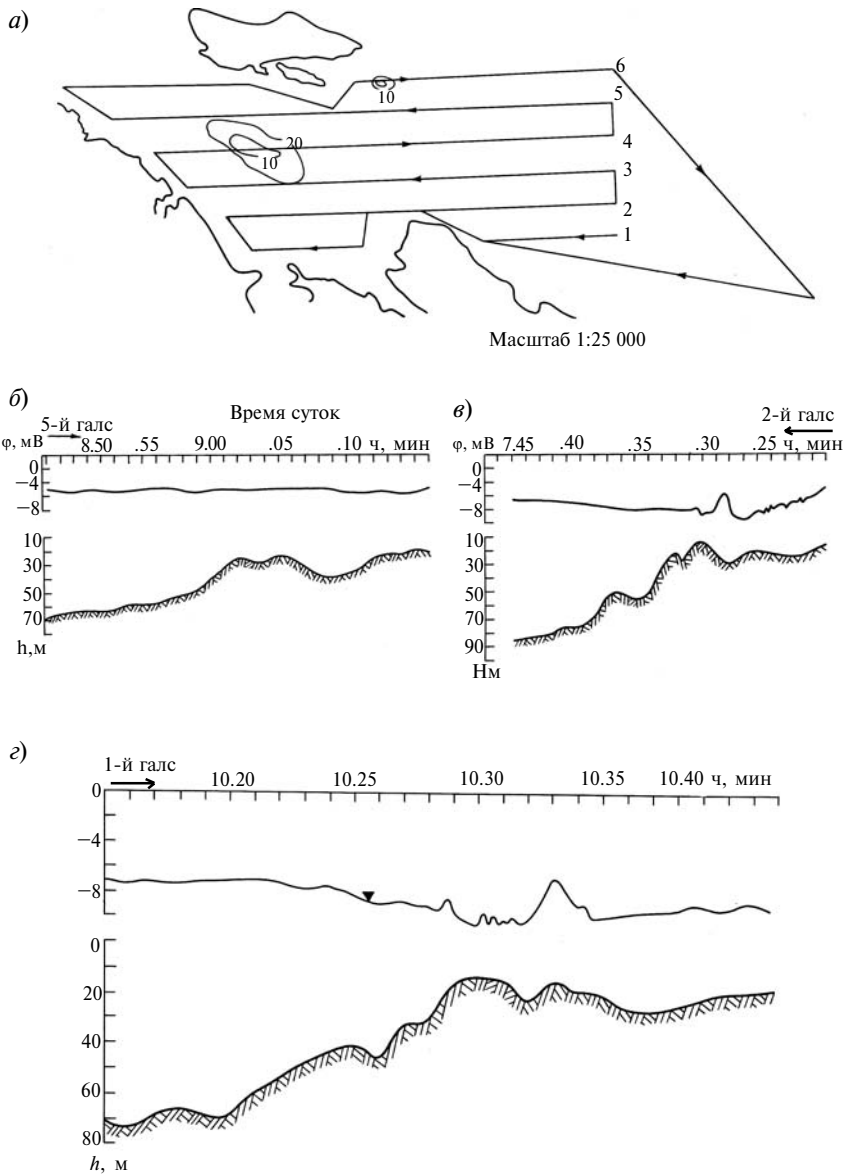


Рис. 2.35. Примеры изменения электрического поля на поверхности воды при неоднородности рельефа дна

Пример аномалии градиента, вызванного перепадом глубин, представлен на рис. 2.33, б. Здесь на участке I амплитуда аномального градиента равна $(1,8 \div 2,0)10^{-4}$ В/м и соответствует перепаду глубин в 20 м. На участке II она достигает высокого значения ($4 \cdot 10^{-4}$ В/м), что вызвано очень резким перепадом глубин (в 20 м) и общим поднятием дна к поверхности воды (глубина места в среднем до 20 м). Для участка III характерна амплитуда примерно $1 \cdot 10^{-4}$ В/м над поднятием дна с более или менее плавными склонами, а для участка IV — интенсивное возмущение поля, которое обусловлено резким изломом дна при выходе судна в зону мелководья (глубины $10 \div 5$ м) и близостью береговой черты $> 8 \cdot 10^{-4}$ В/м).

Специальная детальная съемка залива Рыбный Ладожского озера была проведена 21 июня 1975 г. по шести галсам. Изменение поля и глубин показаны на рис. 2.35. Во всех точках профиля, где наблюдается резкое уменьшение глубин (экранирующее влияние воды ослабевает), градиент поля начинает изменяться в пределах $(4 \div 5)10^{-4}$ В/м. Профили показывают, что перепады глубин в $10 \div 15$ м существенно не сказываются на изменении градиента, если возвышение дна ограничено 30-метровой глубиной.

Своеобразные, импульсного характера, изменения градиента поля значительной амплитуды наблюдаются при прохождении зондирующего устройства вблизи скалистого побережья и скалистого дна, сложенных гранитами. Существенную роль здесь играет соотношение электрической проводимости воды и суши (грунта). При высоких скалистых берегах и скалистом дне отношение $\chi_{\text{суши}}/\chi_{\text{воды}}$ примерно в $10^3 \div 10^4$ раз выше, чем для низинных травянистых почвенных берегов и илистого дна, и примерно в 10 раз выше, чем для песчаных, но влажных берегов и дна. Поэтому скачки градиента у скалистых берегов (в условиях штилевой погоды) могут достигать $1 \cdot 10^{-3}$ В/м, т.е. на два порядка превышать уровень естественного фона поля в открытом озере. Характерный пример, иллюстрирующий изложенное, представлен на рис. 2.36 (схема галсов, запись вариаций электрического поля в поселке Соролы и результаты буксирования зонда в районе скалистого побережья 14 августа 1974 г.). Скачки градиента поля при подходе к вертикальной скале на расстоянии в несколько метров достигают $5 \cdot 10^{-3}$ В/м (шхерный район Ладожского озера).

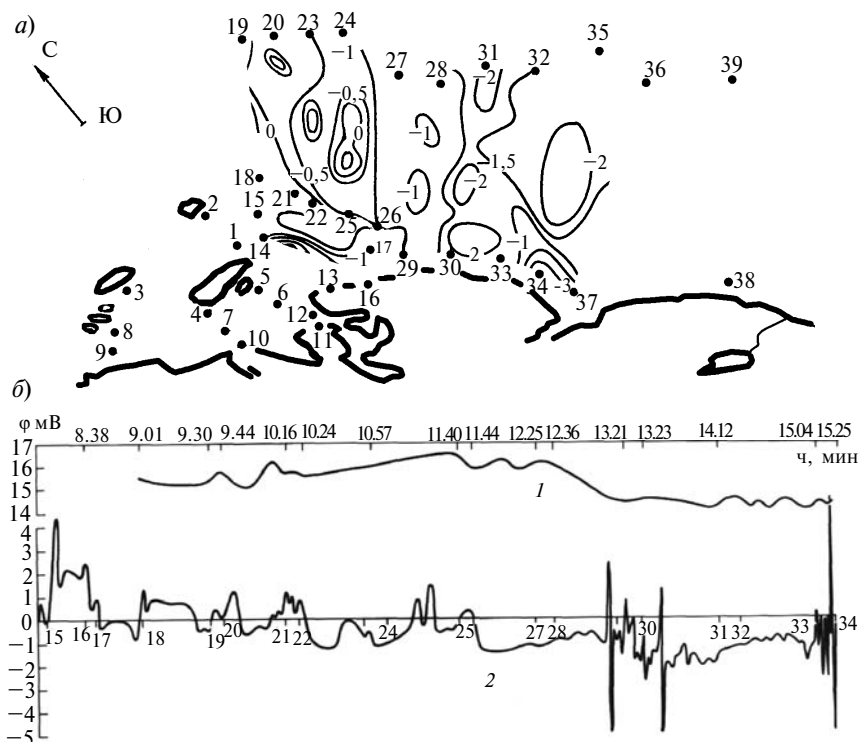


Рис. 2.36. Геофизическая съемка акватории от зал. Рыбный до бухты Моторное. 14 августа 1974 г.:

a — схема галсов буксирования зонда и распределения изолиний градиента потенциала; *б* — флуктуации поля в пос. Сорол (*1*); изменение градиента потенциала в поверхностном слое (*2*)

Многочисленные примеры анализа изменчивости поля, обусловленной геолого-геоморфологическими неоднородностями и зарегистрированной при геофизическом профилировании, позволяют отметить следующее:

аномалии $\text{grad } \Phi$ имеют одиночные или сгруппированные импульсы, которые в принятом масштабе записи свободно выделяются на фоне плавно и незначительно изменяющегося уровня поля;

экранирующее влияние воды не сказывается даже до глубин 50 ÷ 60 м, если перепад их достигает 20 м и зарегистрирован при скорости хода судна до 5 узлов;

крутизна рельефа обуславливает вид аномалии, близкий к теоретическому или отличный от него (критерием крутизны служит тангенс угла наклона поверхности дна); при малых уклонах дна аномалии незначительны, не выходят за пределы стандартной полевой

точности, и ими можно пренебрегать при интерпретации данных; пятиметровые перепады глубин вызывают аномалии градиента до $3 \cdot 10^{-4}$ В/м на мелководье (10 ÷ 15 м). Электрополюметрическое картирование показало, что над глубинами от 50 до 100 м конфигурация эквипотенциальных линий практически не зависит от извилистости береговой черты, и на расстоянии от берега по нормали в 8 ÷ 10 км (глубины 100 м и более) наблюдаются уменьшение напряженности примерно в 3 ÷ 4 раза и выравнивание этих линий.

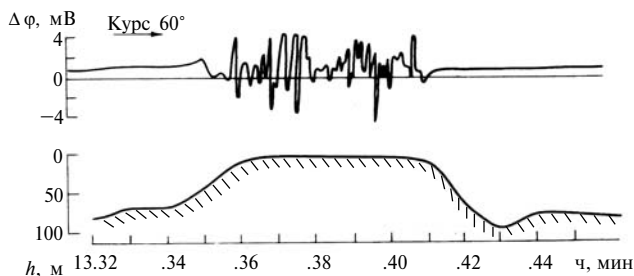
Аналогичные результаты получены при анализе влияния геоэлектрических неоднородностей на геомагнитные вариации в районе морского побережья на Дальнем Востоке сотрудниками СахКНИИ [Мардерфельд, 1981, с. 80–85]. По записям земных токов на суше и в прибрежной полосе, характерные для “берегового эффекта” короткопериодные магнитные пульсации затухают на расстоянии в 10 км от берега моря. На этом расстоянии переменное ЭМП, видимо, имеет «нормальное значение» [Александров, 1973].

Специальная работа по выявлению роли геоморфологических неоднородностей в изменчивости поля вне влияния берегов и смыва взвешенных и растворенных веществ с почвы была проведена в открытом озере.

Пример своеобразной локализации электрического поля над поднятием дна (банкой) в Ладожском озере вдали от берегов представлен на рис. 2.37. Зонд длиной 10 м буксировался за судном на двух взаимно обратных курсах — 60 и 240°, запись глубин велась эхолотом типа НЭЛ-58. Скорость хода — 5 узлов. Профиль рельефа вычерчен самописцем эхолота в виде плавной сглаженной линии, огибающей понижения и повышения дна, а изменчивость электрического поля над банкой характеризуется резкой перестройкой его структуры, зависящей и от геологических причин и от модуляции гидродинамических колебаний при резком изменении рельефа. Амплитуда сигнала достигает $8 \cdot 10^{-4}$ В/м при глубине места менее 5 м, зона влияния дна в этих конкретных условиях проявлялась по галсу на расстоянии около 200 ÷ 300 м (в течение хода около 9 минут по курсу 240° и 7 минут по курсу 60°).

Над менее значительной по площади геоморфологической неоднородностью и с большим по мощности экранирующим слоем воды (5 м) наблюдается и меньшее изменение градиента. На рис. 2.38 представлены записи $\text{grad } \varphi$ над поднятием дна с перепадом глубин в 10 м (с 15 до 5 м) двумя зондами — бортовым и буксируемым за кормой в Кондопожской губе. Амплитуды градиента не превышают $1,5 \cdot 10^{-4}$ В/м (неоднородность пройдена за 2–3 мин, протяженность менее 100 м). Как было показано в работе [Проблемы..., 1980, с. 38–45, 177], над мелководьем электрическое поле волнения может отличаться по амплитуде от фонового своего значения на глубине примерно на 10 %, где кроме близости дна существенную роль играет и крутизна рельефа.

a)



б)

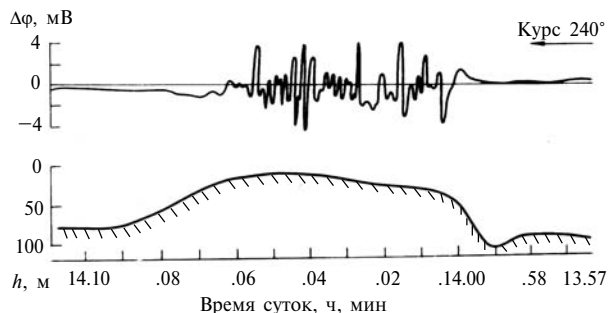


Рис. 2.37. Аномальная структура электрического поля в поверхностном слое воды над резким изменением рельефа дна в центральной глубоководной части Ладожского озера. Взаимообратные курсы движения судна (60° (a) и 240° (б)), 20 июня 1975 г.

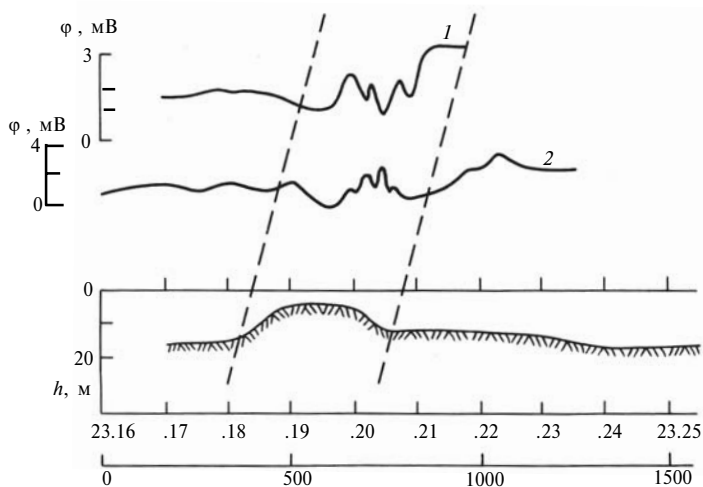


Рис. 2.38. Зависимость электрического сигнала $\Delta\phi$ от профиля дна в Кондопожском заливе на мелководье: 1 — бортовой зонд; 2 — зонд, буксируемый за кормой

Таким образом, изучение вопроса об изменчивости электрического поля в прибрежной области озер позволяет сделать ряд практических выводов.

При использовании электрополюметрии для экспрессного контроля качества воды необходимы учет слабого экранирующего влияния воды на глубинах до 20 м и умелое выделение побочных сигналов, обусловленных перепадами глубин в $5 \div 10$ м при общей глубине акватории до 30 м.

Искажение однородности поля у побережья, как было показано, связано не только с фактором неоднородности электропроводимости в переходной зоне, а с целой группой факторов, важнейшими из которых являются глубинное геологическое строение подводных участков литоральной зоны и геохимические процессы у границы грунт—вода. Однако независимо от того, какой из факторов здесь окажется решающим, важно отметить, что явление существует, и оно может быть использовано при решении прикладных задач. В самом деле, в радионавигации имеется понятие “явление береговой рефракции”, заключающееся в изменении поля радиоволн, открытое еще в 1918 г. и получившем строгое научное объяснение в трудах Г.А. Гринберга, В.А. Фока и Е.Л. Фейнберга в 1942—1948 годах [Долуханов, Коган, 1935; Долуханов, 1965]. Поэтому одновременное параллельное исследование искажения поля радиоволн в воздухе или в воде и естественного поля в воде в прибрежной зоне может послужить основой для создания недорогой аппаратуры навигационного назначения для судов внутреннего плавания. Для этих целей весьма перспективным можно считать применение градиент- или потенциального электрополюметрического зонда, конструктивное оформление которого следует осуществить на современном техническом уровне [Александров, 1973].

Электрические эффекты в контактной зоне вода—донные отложения

Возмущение и модуляция средних значений градиента “нормального электрического поля” у побережья и на мелководье связаны не только с фактором неоднородности электрической проводимости в переходной зоне, существенную роль здесь играют глубинное геологическое строение подводных участков литоральной зоны и геохимические процессы у границы грунт—вода. Эта изменчивость поля прослеживалась автором при вертикальном зондировании водных слоев в момент касания дна дипольным зондом.

Геоморфологическая и геохимическая неоднородность дна озерных котловин обуславливает специфичность электрического сигнала,

в большей или меньшей мере связанную с конкретными свойствами поверхностного слоя дна. Например, причинами локальных аномалий магнитного поля Земли служат коренные породы и донные отложения, содержащие комплексные соединения, в состав которых входит железо. Даже незначительное количество окислов железа в коренных породах и осадочном материале изменяет его магнитную проницаемость, обуславливает градиент магнитного поля вблизи поверхности дна, а это в свою очередь вызывает аномальное распределение $\text{grad } \varphi$ у дна. Другим примером, характеризующим специфичность сигнала, может явиться участок дна, где доминируют мембранно-фильтрационные электрокинетические эффекты (см. разд. 2.3 и ч. 4) — это илы, пески или глины. Этот своеобразный локальный “донный электрический эффект” в практических исследованиях мы сравниваем с разностью потенциалов, измеренной зондом в воде, которую принимаем в качестве среды с «условным нулевым уровнем».

В 1980 г. в Ладожском озере на экспедиционном судне “Талан” были проведены специальные работы, цель которых сводилась к сопоставлению электрического сигнала, измеренного на участках дна, отличающихся геохимическими и геоморфологическими особенностями.

Пробы грунта для лабораторного анализа отбирались типовым дночерпателем (рис. 2.39). Анализ физических свойств выполнен в Лаборатории грунтов и наносов, эмиссионный спектральный анализ — в лаборатории спектроскопии Института озероведения.

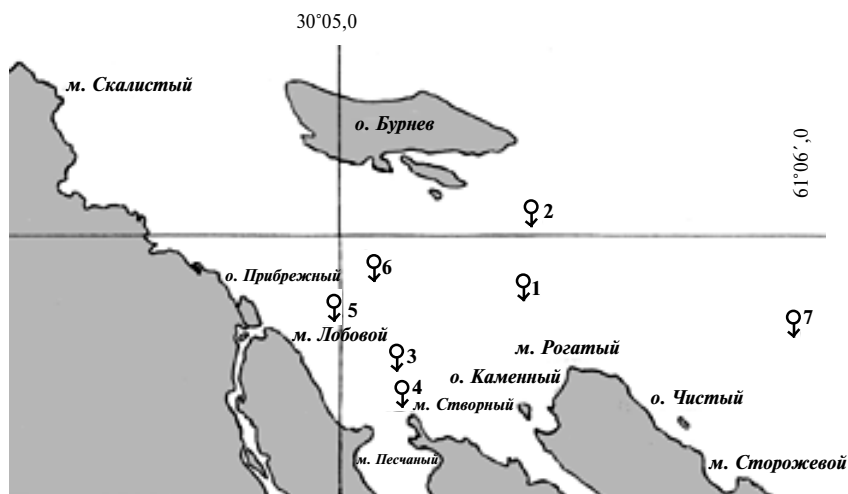


Рис. 2.39. Навигационная карта в зал. Рыбный. ♀ — место расположения станций отбора проб грунта (1–7)

Измерения поля проводились комплектом аппаратуры завода “Эталон” (Киев, см. разд. 2.2.2). Регистрировался квазистационарный сигнал в частотном диапазоне 0,5 Гц. Время контакта зонда с грунтом $1 \div 2$ с. Точки измерений намечались по навигационной карте и карте грунтов с расчетом выполнить опыты в различных геохимических и геоморфологических условиях. Анализ измерений показывает, что донные отложения идентифицируются электрометрически: существенную роль играют знак разности потенциалов при касании дна и амплитуда сигнала (скачок $\text{grad } \varphi$). Наличие посторонних примесей, например, отходов целлюлозного производства, изменяет характер сигнала — значительно снижает амплитуду по модулю и, по всей вероятности, смещает сигнал в отрицательную область значений градиента (анионоактивные примеси, см. ч. 4).

При касании дна зондом можно отметить следующее: над песками разность потенциалов $\Delta\varphi$ отрицательна, амплитуда в среднем в пределах $4 \div 5$ мВ; над илами $\Delta\varphi$ положительна, амплитуда в среднем примерно $2 \div 3$ мВ; над плитой $\Delta\varphi$ большей частью отрицательна и достигает $10 \div 15$ мВ; но бывают случаи, когда $\Delta\varphi$ положительна, что зависит от поверхностной фракции отложений, количества органических примесей и др. Вообще измерения над плитой (выход коренных пород к поверхности ложа озера) весьма сложны, поскольку статистическая воспроизводимость сигнала достигает лишь $50 \div 60$ %, а отбор пробы грунта типовым прибором трудно осуществим. Этим осложняется интерпретация измеренного сигнала.

В ряде случаев также осложнена интерпретация сигналов над песками за счет повышенной концентрации окислов железа и марганца или над илами, если они тонким слоем покрывают коренные породы. Следует подчеркнуть, что форма записи сигнала также заслуживает внимания. Наблюдались весьма сглаженные, плавные одиночные импульсы (вблизи илов), флуктуирующие импульсы, сопровождающиеся обертонами (вблизи песков и смеси песков с илом), резкие мощные импульсы без обертонов, практически симметричные при спуске—подъеме зонда (вблизи плиты) и т.д. Статистически достоверные характерные записи формы сигналов представлены на рис. 2.40–2.43.

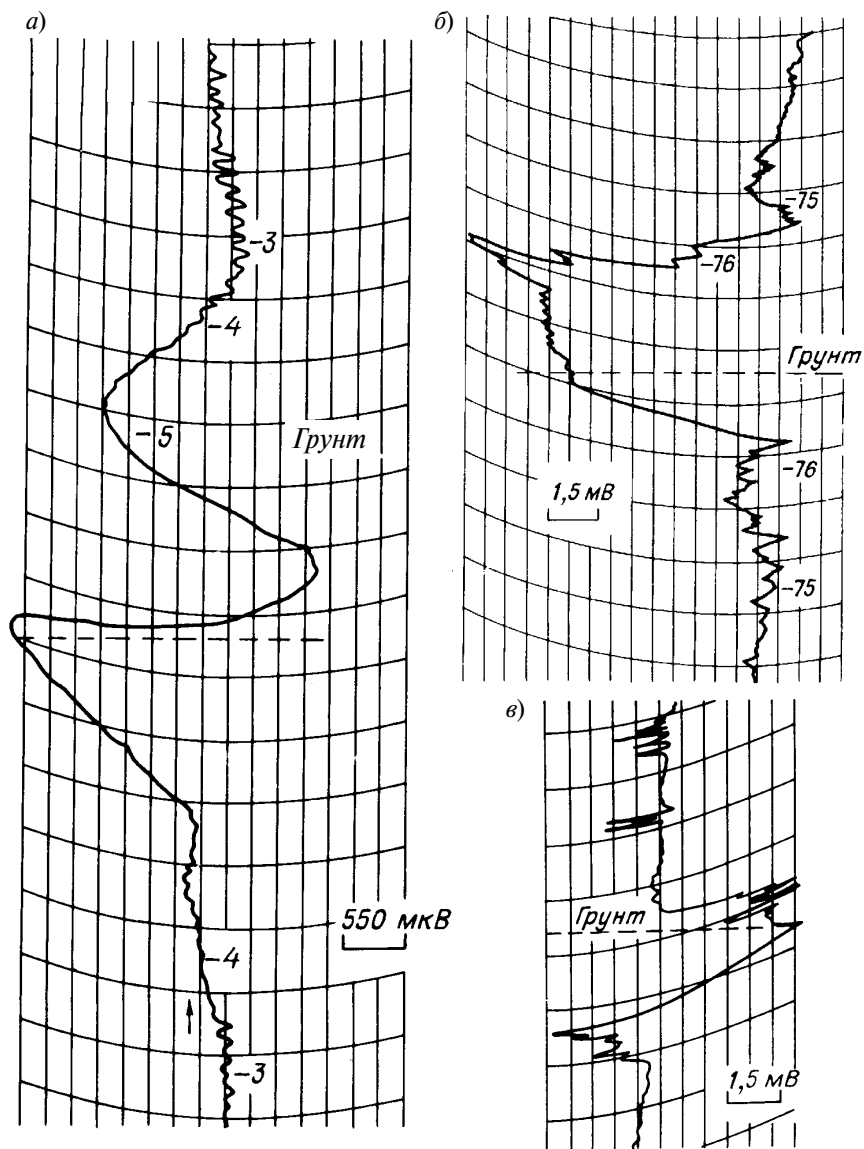


Рис. 2.40. Зависимость формы импульса $\Delta\varphi_z$ от характера грунтов в Ладожском озере:

а — ст.6, $\varphi = 61^\circ 06', 1$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 05', 2$ в.д., 30.07.80 г., $h = 6,5$ м, плита, мелкозернистый песок; б — ст.7, $\varphi = 61^\circ 05', 6$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 07', 7$ в.д., 30.07.80 г., $h = 76$ м, песок крупный, галька; в — ст.8, $\varphi = 61^\circ 02', 5$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 13', 8$ в.д., 30.07.80 г., $h = 58$ м, мелкозернистый песок

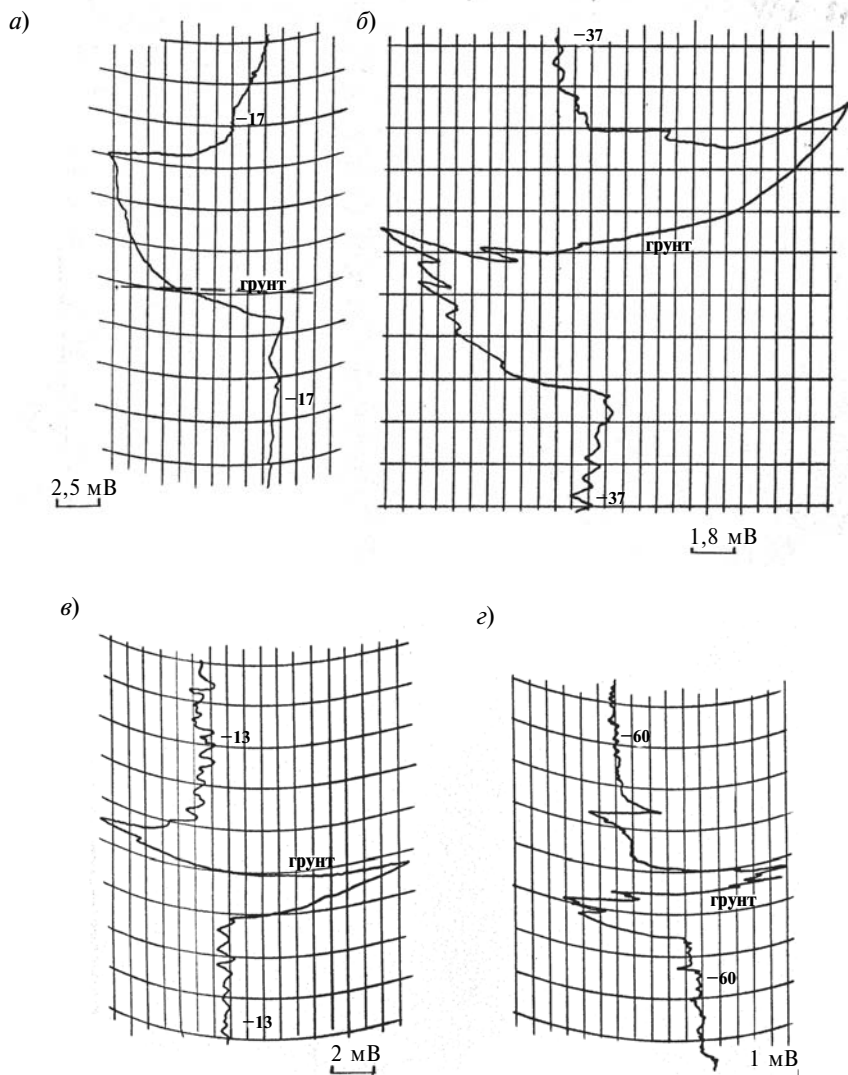
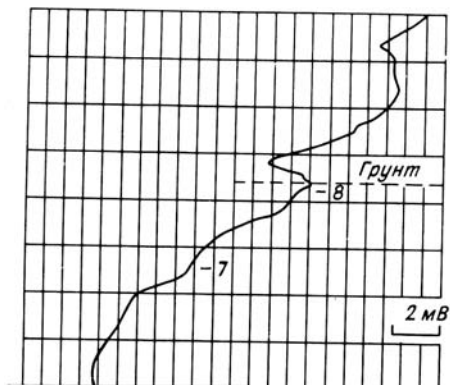


Рис. 2.41. Зависимость формы импульса $\Delta\Phi_z$ от характера грунтов в

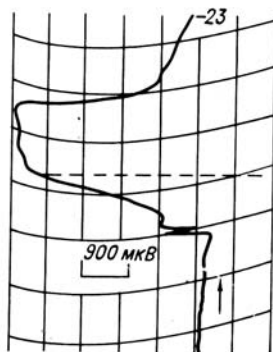
Ладожском озере:

а — ст.4, $\varphi = 61^\circ 05',3$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 05',2$ в.д., 29.07.80 г., $h = 17$ м, мелкозернистый песок; *б* — ст.18, $\varphi = 61^\circ 27',5$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 25',2$ в.д., 5.08.80 г., $h = 37$ м, пелитовый ил; *в* — ст.13, $\varphi = 61^\circ 05'65$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 10',2$ в.д., 31.07.80 г., $h = 13$ м, плита; *г* — ст.11, $\varphi = 61^\circ 01',6$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 16',4$ в.д., 30.07.80 г. $h = 60$ м, мелкоалевритовый ил

а)



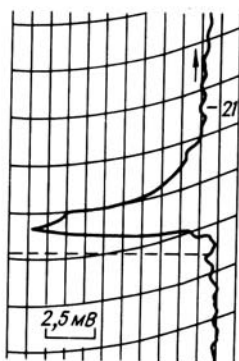
б)



в)



г)



д)

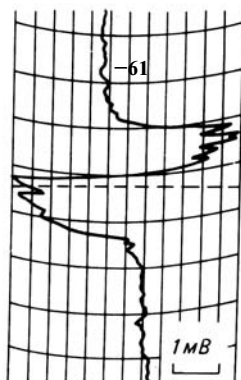


Рис. 2.42. Зависимость формы импульса $\Delta\varphi_z$ от характера грунтов в Ладожском озере:

а — ст.14, $\varphi = 61^\circ 14',4$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 09',4$ в.д., 4.08.80 г., $h = 8,5$ м, мелкоалевритовый ил, гравий, песок; б — ст.2, $\varphi = 61^\circ 06',1$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 06',0$ в.д., 29.07.80 г., $h = 24$ м, мелкоалевритовый ил; в — ст.10, $\varphi = 61^\circ 01',8$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 15',2$ в.д., 30.07.80 г., $h = 47$ м, крупноалевритовый ил; г — ст.5, $\varphi = 61^\circ 05',8$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 04',4$ в.д., 30.07.80 г., $h = 21,5$ м, крупноалевритовый ил; д — ст.12, $\varphi = 61^\circ 01',4$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 17',6$ в.д., 30.07.80 г., $h = 61$ м, пелитовый ил

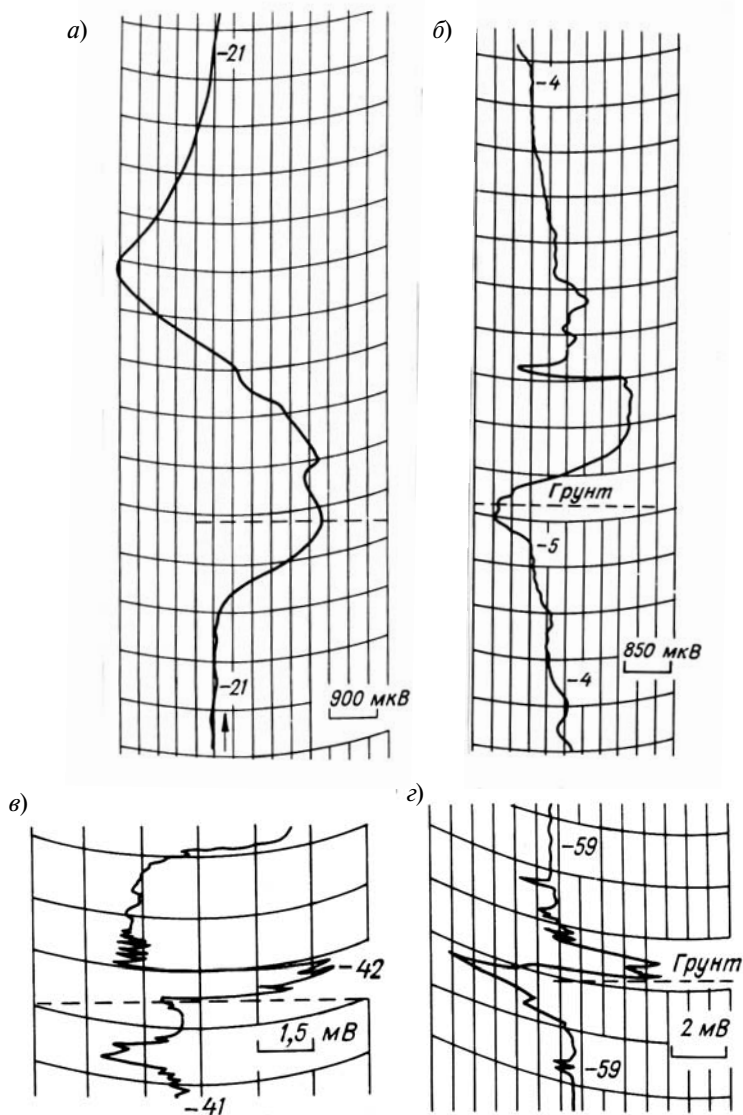


Рис. 2.43. Зависимость формы импульса $\Delta\varphi_z$ от характера грунтов в Ладожском озере:

a — ст.3, $\varphi = 61^\circ 05', 5$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 05', 2$ в.д., 29.07.80 г., $h = 22$ м, алеврито-глинистый ил; *б* — ст.6, $\varphi = 61^\circ 06', 1$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 05', 2$ в.д (контрольная) 30.07.80 г., $h = 6,5$ м, плита, мелкозернистый песок; *в* — ст.1, $\varphi = 61^\circ 05', 4$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 05', 8$ в.д., 28.07.80 г., $h = 42$ м, мелкозернистый песок; *г* — ст.9, $\varphi = 61^\circ 02', 3$ с.ш., $\lambda = 30^\circ 14', 7$ в.д., 30.07.80 г., $h = 60$ м, мелкоалевритовый ил

Электрический сигнал у дна обусловлен многообразными «тонкими явлениями» в переходной зоне, на межфазной границе: электроосмосом, потенциалами течений (см. ч. 4), не исключено и влияние внешних полей. Поэтому формирование двойного электрического слоя на межфазной границе, изменчивость поверхностной проводимости и электрокинетического заряда при течении воды в порах и над шероховатой пористой поверхностью грунта приводят к тому, что распределение зарядов на поверхности донных отложений весьма разнообразно и не поддается теоретическому расчету. Если предположительно считать, что процесс адсорбции—десорбции зарядов донной поверхностью протекает хотя бы так же, как и на взвешенных частицах с размером, равным масштабу шероховатости, то интенсивность ее высока. В этом случае должно наблюдаться убывание электрокинетического и подвижного заряда [Духин, 1975]. Неоднородное распределение электрического поля и трудно учитываемые гидродинамические скорости в порах донных отложений экспериментально не могут быть изучены в соответствии с классическим электрокинетическим уравнением Смолуховского. Однако такое изучение возможно при использовании упрощенного уравнения, усредненного по макроскопическому сечению капиллярно-пористого тела. Эти и другие специальные вопросы рассмотрены в пособиях и монографиях по коллоидной химии, электрохимии и электроповерхностным явлениям [Крюков, 1971; Электроповерхностные явления..., 1972; Духин, Шилов, 1972; Фридрихсберг, 1984].

Донные отложения с физико-химической и гидрогеологической точек зрения должны рассматриваться как тонкопористая диафрагма, к которой не применимы хорошо разработанные теории вязкого и диффузионного течения объемных растворов; здесь не поддаются строгому учету ионные адсорбционные эффекты в порах, движение пленочной влаги, электроповерхностные эффекты в пленках и др. О микропроцессах в системе грунт—вода—ионные и коллоидные включения известно еще очень мало. Поэтому попытка хотя бы приближенно по измеренному электрическому эффекту непосредственно в среде оценить различие между типами донных отложений нам представляется целесообразной. Методика таких исследований еще не разработана.

Электрополюметрия донных отложений может найти применение в решении ряда прикладных задач: экспресс-картирование подводных участков акваторий, содержащих посторонние примеси, обусловленные промышленным загрязнением водной среды, учет электрического поля грунта при высокоточных магнитометрических

стационарных измерениях и др. В научном плане важны учет электрического поля донных отложений в общей естественной энергии экосистемы озера и особенно — влияния поля на гидробионты: бентос, фито- и зоопланктон, мигрирующие от поверхности до дна. Такие работы необходимо конкретизировать применительно к определенным задачам и всесторонне развивать.

Рассмотренный в разделе 2.4.2 материал позволяет сделать заключение:

- Поверхностная пленка, представляющая собой одну из экологических ниш акваторий, и связанный с ней поверхностный потенциал воды являются физико-химическим барьером в определенной зоне атмосфера—водная среда. От свойств и динамики этого барьера зависит развитие фоновых характеристик электрического поля в нижележащем объеме воды. На примере акватории Ладожского озера проанализированы особенности гидрофизического фона с учетом динамики ионных компонентов воды, ее электропроводности, электрического и геомагнитного полей.

- Электрополюметрическая съемка крупных озер северо-западного региона России позволила оценить нормальный и возмущенный электрические фоны акваторий. В результате этих съемок установлен критерий “условно нормального поля” для Ладожского озера, значение которого $5,1 \cdot 10^{-4}$ В/м. Оно близко к показателю озера Байкал, но превышает Черноморский примерно на два порядка.

- Дано обоснование введения обобщенного “критерия нормального электрического поля водоемов”. Это понятие отражает в себе действие полей поверхностной пленки, полей электрических токов, потенциального поля водной системы, квазистационарных геолого-геоморфологических и геохимических полей озерной котловины и полей, обусловленных собственными колебаниями Земли.

2.4.3. Гидродинамические поля и их вклад в колебательный ритмический режим теллурического поля

Принципиальные основы генерирования электрического поля в проводящей среде, движущейся в магнитном поле, известны [Фарадей, 1947; Шерклиф, 1967; Шулейкин, 1968; Повх, 1976; Остроумов, 1979]. В естественных условиях перемещение водных масс в геомагнитном поле сопровождается наведением электродвижущих сил, которые обуславливают сложную траекторию перемещения заряженных частиц по всему объему движущейся жидкости. Определение траекторий движения заряженных частиц представляет сложную теоретическую задачу. Она решалась лишь с учетом ряда допущений.

Существенный вклад в разработку методов расчета электромагнитных полей, генерируемых морскими течениями, волнением, турбулентностью, внесли советские геофизики — В.И. Лопатников, А.С. Кукушкин, С.М. Коротаев, В.В. Новыш, В.В. Сочельников, В.Н. Савченко, В.Ю. Семенов, И.А. Трофимов, Г.А. Фонарев, В.С. Шнеер и другие. Разработаны, например, модели расчета электромагнитных полей волнения и вихревых потоков Г.А. Фонарева и В.Ю. Семенова, изотропной турбулентности в океане А.С. Кукушкина.

Напомним, что в течение 1970–1980 годов наблюдался весьма результативный подъем научных исследований динамики геоэлектрического поля в водной среде (см. разд. 2.1, 2.2). Это было связано с расширением разведочных геофизических работ на шельфе и в абиссальных районах океана. В настоящее время уже хорошо известно, что геологическое электромагнитное зондирование подводного ложа океана, усовершенствование новой техники, применяемой для решения различных задач в морской и пресной воде, сопряжены с определенными трудностями при создании высокоточной и чувствительной аппаратуры. Эти трудности обусловлены значительными электромагнитными помехами, вызванными разнообразными гидродинамическими источниками возмущений нормального геоэлектрического поля (течения, поверхностные и внутренние волны, турбулентные пульсации линейных и вихревых перемещений среды (см. разд. 2.1).

Современная изученность этого вопроса неравноценна. Электрические поля, индуцированные в проводящей среде крупными квазистационарными течениями, изучались давно [Александров, 1998], и на основе этого были созданы соответствующие приборы для определения скорости потока — электромагнитный измеритель течений — в бывшем СССР (ЭМИТ), геоэлектрокинемограф — в США (*G.E.K.*) и др. Электрические поля длиннопериодных волн, турбулентных пульсаций почти не изучены, и поэтому опубликованные в разные годы материалы о динамических характеристиках электрических полей, вызванных волновыми и вихревыми процессами, не только приветствовались научной общественностью, но и способствовали постановке специальных исследований. Тщательно проведенные экспериментальные работы дали более точные сведения о непосредственных физических характеристиках электрического поля, обусловленного динамикой воды. Стала быстро совершенствоваться измерительная техника, появились специальные установки типа глубоководной автономной станции для измерения электрического и магнитного полей на дне океана, подвижная установка типа “свободно падающего вращающегося

зонда” конструкции США, отечественный “электрополемер” конструкции В.И. Лопатникова [Лопатников, 1968]. Созданы новые установки, в которых стала применяться более совершенная технология электролитических контактных проводников тока, в результате чего громоздкие и длинные кабельные измерительные линии заменялись короткими, а контакт электродного чувствительного элемента с внешней средой (водой) осуществлялся без температурных и электрохимических погрешностей. Напомним также об уникальном приборе, сконструированном в Институте земного магнетизма и распространения радиоволн РАН (1976 г.), с помощью которого измерялась дивергенция естественного электрического поля в ограниченном объеме (см. разд. 2.2.6).

Более детальное изучение полей скоростей в пресных водоемах может быть достигнуто путем исследования полей на поверхности и по глубине. В данном разделе рассматривается совокупность экспериментальных приемов, которые были выбраны автором для исследования электрических полей с учетом течений, существующих на разных глубинах озер.

Если водные массы перемещаются в горизонтальной плоскости Земли, т.е. перпендикулярно вертикальной составляющей индукции, то взаимодействие токов в воде с полем B_z приводит к появлению в токе воды электромагнитных пондеромоторных сил, оказывающих влияние на структуру течения. Это влияние в общем случае характеризует изменение как ламинарных, так и турбулентных потоков. Влияние электрического поля на структуру течения условно относят к МГД-эффектам первого рода. Однако неравномерность в распределении локальных гидродинамических характеристик течения будет приводить к неравномерному распределению в потоке индуцируемых ЭДС. Это явление известно как МГД-эффект второго рода. В слабопроводящих средах (например, в пресной воде) магнитное поле практически не будет влиять на движение потока, и движение воды достаточно строго отразит именно гидродинамические эффекты. В этом случае индуцируемую ЭДС можно использовать для изучения свойств и структуры течения.

Таким образом, электрическое поле течения можно рассматривать как его характеристику, удобную для экспресс-оценки гидродинамического состояния водоема в целом [Александров, 1973; 1985].

Следует отметить, что идея использования электрического поля в качестве характеристики, отражающей динамику водоема, получила подтверждение в экспериментах МГИ АН УССР на океанских полигонах [Кукушкин, 1980].

Результаты измерений гидродинамических эффектов, обусловливающих возмущение поля, могут оцениваться с разных позиций. С одной стороны, изменяющееся во времени электрическое поле водоема можно рассматривать как своеобразную целостную характеристику среды. Изменения ее во времени и в пространстве отражают динамическое состояние водоема в его неразрывной связи с внеземными и биосферными источниками генерирования полей. С другой стороны, электрополюметрию гидродинамических источников на поверхности и в глубинах следует рассматривать как один из наиболее эффективных подходов к решению фундаментальной задачи изучения гидрофизики водоемов. Прикладное значение этого метода состоит в том, что оперативно решаются проблемы гидрологии открытых акваторий — установление закономерностей распределения энергии гидродинамического поля по частотам, определение перемещения в пространстве вихревых цепочек, выявление структурных функций высших порядков для пульсирующего поля и т.д.

Результаты конкретных исследований электрических полей с учетом влияния источников гидродинамических возмущений приводятся в следующих разделах.

Оценка электрических полей течений в открытых озерах, проливах и устьях рек

Движение воды в геомагнитном поле является одним из главных источников нарушения ее электронейтральности. При равновесном состоянии жидкости находящиеся в ней ионы и различные взвешенные макрочастицы, несущие заряд, подвержены действию только осмотических сил. Если магнитное поле для простоты полагать постоянным, то упорядоченная система электрических токов в воде возникает лишь при наличии стороннего электрического поля E^{CT} (см. разд. 2.1). За счет сил стороннего поля, таким образом, появляются токи проводимости в неподвижной среде (токи объемных зарядов).

Усложним задачу и рассмотрим поведение системы токов в движущейся среде в том же постоянном магнитном поле с составляющими по ортогональным осям H_x , H_y и H_z , т. е. кратко напомним о поведении макрочастиц, обладающих зарядом и находящихся в сложном движении в водоеме, в реальных условиях геомагнитного поля.

При движении проводящей жидкости в магнитном поле на заряженную частицу, находящуюся в воде, действуют одновременно магнитное, электрическое и гидродинамическое поля. В результате этого частица приобретает сложное движение.

Магнитное поле Земли является векторной величиной, и для его определения необходимо знать (измерить) три взаимно независимых элемента — H (горизонтальная составляющая), D (склонение) и I (наклонение) (см. рис. 2.44). В последние годы благодаря внедрению в измерения магнитометров стало возможным определять и полную напряженность поля (суммарный вектор) B . Элементы геомагнитного поля меняются с изменением широты места. Горизонтальная составляющая уменьшается от экватора к полюсам от $24 \div 32$ до 0 А/м, а вертикальная составляющая увеличивается от экватора к полюсам от 0 до $48 \div 56$ А/м.

Наши работы проводились в крупных озерах северо-западной части Европейской территории бывшего СССР, где составляющие ГМП для этого региона на 60° северной широты равнялись: $H_{xy} \approx 11,2$ А/м, $H_z \approx 38,4$ А/м, склонение $D \approx 8 \div 9^\circ$ (восточное). При учете этих данных картина распределения геомагнитного поля для района наших исследований будет аналогичной представленной на рис. 2.44, *a*, но наклонение I будет $72 \div 75^\circ$, а вектор B будет направлен близко к H_z .

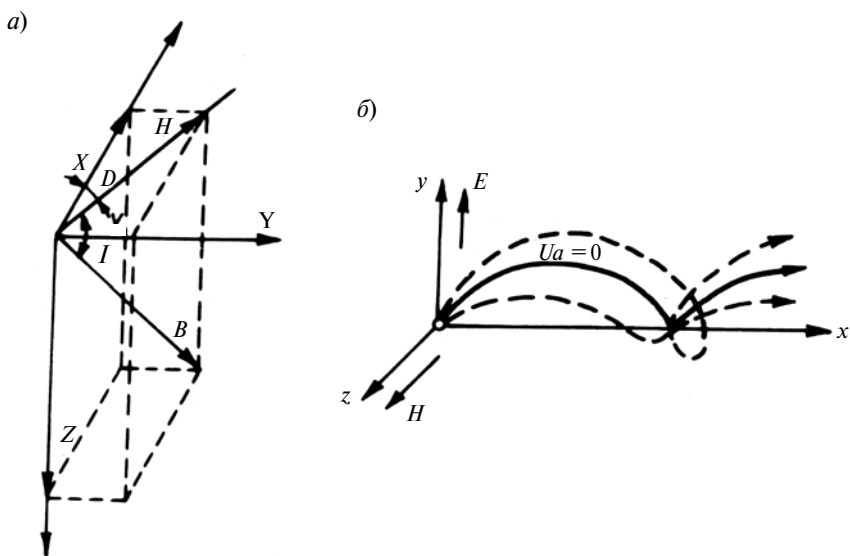


Рис. 2.44. Элементы геомагнитного поля (X , Y и Z — составляющие поля по северному, восточному и вертикальному направлениям, соответственно) (*a*); различные типы трохоид движущейся частицы при условии ориентирования электрического и магнитного полей под прямым углом (*б*); H направлен по геомагнитному меридиану

Полагая для простоты, что в какой-то момент времени t составляющие единого электромагнитного поля Земли постоянны (квазистационарны) в диапазоне частот $0 \div 5$ Гц и уровня поля $\sim 10^3$ А/м, зададим начальные гидродинамические условия так, чтобы течения и волнение отсутствовали, тогда $V_0 = 0$, и мы получим простейший циклоидальный вид движения заряженных частиц в воде под действием электромагнитного поля Земли (рис. 2.44,б).

Одновременное воздействие поля на совокупность частиц в воде может привести к каким-то первоначальным их движениям с передачей количества движения от частицы к частице и вызовет колебание всей системы данного водного объекта (помимо теплового, броуновского и электрокинетического движений растворенных и взвешенных частиц). Вопрос теории движения частиц в покоящейся, казалось бы, жидкости в открытой системе, по-видимому, представляется непростым и требует дальнейших исследований.

Рассмотренные элементы возможного механизма движения заряженных частиц в электромагнитном поле Земли в будущем могут численно разрабатываться с учетом различно задаваемых условий (заряда частиц, их массы, значений элементов электромагнитного поля Земли и т. д.).

При начальных условиях, когда скорость движения не равна нулю, в проводящей жидкости возникает переменное электромагнитное поле гидродинамического происхождения. Токи проводимости (индукционные, или фарадеевские) обуславливают так называемый конвективный ток. В этом случае заряженные частицы массы воды, движущиеся по потоку, находятся под действием сил гидродинамического поля и силы Лоренца, которая перемещает их в вертикальной плоскости вверх или вниз в соответствии со знаком зарядов. Скорость движения частиц в воде и ее электрическая проводимость невелики, поэтому сила Лоренца, действующая как результат индуцированных токов, незначительна по сравнению с силами давления и плавучести (подробнее см. [Александров, 1978; 1985]). Участие заряженных частиц в такой сложной системе движений, вызванных в общем целой цепью факторов, объясняет причину того, что этот вопрос теоретически еще недостаточно разработан.

Электрическое поле течения индуцируется при пересечении вектором скорости V силовых линий геомагнитного поля. При горизонтальных перемещениях воды индукция электрических токов обусловлена напряженностью магнитного поля по вертикали H_z и проводимостью воды. Взаимодействие токов в воде с внешним полем H приводит к появлению в потоке электромагнитных

пондеромоторных сил, оказывающих влияние на структуру самого течения. Это влияние в общем случае характеризуется изменением локальных и интегральных параметров как ламинарных, так и турбулентных потоков. Такое влияние электрического поля на структуру течения условно относят к МГД-эффектам первого рода. В самом общем виде напряженность электрического поля определяется уравнением

$$\vec{E} = \frac{4\pi}{c} \vec{V} \times \vec{B}. \quad (2.25)$$

В основе известного в океанологии метода электромагнитного измерения скорости течений (ЭМИТ) лежит закон электромагнитной индукции М. Фарадея (1831 г.). К настоящему моменту существуют методические руководства по устройству ЭМИТа, целый ряд работ по результатам применимости прибора в разных морях, а также всевозможные методические модификации метода, позволяющие решать различные задачи морской прикладной геофизики [Александров, 1985].

В пресноводных бассейнах метод по прямому своему назначению в соответствии с официальным руководством не применялся, за исключением озера Мичиган (США). Однако модификации его позволили автору изучать вертикальную неоднородность гидродинамического состояния озер Ладожского, Онежского, Байкал и других в 1967–1980 годах. Если слабопроводящая жидкость течет в поперечном магнитном поле, то поле индуцированных токов и соответствующих им пондеромоторных сил может практически не оказывать влияния на структуру самого течения. Однако неравномерность в распределении локальных гидродинамических параметров течения будет приводить к неравномерному распределению в потоке индуцируемых ЭДС и токов. Это явление известно как МГД-эффект второго рода. В слабопроводящих средах (пресная и морская вода) магнитное поле не влияет на движение потока, которое практически соответствует чисто гидродинамическому, но ЭДС индуцируется, и это используется для изучения свойств и структуры течения. Непрерывные вертикальные зондирования методом градиент- и потенциал-зонда с одновременным измерением поля течений типовым прибором вне влияния притока примесей с материка показали, что дифференциация кривой градиента потенциала определяется именно вертикальной структурой поля течений (его скоростью и изменением направления), т. е. фиксируется характеристика неравномерного распределения плотности объемных

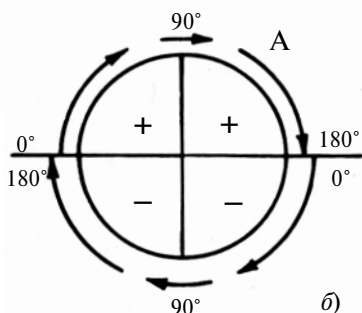
зарядов в зонах изменчивости скоростного поля течения и его миграции по направлению: $\text{grad } \Phi_z = f(V_{\text{теч}}, \alpha_{\text{теч}})$.*

Наглядное представление об указанной связи сделано с помощью графиков изменения направления (α°) и скоростей течения (V) и градиента потенциала ($\Delta\Phi$) по вертикали, а также по ним построены профильные разрезы в меридиональном и широтном направлениях.

Для построения модели изменчивости направлений течений предлагается следующая методика.

1. Северное полушарие от запада (0°) через север (90°) до востока (180°) берется положительным (+); южное полушарие от востока (0°) через юг (90°) до запада (180°) берется отрицательным (–) (рис. 2.45). Измеренное прибором, например морской вертушкой или самописцем течений БПВ-2р, направление в градусах переводится в новую градусную шкалу: например, $\alpha = 117^\circ$ заменяется величиной $\alpha' = -27^\circ$.

а)



$h, \text{ м}$	$\alpha^\circ \text{ ист.}$	$\alpha^\circ \text{ пере-}$ считан- ное
3	117	–27
10	110	–20
25	47	+137
45	312	+42

б)

Направление течения
Южное | Северное

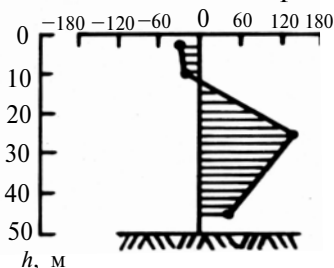


Рис. 2.45. Методика интерпретации вертикальной структуры поля течений: а — шкала пересчета измеренного направления течения в условное для графического представления исходных данных; б — образец графика направления течения в новой шкале

*Отметим, что поступление загрязняющих примесей с побережья по условиям опыта исключалось.

2. Для построения профильного разреза на вертикали наносят значения направления в новой шкале со знаком и проводят изолинии по общим правилам.

3. Построение графика распределения направления течения по глубине производится следующим образом: по оси абсцисс в обе стороны от 0 откладывается направление течения в градусах с соответствующими знаками по новой шкале, по оси ординат — глубины.

Таким образом, все течения с северной составляющей по направлению при данном способе интерпретации имеют положительный знак, а с южной — отрицательный. Такая методика особенно удобна, если в водоеме преобладающими являются меридиональные потоки, соответствующие циклическому характеру движения (как, например, в Ладожском озере)*.

Прежде чем перейти к изложению конкретных результатов исследований, обратим внимание на принципиальный подход к измерению электрических потенциалов и их вторых производных, а также к обработке результатов измерений.

В качестве основных измеряемых величин берутся потенциалы $\varphi = f(L_z)$, $L_z = \text{var}$ и их градиенты. Здесь L_z — пространственная координата, характеризующая глубину погружения индикаторного электрода.

По характеру распределения потенциалов и напряженности электрического поля в конечном итоге определяется картина распределения скоростей течений. Контроль электрополюметрического зондирования осуществлялся прямым измерением векторов скоростей течений.

Вертикальное электрополюметрическое зондирование водных слоев и синхронное инструментальное определение поля скорости течений были проведены в глубоководной части Ладожского озера в направлении с севера на юг и с запада на восток (рис. 2.46). Для такой большой акватории, как Ладожское озеро, успех эксперимента зависел от стабильности гидрометеорологических условий. Поэтому синоптическая обстановка подбиралась так, чтобы состояние среды было близким к квазистатическому, т.е. наблюдалось устойчивое распределение ветра, температуры воздуха, давления, течений и т.д. Состояние квазистатичности длится большей частью 2–3 суток, и это позволяет провести маршрутные съемки вдоль и поперек озера.

*Для континентальных водоемов характерна циклоническая схема движения основных потоков (течений).

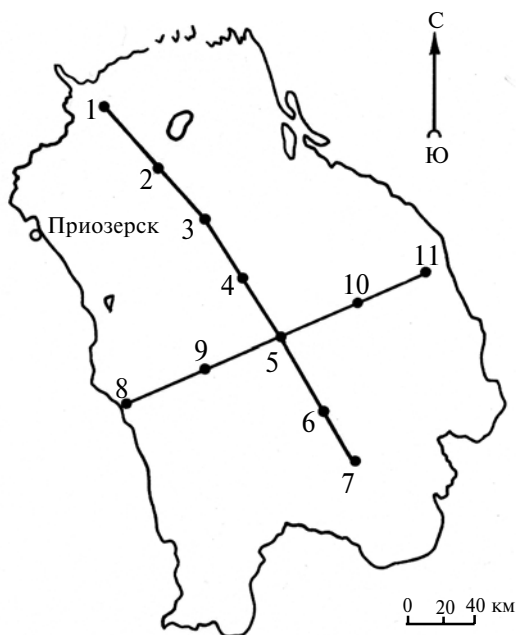


Рис. 2.46. Схема продольного и поперечного галсов в Ладожском озере при измерении вертикальной составляющей градиента потенциала естественного электрического поля в июне—июле 1968 г.

На рисунках 2.47—2.48, представлены картины полей, построенные по результатам съемки на двух разрезах.

Продольный разрез, выполненный 17—20 июля 1968 г. (см. рис. 2.47), характеризуется незначительными градиентами потенциала в южной и средней частях озера и значительными — в северной части на глубинах от $40 \div 50$ до 100 м. Возрастание градиента здесь обусловлено в основном сменой направления течений: до глубины $50 \div 70$ м течение под действием северных ветров направлено на юг, а глубже — на север (см. рис. 2.47, б, в). Поэтому на глубине около 75 м отмечаются скачок потенциалов до 10 мВ, уменьшение скорости в 2 раза по сравнению с выше- и нижележащими слоями воды. Расслоение течений (векторы с северной и южной составляющими), измеренное на других вертикалях, оконтуривается эквипотенциальными линиями электрического поля (вертикали 4, 6 и др.) На больших глубинах, где скорости течения невелики и их направление мало меняется, наблюдаются незначительные и практически неизменные по вертикали градиенты потенциала. Сгустки неоднородности электрического поля хорошо интерпретируются полем изотак (см. рис. 2.47, в).

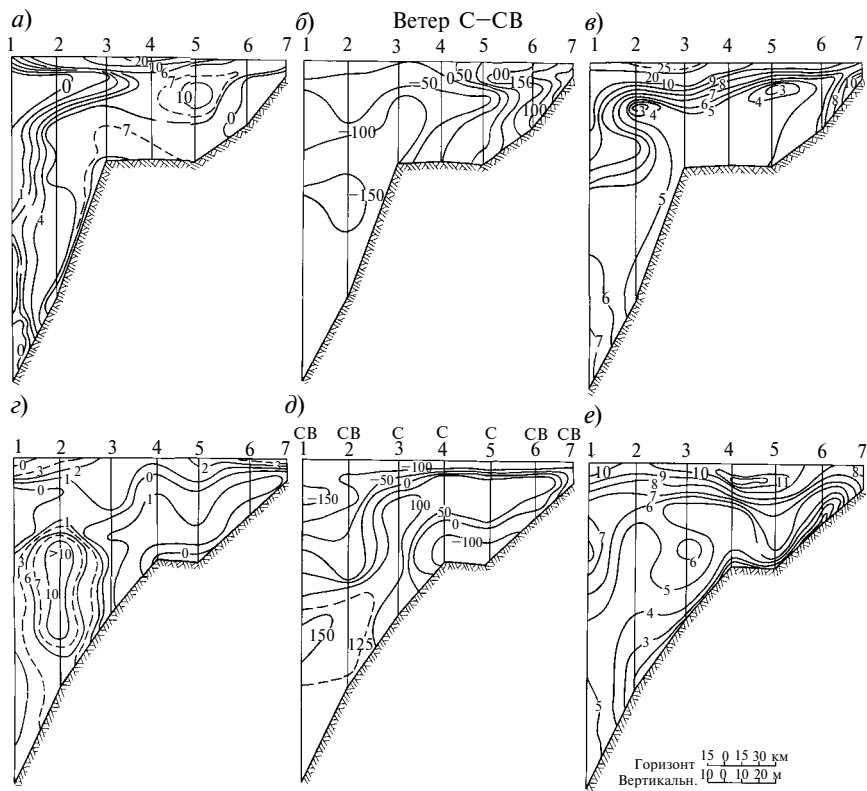


Рис. 2.47. Вертикальная структура электрического поля и поля течений в Ладожском озере в направлении с севера на юг 27–28 июня 1968 г (а–в) и 17–20 июля 1968 г (з–е): а, з — градиент потенциала $\Delta\varphi_z$, мВ, при длине зонда $l = 2$ м; б, д — изменение условных направлений течений в градусах по вертикали (положительные значения — северная составляющая, отрицательные — южная); в, е — поле скоростей течений (изотахи, см/с)

Поперечный разрез от 17–20 июля 1968 г. (см. рис. 2.48) характеризуется двумя областями, отличающимися по электрическим и гидродинамическим данным. В западной мелководной части озера наблюдаются незначительные изменения градиента потенциала, и только ближе к центру озера (вертикаль 5) на глубинах $10 \div 20$ м отмечается его скачок, связанный с поворотом течения с юга на северо-запад. В глубоководной восточной части прослеживаются повышенные градиенты потенциала, обусловленные сменой течения с юго-западного на северное и аномально высокими

скоростями его в слое $10 \div 20$ м (до 14 см/с), в то время как в выше- и нижележащих слоях скорости колеблются около $8 \div 10$ см/с. Поле изотак оконтуривает область аномалий градиента потенциала (вертикаль 10).

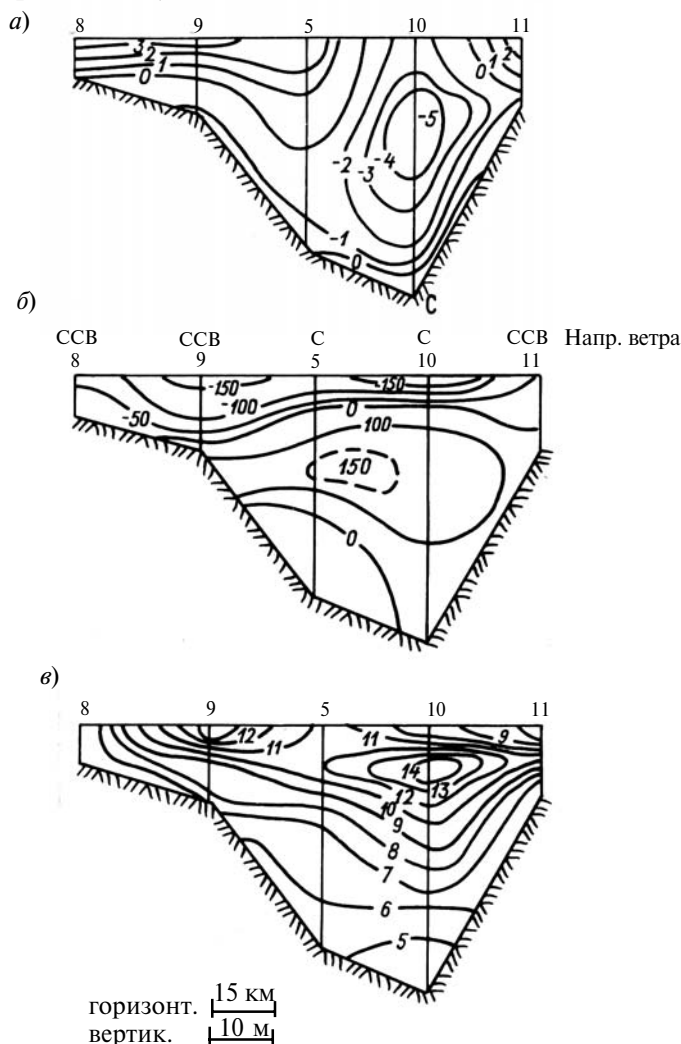


Рис. 2.48. Вертикальная структура электрического поля и поля течения в Ладожском озере в направлении с запада на восток 17–20 июля 1968 г.: а — вертикальная составляющая градиента потенциала (градация эквипотенциальных линий в условных единицах); б — изменение условных направлений течений (в градусах) по вертикали (положительные — северная составляющая, отрицательные — южная); в — поле скоростей течений (изотакх, см/с)

Таким образом, в плоскости меридиана, рассекающей поле течения вдоль (наблюдались только течения северных и южных направлений), могут индуцироваться электрические сигналы до $1 \cdot 10^{-3}$ В/м, обусловленные скоростями течения ≈ 10 см/с и более (например, вертикаль 5) или резкими поворотами течения на $120 \div 150^\circ$ (например, вертикаль 2). В плоскости параллели (поле течения рассекается поперек) наблюдаются меньшие по величине индуцированные сигналы, достигающие в восточной глубоководной части примерно $0,5 \cdot 10^{-3}$ В/м, определяющиеся, по-видимому, аномальными скоростями потока в слое $10 \div 20$ м в период измерения. Аналогичные результаты получены и для прибрежной части, свободно сообщаемой с озером, но мы их не рассматриваем во избежание излишних повторений.

Результаты вертикальной электрополюметрии на Ладожском озере (более 200 наблюдений) проанализированы статистически, и выявлены характерные особенности в распределении потенциала (или его градиента). Приведем классификацию видов распределения $\Delta\varphi_z$ [Александров, 1973]:

1. Поле отличается незначительным изменением градиента потенциала по всей глубине ($\text{grad } \varphi_z \approx \text{const}$). Градиент достигает $(0,8 \div 2) \cdot 10^{-4}$ В/м на поверхности, $(0,6 \div 1,1) 10^{-4}$ В/м в промежуточном слое и $0,6 \cdot 10^{-4}$ В/м у дна. Эти признаки характерны для полужакрытых прибрежных акваторий (например, для залива Лехмалаhti и Рыбный).

2. В поверхностном и придонном слоях наблюдаются значительные градиенты потенциала, а в промежуточном — близкие к нулю. Характерен для открытых прибрежных участков (например, от зал. Рыбный до бухты Моторное). В поверхностных слоях $\approx (1,5 \div 1,2) 10^{-4}$, в придонных $\approx (12 \div 8) 10^{-4}$ и в промежуточных $\approx (0,5 \div 0,9) 10^{-4}$ В/м.

3. По всей глубине наблюдаются значительные колебания градиента потенциала. Они связаны с гидродинамической неоднородностью среды, характерной для открытой глубоководной части озер: $(2 \div 7) 10^{-4}$ В/м — поверхностный слой, $(3,3 \div 5) 10^{-4}$ В/м — придонный слой и $(1,5 \div 3) 10^{-4}$ В/м — промежуточный слой.

Глубоководные измерения в озерах Онежском и Байкал не обнаружили принципиальных отличий в распределении электрического потенциала по сравнению с Ладожским. Это подтверждается данными рис. 2.49, где показаны результаты комплексного зондирования на станции № 15 в Кондопожском заливе $\varphi^\circ = 62^\circ 05' 2$ с.ш., $\lambda^\circ = 34^\circ 27' 2$ в.д.). Значение градиента достигает $(2 \div 3) 10^{-3}$ В/м, а интегрирование измеренных данных по всей глубине дает кривую

распределения $\Delta\varphi_z$, которая с коэффициентом корреляции 0,88 соответствует кривой распределения модуля скорости потока от поверхности до 50 м при общей глубине 58 м. В штилевую погоду, перед ледоставом, на оз. Байкал вертикальное распределение поля в южной части соответствовало второму и третьему видам распределения, причем $\text{grad } \varphi_z$ в поверхностном слое равнялся $\approx 5 \cdot 10^{-4}$ В/м и отмечался повсеместно. Значительная аномалия поля $|1,6 \cdot 10^{-3}|$ В/м обнаружена 24 декабря 1968 г. на глубине 500 м и характерна для третьего вида распределения.

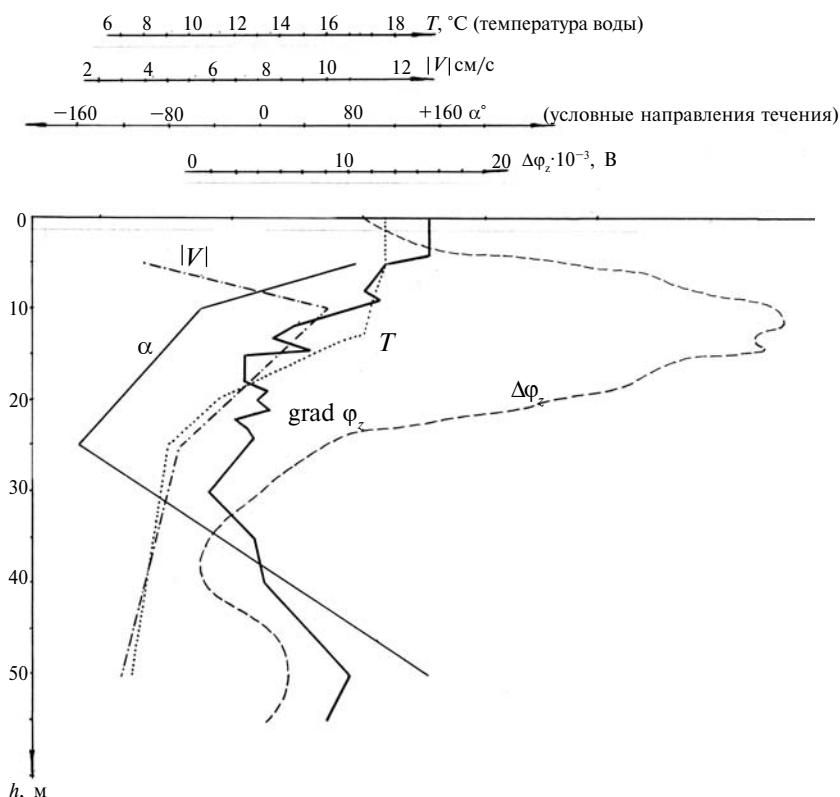


Рис. 2.49. Результаты вертикального зондирования на станции № 15 в Онежском озере 23 августа 1972 г. Зонд $L_z = 1$ м

На рис. 2.47 и 2.48 дано схематическое представление об электрическом и гидродинамическом полях Ладожского озера на период измерений. На этих схемах видны интересные особенности. Центральная часть бассейна характеризуется однородностью полей, незначительной изменчивостью градиента потенциала, а периферийные части — повышенными градиентами и максимальными гидродинамическими неоднородностями. В бассейне озера как на крупной естественной модели воспроизводится гидрофизическая ситуация, свойственная структуре течения вязкой жидкости во вращающемся цилиндре — турбулентный слой концентрируется у стенок сосуда, а в центре — ламинарный поток, в котором идет подавление турбулентности [Владимиров, Тарасов, 1982].

Таким образом, для характеристики общего динамического состояния водоема даже в условиях малой минерализации воды и ее химической инертности метод электрополюметрии по вертикали двухэлектродным зондом весьма эффективен. Градиент электрического поля в этом случае характеризует гидродинамическую неоднородность водоема по вертикали, позволяет дифференцировать потоки, отыскивать скрытые струйные течения и проводить при необходимости длительный контроль за их режимом [Александров, 1973].

Далее рассмотрим результаты наблюдений над режимом турбулентных потоков в узком проливе.

В 1970 г. в Куркийокском заливе шхерного района Ладожского озера в протоке шириной 20 м и глубиной 3 м ($\varphi^\circ = 61^\circ 14' 4$ с.ш., $\lambda^\circ = 30^\circ 01' 0$ в.д.) был установлен двухдипольный зонд с базами $L = 2$ м. Диполи жестко фиксировались на растяжках, укрепленных за береговые предметы, один диполь находился в приповерхностном (50 см) слое и ориентировался горизонтально в направлении север—юг, другой устанавливался ортогонально по вертикали. Линии подачи ЭДС на регистратор были неподвижны и ориентированы с запада—северо-запада на восток—юго-восток (по оси протоки). На расстоянии 3 м от зондирующего устройства аналогично был установлен самописец течений БПВ-2р (на буйках и на растяжках) (рис. 2.50).

Идея опыта сводилась к синхронным измерениям флуктуации электрического поля в двухкоординатной системе и пульсаций турбулентного потока, если таковой появится в протоке. Наблюдения выполнялись в течение 44 часов с перерывом на ночь. Отмечена реверсивность потока по гидродинамическим и электрометрическим показателям на основании обработанных данных с применением изложенного выше методического приема.



Рис. 2.50. Наблюдения над режимом электрического поля турбулентных потоков в узком проливе. 1970–1971 гг.

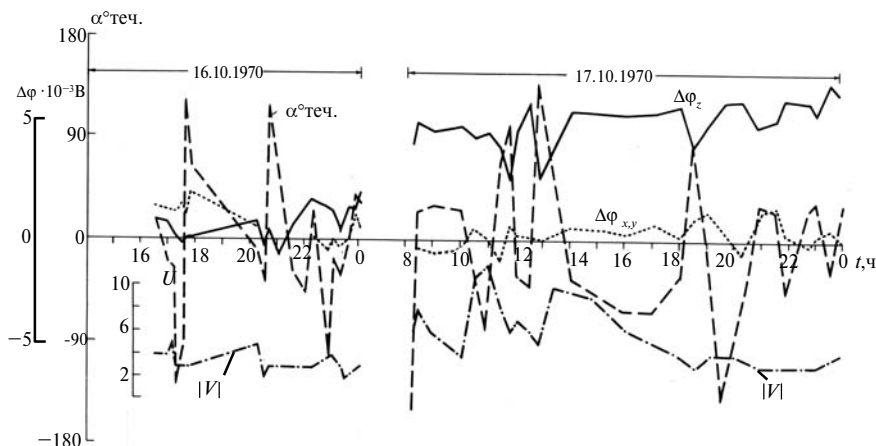


Рис. 2.51. Пульсационные характеристики электрического поля турбулентных течений в узком проливе. 1970 г.

Обозначения: $\Delta\varphi_z$ — вертикальная и $\Delta\varphi_{x,y}$ — горизонтальная компоненты ЭП в воде протоки; $\Delta\varphi_{x,y}$ — компонента $\Delta\varphi$ в плоскости x и y (направл. север-юг) α° теч. — условные направления течения; $|V|$ см/с — модуль скорости потока

Направление потока было весьма неустойчивым (см. рис. 2.51). При помощи несложных подсчетов было установлено, что изменение направления течения на 1° дает изменение градиента поля $25 \cdot 10^{-6}$ В/(м·град) как для северного, так и южного векторов суммарного потока. Сигнал невелик по амплитуде. Масса воды, участвующая в индуцировании, также невелика (при максимальной наблюдавшейся скорости 12 см/с и площади сечения пролива 60 м^2 , максимальный расход не превышает $7 \text{ м}^3/\text{с}$). Значительные изменения в направлении вектора скорости (десятки градусов) даже на небольшой измерительной линии (2 м) создают весьма ощутимый сигнал. При использованной методике работ трудно разделить влияние непосредственно скорости и изменения направления течения на суммарный электрический эффект. Для разделения сигналов необходимо применение устройств типа теллурической установки В.И. Лопатникова, созданной им для морских работ или измерителя дивергенции поля (см. разд. 2.2.6). В 1971 г. в той же протоке были проведены измерения электрических пульсаций потока и удельной электрической проводимости с помощью вертикального дипольного зонда и кондуктометрической аппаратуры ВНИИнауцприбор. Образец записи и расчеты представлены на рис. 2.52. Расчет средней, или пульсационной, скорости горизонтального потока производится по формуле

$$|V| = \bar{E} / B_z \cdot L, \quad (2.26)$$

где $|V|$ — модуль скорости потока, см/с; $\bar{E}$ — компонент электрического поля, измеренного диполем в горизонтальной плоскости в единицах 10^{-6} В/м; B_z — вертикальный компонент ГМП в теслах; L — размер диполя в см.

Однако результаты могут быть неточными, если в расчет не будут введены величины электрической проводимости донных отложений и не учтена геометрия потока (в форме коэффициента K , аналогичного коэффициенту ослабления, данного в руководстве по ЭМИТ). При мелководных проливах и сложной (не прямоугольной) геометрии потока расчеты усложняются из-за трудно контролируемого влияния проводимости дна, чем, как правило, пренебрегают в глубоких проливах с каменистым дном и скалистыми берегами (фьорды). Именно поэтому необходимы измерения на установке из горизонтального и вертикального диполей. Два диполя обеспечат независимость расчета скорости от электрических и морфометрических условий природного объекта. Сравните расчет по формуле

$$|V| = \bar{E}_z / B_{x,y} \cdot L, \quad (2.27)$$

где $\bar{E}_z$ — компонент, измеряемый в вертикальной плоскости в единицах 10^{-6} В/м; $B_{x,y}$ — горизонтальные компоненты ГМП в теслах; L — размер диполя в см. Повторные работы 1980 г. показали справедливость этих выводов.

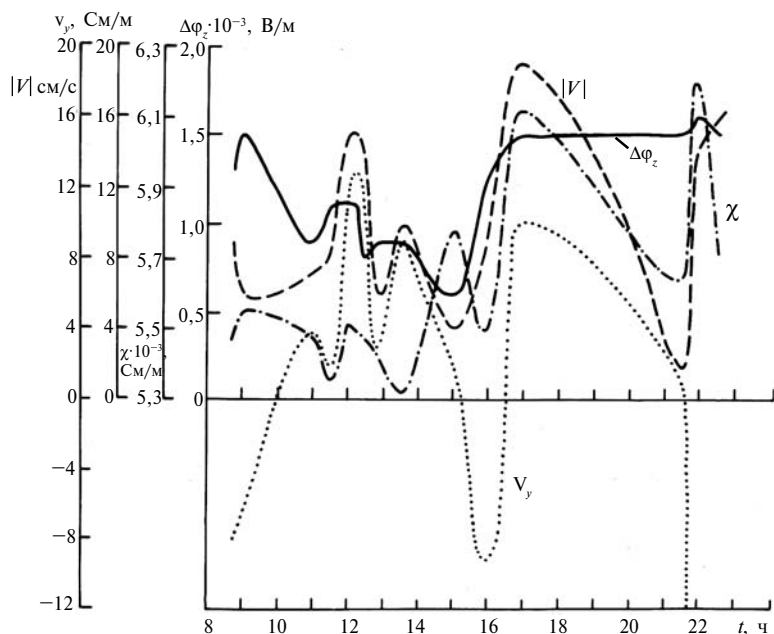


Рис. 2.52. Пульсационные характеристики электрического поля ($\Delta\phi_z$), проводимости воды (χ), модуля скорости потока $|V|$ и компоненты скорости V_y в шхерном районе Ладожского озера. 1971 г.

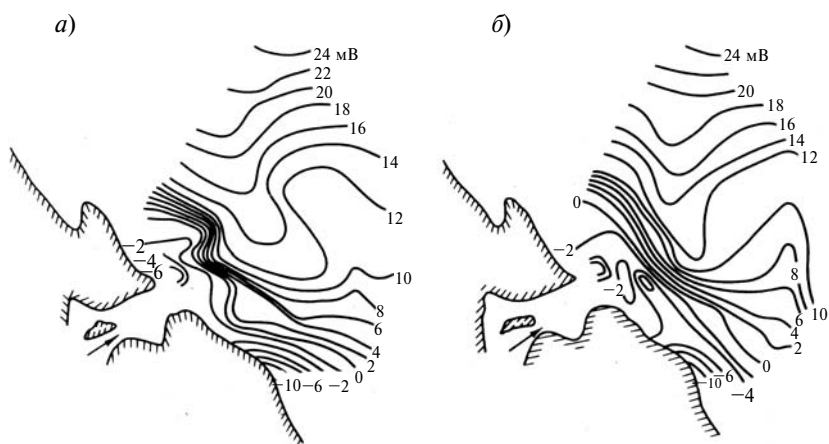


Рис. 2.53. Электрическое поле приустьевое участка р. Тихой (Ладожское озеро). Съёмка 23 июня 1975 г.

Устьевые факелы рек

Гидрология устьев рек отличается динамическими особенностями, которые до настоящего времени плохо изучены, так как применявшаяся ранее аппаратура для измерения течений не обеспечивала быстрого обследования больших площадей акваторий и непрерывной записи элементов течения. Использование электрополюметрии для изучения структуры поверхностных потоков в локальных участках позволяет в короткий срок получить плановую съемку устьевых участков и определить характер струйного движения речных вод в озере.

При электрополюметрическом картировании прибрежных участков в Ладожском озере получены записи естественного поля в районе устьев рек Вуоксы и Тихой. Эти записи показывают существенные различия в структуре поля между открытыми или прибрежными участками озера и устьем рек. При подходе к устью реки частота и амплитуды колебаний поля изменяются настолько разительно, что приустьевые участки можно в общем характеризовать своим локальным полем. Безусловно, здесь важен учет не только динамической особенности потока речных вод, но и морфологии и геохимии дна. Однако в данном случае рассматривается суммарный эффект как общий показатель, отличающий приустьевую акваторию от собственно озерной.

На рис. 2.53 показаны результаты электрополюметрических съемок по радиусам от центрального электрода в поверхностном слое воды в районе р. Тихой, выполненных с разницей по времени приблизительно в 1 час. Поле характеризуется двумя участками динамической неоднородности потока: первый участок, непосредственно прилегающий к области перехода от русла к устью, отличается высоким градиентом поля $\approx 12 \cdot 10^{-5}$ В/м, а второй участок — в три раза меньшим: $\approx 5 \cdot 10^{-5}$ В/м. Высокий градиент поля первого участка обусловлен большим количеством взвешенных частиц в речной воде и отличает границу зоны интенсивного перемешивания речных и озерных вод. Отрицательный знак поля здесь свидетельствует о коллоидных и минеральных взвесах в речных водах и дает возможность проследить их движение вдоль берега на юго-восток. Второй участок с относительно ровным изменением градиента свидетельствует о замедлении течения речных вод в озере и о значительном разбавлении.

На рис. 2.54, цв., показано зондирование по схеме $d^2 \varphi / dL^2 = f(x)$ при $x = \text{var}$ (см. разд. 2.2.5) вдоль радиальных профилей в устье р. Вуоксы, воды которой содержат много не только природных взвесей, но и загрязняющих акваторию промышленных примесей. На участке протяженностью 500 м наблюдается изменение $\text{grad } \varphi_x$ в

среднем на $3 \cdot 10^{-4}$ В/м — вплоть до условной границы между сугубо речными и озерными водными массами. Далее изменение градиента практически прекращается, что свидетельствует о переходе зондирующего устройства в собственно озерные воды.

Электрические эффекты, обусловленные сточными течениями, были отмечены автором на оз. Байкал в истоке р. Ангары 25 декабря 1968 г. Методические измерения преследовали цель выявить изменчивость электрического поля под воздействием стока чистой воды из крупного водоема. Измерения выполнены на глубинах $0 \div 75$ м, причем в промежуточном слое от 50 до 75 м отмечены градиенты $\approx 10^{-3}$ В/м. Однако в неискаженном виде эффекта получить не удалось, так как сильно сказывалось влияние геоморфологии дна. На протяжении $200 \div 300$ м существует перепад глубин от сотен до десятков метров [Александров, 1973].

О пользе электромагнитного метода изучения динамики водоемов и речных систем сообщалось в работе Н. Ryokborst и R.O. Christie, [Ryokborst, 1976], которые выявили возможность измерения стока реки, применив современную электронную сканирующую аппаратуру и цифровую аналоговую регистрирующую. Результаты измерения скорости течения электрополюметрическим методом эти исследователи сравнивали с собственными численными расчетами на гидродинамических моделях. Небольшие расхождения в результатах авторы объясняют морфометрией руслового сечения и переменной электрической проводимостью воды вследствие ее перемешивания. Авторы рекомендовали для уточнения результатов производить измерение $\Delta\phi$ между правым и левым берегами русла и одновременные раздельные измерения на каждом берегу, а также предусмотреть возможность телеметрической передачи сигналов между берегами, что особенно важно на крупных реках.

Оценка информационной роли электрического поля волновых процессов

В настоящее время опубликованы экспериментальные материалы, посвященные изучению индукции электромагнитных полей ветровыми волнами и зыбью. В последних работах ИЗМИР РАН показано, что спектральная структура электрического поля и поля волн одинакова, если считать, что волновые колебания и колебания индуцируемого сигнала представлены в форме безвихревых гармонических колебаний [Морские электромагнитные..., 1976; Морское магнитотеллурическое зондирование, 1978]. Однако в реальных условиях профиль поверхности волнения представляет

собой весьма сложную кривую. Поэтому строгое сопоставление измерений разности потенциалов, обусловленной волновым движением, и характеристик этого волнения (высоты, периоды) невозможно. Для сравнения колебательного процесса волнения и сопряженных с ним флуктуаций электрического поля целесообразно использовать усредненные по времени статистические характеристики, например, функции спектральной плотности. Результаты экспериментальных измерений у побережья о. Кубы, о. Сахалина и на мысе Абрамовском в Белом море дают типичные распределения функции спектральной плотности (рис. 2.55) [Бондаренко, Бычков и др., 1978; Абрамова, Бондаренко, Новыш, 1978].

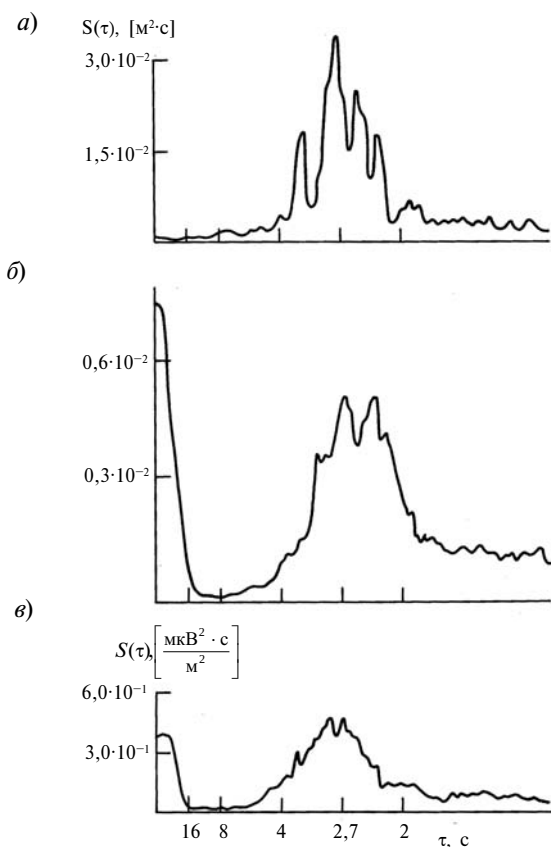


Рис. 2.55. Синхронная регистрация волнения и электрического поля у побережья о. Куба [Бондаренко, Бычков, 1978]. Распределение функции спектральной плотности $S(\tau)$:

а — ветрового волнения; б — скорости движения воды в волне по оси z ; в — напряженности электрического поля по оси y

Для изучения энергетических характеристик и ритмов гидродинамических колебаний на поверхности и в глубинах акваторий мы рекомендуем использовать флуктуационную часть поля. Получение массовой информации об энергетических характеристиках поверхностных и внутренних волн можно обеспечить, используя современную аппаратуру МО-67 или М-148, которой оснащен военно-морской флот.

В озерах ветровое волнение сопровождается электрическими возмущениями, частота которых соответствует частотам групп волн при волнении свыше 1 балла, хотя амплитуды колебаний при этом еще невелики. При развитом волнении (не менее 2 баллов) величина регистрируемого полезного сигнала зависит от условий эксперимента. Поясним это на примерах. Рассмотрим записи флуктуаций электрического поля при штилевой погоде и при развитом волнении 3 балла на Ладожском озере. Установка соответствовала принципу "системы с подвижным датчиком" (см. разд. 2.3), который перемещался вертикально в тонком приповерхностном слое на притопленном диэлектрическом грузе. Установка работала в точке с глубиной места 80 м (неподвижный электрод сравнения находился у дна). При волнении 3 балла генерировался сигнал с амплитудой $(1 \div 1,5)10^{-3}$ В (рис. 2.56, а).

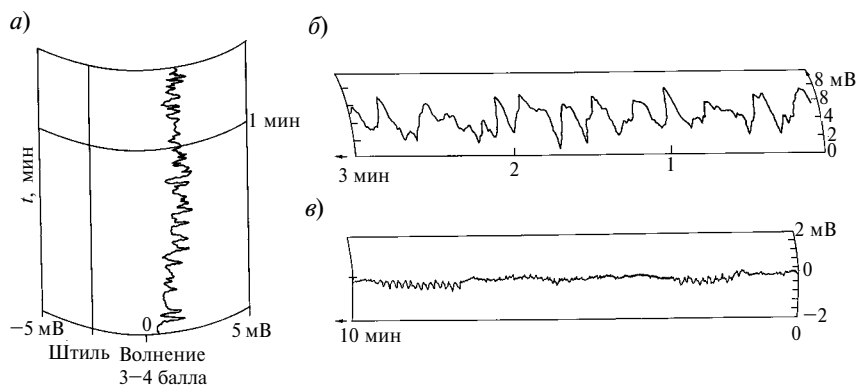


Рис. 2.56. Электрическое поле волнения:

а — флуктуации $\Delta\phi$ в Ладожском озере на стационарной установке с подвиж-

ным электродом на поплавке. Глубина места 80 м; б — флуктуации $\Delta\phi$ в Онежском озере на стационарной установке с подвижным электродом. Глубина места 4 м, волнение 3 балла; в — флуктуации $\Delta\phi$, обусловленные волнами зыби. Ладожское озеро

Аналогичный пример наблюдений выполнен на Онежском озере на глубине 4 м. Ветровое волнение $2 \div 3$ балла обусловило амплитуду сигнала до $6 \cdot 10^{-3}$ В, т.е. в $4 \div 5$ раз выше, чем в предыдущем опыте. На наш взгляд, такая разница в амплитуде сигнала была обусловлена уменьшением экранирующего влияния слоя пресной воды на малых глубинах. Периодичность флуктуаций соответствует типичной периодичности для ветрового волнения $2 \div 3$ балла в этих озерах и колеблется от 3 до 10 с (см. рис. 2.56,б) [Александров, Зайцев, 1978]. Это положение теоретически обосновано в работе [Савченко, 1980].

При исследовании электрического “волнового шума” в Якимварском заливе Ладожского озера нами был выявлен случай распространения озерной зыби на глубине 3 м. Неподвижные электроды располагались в горизонтальной плоскости на глубине 3 м от поверхности на расстоянии 80 м друг от друга, общая глубина района измерений примерно одинакова — 20 м (см. рис. 2.21,б). Волны зыби, беспрепятственно распространяясь в заливе, достигали электродов установки практически одновременно. Запись естественного фона продолжалась 3 ч. В результате удалось зарегистрировать групповое распространение зыби с ярко выраженной периодичностью между группами. Амплитуды электрических сигналов волн зыби достигли $\approx (0,5 \div 0,6) 10^{-4}$ В, периоды между группами менялись от 3,3 до $19,4 \div 19,7$ мин, в каждой группе насчитывалось в среднем 10 волн (от 6 до 14 волн) (см. рис. 2.56,в). Периоды между группами имели тенденцию также группироваться; период, близкий к 20 мин, сменялся тремя—четырьмя последовательными периодами в среднем около 4 мин, и снова появлялась волна с периодом около 20 мин.

Аналогичные выводы по перестройке спектральных характеристик магнитного поля морского волнения в зависимости от глубины даются в работе Г.В. Соколова [Соколов, 1975]. Пример исследований ветровых волн и зыби в море, проведенных неэлектрическими методами, рассматривается в работе Б.Н. Шатова, который отмечает, что несмотря на различия в условиях волнообразования, спектральные характеристики волнового процесса затухают экспоненциально с глубиной, когерентность колебаний на различных глубинах близка к единице, имеются фазовые сдвиги по глубинам. Наиболее интенсивно фазовая перестройка происходит в подповерхностных слоях. Групповая структура поверхностного волнения сохраняется по всей глубине, включая придонные горизонты. Группы волн содержат от 3 до 14 волн, среднее число волн в группе составляет $5 \div 8$, причем с глубиной число их в группе увеличивается [Шатов, 1975].

Период распространяющихся групп электрических колебаний, равный примерно 20 мин, возможно, имеет более сложную природу, не связанную с гидродинамическим источником. Известно, например, что “сейсмический шум” (микросейсмы) в диапазоне частот от единиц до десятков герц, проявляющийся в региональном масштабе, существует при отсутствии местных источников и может модулироваться более низкочастотными колебаниями [Рыкунов, Хаврошкин, Цыплаков, 1978]. Эти авторы показали, что длиннопериодные сейсмические явления приводят к увеличению уровня высокочастотного шума в моменты роста сейсмической активности Земли. Собственные колебания Земли наблюдались сейсмическими и гравиметрическими приборами и, как известно, имеют различные периоды в соответствии с типами колебаний (сфероидальные, крутильные) — 54,7; 20,5; 19,8; 15,5 мин и т.д. (см. разд. 2.4.1).

Анализируя приведенные выше исследования на Ладожском озере, следует отметить, что не исключена возможность влияния микросейсмических напряжений в земной коре с периодом, близким к 20 мин, на генерирование электрических колебаний, которые могут модулировать более высокочастотные сигналы гидродинамической природы — групп волн зыби*.

Всевозможные источники искажения волновых электрических сигналов маскируют истинную, гидродинамическую их природу, снижают эффективность изучения гидрологии методами электрополюметрии. Это обстоятельство вынуждает проводить дополнительные эксперименты, синхронно контролирующие соответствие электрического поля волновых процессов реально существующему гидродинамическому полю. Работа, проведенная автором с группой сотрудников СПБОГОИНа** в июле—августе 1980 г. на Красном озере, была посвящена такому контролю.

Измерения производились в прибрежной зоне ($\varphi^\circ = 60^\circ 31' 0$, с.ш., $\lambda^\circ = 29^\circ 46' 0$, в.д.), где воздействие активных источников естественных и искусственных гидродинамических помех (речные потоки, движущиеся плавсредства и т.д.) было минимально. Впервые были синхронно зарегистрированы волновые колебания поверхности воды и флуктуации электрического поля в стационарных условиях. Волны в прибрежной полосе регистрировались струнным волнографом

*См. текст в разделе заключение, «геофизика».

**Автор выражает признательность сотрудникам ЛОГОИНа (СПБОГОИНа) А.И. Устимову, А.Б. Пастухову, Ю.А. Трапезникову и Б.М. Андрееву за активную помощь и непосредственное участие в эксперименте и обработке материалов.

ГМ-61, размещенным на свайном фундаменте на глубине 3,5 м, средняя скорость ветра за отрезок времени в 10 мин измерялась контактным анемометром. Регистрация процессов велась осциллографом Н-115. Измерительный блок волнографа воспринимал колебания в частотном диапазоне $0,1 \div 1,5$ Гц, градуировка установки обеспечивала высокую разрешающую способность (по оси ординат 1 мм записи соответствовал 5 мм возвышения поверхности в натуре). Флуктуации разности потенциалов электрического поля регистрировались вертикальным многоэлектродным зондом, установленным неподвижно вблизи от волнографа на глубине 1,5 м в 40 м от уреза воды. Верхний электрод размещался на горизонте 0,3 м, электрод сравнения — на 1,3 м (в зоне практического затухания поверхностных волн). Электрические сигналы передавались по экранированному проводу на усилитель постоянного тока с дифференциальным высокоомным входом и активным фильтром низкой частоты, калибровка сигналов проводилась типовым магазином сопротивлений Р333. Масштаб записи на ленте осциллографа: 1 мм по оси ординат соответствовал 20 мкВ разности потенциалов. Нижний предел достоверного сигнала равен 10 мкВ, частотный диапазон измерений — $0,01 \div 10$ Гц. Возможная погрешность измерения, обусловленная изменением гидростатического давления на электродную установку, сведена к минимуму за счет специальной обработки датчиков. Термические и электрохимические источники ЭДС вблизи установки практически отсутствовали. Записи процессов проводились синхронно осциллографом со скоростью развертки 25 мм/с, длительности непрерывных записей $10 \div 15$ мин. Погрешность измерений 5 %.

Геомагнитное поле в период измерений флуктуировало в пределах многолетних средних фоновых значений и регистрировалось в полосе частот ниже 0,02 Гц типовой аппаратурой на Магнитной обсерватории ЛОИЗМИР* АН России, оз. Красное. Результаты измерений были статистически обработаны на основе известных положений о квазистационарности исследуемых процессов и допущения справедливости эргодической гипотезы (см. разд. 2.3; ФЭС. 1983. С. 905).

Образец осциллограммы профиля поверхностного ветрового волнения и флуктуаций электрического поля за 11 июля 1980 г. представлен на рис. 2.57.

*СПбФИЗМИР АН России.

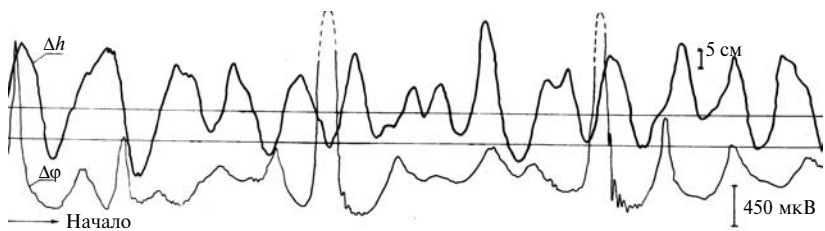


Рис. 2.57. Осциллограмма синхронной регистрации профилей ветрового волнения и флуктуаций электрического поля в оз. Красном, 1980 г.; Δh — волновые колебания, $\Delta \varphi$ — флуктуации электрического поля

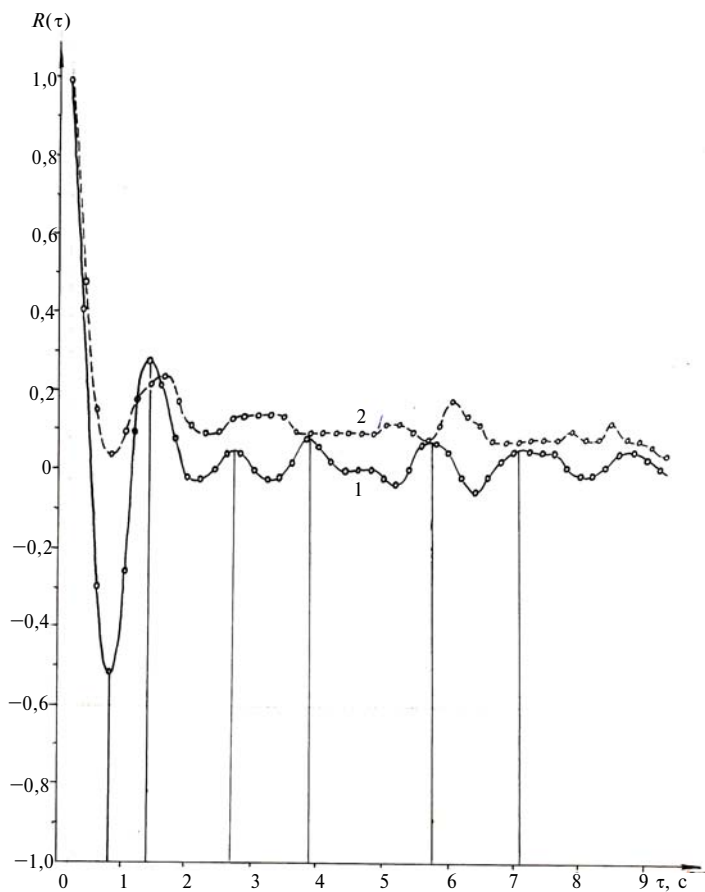


Рис. 2.58. Автокорреляционные функции волновых колебаний Δh (1) и флуктуации электрического поля $\Delta \varphi$ (2)

На рисунках 2.58, 2.59 показаны результаты статистической обработки материала: автокорреляционные, автоспектральные и взаимоспектральные функции распределения колебаний ветровых волн (Δh) и флуктуаций электрического поля ($\Delta\phi$). Здесь $M(x)=11,017$ и $\delta_x=12,805$ (см. рис. 2.58, кривая 1) и $M(x)=1,44$ и $\delta_x=8,530$ (см. рис. 2.58, кривая 2), шаг по частоте 0,2 с; на рис. 2.59 шаг по частоте 0,111 Гц.

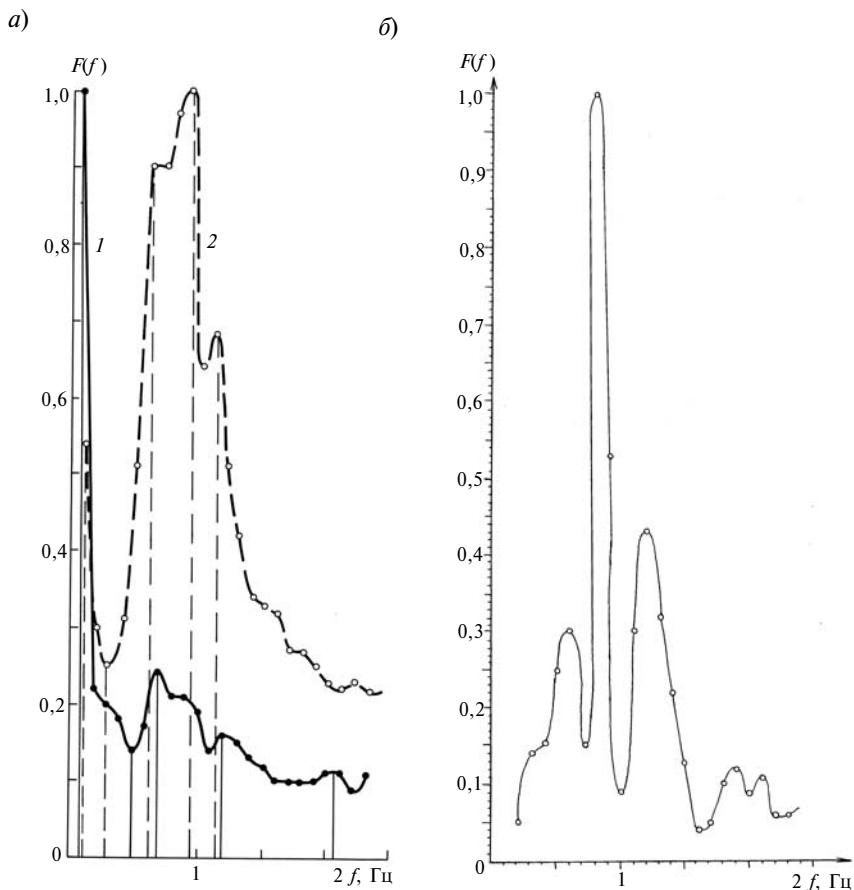


Рис. 2.59. Результаты синхронной регистрации электрокинетического поля в воде и гидродинамического поля волнения в оз. Красном 11.07.80 г.:
 а — спектры Фурье флуктуаций поля $\Delta\phi$ (1) и волновых колебаний Δh (2);
 б — распределение взаимной спектральной плотности $\Delta\phi$ и Δh

Достоверно наблюдались ветровые волны с характерными периодами 0,2 с и менее; 0,7 и 1,4 с. Энергетические максимумы отмечаются на частотах 0,99 и 1,22 Гц. Свыше 1,2 Гц идет интенсивный спад энергии (тангенс угла наклона — $10/3$). Для электрических флуктуаций характерны периоды 0,2 с и менее; 0,7 и 1,4 с. Энергетические максимумы отмечаются на частотах 0,11; 0,77 и 1,22 Гц. Коррелограммы и спектрограммы показывают, что характерные периоды флуктуаций поля и колебаний волн близки, а в некоторых случаях совпадают точно (0,7 и 1,4 с). Выявляются две области корреляции электрических флуктуаций и ветрового волнения:

в области двойной частоты ветрового волнения, что, по-видимому, связано с тем, что модуль орбитальной скорости волнового течения имеет максимум на двойной частоте. Этим, возможно, и объясняется повышенная корреляция в области $1,2 \div 1,3$ Гц;

в области основного максимума ветрового волнения, что связано с изменением электрического сигнала при перемещении датчика (верхнего электрода) на волне по вертикали; в этом случае второй минимум считается значимым, и это объясняет уменьшение взаимного спектра на частоте вблизи 1,2 Гц.

В области 0,7 Гц сосредоточено до 90 % всей энергии ветрового волнения и генерируемого электрического сигнала, на частоте же 1,5 Гц — шум. На частоте $\approx 1,98$ Гц (0,5 с) мало значение взаимной спектральной плотности (0,1) и низок уровень значимости, так как полоса частотного диапазона волнографа ограничена — $0,1 \div 1,5$ Гц.

Сложная структура спектральной плотности может быть связана как с гидродинамикой, так и с геомагнетизмом. Гидродинамическое поле ветровых волн трехмерно. Центральная энергонесущая частота 0,7 Гц обусловлена регулярной частью волнения, другие частоты — менее выраженными колебаниями. Кроме того, в суммарный электрический сигнал вносится часть, индуцируемая горизонтальными и вихревыми движениями воды в волне, а также слабым потоком течений. Кроме того, с 30-х годов XX в. известен в физике принцип резонансного поглощения энергии, заключающийся в том, что если заряженная частица совершает в магнитном поле круговое движение с постоянным периодом обращения, то при наложении внешнего переменного электрического поля определенной частоты возникает увеличение как скорости, так и радиуса движения частицы. Отсюда, по всей вероятности, также снижается коэффициент корреляции между энергетическими спектрами волнового и электрических полей. Однако частоты 0,7 и 1,22 Гц являются весьма сложными для интерпретации, так как известно, что существуют магнитосферные микропульсации геомагнитного поля

(а следовательно, и электрического) в полосе частот $1 \div 2$ Гц, это так называемый УНЧ-диапазон ($10^{-3} \leq f \leq 5$ Гц). В условиях повышенной солнечной активности (например, период наших измерений 1978–1981 гг.), как правило, наблюдается увеличение фазово-амплитудной неоднородности поля геомагнитных пульсаций, что может обусловить и меньшую зависимость зарегистрированных флуктуаций поля от волнения, а следовательно, и невысокий коэффициент корреляции. С гидрофизической точки зрения такие геомагнитные пульсации электрического поля являются определенной помехой при установлении связей между гидродинамическим источником и генерируемым им электрическим эффектом на акватории.

Примененный нами вариант электрополюметрического слежения за динамикой поверхности воды (вертикальный двухэлектродный зонд с подвижным и жестко закрепленным датчиками) позволил регистрировать влияние суммарного гидродинамического источника. Применение дифференциального метода измерения поля на трехкомпонентной электродной установке может обеспечить решение гидрологических задач изучения поверхностного волнения в прибрежной зоне [Александров, 1985].

Об изменениях магнитных полей гидродинамического источника в озерах автору не известно. Поэтому была произведена оценка возможного генерирования аномального магнитного поля поверхностными волнами, параметры которых соизмеримы с таковыми в море. Расчет магнитных флуктуаций производился по формулам из работы [Горская, Скрынников, Соколов, 1972] с учетом реально возможных максимальных параметров волн в Ладожском озере: амплитуда (α) ≈ 5 м; длина (λ) ≈ 60 м; максимальная глубина озера — 240 м; средняя глубина ≈ 100 м; проводимость воды (χ) $\approx 7 \cdot 10^{-3}$ См/м; магнитная индукция для региона $B_x = 0,15 \cdot 10^{-4}$ Тл, $B_z = 0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл. Для поверхности воды расчет дает аномалию магнитного поля $|B_x| \approx |B_z| \approx 5 \cdot 10^{-7}$ нТл, т.е. значение флуктуаций, недоступное измерению полевыми геофизическими магнитометрами. Для морской воды значение аномального магнитного поля находится на уровне 10^{-1} нТл, поэтому спектральную характеристику волнового поля в пресноводных бассейнах можно зафиксировать только электрополюметрически.

О динамических источниках электризации жидкости в поверхностных слоях водоема

Поверхностные слои воды (поверхностная пленка) являются зоной, в которой электризация усиливается за счет непосредственного

контакта с ветром. В наземных электроразведочных работах, как правило, ведутся наблюдения над колебаниями электрического поля Земли магнитосферной природы, классификация их известна (см. ч. 1), однако ветровые возмущения поля при этом не учитываются. В работе [Фонарев, 1968] отмечалось, что “ветровые помехи” могут быть исключены, если линии подачи ЭДС от электродов к регистратору будут неподвижны. Наблюдения автора дополняют это замечание: генерирование электрических сигналов в переходном слое воздух—вода или воздух—почва на контактных датчиках может быть и не связано с движением проводящих линий и зависеть в большей мере от непосредственной электризации поверхности воды или суши ветром.

В период длительных наблюдений над флуктуациями поля и его дивергенцией в воде был оборудован специальный вариационный пункт в поселке Соролы ($\varphi^\circ = 61^\circ 28', 9$ с.ш., $\lambda^\circ = 30^\circ 14'$, в.д.) для синхронных записей пульсаций поля также и в земле на линиях север—юг и запад—восток. Линии подачи ЭДС на регистратор длиной по 100 м были проложены в почве экранированным кабелем и закопаны.

Частота появления пульсаций УНЧ-диапазона ($pc1$ — $pc2$), как известно, очень низкая, на графике спектральной плотности она имеет обратную зависимость, т.е. находится в пределах $10^{-5} \div 10^{-4}$. Поэтому обнаруженная в записях периодическая повторяемость «пакетов» пульсаций с частотами типа $pc1$ — $pc2$ и натолкнула на мысль об иной природе наблюдаемых колебаний.

Появление на записях поля «сгустков» или «пакетов» колебаний УНЧ-диапазона оказалось тесно связанным с усилением ветра. С помощью элементарных учащенных дискретных наблюдений (анемометр и секундомер) было установлено, что интенсивность пульсаций поля возрастает четко с усилением скорости ветра; в период штилевой погоды или при скорости ветра не более 1 м/с пульсаций типа $pc1$ — $pc2$ не отмечалось, при скоростях ветра от 7 м/с и более вариации электрического поля возрастают, и отличить их по частоте от чисто магнитосферных (теллурических) практически не удастся. Подобные же наблюдения были сделаны автором в 1978 г. в районе Андижанского водохранилища: в тонкой поверхностной пленке воды с началом ночного горно-долинного ветра внезапно возрастала интенсивность электрических колебаний и также внезапно снижалась до обычных фоновых очень слабых колебаний, когда ветер стихал к утру.

Механизм дополнительной электризации поверхностной пленки воды ветром связан с кавитационными эффектами (комплекс

явлений, приводящих к образованию, росту и схлопыванию пузырьков в жидкости). Ветер, возбуждая волны на поверхности воды, помимо именно гидродинамических электрических колебаний, создает предпосылки и для усиления кавитационных эффектов. Известно, что в кавитационном пузырьке напряженность электрического поля E может достигать, по расчетам Я.Н. Френкеля (1940 г.), 600 В/см при концентрации свободных зарядов в жидкости примерно 10^{18} см^{-3} . Однако в действительности [Маргулис, 1984] для чистой воды эта величина завышена в 10^4 раз, и поэтому E не может превышать 6 В/см, а для органических жидкостей и того меньше. Электрический кавитационный эффект в воде для прикладных задач гидрофизики может представлять определенный интерес:

- электрический эффект (возмущение), вызванный поверхностным волнением (ветром), обусловлен не только магнитногидродинамическими силами, но и кавитационными явлениями, что значительно усложняет интерпретацию суммарного сигнала, который, безусловно, становится не адекватен функциональной зависимости $\Delta\varphi = f(h_{\text{волн}}, f_{\text{волн}})$. Для разделения сигнала на составляющие по энергетическому спектру, по всей вероятности, необходимо совместное измерение также и ультразвукового поля в воде;

- кильватерный след от судового движителя (винта), насыщенный пузырьками, внутри которых сосредоточивается высокий электрический заряд, проявляется в виде электрического шлейфа и легко обнаруживается элементарной электрометрической установкой [Александров, Зайцев, 1978]. Анализируя механизм кавитационных явлений, следует отметить следующее: интенсивность кавитационных эффектов может быть опосредовано показана интенсивностью акустических колебаний, которые при мощности 1 Вт/см² могут вызывать сонолюминесценцию [Маргулис, 1984], а при схлопывании пузырьков происходят ионизация различных веществ и образование радикалов ионов, что вызывает изменения электрического импеданса системы электрод—жидкость [Эльпинер, 1973].

Для наземной электроразведки и метеорологической службы также можно сделать следующие предложения:

- поскольку частотный спектр пульсаций ветра и геомагнитных микропульсаций лежит примерно в одних и тех же пределах ($pc1$ — $pc5$) и при анализе записей электрического или магнитного полей могут появиться ошибки в истолковании природы явления, целесообразно вести синхронную регистрацию скоростного поля ветра;
- метод теллурических наблюдений, помимо своей основной задачи в геофизических работах, может быть использован для регистрации энергетического спектра ветра в пограничном слое (воздух—почва) без устройства всевозможных высотных сооружений.

2.4.4. Вихревая структура электрического поля в биоактивных слоях водоемов

В предыдущем разделе отмечалось, что спектральные характеристики электрического поля, связанного с гидродинамическим полем волн, в реальных условиях не соответствуют теоретическим представлениям о бездивергентных полях. Это обусловлено наличием вихревой части электрического поля в движущейся волне. Учет вихревого характера движения воды в волновых процессах представляет собой самостоятельную экспериментальную задачу, которой и посвящен данный раздел.

Электрические поля гидродинамической и магнитотеллурической природы соизмеримы по порядку амплитуд и частот. Для их разделения впервые в нашей стране применена методика измерения дивергенции электрического поля, которая позволяет получить данные, связанные только с движением воды. Возможность практического измерения дивергенции поля была реализована путем одновременной регистрации потенциала в нескольких точках среды относительно потенциала центра с помощью многоэлектродной установки «Вихремер». Измеренное значение дивергенции электрического поля в воде следует интерпретировать как меру плотности электрического заряда в данном объеме (тетраэдр), которая связана с вращением проводящей среды в магнитном поле Земли (см. разд. 2.2.6).

Для оценки достоверности полученных многоэлектродной установкой данных параллельно велись наблюдения термозондом, электрополюметрическим двухэлектродным зондом и пьезокерамическим турбулиметром конструкции ВНИИФТРИ. Эти приборы применялись для выявления фоновой характеристики водных масс. Пьезокерамическим турбулиметром регистрировались вертикальные составляющие пульсации скорости потока, а электрометрическим зондом — вертикальная компонента поля (см. разд. 2.2.6).

Рассмотрим несколько примеров фоновых значений флуктуаций естественного поля турбулентных пульсаций в открытом озере 12 сентября 1976 г. в точке с координатами $\varphi^\circ = 60^\circ 26'$, 2 с.ш. $\lambda^\circ = 30^\circ 29'$, 3 в.д. на глубине 42 м. Наблюдения проводились спустя одни сутки после непродолжительного шторма в 6 баллов. Приборы находились на глубине около 15 м в течение одного часа. На рис. 2.60 показаны образцы синхронной записи, приведенной к одному масштабу по времени. Наблюдались “вихревые пакеты” — периодически появляющиеся сгустки пульсаций скорости, которым соответствовали аналогичные сгустки флуктуаций электрического поля.

Сгустки пульсаций длились в течение 1–2 мин, количество колебаний, зарегистрированное приборами, примерно одинаково: $\approx 20 \div 40$, и частота их практически одинакова. Были подсчитаны коэффициенты перемежаемости, характеризующие частоту появления “вихревых пакетов”, по формуле

$$K = \Sigma t_i / \Sigma t_{\text{общ}}, \quad (2.28)$$

где t_i — время, в течение которого длится динамическое возмущение (“вихревой пакет”); $\Sigma t_{\text{общ}}$ — время наблюдения, включающее как возмущения, так и промежуточные спокойные периоды. По данным турбулиметра, $K_1 = 0,513$, по данным электрометрии, $K_2 = 0,602$. Средний период колебаний внутри “пакета” $1,5 \div 2,0$ с, минимальный — 0,5 с, максимальный — $3 \div 4$ с.

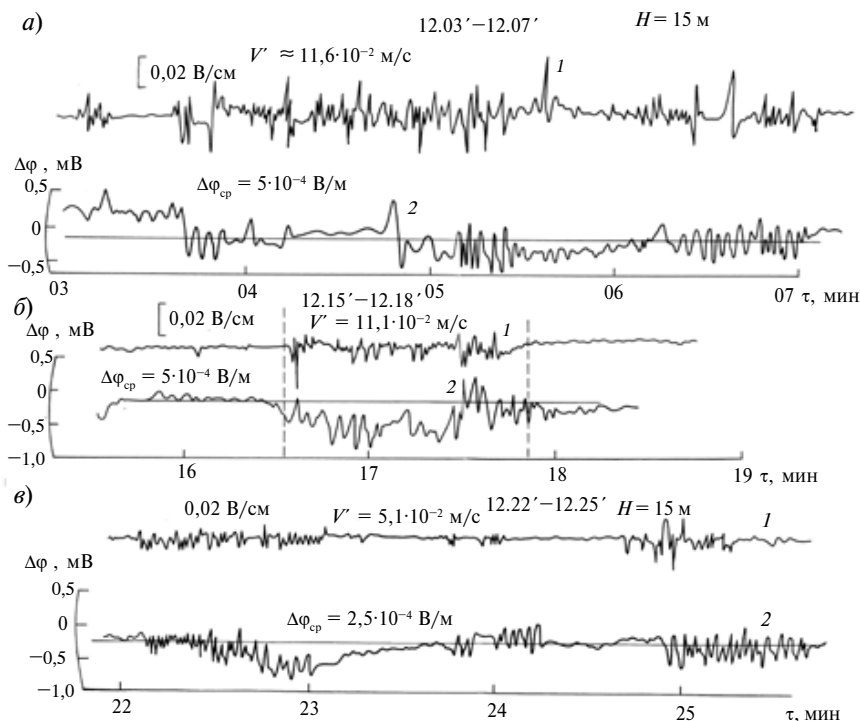


Рис. 2.60. Синхронная регистрация фоновых значений пульсаций скорости потока (1) и градиента потенциала ЭП (2) в Ладожском озере 12 сентября 1976 г.: а, б, в — последовательно проведенные записи на глубине 15 м

Для оценки соотношения динамического фактора и генерируемого им электрического сигнала произведен расчет скорости пульсации и амплитуды градиента поля в соответствии с формулами паспорта турбулиметра ВНИИФТРИ [Александров, 1985].

Для данных примеров скорость пульсаций колеблется в пределах $(10,52 \div 11,60)10^{-2}$ м/с, градиент — в пределах $(3,5 \div 5,0)10^{-4}$ В/м.

Затем приборы работали на глубине 5 м (в тех же координатах), где отмечается меньший период возмущения, т.е. длительность “вихревого сгустка” колеблется от 40 до 70 с, количество пульсаций примерно $13 \div 22$, т.е. снизилось в $2 \div 3$ раза по сравнению с глубиной 15 м, но периодичность их в основном та же — $1,5 \div 3,0$ с. Однако величина скорости пульсаций примерно в 2 раза меньше — $(5,06 \div 6,26)10^{-2}$ м/с, а градиент поля несколько выше — $(5 \div 6)10^{-4}$ В/м. В этом примере прослеживалась смена полярности разности потенциалов при появлении «вихревого сгустка». Коэффициенты перемежаемости равны 0,477 (для турбулиметра) и 0,611 (для электрометрического зонда).

Второй пример зарегистрирован наблюдениями за 14 сентября 1976 г. в 19 ч 38 мин у входа в Якимварский залив ($\varphi^\circ = 61^\circ 27' ,5$ с.ш. $\lambda^\circ = 30^\circ 21' ,5$ в.д.) на глубине 36 м, горизонт измерения 7 м (электрополюметрический зонд) и 4 м (турбулиметр). Несмотря на разницу в глубинах наблюдений, “вихревые сгустки” прослеживаются по обоим приборам, хотя амплитуды градиента поля занижены. Длительность “пакетов” — от 26 до 52 с, количество пульсаций примерно $10 \div 22$, периодичность — $1,7 \div 2,0$ с, скорости пульсаций примерно $(10,5 \div 11,1)10^{-4}$ м/с, напряженность поля — $(1,5 \div 3,0)10^{-4}$ В/м. Это еще раз подчеркивает необходимость корректно производить измерения.

Заслуживают внимания некоторые экспериментальные реализации, характеризующие своеобразное “портретное сходство” между турбулентными пульсациями скорости потока и генерируемыми ими электрическими сигналами (градиент поля). Так, 13 сентября 1976 г. приборы находились у о. Сельтямарьянсари на глубине 20 м, горизонт наблюдений — 10 м. При записи (рис. 2.61) видна не только полная идентичность в количестве пульсаций, их периодах в течение “жизни” пакета — 35 с, но и даже в форме записи. Средний период — примерно 1,5 с, скорость пульсаций $\approx 10,1 \cdot 10^{-2}$ м/с и средняя амплитуда градиента поля $\approx 5 \cdot 10^{-4}$ В/м. Такой результат получен, видимо, при удачном расположении электродного зонда и турбулиметра и показывает, таким образом, большие методические возможности электрополюметрии.

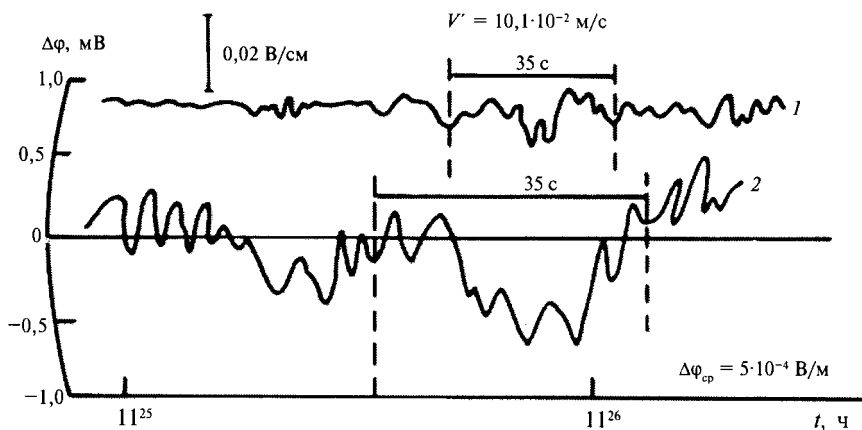


Рис. 2.61. Синхронная регистрация фоновых значений пульсаций скорости потока (1) и градиента потенциала ЭП (2) в Ладожском озере у о. Сельтямарьянсари 13 сентября 1976 г.

Резюмируя наблюдения над короткопериодными пульсациями гидродинамической природы, можно отметить следующее:

- для фоновых колебаний скорости потока и электрического поля в вертикальной плоскости характерны частоты $0,5 \div 0,14$ Гц ($2 \div 7$ с) — 73% (электрометрия) и $2 \div 0,14$ Гц ($0,5 \div 7$ с) — 80 % (турбулиметр). Основной энергетический вклад приходится на пульсации с периодами $2 \div 3$ с (более 60 %). Расчетные экстремальные периоды 1,33 и 5,3 с, скорости пульсаций (только обработанные данные) равны $(5,06 \div 11,32)10^{-2}$ м/с, амплитуды градиента поля — $(0,2 \div 6,0)10^{-4}$ В/м, а средние значения — примерно $8 \cdot 10^{-2}$ м/с и $1 \cdot 10^{-4}$ В/м.

- короткопериодные пульсации, как правило, сгруппированы в “вихревые сгустки” общей длительностью 40, $70 \div 80$ и 240 с (первая группа), а также 30, 60, и 90 с (вторая группа), интервалы между которыми могут быть весьма разнообразны, но чаще наблюдались минутные и двух-, трехминутные, о чем свидетельствует коэффициент перемежаемости (примерно 0,5).

Фоновые флуктуации дивергенции естественного электрического поля зарегистрированы при различных гидрометеорологических условиях на гидрофизическом полигоне в Якимварском заливе в слое примерно $1 \div 3$ м при глубине места 4 м ($\varphi^{\circ} = 61^{\circ}29',3$ с.ш. $\lambda^{\circ} = 30^{\circ}15',3$ в.д.). Длительность записей, на которых отсутствуют последствия воздействий гидродинамических источников неестественной природы, не превышает 1 часа. Минимальный период

флуктуаций, регистрируемый комплектом многоэлектродной установки, не менее 0,1 с. На реализациях дивергенции поля прослеживаются регулярные, свойственные вихревому движению жидкости, сигналы. Обнаруживались четкие “вихревые сгустки” с длительностью от 40 до 45 с. Периоды между ними равнялись $2,5 \div 3,5$ мин, амплитуды — в пределах $136 \div 368$ мкВ. Зарегистрированы отдельные долгопериодные пульсации со средним периодом $67 \div 68$ с и средней амплитудой — около 225 мкВ (при $\tau_{\text{мин}} = 62$ с, $\tau_{\text{макс}} = 75$ с, $A_{\text{мин}} = 80$ мкВ, $A_{\text{макс}} = 370$ мкВ). Короткопериодные пульсации в $4 \div 5$ с имеют амплитуды примерно $20 \div 40$ мкВ. Но чаще всего наблюдались серии вихрей, следующих друг за другом, и на записях визуально трудно выделять отдельные вихревые образования с характерным сигналом (рис. 2.62,а).

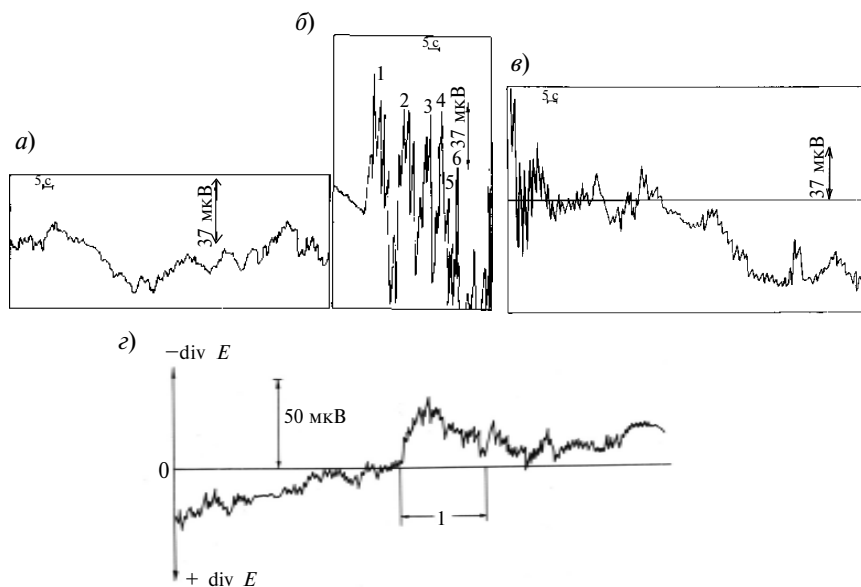


Рис. 2.62. Флуктуации дивергенции электрического поля

при разных источниках генерации. Якимварский залив, 1977 г.:

- а — естественный фон; б — возмущение фона корабельными волнами; в — флуктуации ЭП отраженных корабельных волн от скалы; г — импульс дивергенции поля, генерированный ветровой полосой циркуляции Ленгмюра

Как правило, связь между флуктуациями температуры и дивергенцией поля не прослеживалась, однако есть примеры, когда она имеется для периодов более 15 с (термогирляндой и “Вихремером” зарегистрированы колебания с периодом $3 \div 4$ мин 6 сентября 1977 г.).

2 сентября 1977 г. была предпринята попытка получить относительно продолжительную запись дивергенции поля и температуры примерно в течение 8 ч. В этот день (11 ч 30 мин $\div$ 12 ч 00 мин и 12 ч 30 мин $\div$ 12 ч 46 мин) зарегистрированы долгопериодные колебания — 6,5 и 2,3 $\div$ 2,5 мин с амплитудами $89 \div 130$ и $49 \div 60$ мкВ, соответственно. На фоне этих колебаний прослеживаются пульсации типа “биений” с периодами 1,5 $\div$ 2 с и амплитудами $8 \div 10$ мкВ. В промежутке между 12 ч 00 мин и 12 ч 30 мин отмечался штиль. Пульсации типа “биений” практически сгладились. Затем были отмечены появление на поверхности воды капиллярных волн и характерное “потемнение поверхности”. Сразу же (сдвиг по фазе установить трудно) на записи дивергенции поля появились пульсации типа “биений”. В 13 ч 07 мин ветровое волнение усилилось до 1 балла, а на записи дивергенции поля появились пульсации с периодами от 1 до $18 \div 20$ с ($1 \div 0,05$ Гц), с амплитудами до $15 \div 20$ мкВ. При усилении волнения до 2 баллов амплитуды пульсаций возросли до $400 \div 700$ мкВ. Очень часто удавалось зарегистрировать вихревые “выбросы”, связанные с внезапными шквалами.

Спектральный анализ изменчивости дивергенции поля в течение периода от штилевой погоды до усиления ветра в $3 \div 4$ балла позволил выделить три характерных вида распределения спектра Фурье в полосе предельных частот $0,05 \div 1,25$ Гц.

Первый вид. В тихую погоду при слабом юго-восточном ветре (15 ч 00 мин $\div$ 15 ч 34 мин) можно было выделить несколько энергетических максимумов, которые соответствовали частотам менее 0,05; $0,1 \div 0,15$ ($10 \div 7$ с) и 0,35 Гц (3 с) (доверительный предел 95 %), более высокочастотные колебания вносят незначительную энергию (доверительный предел 5 %) (рис. 2.63,а).

Второй вид. Переходный момент от штилевой погоды до устойчивого ветра в 2 балла и до появления ветрового волнения ($18 \div 19$ ч) характеризуется перестройкой энергетического спектра. Максимумы сдвигаются в более высокочастотную область $0,25 \div 0,40$ Гц ($4 \div 2,5$ с) и $0,75 \div 0,90$ Гц ($1,3 \div 1,1$ с) (доверительный предел 95 %), максимум на частоте примерно 1,25 Гц (0,8 с) имеет доверительный предел 5 %. Колебания около $0,5 \div 0,6$ Гц (2 с) практически исчезают, доверительный предел 5 % и менее (рис. 2.63,б).

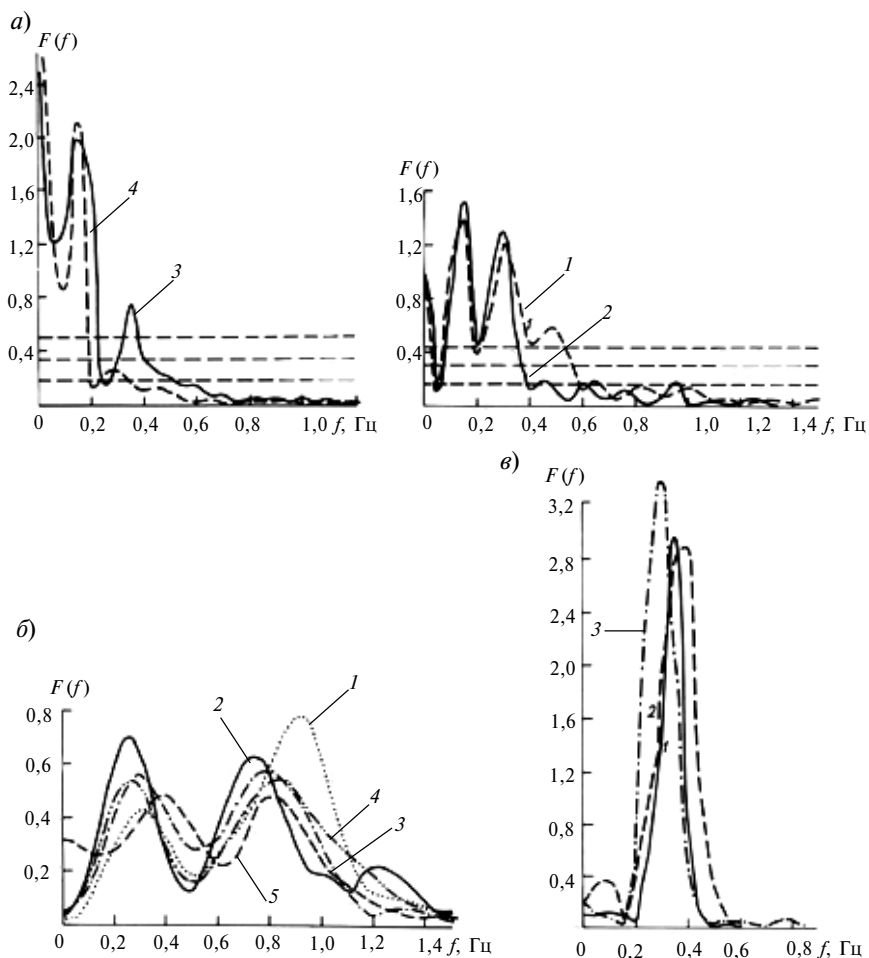


Рис. 2.63. Спектральные характеристики флуктуаций дивергенции электрического поля в Якимварском заливе 12 сентября 1977 г.: *а* — период тихой погоды (15 ч 00 мин ÷ 15 ч 34 мин); *б* — переходный период от штиля до устойчивого ветра в 2 балла (18 ÷ 19 ч); *в* — период установившегося ветрового волнения 3 балла (после 19 ч). Цифры у кривых соответствуют числу опытов для выделяемого вида спектра

Третий вид. Характеризует устойчивую ветреную погоду (ветер 3 ÷ 4 балла) и развитое ветровое волнение до 3 баллов (19 ч 08 мин ÷ 19 ч 11 мин). Отмечается один энергетический максимум, равный 0,35 Гц (2,8 ÷ 3 с) (рис. 2.63, в). Аналогичные значения для центральной части максимума энергетического спектра

получены авторами работ [Абрамова, Бондаренко, Новыш, 1978; Бондаренко, Бычков и др., 1978] на море в прибрежной полосе (см. рис. 2.55).

Таким образом, порядки частотных характеристик для озерного и морского волнения и индуцированного им электрического поля и его производных практически совпадают на мелководье (по результатам работ до глубины 5 м).

Установка “Вихремер” может применяться для некоторых узкоспециализированных исследований. В 1976 г. при совместных работах с ВНИИФТРИ было отмечено резкое изменение градиента потенциала электрического поля в областях циркуляции Ленгмюра. Попытка провести синхронные сравнительные измерения средних скоростей потока в этих областях с помощью стандартного прибора ГР-42 и поля электрометрическим зондом не дали положительных результатов, так как прибор ГР-42 при работе за счет разряда батарей блока питания в воду резко искажает естественный фон среды. Поэтому такая работа была проведена в паре с пьезокерамическим турбулиметром. Динамические пульсации, измеренные пьезокерамическим турбулимером и электрометрическим зондом, имеют практически одинаковые характеристики и в этих областях. Например, 5 сентября 1977 г. было проведено наблюдение за моментами появления полос Ленгмюра и за результатами записи установкой “Вихремер”. Запись регистрации импульсов дивергенции поля в момент прохождения полосы Ленгмюра над установкой показывает, что они имеют отрицательную составляющую $\text{div } E$ и достигают $35 \div 40$ мкВ в начальный момент развития конвекции. Прослеживается вихревая цепочка движений в области циркуляции (см. рис. 2.62,з) [Александров, 1981; 1985].

Экспериментальные работы по изучению дивергенции поля дают возможность проследить за пространственной картиной изменения вихревого состояния среды. Спектральные функции распределения энергии по частотам (см. рис. 2.63,а,б,в), характеризующие вихревые течения от волнения $2 \div 3$ балла до штиля, показывают, что передача энергии в область больших пространственных масштабов приводит к объединению мелких вихрей (высокочастотные конвективные микропульсации) в крупные (низкочастотные флуктуации с большими амплитудами), которые в условиях перехода к штилевой погоде снова распадаются на серию мелких вихрей различного размера с постепенным ростом периодов между вихревыми сгустками. Исключительно важной можно считать возможность использования метода в исследовании структуры внутреннего волнения, которое сложным образом видоизменяет поверхностное волнение [Веселов и др., 1984].

Испытания установки и обработка материалов позволили наметить пути ее усовершенствования. С учетом реконструкции (усилитель постоянного тока, контейнер блока электроники, чувствительные элементы, жесткая конструкция “солевых мостов” и т.д.) прибор может применяться не только для определения структуры электромагнитного поля в воде, но и для исследования турбулентных движений в водоемах как естественного, так и искусственного происхождения. Например, автор изучал вихревую структуру корабельных волн, передающих энергию в глубинные слои водоема и искажающих фоновые характеристики теллурического поля. Эти данные могут быть использованы в различных технических аспектах и в первую очередь в военных. На рис. 2.64 показаны этапы подготовки и спуска на воду “Вихремера”.

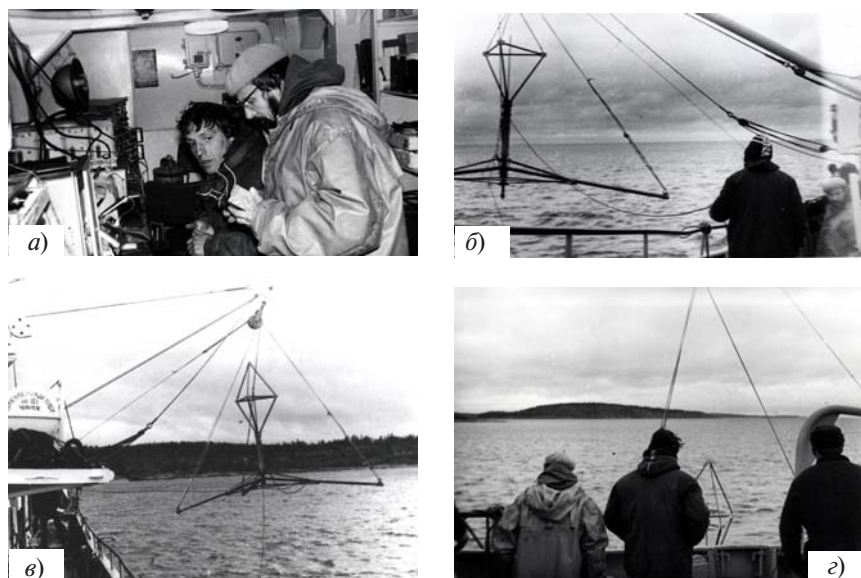


Рис. 2.64. Использование первой отечественной установки для подводного изучения дивергенции естественного электрокинетического поля вихревых течений, поверхностного волнения, искусственных вихрей в пресных крупных водоемах: *а* — подготовка электронного блока измерительной системы (слева — В.Ю. Семенов, сотрудник ИЗМИРАН, справа — В.В. Александров, автор); *б, в* — “Вихремер” опускается на глубину 30 м с борта э/с “Талан”; *г* — идет погружение

Автор выражает глубокую признательность сотрудникам ИЗМИР РАН — Г.А. Фонареву, В.Ю. Семенову, М.М. Богородскому, Ю.В. Федорюку, сотрудникам ВНИИФТРИ — И.Л. Кузнецову, С.Р. Стефанову, Г.Р. Барановой, Л.И. Лесуновской, В.В. Слотину, принявшим непосредственное участие в экспериментах; сотрудникам АФИ — Е.З. Гак., В. Ивашинцеву, выполнившим спектральную обработку материала и дипломнице ЛГУ Л.О. Вьюсовой, участвовавшей в расчетах пульсационных характеристик скорости потока и напряженности поля.

Описание пульсирующих вихревых явлений в трофогенном слое озер

Анализ суточных циклов наблюдений процесса генерирования электрического поля в биологически активных слоях пресноводных озер выявил закономерности распределения энергии турбулентных пульсаций в ультранизкочастотном диапазоне. Примененный нетрадиционный экспрессный метод изучения гидродинамики акваторий может рекомендоваться для решения конкретных задач гидрофизики, гидротехники и гидробиологии.

В качестве естественной физической модели было выбрано оз. Красное Карельского перешейка Ленинградской области ($\varphi^\circ = 60^\circ 31' , 0$ с.ш. $\lambda^\circ = 29^\circ 46' , 0$ в.д.). Здесь анализируются результаты измерений естественной разности потенциалов в воде озера ($\Delta\varphi$) многоэлектродной косой, установленной вертикально и неподвижно с помощью заглубителей и жестких растяжек по принципиальному способу градиент-зондирования (см. разд. 2.2.5):

1) $d\varphi/dL_x = f(t)$ стационарный режим,

одномерное измерение по координате $x = \text{const}$ и $L = \text{const}$;

2) $d\varphi/dL_{x,y,z} = f(t)$ стационарный режим,

трехмерное измерение по координатам $x = y = z = \text{const}$ и $L = \text{const}$;

Работы проведены в 1980 и 1981 гг. в перерывах между вертикальными зондированиями среды с целью слежения за перемещениями планктонных сообществ (см. разд. 2.5). Установка позволяла непрерывно регистрировать данные на различных глубинах (горизонтах) относительно электрода “нулевого потенциала”, априорно расположенного в наименее возмущенной среде. С целью выявления гидродинамических условий в ярко выраженном трофогенном, или “биотическом” слое озера выбрана глубина от 2 до 3 м. Этот слой содержит максимум концентрации планктонных организмов и представляет в данном примере наибольший интерес, поскольку

сведений о “внутренней жизни” таких слоев известно еще исключительно мало. Продолжительность непрерывной записи флуктуаций поля равнялась $15 \div 30$ мин, дискретность значения ординат — 0,2 с (или 0,005 рад/с, т.е. шаг квантования равен 1 мм на осциллограмме при перфорировании данных). Такая дискретность при обработке обеспечила 10 точек отсчета ординат на одно двухсекундное колебание $\Delta\phi$, т.е. разрешение частотного спектра в диапазоне $2 \div 10$ мин. Обычно для расчетов брали 2580 значений ординат.

В прибрежной зоне озера, в Магнитной обсерватории СПбФИЗМИР РАН, производилась запись элементов земного магнетизма. Обработка результатов проведена с применением теории случайных процессов, статистических оценок с учетом известных положений о квазистационарности процессов и допущении справедливости эргодической гипотезы на ЭВМ в Санкт-Петербургском отделении Государственного океанографического института [Рожков, Трапезников, 1969, с. 388]. Программа расчета статистических параметров электрических флуктуаций в объеме озера разработана Ю.П. Клеванцовым и проведена обработка материалов наблюдений в 1985–1986 гг*.

Вопрос о регистрирующей аппаратуре здесь намеренно не рассматривается, поскольку технические требования постоянно возрастают и создается аппаратура на новой элементной базе. Тем не менее, следует отметить существенный методический аспект, который всегда остается в центре внимания разработчиков. Например, для повышения точности измерений применяют различные способы компенсации собственной ЭДС электродной пары — с помощью специальных компенсационных мостовых электронных схем или с помощью вращающихся контактно-запорных устройств в электродных системах для модуляции входных сигналов и применения измерительных приборов переменного тока. Опыт использования простых и дешевых материалов (химически чистый свинец, керамические фильтры-обтекатели и др.) при несложной технологии изготовления датчиков и достаточно высоких их метрологических характеристиках позволяет рекомендовать такие системы не только для гидрофизических исследований, но и для методических прикладных работ в военно-морском флоте.

*Автор, пользуясь возможностью публикации материалов, выражает глубокую признательность сотрудникам СПбОГОИН — Ю.П. Клеванцову (автору программы расчетов), Б.М. Андрееву (консультанту и организатору механизированной обработки большого объема информации), а также сотруднику СПбФИЗМИР РАН Л.М. Сердюкову за измерение и анализ данных о ГМП в регионе.

В качестве примера рассмотрим суточные наблюдения с 14 ч 14 августа до 15 ч 15 августа 1980 г. (табл. 2.12). Период наблюдений характеризовался слабым ветром С, СВ и СЗ направлений, незначительным волнением ($1 \div 2$ балла) или штилем, слабыми и неустойчивыми течениями. Основные периоды ветровых волн $-1,35 \div 1,4$ с; двухслойное течение компенсационного типа — на глубинах $0 \div 2$ м южных направлений ($180^\circ \div 190^\circ$), на глубинах $3 \div 4$ м — северо-северо-восточного направления ($0^\circ \div 90^\circ$). Ветровой дрейф поверхностного слоя по специальному сигнальному поплавку характеризовался регулярно повторяющимися периодами (частотами):

τ , с	10	25	42	50	$68 \div 72$
f , Гц	0,06	0,04	0,02	0,02	0,014

Таблица 2.12

Метеообстановка на оз. Красном 14–15.08 1980 г.

Время наблюдения		Ветер, направление, скорость	Облачность, балл	Температура воздуха, °С	Атмосферное давление, мб
14.08.80	2 ч	Штиль	10	—	—
	8 ч	СВ, $2 \div 4$ м/с	10	14,9	1009,0
	14 ч	С, $1 \div 2$ м/с	4	18,5	1011,7
	20 ч	СВ, $1 \div 2$ м/с	0	17,5	1013,3
15.08.80	2 ч	Штиль	0	11,6	1006,4
	8 ч	ССЗ, $0 \div 1$ м/с	0	11,9	—
	14 ч	ССВ, 2 м/с	8	16,1	1017,4
	20 ч	ССВ, 1 м/с	2	14,9	1018,0

Наблюдениями отмечено, что при появлении на осциллограмме колебаний $\Delta\phi$ с периодом $20 \div 30$ с субъективно ощущается дуновение легкого ветра (ранее это был штиль), причем зондирующее устройство фиксирует появление этих колебаний раньше, чем наблюдатель ощутит на себе порыв ветра. Поверхностное волнение $1 \div 2$ балла сопровождается генерированием учащенных внутрислойных колебаний $\Delta\phi$, которые достоверно регистрируются приборами на глубине 2 м. Освещение поверхности воды солнцем при очищении неба от облачности сопровождалось внезапным появлением на диаграмме короткопериодных пульсаций (5, 10 и 15 с) со сдвигом кривой записи в отрицательную область.

“Реперная характеристика пульсаций поля $\Delta\phi$ ” получена спектральной оценкой их в штилевую погоду (с 01 ч 20 мин до 01 ч 36 мин и с 01 ч 37 мин до 02 ч 35 мин). Следует отметить, что для сглаживания спектра $S(\omega)$ в отдельных участках осциллограммы и для выявления максимума энергии спектральной плотности на отдельных частотах в программе СПБОГОИН применялись специальные фильтры. Анализ пучка кривых из восьми “реперных спектров” мелкомасштабных флуктуаций $\Delta\phi$ (рис. 2.65–2.69) показывает, что средний наклон их на первом низкочастотном участке равен примерно “–3”, а на втором высокочастотном — “–5/3” (рис. 2.65,а). Штилевой период характеризуется так называемым инерционным интервалом турбулентности, где преобладают силы плавучести; здесь существует большая вероятность того, что убывание энергии идет по “степенному закону с показателем –11/3”. Отметим, что роль параметров математической фильтрации функций спектральной плотности существенна, так как с их применением вид плавно спадающей пульсирующей кривой спектра по закону распределения, близкому к “–11/5”, дает иную картину распределения с четким максимумом энергии на частоте 0,05 рад/с (см. рис. 2.65,а и рис. 2.66,в и г).

Далее рассмотрим моменты распределения $S(\omega)$ в периоды, отличающиеся от штилевого:

Утренний период (4 ч 46 мин ÷ 5 ч 55 мин и 5 ч 55 мин ÷ 6 ч 09 мин), погода штилевая, наклон кривой распределения $S(\omega)$ равен “–11/3”; за счет фильтрации выделен максимум на частотах 0,065 ÷ 0,1 рад/с (90 ÷ 62,8 с). Позднее утро (7 ч 18 мин ÷ 7 ч 44 мин и 8 ч 20 мин ÷ 10 ч 13 мин), слабый порывистый ветер, слабое течение на глубине 1,5 м, волнение 1 ÷ 2 балла; наклон пучка кривых $S(\omega)$ варьирует от “–11/5” до “–5/3”. Таким образом, с усилением даже слабого и неустойчивого ветра убывание энергии пульсаций $\Delta\phi$ идет не по закону “–11/3” (как при штиле), а в пределах “–11/5 или –5/3”, что очень хорошо согласуется с данными по турбулентной диффузии в море [Монин, Озмидов, 1981]. Все это приводит к допущению значительной роли микроструктуры поля флуктуаций $\Delta\phi$ и вихревых или нелинейных колебаний внутренних волн в формировании спектра $S(\omega)$, которые могут “переносить” микропульсационные скачки $\Delta\phi$ из тонкоструктурных слоев в более однородные (см. рис. 2.47, 2.48).

Дневной период (11 ч 00 мин ÷ 14 ч 19 мин), устойчивый ветер 1 ÷ 2 балла, наклон кривой распределения $S(\omega)$ соответствует “закону –5/3 или –11/5”, но за счет фильтрации выделен участок спектрограммы в виде “плато” (0,00 ÷ 0,01 ÷ 0,05 рад/с) (см. рис. 2.69).

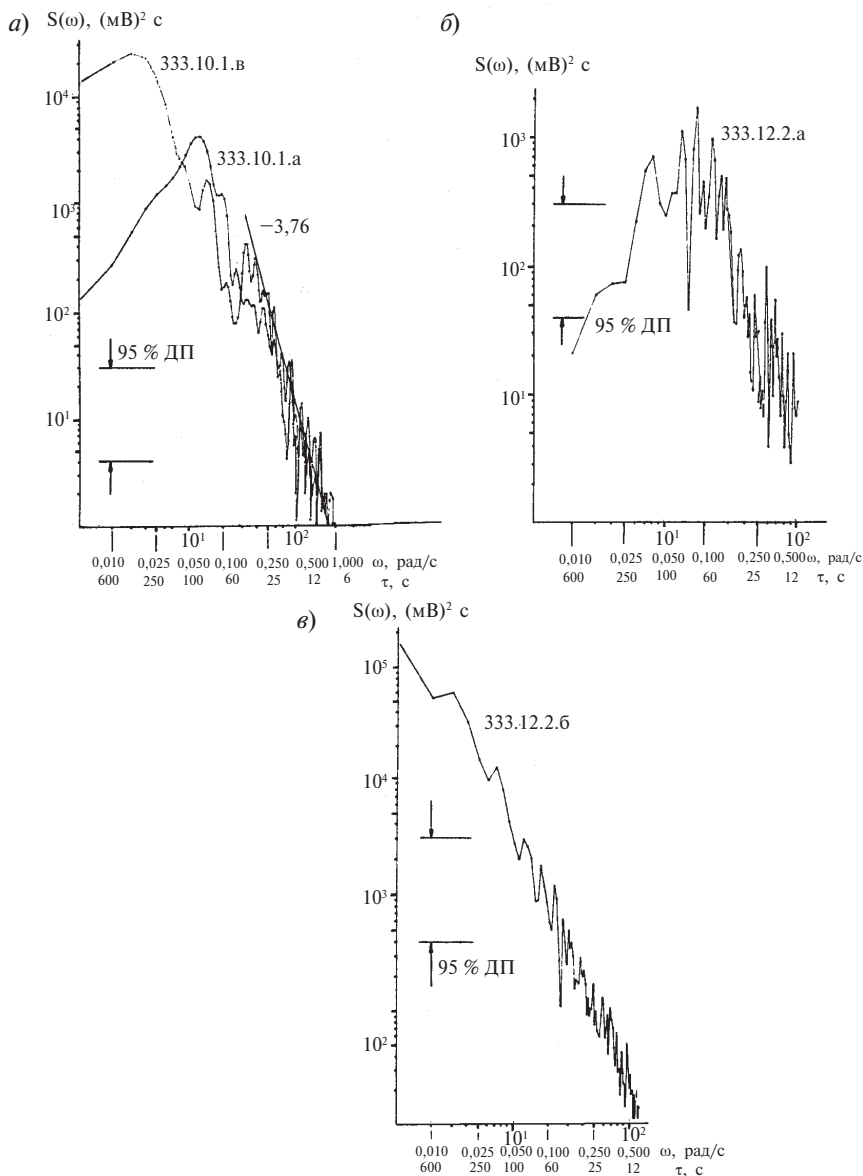


Рис. 2.65. Энергетические спектры $S(\omega)$ флуктуаций электрического поля в слое 2 ÷ 3 м в штелевой период 14–15 августа 1980 г.:
 а — ночное время 01:20 ÷ 02:35. Реперные спектры в группе из 8 спектров;
 б — раннее утро 04:07 ÷ 04:45; параметры фильтра: Delta = 35; $p = 5$; в — раннее утро 04:07 ÷ 04:45; параметры фильтра: Delta = 35; $p = 2$

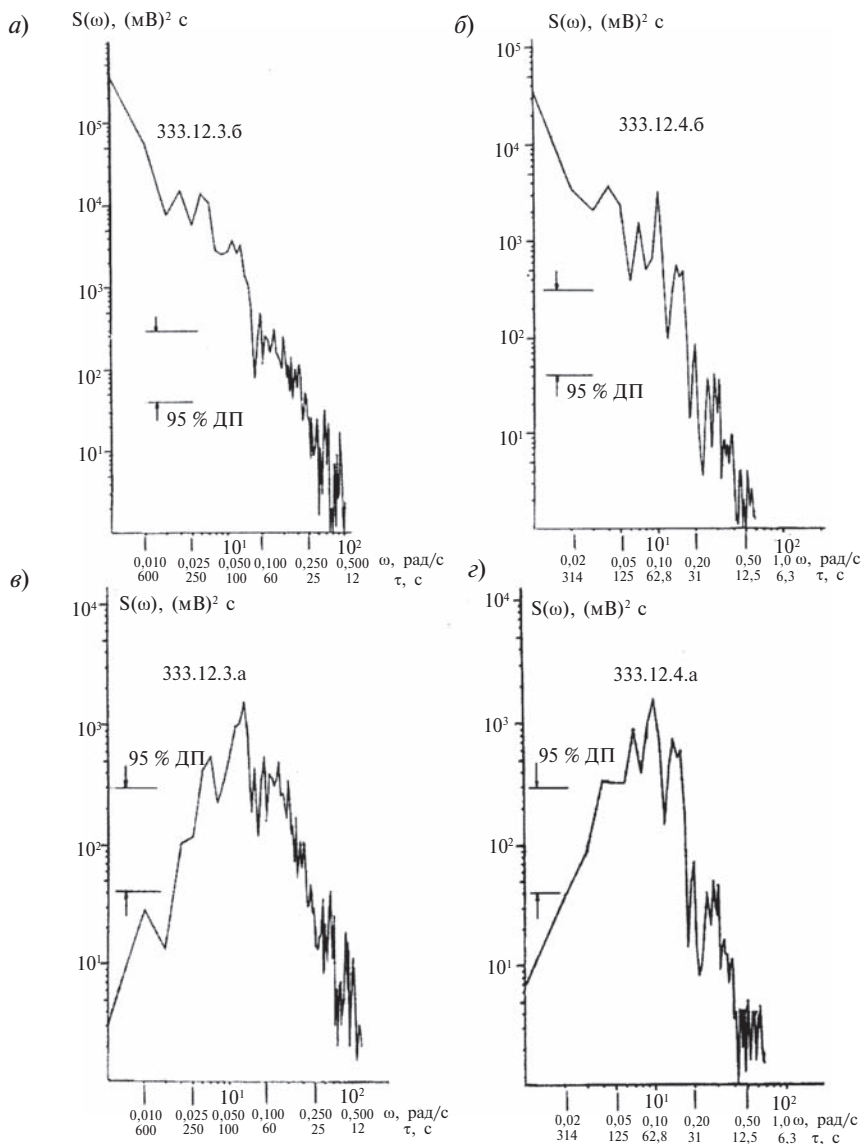


Рис. 2.66. Энергетические спектры $S(\omega)$ флуктуаций электрического поля в слое 2 ÷ 3 м. Раннее утро 15 августа 1980 г.:

а — штиль, время 04:46 ÷ 05:55; параметры фильтра: $\Delta = 35$; $p = 2$; б — переход от штиля к слабому ветру, время 05:55 ÷ 06:09; параметры фильтра: $\Delta = 35$; $p = 2$;
 в — штиль, время 04:46 ÷ 05:55; параметры фильтра: $\Delta = 35$; $p = 5$; г — переход от штиля к слабому ветру, время 05:55 ÷ 06:09; параметры фильтра: $\Delta = 35$; $p = 5$

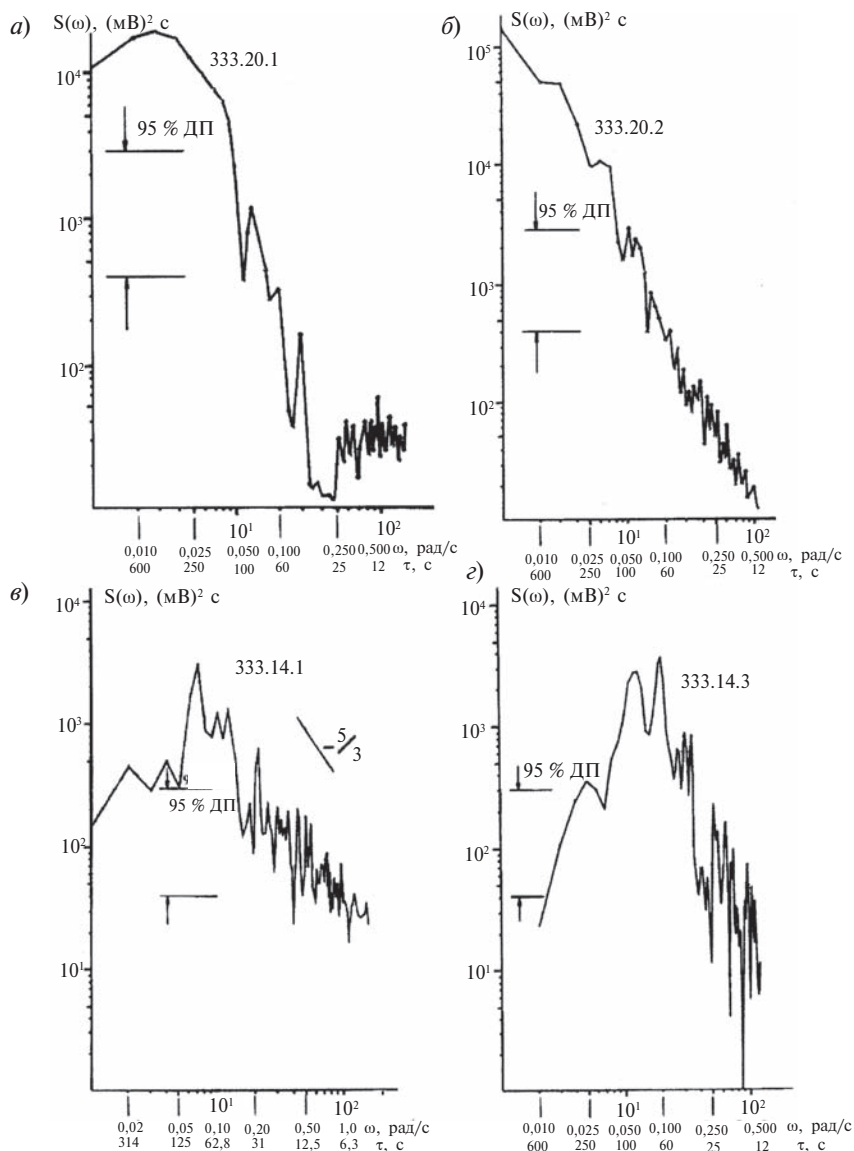


Рис. 2.67. Энергетические спектры $S(\omega)$ флуктуаций электрического поля в слое 2 ÷ 3 м при слабом порывистом ветре. Позднее утро 15 августа 1980 г.:

a — время 07:18 ÷ 07:44; параметры фильтра: Delta = 35; $p = 2$; *б* — время 07:44 ÷ 08:07; параметры фильтра: Delta = 35; $p = 2$; *в* — время 08:20 ÷ 08:45; параметры фильтра: Delta = 35; $p = 5$; *г* — время 08:58 ÷ 09:23; параметры фильтра: Delta = 35; $p = 5$

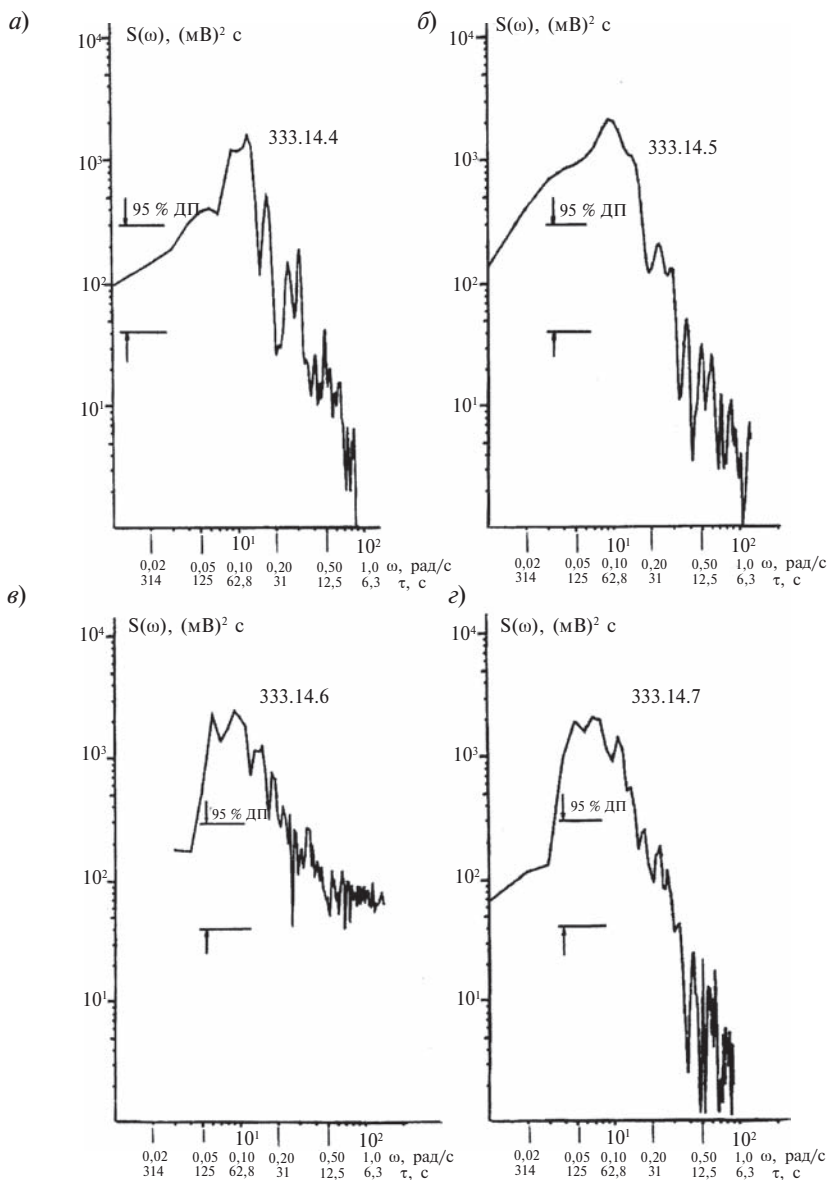


Рис. 2.68. Энергетические спектры $S(\omega)$ флуктуаций электрического поля в слое 2 ÷ 3 м при слабом порывистом ветре. Позднее утро 15 августа 1980 г. *а* — время 09:23 ÷ 09:38; *б* — время 09:38 ÷ 09:46; *в* — время 09:46 — 09:55; *з* — время 09:55 ÷ 10:13. Параметры фильтра: $\Delta=35$; $p=2$

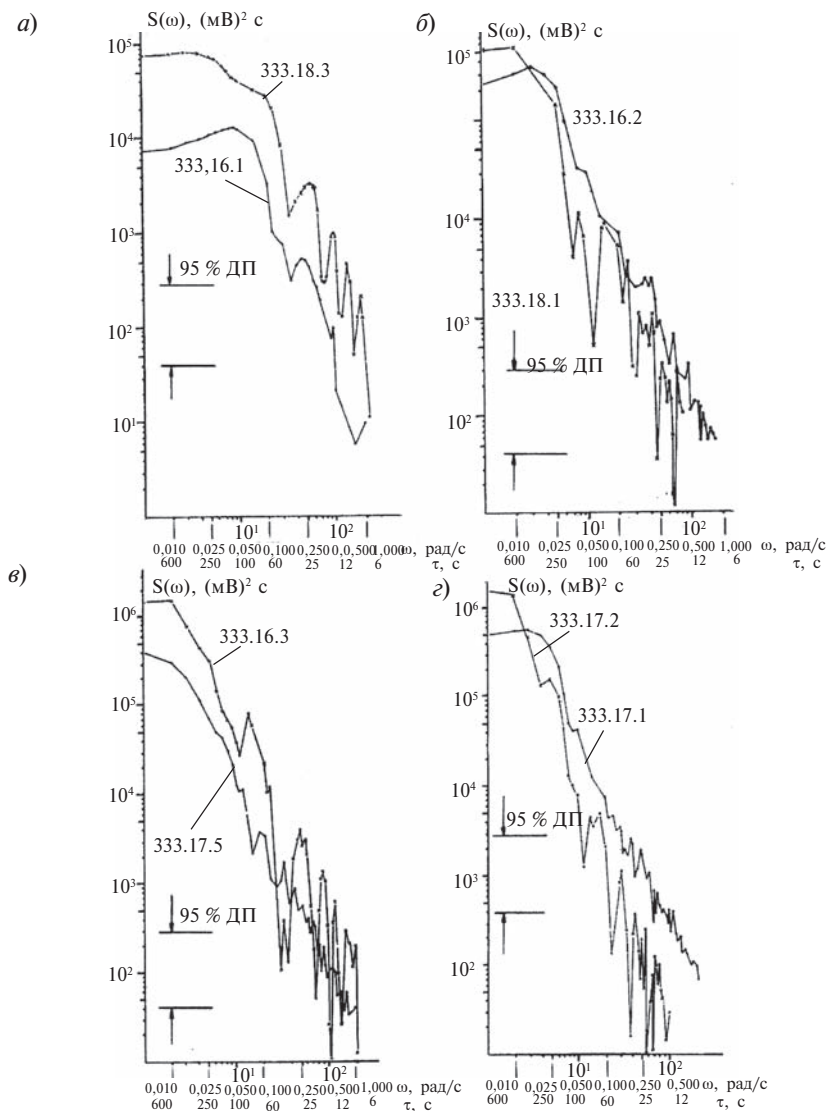


Рис. 2.69. Энергетические спектры $S(\omega)$ флуктуаций электрического поля в слое 2 ÷ 3 м днем при устойчивом ветре 1 ÷ 2 балла 15 августа и в вечернее время 14 августа 1980 г.:

a — время 11:00 ÷ 11:08 (спектр 333.16.1), время 17:46 ÷ 17:54 (спектр 333.18.3);
б — время 11:08 ÷ 11:30 (спектр 333.16.2), время 16:38 ÷ 17:06 (спектр 333.18.1);
в — время 11:30 ÷ 12:08 (спектр 333.16.3), время 13:51 ÷ 14:19 (спектр 333.17.5);
з — время 12:14 ÷ 12:34 (спектр 333.17.1), время 12:34 ÷ 13:16 (спектр 333.17.2)

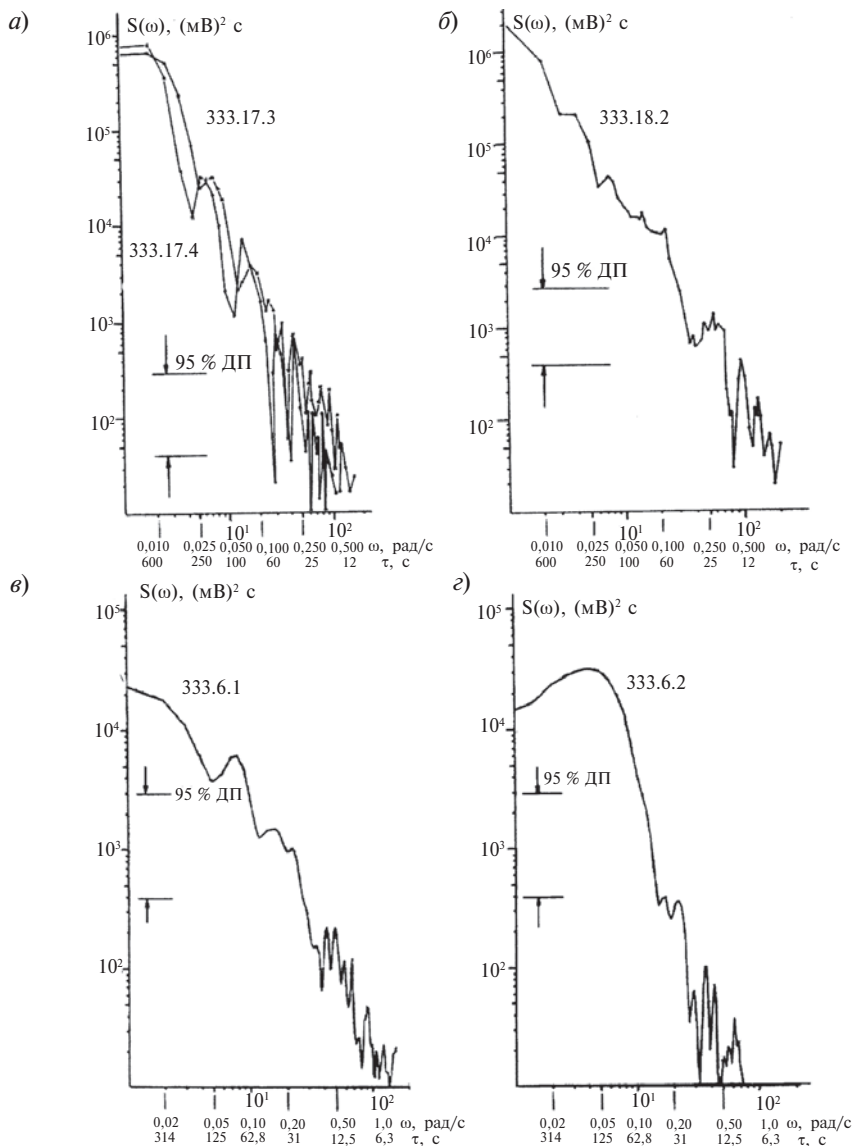


Рис. 2.70. Энергетические спектры $S(\omega)$ флуктуаций электрического поля в слое 2 ÷ 3 м во второй половине дня при устойчивом ветре 1 ÷ 2 балла 14 августа 1980 г.:

a — время 13:16 ÷ 13:26 (спектр 333.17.3), время 13:26 ÷ 13:57 (спектр 333.17.4);
б — время 17:06 ÷ 17:40 (спектр 333.18.2); *в* — время 19:05 ÷ 19:20 (спектр 333.6.1); *з* — время 19:20 ÷ 19:23 (спектр 333.6.2)

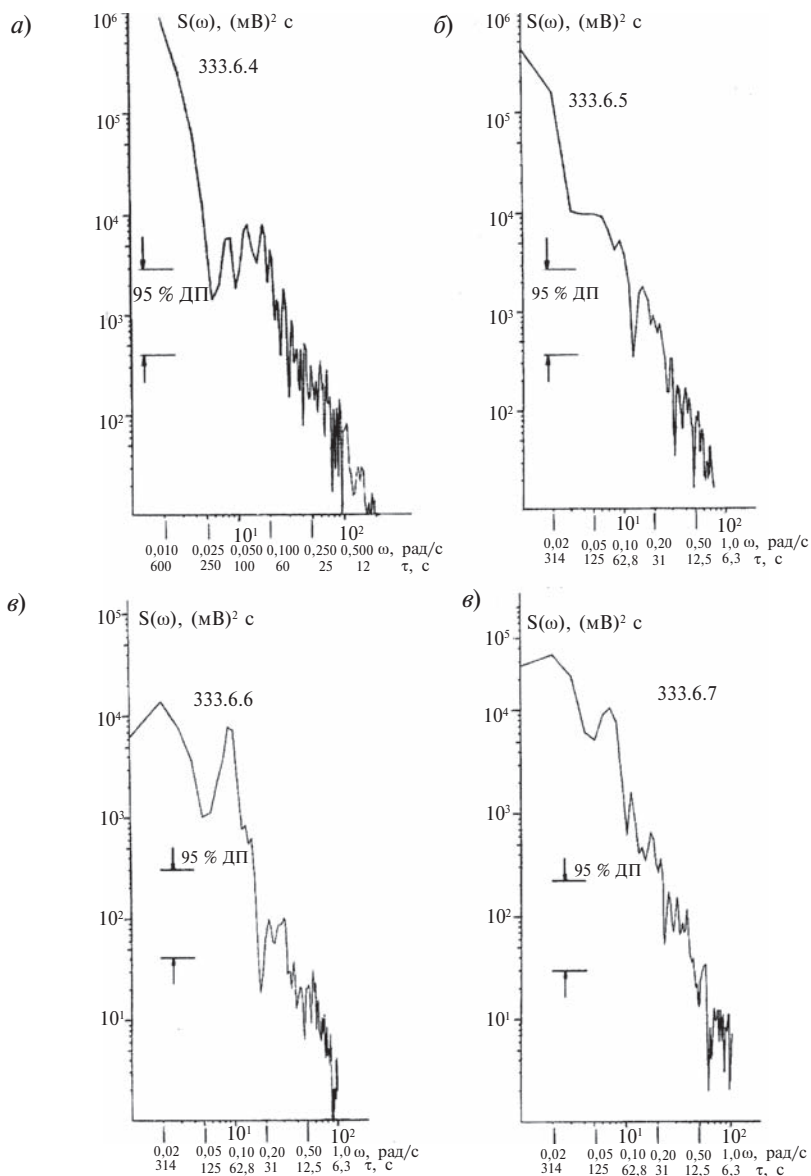


Рис. 2.71. Энергетические спектры $S(\omega)$ флуктуаций электрического поля в слое $2 \div 3$ м во второй половине дня при устойчивом ветре $1 \div 2$ балла 14 августа 1980 г.:

а — время $19:49 \div 20:10$ (спектр 333.6.4); б — время $20:10 \div 20:20$ (спектр 333.6.5); в — время $20:21 \div 20:32$ (спектр 333.6.6); г — время $20:32 \div 20:44$ (спектр 333.6.7)

Вечерний период 14.08.80 (15 ч 27 мин ÷ 20 ч 44 мин), переменная метеобстановка со слабым ветром. Обработано 10 осциллограмм, для которых средний наклон пучка кривых спектральной плотности флуктуаций $\Delta\phi$ делится на два участка: первый с наклоном $S(\omega)$ в пределах “ $-4 \div -5/3$ ”, второй в пределах “ $-11/3 \div -11/5$ ”. В трех случаях имеется промежуточный участок с “плато” в полосе частот $0,03 \div 0,2$ рад/с (19 ч 49 мин ÷ 20 ч 32 мин). Здесь прослеживается более крутой спад энергетического спектра, что характерно именно для такого инерционного интервала, где преобладают силы вязкости (рис. 2.70, 2.71). Аналогичные результаты были получены другими методами исследования океанической турбулентности [Монин, Озмидов, 1981].

Анализируемые спектрограммы флуктуаций $\Delta\phi$ для двух типов погодных условий (штиль или слабый ветер) охватывают диапазон $0,01 \div 1,0$ рад/с ($\approx 600 \leq \tau \leq 6$ с). Четко выделяются пределы максимумов и минимумов $S(\omega)$ в рад/с:

$S(\omega)$ max	Пределы	$S(\omega)$ min	Пределы
I	$0,015 \div 0,025$	I	$0,04 \div 0,05$
II	$0,05 \div 0,08$	II	$0,07 \div 0,15$
III	$0,08 \div 0,1$	III	$0,25 \div 0,4$

Впервые по электрополюметрическим данным на большом статистическом материале обнаружен так называемый “*микрометеорологический максимум*” в флуктуациях электрического поля, который соответствует периоду колебаний около 1 мин (табл. 2.13). Анализ спектрограмм и таблицы показывает, что частотный диапазон положения микрометеорологического максимума в спектре флуктуаций $\Delta\phi$ не постоянен. Несмотря на то, что он близок к частоте $0,1$ рад/с (≈ 60 с), и это соответствует как теоретическим, так и наблюдаемым величинам в метеорологической практике, сдвиг по его частотной шкале связан с состоянием среды. Именно в длительный штилевой период ночью положение максимума в среднем около частоты $0,06$ рад/с, в вечерний период и ранним утром при слабом ветре — около $0,09$ рад/с и, наконец, при переходе к дневному периоду с усилением ветра сдвигается к $0,1$ рад/с и к более высоким частотам.

**Положение микрометеорологического максимума на основной энергонесущей частоте в спектре флуктуаций электрического поля в оз. Красном
14–15 августа 1980 г.**

Шифр спектрограммы и время наблюдения	Частота ω , рад/с	Период τ , с	Частота f , Гц
<i>Ночной период</i> 01 ч 20 мин ÷ 01 ч 36 мин			
333.10.1	0,095	63	0,015
333.10.1 а	0,06	105	0,010
333.10.1 б	0,09	70	0,014
333.10.1 в	0,07	90	0,012
333.10.1 г	0,08 ÷ 0,15	79 ÷ 42	0,013 ÷ 0,025
333.10.1 д	0,07	90	0,012
333.10.1 е	0,06	105	0,010
<i>Ранний утренний период</i>			
333.12.2. а,б 04.07 ÷ 04.45	0,09	70	0,014
333.12.3. а,б 04.46 ÷ 05.55	0,07	90	0,012
333.12.4. а,б 05.55 ÷ 06.09	0,10	62	0,016
<i>Позднее утро</i>			
333.14.1 08.20 ÷ 08.45	0,07 (0,2)	90 (31)	0,012 (0,03)
333.14.3 08.58 ÷ 09.23	0,10	62	0,016
333.14.4 09.23 ÷ 09.38	0,12	52	0,019
333.14.5 09.38 ÷ 09.45	0,09	70	0,014
333.14.5 09.46 ÷ 09.55	0,1	62	0,016
333.14.7 09.55 ÷ 10.13	0,11	57	0,018
<i>Дневной период</i>			
333.16.3 11.30 ÷ 12.08	0,065	97	0,010
333.17.2 12.34 ÷ 13.16	0,08	78	0,013
333.17.3–333.17.4 13.16 ÷ 13.57	0,1	62	0,016

Шифр спектрограммы и время наблюдения	Частота ω , рад/с	Период τ , с	Частота f , Гц
Вечерний период 14.08.80			
333.1.1 15.27 ÷ 16.27	0,04	157	0,006
333.18.1 16.38 ÷ 17.06	0,08	78	0,013
333.18.3 17.46 ÷ 17.54	0,1	62	0,016
333.6.1 19.05 ÷ 19.20	0,08	78	0,013
333.6.2 19.20 ÷ 19.23	0,17	37	0,027
333.6.4 19.49 ÷ 20.19	0,09	70	0,014
333.6.6 20.21 ÷ 20.32	0,09	70	0,014
333.6.7 20.32 ÷ 20.44	0,07	97	0,012

Таким образом, четкое выделение микрометеорологического максимума во флуктуациях $\Delta\phi$ в “трофогенном слое” естественно связать с ветровым или атмосферно-электрическим возмущением градиента потенциала поля в приводном слое. Такие флуктуации в биологически активных слоях могут являться отражением эффекта трибополяризации и кавитации в переходном слое вода—воздух, но не исключена и их гидромеханическая природа, поскольку их вихревые пульсации аналогичных частот отмечены автором и ранее на Ладожском озере (1985, 1992 гг.). По характеру структуры спектров $S(\omega)$ с их попеременной группировкой то подъема энергии, то ее спада, можно сделать заключение о том, что динамическое воздействие ветра как бы “порывами”, “порциями” достигает больших глубин в озере или море. О таких “гидродинамических порывах” еще в 1930-х годах образно писал Роун [Sharp, 1969], моделируя гидромеханические задачи (см. разд. 2.3). Следует отметить, что представленные на спектрограммах $S(\omega)$ частоты колебаний поля $\Delta\phi$ явно и всецело не связаны с колебаниями только поверхностных волн, у которых основной период составлял $1 \div 1,4$ с, а также и то, что турбулентность в воде существует даже при штиле. В слоях $1 \div 2$ м и $2 \div 3$ м (это наиболее насыщенные планктоном слои) обнаружен

частотный интервал в диапазоне $8 \div 300$ с ($3 \cdot 10^{-3} \div 0,125$ Гц), характеризующийся относительно высоким уровнем энергии движения, а в отдельных случаях — куполообразным подъемом спектральных кривых. Этот результат согласуется с данными для верхнего слоя океана. Зарегистрированные различными методами (термометрическими, акустическими, кондуктометрическими) закономерности распределения максимумов плотности энергии турбулентных пульсаций в интервале частот $0,06 \div 0,1$ Гц многие исследователи связывают с существованием колебаний на тонких градиентных прослойках с резкими локальными градиентами плотности воды по вертикали. Такое явление может быть обусловлено также и более высокочастотными резонансными гидродинамическими колебаниями волновых компонент в периодах $8 \div 10$ с, где выполняется закон “ $-5/3$ ” [Колесников, Пантелеев, 1975].

Наблюдавшееся в Красном озере повышение уровня энергии в интервале $40 \div 60$ с можно объяснить интенсивным притоком энергии за счет ее потерь при взаимодействии с приводным слоем атмосферы. В этом интервале происходит энергоснабжение мелкомасштабных флуктуаций $\Delta\phi$. Как видно по данным, представленным на рисунках, с дальнейшим ростом частоты происходит закономерный спад кинетической энергии турбулентных пульсаций в соответствии с известными механизмами передачи энергии по каскаду вихрей. В низкочастотной области спектра первый минимум является нижним пределом возможных внутриводных пульсаций и составляет ≈ 100 с для “трофогенных слоев”. С уменьшением градиентов $\Delta\phi$ (ближе к дну или к поверхности воды относительно таких биоактивных слоев)

предел $S(\omega)_{\min}$ смещается в область $4 \div 5$ мин. Таким образом, основной энергообмен идет в интервале частот, характерных для микрометеорологического максимума. Исходя из общей концепции взаимодействия электрофизических явлений в системе солнечно-земных связей, автор также не исключает вероятности электризации водоема за счет непосредственного проникновения пульсирующих электрических полей в воду через волноводный слой атмосфера—Земля, особенно в частотном диапазоне шумановского резонанса.

Подведем итоги обобщенных результатов, рассмотренных в разд. 2.

На основе многолетних исследований динамических процессов в озерах автором обосновано положение о фундаментальной значимости метода электрополюметрии для решения задач гидрофизики. В частности, функции спектральной плотности энергии электрических полей, обусловленных волнением, турбулентностью и вихревыми цепочками в неограниченной полосе частот флуктуаций, позволяют

выявить закономерности энергомассообмена практически в любой точке водоема.

Обнаруженный при анализе разнообразный и богатый спектр водных пульсаций $\Delta\phi$ в ультранизкочастотном диапазоне наблюдается также и в других естественных процессах, в частности нейрофизиологических, где он соответствует дельта-диапазону. Проводя некоторые аналогии, можно в спектре $S(\omega)$ выделить медленноволновую, “патологическую активность водоема”. Максимум энергии спектра в области нулевых частот свидетельствует об инертном состоянии водоема, отсутствии интенсивных гидродинамических флуктуаций, замедленном водообмене. В этом заключается информационная роль электрического поля акваторий. Однако состояние относительного покоя занимает лишь определенную часть в непрерывном флуктуирующем процессе. Поэтому полученные результаты анализа исключительно важны для оценки ответной реакции озерных экосистем на воздействия различных гидродинамических и атмосферных явлений. В разные периоды суток в соответствии с синоптической ситуацией развитие и затухание активности водоема подчиняются разным закономерностям (закону “ $-11/3$ ” в штилевую погоду и закону “ $-5/3 \div -4$ ” при других метеословиях). В перспективе возможна классификация гидрофизического состояния водоема, характеризующая спектральной структурой электрического поля.

Интенсивность кавитационных эффектов может быть опосредованно показана интенсивностью акустических колебаний, которые при мощности 1 Вт/см^2 могут вызывать сонолюминесценцию [Маргулис, 1984]. При схлопывании пузырьков происходят ионизация различных веществ и образование радикалов ионов, а это вызывает изменения электрического импеданса системы электрод—жидкость [Эльпинер, 1973].

Результаты детального изучения гидродинамических неоднородностей в стационарных течениях на больших глубинах озер, в проливах и устьях рек открывают новые возможности в гидрологической науке. Электрополюметрия как новый гидрофизический метод исследования становится ведущим по информативной значимости в гидрологии и даст количественные характеристики при обеспечении военной радиотехники, средств поиска подводных целей и в рыбопромысловых работах.

Дана оценка электрических полей течений в открытых озерах, проливах и устьях рек. На основе конкретных значений потенциала

(или его градиента) проведена классификация видов распределения его по глубине для различных участков озерной котловины.

Проанализированы результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик и ритмов гидродинамических колебаний на поверхности акваторий и в глубинах озер. Рассмотрены уникальные данные по синхронной регистрации волновых колебаний поверхности и флуктуаций электрического поля в стационарных условиях. Показана высокая взаимная корреляция гидродинамических и электрических колебаний для периодов 0,7 и 1,4 с (периоды ветровых волн), а также неоднозначность интерпретации взаимного энергетического спектра, поскольку центральная энергонесущая частота 0,7 Гц обусловлена регулярной частью волнения, а другие частоты могут быть связаны и с резонансными частотами геомагнитных микропульсаций (0,6 и 1,22 Гц).

Сделан вывод о необходимости проведения синхронного эксперимента по регистрации минимум трех геофизических явлений — флуктуаций магнитного, электрического и гидродинамического (волнового) полей в унифицированной системе регистрации в частотном диапазоне $0 \div 14$ Гц. Это позволит точнее оценить роль флуктуаций электрического поля гидродинамической природы, которое в данном случае рассматривается как помеха для радиолокационной техники.

Дана расчетная оценка аномального магнитного поля, связанного с максимально возможным волнением в крупном озере Северо-Западного региона России. Эта величина ($5 \cdot 10^{-7}$ нТл) пока недоступна измерению полевыми магнитометрами. Показана роль трибополяризационного и кавитационного эффектов в поверхностной пленке воды, которые вносят дополнительные сложности в интерпретацию электрического сигнала, связанного с волнением, но в то же время эти эффекты демаскируют кильватерный след корабля и расширяют методические возможности электрополюметрии при ее использовании в задачах поиска подводных целей.

В результате использования новых средств измерения гидрофизических характеристик водоемов (электрополюмер “Вихремер”, пьезокерамический турбулиметр, термометр, гидроакустический зонд) получены данные, позволившие установить ряд закономерностей в распределении энергии флуктуаций электрического потенциала (градиента), генерируемого внутриводным гидродинамическим источником. Спектральные функции распределения

плотности энергии электрического поля в полосе СНЧ-колебаний для Ладожского и Красного озер дали возможность охарактеризовать степень гидродинамической возмущенности среды. В биологически активном слое ($2 \div 3$ м) в штилевую погоду распределение энергии поля соответствует “степенному закону с показателем $-11/3$ ” при других метеорологических ситуациях этот показатель варьирует от “ $-5/3$ до -4 ”*. Впервые по электрополеметрическим данным на большом статистическом материале обнаружен микрометеорологический максимум в флуктуациях электрического поля. Максимум соответствует периоду колебаний около 1 мин, но положение его в энергетическом спектре не постоянно, а сдвигается по частотной шкале в зависимости от состояния среды. В перспективе возможна классификация гидрофизического состояния водоема, характеризуемого спектральной структурой электрического поля. Найденные закономерности не противоречат данным по морским акваториям, полученным другими методами (термометрическим, акустическим, кондуктометрическим). Наиболее перспективны полученные сведения о закономерностях флуктуаций электрического поля в биоактивных (трофогенных) слоях акваторий. Именно они определяют пространственно-временную структуру водных экосистем, физиологическое взаимодействие между гидробионтами, формируют “экологические ниши”. Гидробиологическая наука получает новый объективный метод исследования для оценки продуктивности обширных и многочисленных водоемов суши.

*Выявленный показатель степени закономерности распределения пульсаций турбулентного процесса в глубинах водоемов характерен для так называемых Колмогоровских спектров, или Колмогоровского закона пяти третей [Хасельман, 1968; Красицкий, 1974] (см. [Монин, 1981]).

2.5. ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

- 2.5.1. Электрокинетические явления в биоактивной функциональной зоне водоемов**
- 2.5.2. Пелагические гидробионты — пространственно-временной источник электрокинетических полей акваторий**
- 2.5.3. Магнитобиологическая концепция двигательной активности и вертикальной миграции планктона**
- 2.5.4. Электромагнитные характеристики среды обитания и физиологические реакции водных животных**

Одна из главнейших задач освоения акватории состоит в обеспечении условий сохранения экологического равновесия в окружающей среде. Решению этой задачи могут способствовать проведенные и планируемые исследования электромагнитных взаимодействий среды обитания с живыми ее обитателями. Основу таких взаимодействий определяют электрические и магнитные поля водных экосистем и контактирующие с ними поля атмосферы и литосферы. Поэтому в течение последних 30 лет изучались электрические поля гидробионтов, восприятие ими гидрофизических полей пресноводных и морских экосистем и внешних геомагнитных воздействий. Подчеркнем, что в физиологической науке существенная роль отводится геофизическим факторам, ответственным за эволюцию электросенсорных органов, за поведенческие и нейрональные реакции у низших и высших животных. Значительные успехи в этом направлении достигнуты при электрофизиологических исследованиях рыб и разработке ряда теоретических вопросов электрогенеза живых систем на примере одноклеточных и многоклеточных организмов.

Настоящая глава посвящена актуальной проблеме установления взаимосвязи и взаимодействия водных экосистем с электромагнитными полями Земли. Программа исследований по этой проблеме была разработана автором в результате современного осознания и переосмысления роли геомагнитных и космических воздействий в биосфере Земли в свете учения В.И. Вернадского и А.Л. Чижевского.

В результате целенаправленных полевых исследований в озерах и морях были выявлены корреляционные связи биоэлектрических полей планктонных организмов с элементами геомагнитного поля,

установлено, что периодичность внутрисуточных вертикальных перемещений зоопланктона (“трофогенный слой водоема”) соответствует геомагнитным ритмам. Показано также, что пороговая зона восприятия гидробионтами электрического и магнитного полей низкой интенсивности соизмерима с величиной “критерия условного нормального поля” водоема (см. с. 134, 233, 274, 315, 669).

2.5.1. Электрокинетические явления в биоактивной функциональной зоне водоемов

Поскольку для многих исследователей основными биологическими объектами, способными дать информацию о взаимодействиях в биосфере, послужили водные организмы, мы рассмотрим ряд примеров генерации электрического поля гидробионтами.

Все обитатели водоемов — от бактериопланктона до млекопитающих — являются не только электросенсорными компонентами экосистем, но и источниками биоэлектрических и биомагнитных полей. Многие жизненные функции гидробионтов — ориентация, локационное общение, адаптивное поведение — реализуются путем обмена электрическими сигналами с внешней средой. Изучение механизма взаимодействия электрического поля организмов с электрическими полями водной экосистемы представляет одну из актуальных задач не только экологии и биофизики, но и биотехнологии и биоинформатики, поскольку речь идет о раскрытии роли электрических и магнитных полей в жизнедеятельности гидробионтов и о разработке путей управления биоресурсами водоемов. Чувствительность гидробионтов к электромагнитным полям среды обитания, их реакции на изменения фоновых характеристик этих полей в настоящее время пытаются использовать в практических нуждах рыболовства и в аквакультуре.

Электромагнитное поле Земли и околоземного пространства на протяжении эволюции планеты способствовало формированию биосферы и ее изменению. Поскольку гидробионты являются источниками собственных электромагнитных полей, мы рассматриваем гидросферу и геомагнетизм как взаимосвязанные элементы биосферы — единую среду обитания гидробионтов. В свою очередь гидробионты являются индикаторами этого экологического единства.

Большинство исследователей отмечают, что достаточно хорошо изучены электрические свойства пресноводных и морских рыб, способных генерировать электрические разряды, а возможности генерировать и воспринимать электрические поля основной массой неэлектрических рыб (рыб, не имеющих электрорецепторов)

изучены недостаточно. В электрическом поле, генерируемом рыбой, многократно измеряли потенциалы, обусловленные действием различных органов [Барон и др., 1978; 1980; Басов, 1985], поэтому стало возможным выделить следующие компоненты из суммарного эффекта: квазипостоянное поле, дыхательный потенциал и переменное поле за счет двигательной активности. Так, в работе [Броун, Ильинский, 1984] были определены динамические характеристики макроскопических квазипостоянных ЭП рыб разных экологических групп, при этом рыбы имели возможность свободно перемещаться, а биполярное отведение потенциалов производилось дистанционно на расстоянии 10 см от особи. У пресноводных неэлектрических рыб разных видов амплитуды полей колебались в пределах $60 \div 440$ мкВ, а периоды сигналов от 8,5 до 25 с, причем характеристики поля отличались от миограмм и дыхательных ритмов и лежали в пределах милливольтового диапазона на расстояниях $0,5 \div 1$ см от особи. Регистрируемый сигнал имел синусоидальную форму (так как регистрировалась вторая производная от потенциала Φ при движении рыбы) в аквариуме, что характерно для любого источника электрического поля дипольного типа. Полярность биодиполя, обусловленного знаками потенциалов в ростральной и каудальной частях тела рыб, характеризует вид начальной и конечной фазы постоянного компонента при движении. Есть предположение, что для рыб их собственные квазипостоянные биоэлектрические поля являются одним из элементов эколого-информационного комплекса раздражителей. Это подтверждается тем, что максимум чувствительности рыб, имеющих специализированные электрорецепторные структуры, лежит именно в области постоянных и медленно меняющихся электрических полей [Барон и др., 1978; Броун, Ильинский, 1984].

По данным [Данюлите, 1974; Данюлите и др., 1983], постоянное поле (потенциал на расстоянии 1 мм от поверхности тела) у костистых рыб достигает 500, а у акул и скатов 50 мкВ; градиент потенциала у морской камбалы, карликового сомика и карася ($3 \div 4$ см) достигает величины примерно 200, 250 и 50 мкВ соответственно при расстоянии от рыбы $0,5 \div 1$ см. С увеличением длины и излучающей поверхности объекта амплитуда сигнала растет практически пропорционально.

В результате того, что квазипостоянные потенциалы рыб модулируются дыхательными ритмами, импульсными разрядами, мышечными сокращениями, биополе рыбы оказывается достаточно переменным. В эксперименте регистрируется суммарный эффект. Некоторые авторы [Барон и др., 1978; 1980; Басов, 1985] полагают,

что квазипостоянное электрическое поле исследованных рыб обладает четкой пространственной конфигурацией с потенциалами, значительно превышающими по величине потенциалы мышечного происхождения. Силовые характеристики этого поля они предлагают аппроксимировать системой из двух взаимно перпендикулярных диполей, моменты которых можно установить равными измеренным экспериментально. Такое представление оказывается полезным при моделировании кооперативных электрических эффектов в стаях рыб, при изучении сигнального значения постоянных электрических полей слабых интенсивностей в экологии рыб [Басов, 1985].

В ряде работ [например, сборник статей “Электрические свойства гидробионтов”, 1980] было показано, что у беспозвоночных и позвоночных морских и пресноводных организмов наряду с квазипостоянным компонентом электрического поля генерируются переменные поля, зависящие от двигательной активности животных. Например, слегка потревоженные крабы и креветки генерируют квазипостоянные потенциалы до 1200 мкВ, а пресноводный американский сомик, елец, трехиглая колюшка, судак — квазиперемежные поля в диапазоне частот $0,03 \div 10$ Гц. Были отмечены потенциалы, коррелирующие с ритмическими сокращениями жаберного аппарата рыб. Источником дыхательных электрических колебаний является постоянная разность потенциалов между полостью рта и наружной поверхностью (кожей) рыб. Квазисинусоидальная форма их зависит от изменения направления внешнего электрического тока между наружной поверхностью и полостью рта с частотой сокращений дыхательного аппарата рыб. Дыхательные ритмы потенциалов называют еще “электропневмограммами”, по которым в какой-то мере можно судить о реакциях организма на изменения биотических и абиотических факторов окружающей среды — света, звука, электропроводимости воды, концентрации кислорода, давления и температуры. Биопотенциалы, связанные с мышечным аппаратом и функционированием внутренних органов, изучены менее подробно, чем дыхательные.

Известные данные о переменных электрических полях рыб характеризуются следующими амплитудно-частотными значениями [Барон и др., 1978; 1980; Басов, 1985; Солуха, 1985]: дыхательные ритмы — $80 \div 50$ мкВ и $0,7 \div 2,6$ Гц; мышечные сокращения — $100 \div 400$ мкВ; желудочно-кишечные сокращения — $100 \div 400$ мкВ и $5 \cdot 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-2}$ Гц; сердечные сокращения — $70 \div 800$ мкВ и $\sim 10^{-1}$ Гц; электрические разряды — $90 \div 2800$ мкВ. Следует отметить, что изменение внешних факторов — температуры воды,

электропроводимости, концентрации биогенных веществ, действия слабых электрических полей интенсивностью $0,1 \div 1$ мкВ/см с частотой $0,5 \div 5$ Гц или $10 \div 15$ мкВ/см независимо от частоты — способствует возникновению специфических электрических и поведенческих реакций рыб. По мнению авторов [Броун и др, 1978; Барон и др., 1978; 1980; Басов, 1985], амплитудно-частотная характеристика разрядов является своеобразным экологическим признаком для объектов, близких по своим жизненно-поведенческим особенностям (способы питания, выбор места обитания, нерестовое поведение и т.д.).

Переменные низкочастотные биоэлектрические сигналы рыб, связанные с их двигательной активностью, автор исследовал в аквариальных условиях с применением многоэлектродной специализированной установки. Значения амплитуд при активных перемещениях особей карпа возраста 1 года (10 экз. одного помета, статистика ≈ 1000 опытов) колебались в пределах $60 \div 220$ мкВ (при поворотах), $20 \div 60$ мкВ (при движениях хвоста), $100 \div 150$ мкВ (изгибание тела), $80 \div 100$ мкВ (активные проплывы), $60 \div 100$ мкВ (опускание—подъем), 120 мкВ (резкие броски), $100 \div 160$ мкВ (беспорядочные движения при гипоксии) и т.д. Сравним с данными о генерации ЭП других источников: нерв лягушки — на расстоянии от него в 12 мм — генерирует 150 мкВ. В районе биологически активных точек человека ЭП относительно Земли на расстоянии 10 см от поверхности тела достигает $2 \div 3$ В, на расстоянии 1 м от груди человека — до 6 мВ, а в 15 см — ≈ 75 мВ. Поле плывущего человека дает изменение градиента $\Delta\varphi \approx 15$ мВ/м [Александров, 1985]. В специальных опытах было обнаружено, что амплитудно-частотная характеристика электрогидродинамических биопотенциалов резко изменяется при воздействии различных ЭМ факторов внешней среды. Поэтому регистрируемый многоэлектродной установкой энергетический спектр двигательной активности рыбы (группы особей) $S(f)$ и соответствующие визуальные наблюдения дают возможность дифференцировать характер поведенческих реакций, что исключительно важно при оценке действия внешних факторов на центральную нервную систему рыб. Кроме того, следует учесть, что при исследовании флуктуаций естественного поля высокочувствительными многоэлектродными установками измеряемые сигналы могут модулироваться за счет электрогидродинамических потенциалов, связанных с движением отдельных рыб или их косяков. Это явление потребует надежного идентифицирования биоэлектрических полей на фоне собственного ЭП акваторий.

С проблемой адаптации живых систем к ЭМ воздействиям связаны чувствительность организма, его уязвимость к изменению всех характеристик поля, в частности ЭМПЗ (напряженности, склонения, наклонения вектора). Этот вопрос хорошо освещен в литературных источниках.

Чувствительность гидробионтов к действию электромагнитных полей среды обитания, их реакции на изменения фоновых электрофизических характеристик воды наиболее полно изучены в ихтиологии.

У большинства рыб градиенты потенциала, необходимые для возникновения первичной реакции, находятся в пределах $10 \div 100$ мВ/см. Однако эта оценка пороговой электрочувствительности, определяемая по первичной реакции животного (вздрагивание при включении электрического тока), оказалась недостаточной, когда были открыты у многих видов морских и пресноводных рыб специальные сенсорные образования — электрорецепторы, предназначенные для восприятия слабых электрических полей в водной среде [Стернин, 1972; Барон и др., 1980; Солуха, 1985]. Пороговая чувствительность электрорецепторов для разных видов рыб находится в пределах $0,01 \div 20,0$ мкВ/см. Поэтому истинная электрическая чувствительность у рыб может быть установлена точно, если она подтверждается поведенческими опытами и электрофизиологическими данными. Для большинства же рыб, не имеющих специализированных электрорецепторов, пороги восприятия постоянных электрических полей составляют в среднем $0,5 \div 100$ мВ/см. Это на порядок меньше чувствительности любой рыбы с электрорецепторами. Пороги рефлекторных реакций при воздействии электрических токов у морских животных на $1 \div 4$ порядка ниже, чем у пресноводных, что связано с высокой проводимостью морской воды. Из пресноводных “неэлектрических” рыб наиболее устойчивы к воздействию тока карповые, форель и щука.

Большую научную и практическую значимость имеют данные о восприятии рыбами электрических и магнитных полей низкой интенсивности. Скаты, например, показали необычайно высокий уровень электрочувствительности ($0,01$ мкВ/см), а также способность к восприятию магнитного поля Земли и его вариаций [Брун, Ильинский, 1978]. Так, градиент потенциала в морской воде в $0,01 \div 1$ мкВ/см позволяет акулам и скатам воспринимать электрическое поле как биологического (поля пищевых объектов, хищников, особей своего вида) [Kalmijn, 1974; 1984], так и физического происхождения (поля течений, волновые и вихревые пульсации, магнитные бури, циклоны). Это играет огромную роль в ориентации и коммуникационной реакции рыб при постоянной изменчивости

внешних факторов. Точная оценка порога восприятия поля невозможна, определить можно только лишь “пороговую зону”, которая оценена как $10^{-2} \div 10$ мкВ/см [Солуха, 1985]. Отсюда возникает необходимость тщательного исследования фоновых характеристик электрических и магнитных полей акваторий. В разделе 2.4.1, например, приведено значение критерия условного “нормального фона” электрического поля Ладожского озера в штилевую погоду — $5 \cdot 10^{-4}$ В/м (5 мкВ/см), т.е. напряженность поля фона входит, таким образом, в диапазон упомянутой выше “пороговой зоны”, в которой проявляются редкие, но сильные ориентировочные акты.* Так, в бухте “Титовское озеро” Баренцева моря воздействие слабых полей в пределах $5 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-2}$ мВ/см вызывало энергичные, ориентированные по направлению силовых линий поля, передвижения сельди во всем пространстве бухты [Стернин, 1972]. Как видно, эти ориентирующие пороговые поля соответствуют фоновым значениям квазипостоянной компоненты, измеренной в Ладожском озере. Это подтверждает положение об эволюционной роли слабых полей в жизни гидробионтов и о выработке рефлекторных поведенческих реакций в ответ на изменения поля.

Любое изменение фона, приводящее к повышению напряженности поля, например, за счет грозы или сейсмической активности Земли может быть отмечено поведенческой реакцией электрочувствительной рыбы (карликовый сомик) — так называемой психометрической функцией гидробионтов. Недаром в период грозы рыбы “уходят” в глубокие части водоемов. В работе [Протасов, 1978] показано, что в районе Волжской ГЭС плотность осетровых рыб в зоне циркуляционных течений ниже водосливной плотины сразу после грозы уменьшилась в $3 \div 4$ раза. Изменился и горизонт их нахождения. После грозы осетровые регистрировались в основном в местах с наибольшими глубинами и находились у самого дна. Ультразвуковые наблюдения показали, что резко снизилась плотность за счет массового ухода рыбы вниз по течению. Через $8 \div 10$ ч после грозы плотность их в приплотинной зоне стала возрастать и через $15 \div 18$ ч достигла предельной величины. На Ладожском озере во время грозы удалось зарегистрировать на поверхности воды и даже на глубинах $10 \div 15$ м напряженность поля на $1 \div 2$ порядка выше, чем перед грозой. Интересные данные получены о восприятии электромагнитных полей циклонов и об их действии на баренцево-морских скатов и треску в частотном диапазоне $0,5 \div 100$ Гц [Муравейко, Степанюк, 1985]. Авторы приходят к выводу о прямом воздействии электромагнитных полей циклонов на электрочувствительных

*(см. с. 134, 233, 274, раздел Заключение, геохимия — ихтиология — биохимия).

рыб через индуцированные токи в морской воде, что позволяет животным заблаговременно покинуть опасную прибрежную и приповерхностную зоны моря.

Влияние сезонной изменчивости электропроводящих свойств воды на физиологические функции электрических органов некоторых рыб показано в работе [Squire, Moller, 1982], где отмечено, что с увеличением проводимости воды от $10 \cdot 10^3$ (период дождей) до $36 \cdot 10^3$ мкСм/см (период засухи) наблюдались уменьшение амплитуды напряженности генерируемого рыбой ЭП и сокращение предельного расстояния регистрации разрядов от ее электрических органов. Авторы указанной работы полагают, что биологическая роль данного эффекта заключается в изменении порога чувствительности рецепторов. В репродуктивный период при распреснении воды (дожди) растет чувствительность — увеличивается дистанция взаимодействия привлекающих разрядов от рыб, в сухой период с увеличением проводимости уменьшается чувствительность электрорецепторов, и дистанция взаимодействия сокращается.

Исследование структуры электрического поля в поверхностном слое воды крупных озер северо-западной части России показало, что она зависит от морфологического строения озерной котловины в точке измерения: в глубоководной части акватории, где практически отсутствуют существенные гидродинамические возмущения, поле однородно, кривая градиента имеет плавный ход; на мелководье (банки, подводные гряды и рифы при глубине менее 10 м) регистрируется знакопеременная, пульсирующая кривая градиента поля. В этом случае карта эквипотенциальных линий характеризует четкую локализацию поля над мелководьем. Это геофизическое явление связано с плохо изученной активной ролью электрохимических процессов геолого-минералогической этиологии на мелководье (разд. 2.2—2.4). Изложенное заслуживает серьезного внимания, поскольку в последних работах по ихтиологии и электрическим полям в косяках рыб отмечено: в районе мелководья характеристика суммарного электрического поля рыбного косяка иная, чем в глубинных частях водоемов [Протасов и др., 1982]. Изучение взаимодействия полей этих источников — биологического и геофизического — может прояснить многие неясные вопросы поведенческих реакций водных животных. Именно поэтому стоит обратить особое внимание на результаты исследования влияния на рыб электрических и магнитных полей различных геофизических источников. Изучение электрической чувствительности рыб и степени ее участия в поведенческих реакциях даст возможность понять нейрофизиологические основы электрорецепции и пути ее

эволюции в связи с изменением среды обитания и развитием двигательного аппарата водных животных. Особо стоит вопрос о спектральных характеристиках электровосприятия неэлектрических рыб в процессе их индивидуального развития [Протасов, 1978; Извеков, 1987].

В последнее время исследователи более четко сформулировали представление об электрорецепторном аппарате рыб как о специфической системе, дающей животным многообразную информацию о внешней среде, которая по своей значимости не уступает информации от органов зрения, слуха, обоняния. Пассивная электроориентация обусловлена обнаружением рыбой слабых электрических полей биологического и геофизического происхождения. Поэтому-то чрезвычайно важно знание как слабых электрических полей среды обитания, так и полей, генерируемых гидробионтами. Благодаря высокой чувствительности электрорецепторов [Orientation and navigation birds..., 1993] открывается перспектива управления поведением электрочувствительных рыб слабыми электрическими полями.

2.5.2. Пелагические гидробионты — пространственно-временной источник электрокинетических полей акваторий

Изучение воздействия электромагнитного поля на планктонные сообщества, выяснение связи поведенческих реакций и биоритмов беспозвоночных организмов с геомагнетизмом представляют собой самостоятельную задачу, которая реализована в значительной мере в бывшем СССР [Александров, 1985; Александров и др., 1990; Биофизика, 1992; Биофизика, 1995; Биофизика, 1996]. Расширению таких исследований способствовало комплексное инструментальное физико-биологическое изучение загрязняемых акваторий Ладожского и Онежского озер. Автором было установлено, что в переходной зоне между загрязненной водой с примесями отходов целлюлозно-бумажной промышленности и условно чистой озерной водой существуют высокие значения градиента потенциала локальных диффузионно-адсорбционных электрических полей (см. табл. 2.5). По обе стороны от переходной зоны градиенты поля невелики, так как вода однородно чистая, либо однородно загрязнена. Гидробиологическим доказательством существования переходной зоны явились синхронные наблюдения над концентрацией микрозоопланктона-индикатора — инфузорий (*Tintinnopsis*, *Cratera*, *Hoda*) и коловраток (*Keratella cochearis* Grosse). В чистой воде концентрация этих организмов была в пределах 200 экз/л (фон), в переходной зоне — более чем в 4 раза. При этом коэффициент корреляции

между градиентом потенциала на поверхности воды и концентрацией животных достигал 80 % с вероятностью 0,99. Факт сосредоточения микрозоопланктона в области между гетерогенными водными массами искусственного происхождения и чистыми озерными водами был подтвержден физико-химическими индикаторами качества воды и статистическими расчетами, но механизм явления пока еще не выяснен. Поэтому новые исследования были проведены на незагрязняемых акваториях мезотрофных озер и в прибрежной зоне Черного моря.

От простейших — к позвоночным

Изучение механизмов взаимодействия электрического поля организмов с электрическими полями водной экосистемы представляет одну из важных задач биофизики. Значительные успехи в понимании этих механизмов достигнуты при электрофизиологических исследованиях рыб [Lissmann, 1963; Kalmijn, 1974, 1983; Szabo, 1974; Fessard, 1974; Данюлите, 1974; Bennett, 1978; Барон, 1978, 1980, 1982; Протасов, 1978; Олышанский, 1980; Бессонов и др., 1983; Броун, Ильинский, 1984; Басов, 1985; Яржомбек, Лиманский и др., 1986; Rankin, Moller, 1986; Шпарковский, 1987]. Успешно развивается и теория электрогенеза живых систем на примере исследования одноклеточных и других организмов [Доронин, 1978; Кульский, 1980; Павлович, 1981].

Следует отметить, что экспериментальное исследование электрических свойств гидробионтов, их электрофизиологических реакций на раздражение осуществлялось, как правило, в изолированных системах, не связанных с многообразными природными источниками воздействия на организм. Исключение составляли лишь некоторые наблюдения за поведением рыб или прямая регистрация восприятия действия электромагнитного поля Земли чувствительными рецепторами некоторых морских рыб [Броун, Ильинский и др., 1978; Протасов, Гусар, 1982; Извеков, 1985; 1987; Муравейко, Степанюк, 1985; Малинин, Протасов, 1986]. Изоляция объектов наблюдения от непосредственного контакта с природной средой имеет ряд преимуществ, поскольку облегчает экспериментатору интерпретации измеренных сигналов. Однако возникает основная неконтролируемая ошибка эксперимента — организмы лишаются естественного состояния, нарушаются трофические цепи, измеряемые сигналы могут и не соответствовать действительности. Поэтому автор предпочел проведение таких работ непосредственно в открытых водных системах.

В качестве объекта наблюдения были взяты планктонные сообщества (бактерио-, фито- и зоопланктон). Эти водные организмы находятся в основании экологической пирамиды гидробионтов — продуценты и консументы первого порядка [БЭС, 1989, с. 864; Реймерс, 1991], имеют ограниченную подвижность по сравнению с рыбами и потому более доступны непосредственному наблюдению в природных условиях. Массовое скопление в определенных слоях водоема этих мелких организмов с размерами от нескольких мкм до 1,5 см и обладающих электрическим зарядом проявляется на акватории макроскопически — в виде локального электрического поля, имеющего истинную биологическую природу. Потенциал этого локального поля определяется не только биомассой или численностью особей, но зависит и от напряженности внешнего по отношению к воде электромагнитного поля.

Планктонные сообщества (пелагические гидробионты) трофически связаны с планктофагами водоемов, являются источником сырья для промышленности и сельского хозяйства. К сожалению, в традиционных гидробиологических исследованиях до сих пор не учитывается электрическая активность планктона и поэтому, естественно, недооценивается перспектива использования электрополюметрических методов для экспресс-обнаружения этих организмов в глубинах водоемов, для слежения за их перемещением, выявления их связей с внешними геофизическими и антропоферными электромагнитными воздействиями.

Рассмотрим результаты экспериментальных работ по изучению электрических полей планктонных сообществ в озерах и морях, проведем анализ связи этих полей с земным магнетизмом, а также оценим восприятие электромагнитных воздействий биокомпонентами водной среды [Александров, 1985].

Оценка электрического поля, генерируемого планктоном в трофогенных слоях водоемов

В основу проведенных работ положен известный метод расчета потенциала и тока оседания частиц в дисперсных системах, разработанный в теории электрокинетических явлений. Потенциалы и токи, возникающие при оседании (всплытии) частиц дисперсной фазы в жидкой среде, описываются выражением для потенциала оседания, полученным Смолуховским

$$\zeta = \frac{3\eta\chi\Delta\varphi}{\epsilon r^3 (d - d_0) g v}, \quad (2.29)$$

где η — вязкость раствора (аналог силы трения, уравнивающей электрическую силу); χ — удельная электрическая проводимость жидкости; $\Delta\phi$ — градиент электрического поля ($\bar{E}/L$, где L — расстояние между электродами); ϵ — диэлектрическая проницаемость среды; r — радиус диспергированных частиц; d — плотность; v — число частиц в единице объема; g — ускорение силы тяжести.

Использование этого уравнения для нахождения потенциала ξ затруднено тем, что реальные системы обычно полидисперсны и не все частицы имеют сферическую форму. Поэтому величина ξ , как правило, неопределенна; кроме того, явление в таких системах осложнено различными скоростями оседания частиц, поляризацией двойного электрического слоя, неравномерностью поверхностной проводимости, отличной от объемной, адсорбцией ионов на частицах. Д.А. Фридрихсберг (1984 г.) указывает, что все эти явления не могут быть учтены данным уравнением, тем более, что в основе его лежит упрощенный вариант расчета потенциала в равновесных системах. На самом же деле методика обнаружения трофогенных слоев применяется к полидисперсным системам, и практическое значение разностей потенциалов, возникающих в неравновесных гетерогенных системах (суспензия—вода), характеризуется так называемым золь-концентрационным, или суспензионным эффектом, а не потенциалом Доннана. В настоящее время величины золь-концентрационного эффекта и потенциала Доннана принимаются для практических целей идентичными, а значение последнего в биологии весьма важно, так как он является одним из источников биопотенциалов [Кройт, 1955; Фридрихсберг, 1984]. В дополнение к изложенному следует отметить, что в трофогенных слоях заряженные организмы движутся в произвольных направлениях, флуктуируя с частотой внутриводных вихревых гидродинамических пульсаций (см. разд. 2.4.4), поэтому наиболее правильным путем остается экспериментальное изучение как потенциала трофогенных слоев, так и наблюдение за его изменчивостью во времени.

В дополнение к рассмотренной теоретической предпосылке обнаружения пелагических скоплений в естественных условиях напомним, что значение $\Delta\phi$ биообъектов было зафиксировано рядом авторов — Potter M.C., 1911; Cohen B.J., 1931; Naacke O., 1892 (см. [Clark, 1960]). По наблюдениям Л.В. Подгорных (научные фонды бывшего НИИ “Севморгео”), в экваториальном районе Атлантического океана были обнаружены планктонные поля

(скопление живых организмов) с весьма интенсивным квазистационарным потенциалом, обусловленным поверхностным отрицательным электрическим зарядом. Заряд поверхности организма связан с ионными процессами в нормальной клетке, находящейся в состоянии возбуждения*. На рис. 2.72 показан пример распределения геофизических характеристик в океане ($\Delta\phi$, ϕ , t , $S^\circ/\text{‰}$). Как видно, резкий скачок (аномалия $\Delta\phi$) выявлен на глубине от 70 ÷ 80 м до 120 ÷ 140 м. По результатам обработки биологических проб эта аномалия связана с трофогенным слоем (колонка 5). Интересно, что наблюдавшиеся аномалии $\Delta\phi$ зачастую интенсивнее, чем волновые, электрохимические или создаваемые сильными течениями.

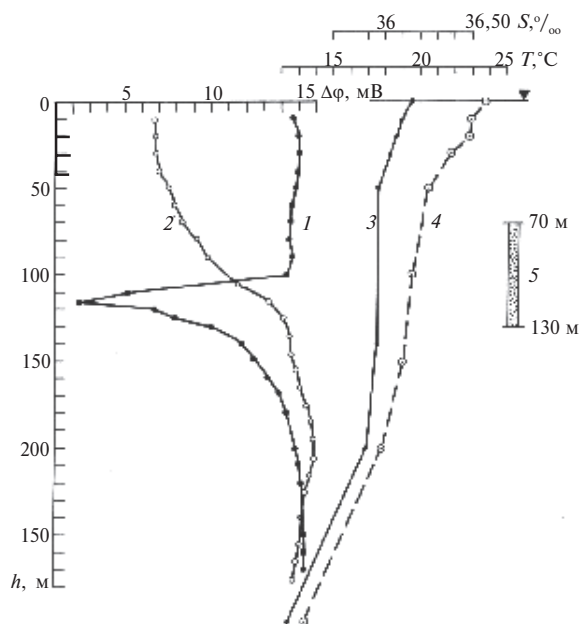


Рис. 2.72. Вертикальное распределение геофизических характеристик в Атлантическом океане у берегов экваториальной Африки: 1 — $\Delta\phi$, мВ/м (измерено); 2 — ϕ , мВ (расчетное); 3 — температура воды T , °C; 4 — соленость воды — $S^\circ/\text{‰}$ [Литвинов Э.И., Подгорных Л.В. Неполаризующиеся электроды при измерении естественных электрических полей. Информ. сообщ. ОНТИ-ВИЭМС. 1966. № 6].

*Теория ионного процесса образования заряда клетки рассмотрена в работах [Плонси, Барр 1992; Мембраны: ионные каналы, 1981; Овчаренков и др., 1974].

Конкретных измерений электрического поля биологических объектов в озерах не проводилось. Пробные методические измерения электрических потенциалов зоопланктона и водорослей автор осуществил осенью 1974 г. на Ладожском и Онежском озерах. К сожалению, время для подобных измерений было неподходящим, тем не менее попытка получить информацию нами была сделана.

В одной из бухт шхерного Куркийокского района в штилевую погоду 22.09.74 г. произвели вертикальное зондирование на глубине 16 м со шлюпки вдали от судна. Запись сигналов велась на судне, измерения выполнялись методом “потенциала”, глубины погружения подвижного электрода фиксировались через 0,2 м. Планктон отбирался сеткой в точках аномалий потенциала, в слое мощностью 2 или 4 м (меньший по мощности слой облавливать не было смысла).

Таблица 2.14

Результаты наблюдений в Куркийокской шхере в 1974 г.

Номер пробы	Мощность слоя, м	Виды организмов и их численность, экз/м ³	Качественная характеристика пробы	Скачок градиента потенциала, В/м
327	0 ÷ 4	Рачки — 760 Коловратки — 45 Инфузории — 90 Σ 895	Масса водорослей. Вода очень мутная	$0,6 \cdot 10^{-3}$
318	5 ÷ 8	Рачки — 50 Коловратки — 27 Инфузории — 3 Σ 80	Водорослей мало	Изменений градиента нет
328	10 ÷ 12	Рачки — 60 Σ 60	Водорослей очень мало, колоний трупов нет	Изменений градиента нет
317	7 ÷ 13	Рачки — 92 Коловратки — 8 Σ 100	Водорослей мало	$0,5 \cdot 10^{-4}$
316	14 ÷ 16 (у дна)	Рачки живые — 20 Рачки мертвые — 500 Σ 520	Много частиц неясного происхождения; колонии отмерших водорослей	$0,2 \cdot 10^{-3}$

Как видно из данных табл. 2.14, несмотря на бедность организмами, слои, содержащие биомассу (живую или мертвую), отличаются по электрическому полю от слоев, лишенных планктона. Динамический источник формирования скачка градиента (течения, волнение) в момент измерений практически отсутствовал — был штиль. Безусловно, эти данные мы принимали осторожно, поскольку в точках аномалий напряженности поля не был выполнен химический анализ воды.

Первым этапом исследования были измерения, синхронно регистрирующие значения $\Delta\varphi$ и послойную концентрацию планктона в направлении от поверхности до дна. Наблюдения получены на 10 эпизодических станциях в оз. Красном, гидробиологическая характеристика и гидрохимический режим которого длительное время изучались Институтом озераедения [Озера Карельского перешейка, 1971].

Регистрация значений $\frac{d^2\varphi}{dL^2}$ велась непрерывно по вертикали, а гидробиологические наблюдения выполнялись по стандартной методике путем облова горизонтов через $1 \div 2$ м либо планктонной сетью (газ № 58, № 70), либо специальным батометром в дискретных точках. Синхронно с электрополюметрическими величинами и записи колебаний геомагнитного поля (ГМП) на суше. Таким образом, методические возможности гидробиологических и геофизических наблюдений при оценке результатов не равнозначны: первые дают грубую модель распределения организмов по вертикали, вторые — выявляют весьма тонкую структуру ЭП в воде озера и непрерывную характеристику ГМП. Поэтому сопоставление результатов наблюдения может выявить в настоящее время лишь общие зависимости между измеренными характеристиками. Тем не менее, электрополюметрически были обнаружены “трофогенные слои” с максимальной концентрацией планктона, установлены горизонты с обедненным содержанием биомассы и прослежена миграция планктона в течение суточного периода, что было подтверждено последующей лабораторной обработкой результатов облова под микроскопом*.

Рассмотрим ряд примеров индикации трофогенного слоя с помощью вертикальных электрополюметрических зондирований в оз. Красном, которые были проведены сначала лишь с методическими

*В этих работах принимали непосредственное участие И.П. Николаева, К.А. Подгорный, Н.В. Родионова, Т.М. Лобанова. Автор приносит им глубокую признательность. Следует подчеркнуть, что это были первые в бывшем СССР запланированные, систематические исследования рассматриваемого явления. К.А. Подгорному принадлежит вывод о функции распределения планктона по глубинам озера (см. с. 334).

целями. Для этого подбирались соответствующие благоприятные условия эксперимента: естественный фон флуктуаций электрического поля характеризовался квазиоднородностью. Это обуславливалось практически отсутствием электрических потенциалов градиента концентрации химических компонентов, резких перепадов температуры воды по вертикали, долгопериодных гидродинамических движений водных масс по вертикали. При такой обстановке вероятность получить наиболее достоверные результаты связи значений $\Delta\phi$ с концентрацией планктона повышается. Следует отметить, что разделить суммарный электрический сигнал на компоненты, обусловленные только фито- или зоопланктоном, пока не представляется возможным. Поэтому интерпретация результатов на первом этапе исследования проводилась с учетом концентрации зоопланктона, поскольку именно зоопланктон представлял наибольший интерес как объект, регулярно перемещающийся по вертикали.

Электрополюметрическая индикация трофогенных слоев проведена 15–21 июля 1979 г. в двух пунктах оз. Красного (№ 2 и 4), расстояние между которыми 2,3 км (рис. 2.73,б). Результаты наблюдений следующие:

1. Если разница во времени наблюдения в этих пунктах не превышает 1,5–2 ч, характер распределения $\Delta\phi$ и концентрации планктона в них практически не отличался, если разница во времени была более 2 ч — наблюдалась разница в распределении.

2. Слой с максимальной концентрацией планктона (трофогенный, или биотический) соответствовал, как правило, смещению кривой градиента потенциала ЭП в отрицательную часть шкалы измерения прибора, но наблюдалась также и смена знака полярности этого слоя на положительный. Впоследствии поэтому возникла необходимость провести специальные длительные суточные наблюдения.

3. Если отмечался рост напряженности поля внешнего фона, то это соответствовало уменьшению численности зоопланктона. Однако нельзя сказать, что это изменение было пропорциональным. Так, например, в пункте № 4 наблюдения выполнены почти в одно и то же время суток 19 и 20 июля 1979 г. (рис. 2.74 и 2.75), но при этом среднефоновые величины напряженности поля изменились в $8 \div 10$ раз и соответственно уменьшились амплитуды его аномалий, но суммарные показатели концентрации зоопланктона разнятся примерно в 1,6 раза (самые верхние слои). В пункте № 2 наблюдения выполнены также днем с разницей примерно в 1 ч (19 и 20 июля 1979 г.). Здесь среднефоновые величины напряженности поля уменьшились лишь в $3 \div 3,5$ раза, а суммарные показатели концентрации отличаются примерно в 1,4 раза (рис. 2.76,а,б).

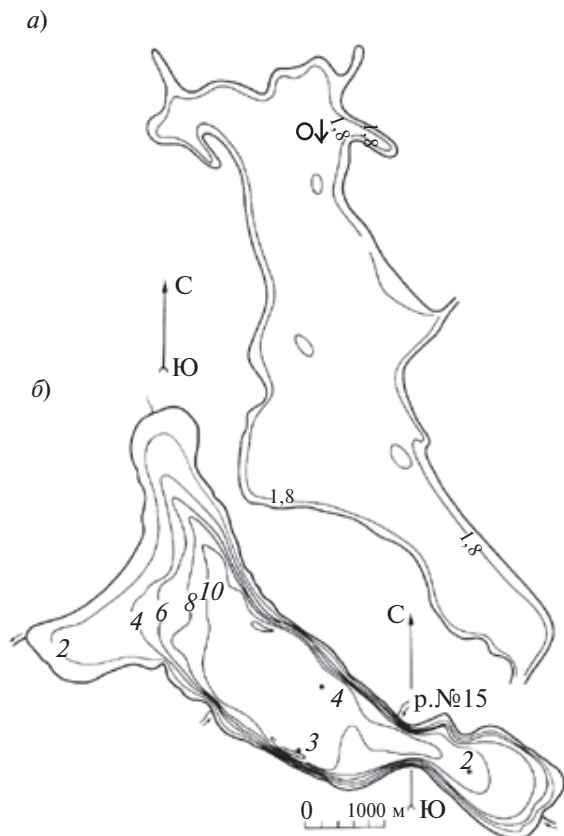


Рис. 2.73. Электрополюметрия трофогенных слоев озер.
 а — оз. Сиверское, 1981 г.; б — оз. Красное, 1979–1983 гг.
 Точка 4 — пункт суточного цикла; точка 3 — пункт 5-суточного цикла;
 точка 2 — пункт эпизодических наблюдений, 1979 г., р. № — притоки
 (ручьи)

4. На примере этих наблюдений можно убедиться, что разнокачественность состава зоопланктона обуславливает неоднозначность вертикального распределения поля. Так, 19 июля на глубине $3,0 \div 3,5$ м в пункте № 2 (рис. 2.76, а) отрицательные аномалии поля в большей мере зависят от распределения *Cladocera*, а в пункте № 4 (см. рис. 2.74) — от распределения *Rotatoria*; 20 июля на глубине

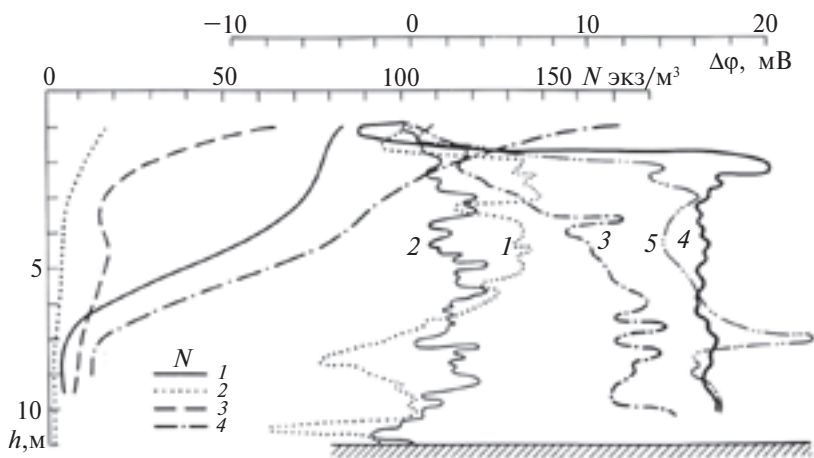


Рис. 2.74. Электрополюметрия трофогенных слоев оз. Красного 19.07.79 г., пункт 4. Концентрация: 1 — *Rotatoria*, 2 — *Cladocera*: 3 — *Copepoda*, 4 — общая сумма планктеров.

Кривые 1–5 — запись результатов градиент-зондирования, время: 16:45, 17:10, 17:23, 17:26, и 17:35, соответственно

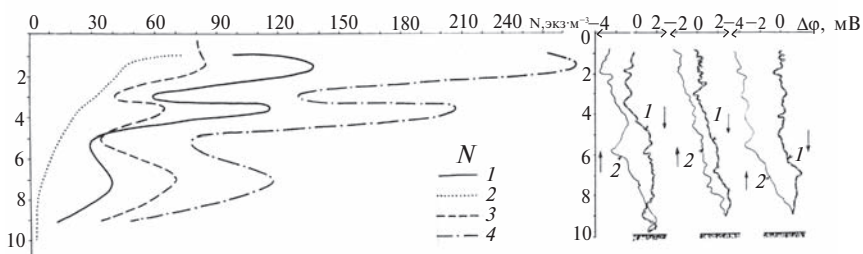


Рис. 2.75. Электрополюметрия трофогенных слоев оз. Красного 20.07.79г., пункт 4.

Концентрация: 1 — *Rotatoria*, 2 — *Cladocera*: 3 — *Copepoda*, 4 — общая сумма планктеров; кривые 1–2 — серия записей градиента ЭП в течение 15 ч 50 мин — 16 ч 05 мин

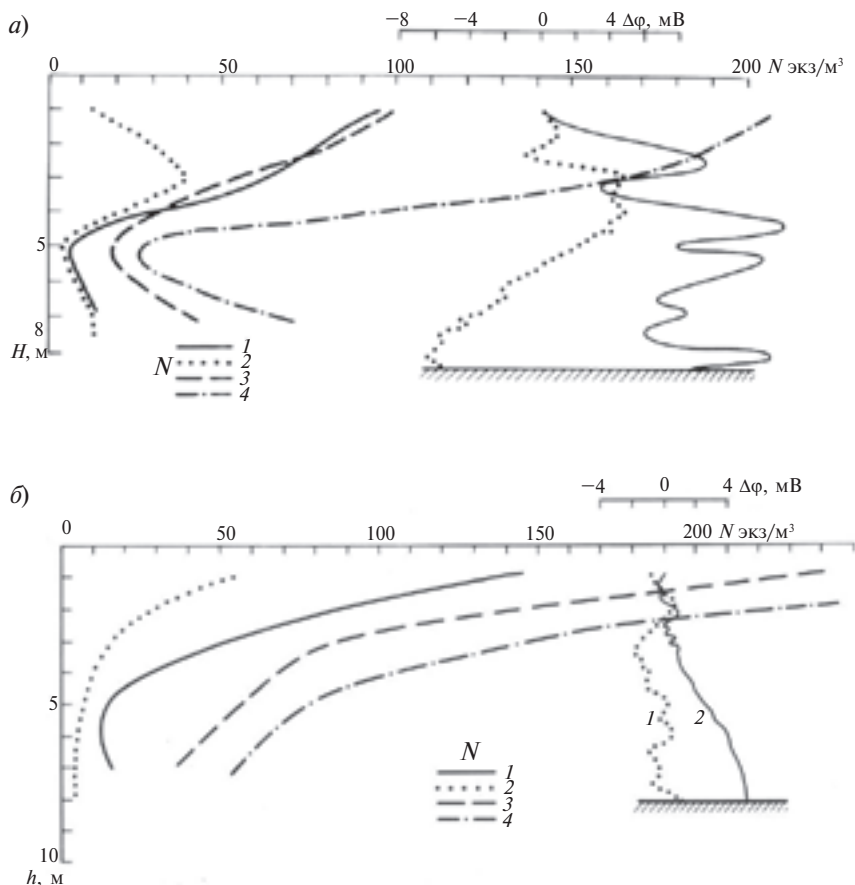
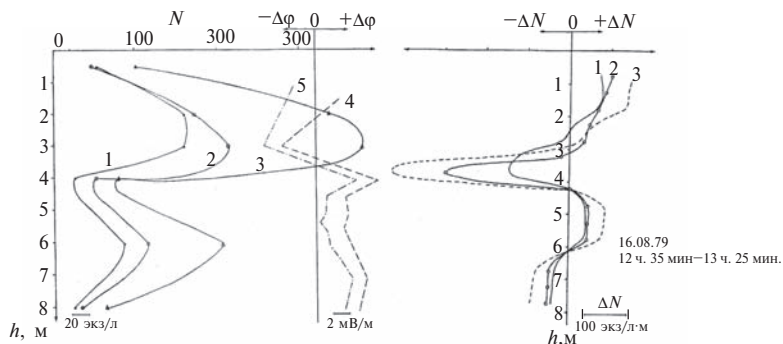


Рис. 2.76. Электрополюметрия трофогенных слоев оз. Красного, пункт 2: *a* — 19.07.79 г., кривые 1–2 — запись градиента ЭП в 14 ч 30 мин и в 15 ч 00 мин; *б* — 20.07.79 г., кривые 1–2 — запись градиента ЭП в 15 ч 20 мин. Концентрация: 1 — *Rotatoria*; 2 — *Cladocera*; 3 — *Copepoda*; 4 — общая сумма планктеров

6 ÷ 7 м в пункте № 4 (см. рис. 2.75) подобные аномалии обусловлены суммарным влиянием *Rotatoria* и *Copepoda*, а в пункте № 2 (см. рис. 76,б) — влиянием только *Cladocera* и т.д. Таким образом, решающим показателем в распределении поля может оказаться не суммарное количество планктона, а лишь количество особей какой-либо одной группы (коловраток или ракообразных). Существенную роль, видимо, играет не столько общая концентрация гидробионтов, сколько градиент концентрации, возможно, и размеры объектов. Это удалось показать в наблюдениях многосуточного цикла

15–19 августа 1979 г. в пункте № 3 в 200 м от южного побережья оз. Красного (см. разд. 2.5.3). Характерные примеры из этого цикла показаны на рис. 2.77 и 2.78. Здесь интересно проследить также, к какому периоду в суточном ходе геомагнитного поля относится наблюдение (подробно см. разд. 2.5.3).

а)



б)

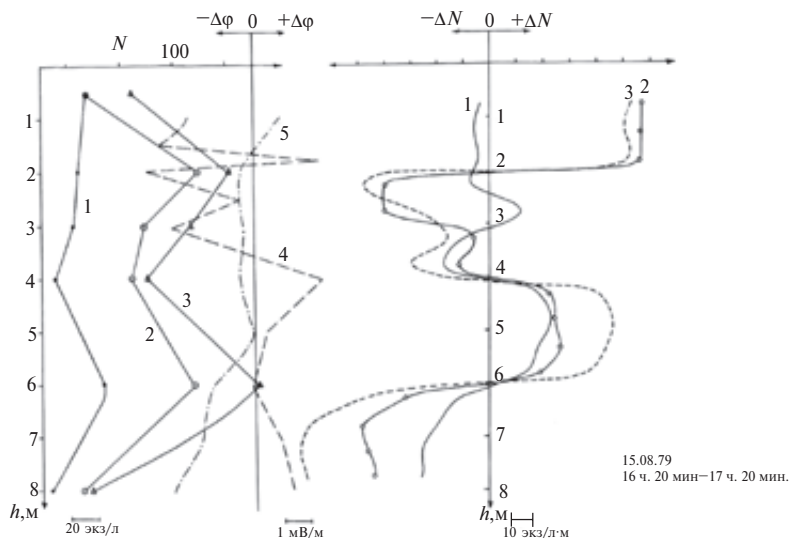
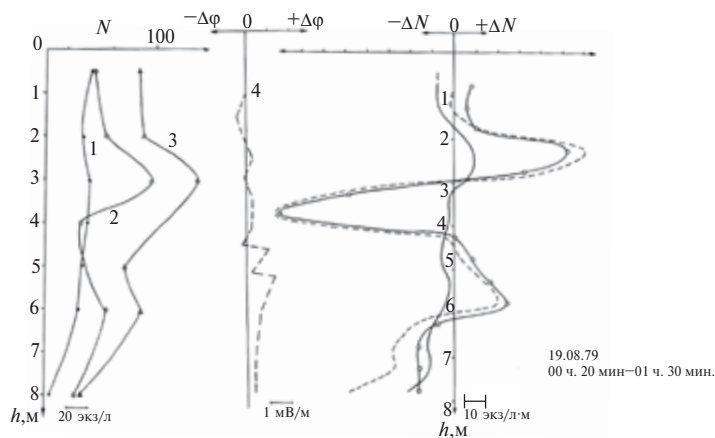
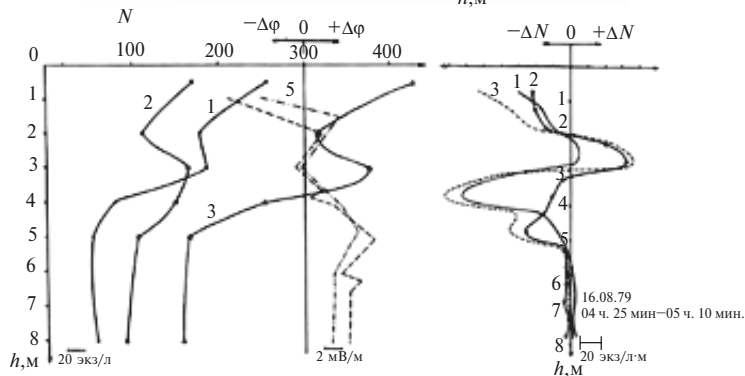


Рис. 2.77. Электропотенциметрия трофогенных слоев оз. Красного в различные периоды пятисуточного цикла 15–19.08.79 гг. (пояснения в тексте)

а)



б)



в)

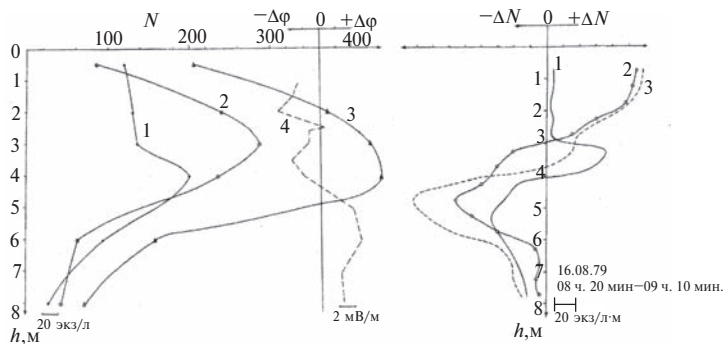


Рис. 2.78. Электрополюметрия трофогенных слоев оз. Красного в различные периоды пятисуточного цикла 15–19.08.79 гг. (пояснения в тексте)

Интересным фактом оказался результат несоответствия между максимальной концентрацией планктона и отрицательным знаком градиента потенциала. Биохимический аспект этого явления может заключаться в том, что клеточные элементы железистых тканей организмов поглощают неорганические катионы из окружающей среды (Ca^{2+}), а сопутствующие им анионы оказываются свободными в растворе. Повышенная концентрация Ca^{2+} приводит к повышенному потреблению кислорода тканями [Романенко, Арсан и др., 1977]. В этом случае можно ожидать снижения фоновое уровня естественного электрического поля.

Предварительные результаты эпизодических зондирований убедили нас в том, что локальная неоднородность электрического поля озера оказывается связанной с планктоном. По нашим наблюдениям, планктон существенно нарушает квазиоднородность электрического поля в воде, обуславливая значительные градиенты его, достигающие иногда порядка $(10 \div 20)10^{-3}$ В/м (например, см. рис. 2.74.). Эта связь между пространственным изменением градиента поля и численностью планктеров интерпретируется нами как результат проявления золь-концентрационного электрического эффекта в воде. На основании этих данных были проведены и специальные суточные и многосуточные наблюдения для сбора статистически значимого материала. Кроме того, ставилась задача изучения природы вертикальных миграций животного планктона.

Рассмотрим результаты статистического анализа материалов, собранных за период пятисуточного цикла 15–19 августа 1979 года (подробно в разд. 2.5.3). Дискретность отбора проб в пункте № 3 (рис. 2.73,б) — четыре часа, горизонты отбора — 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 8 м (150 проб). Проведены корреляционный, вероятностный и дисперсионный анализы, рассмотрены функции распределения $\Delta\phi$ и концентрации зоопланктона.

Результаты анализа по горизонтам наблюдений

1. Распределение среднестатистических значений градиента потенциала и концентрации планктона показывает, что максимум суммарной концентрации планктона соответствует отрицательным аномалиям градиента поля (рис. 2.79,а). Корреляция между концентрацией планктона и полем существует, однако зависимость нелинейная, поэтому коэффициент корреляции невысок (рис. 2.79,б, кривая 1).

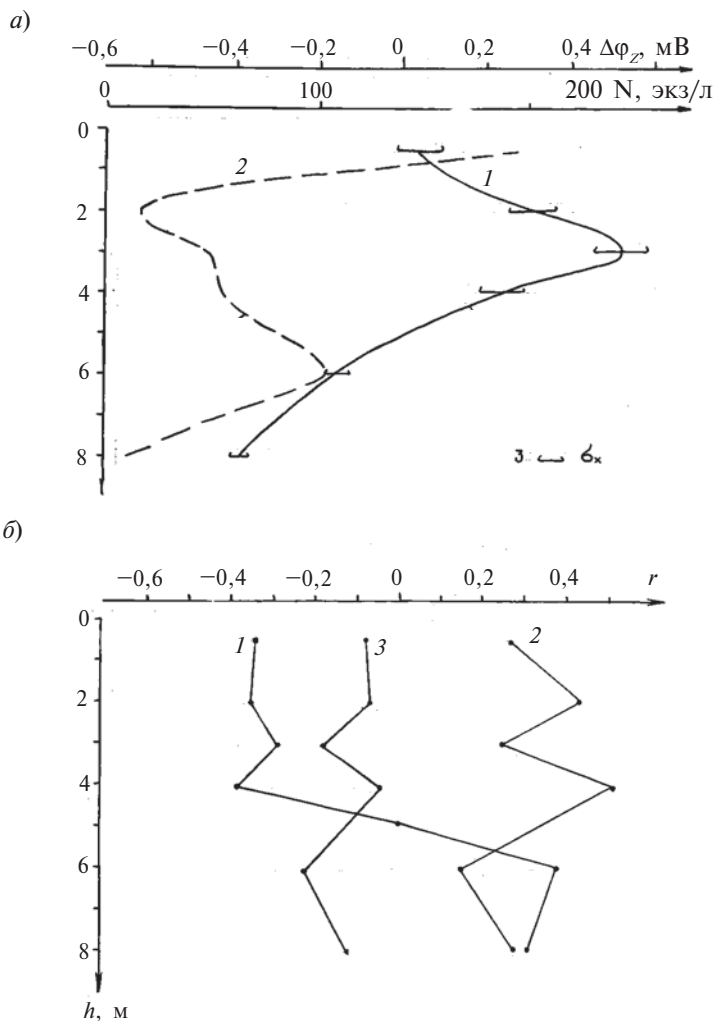


Рис. 2.79. Корреляционные связи в распределении планктонов (N), электрического и геомагнитного полей в районе оз. Красного: а — среднестатистическое распределение от поверхности до дна концентрации планктонов (1) и значения $\Delta\varphi_z$ (2); б — распределение коэффициентов корреляции: 1 — $r[N, \Delta\varphi_z]$; 2 — $r[N, \bar{T}, \text{нТл}]$; 3 — $r[\Delta\varphi_z, \bar{T}, \text{нТл}]$

Распределение значений r по глубинам:

Глубина, м	0,5	2	3	4	6	8
Коэффициент корреляции, r	−0,34	−0,35	−0,29	−0,38	0,38	0,31

На глубинах 0,5 ÷ 4 м наблюдается отрицательная корреляция, а на глубинах свыше 6 м — положительная, что, возможно, вызвано влиянием локального электрического поля донных отложений и придонного слоя воды*. Об этом же свидетельствует и отрицательный коэффициент эксцесса.

Горизонт 2 м является наиболее неустойчивым по электрополюметрическим показаниям. Так, коэффициент вариации при спуске зонда равен 18,15, а при подъеме — 8,03 за счет того, что слой этот находится в первой пограничной области, где наблюдается то резкое возрастание концентрации планктона, то уменьшение. Его можно расценивать как «аномальный слой», в котором коэффициенты корреляции для разных групп животных оказываются различными. Это и обуславливает в целом низкий коэффициент корреляции между полем и общей суммарной концентрацией. Ядро максимальной концентрации планктона чаще всего находится на горизонтах 3 ÷ 4 м, иногда же оно охватывает более мощный слой, размываясь и смещаясь вверх до 2 м и вниз до 5 ÷ 6 м (рис. 2.80 и рисунки в разд. 2.5.3). Это — «биотический», или трофогенный слой, он отличается наибольшей устойчивостью по статистическим показателям (минимальные положительные значения коэффициентов асимметрии и эксцесса).

В переходном слое грунт—вода наблюдается обычно незначительная концентрация планктона, и связь концентрации и потенциала приближается к линейной, хотя имеет обратную зависимость, нежели в «биотическом слое».

2. Дисперсионный однофакторный анализ (по Р. Фишеру) [Корн Г. и Корн Т., 1977; Справочник по теории вероятности..., 1978, с. 123—125] позволил оценить, существенно ли влияние зоопланктона на вертикальное распределение градиента электрического поля. На всех горизонтах был получен положительный ответ, включая придонный 8-метровый слой с невысокой концентрацией планктона, несмотря

*Донные отложения оз. Красного содержат повышенную концентрацию соединений железа, имеются железомарганцевые конкреции, наблюдается дефицит кислорода у дна [Озера Карельского перешейка, 1971. Гл.3, с. 129—210].

на вероятное влияние непосредственно локального поля донных отложений. Поэтому можно сделать вывод о целесообразности проведения таких исследований, но необходимо внести некоторые изменения в методику измерений с учетом полученных статистических оценок.

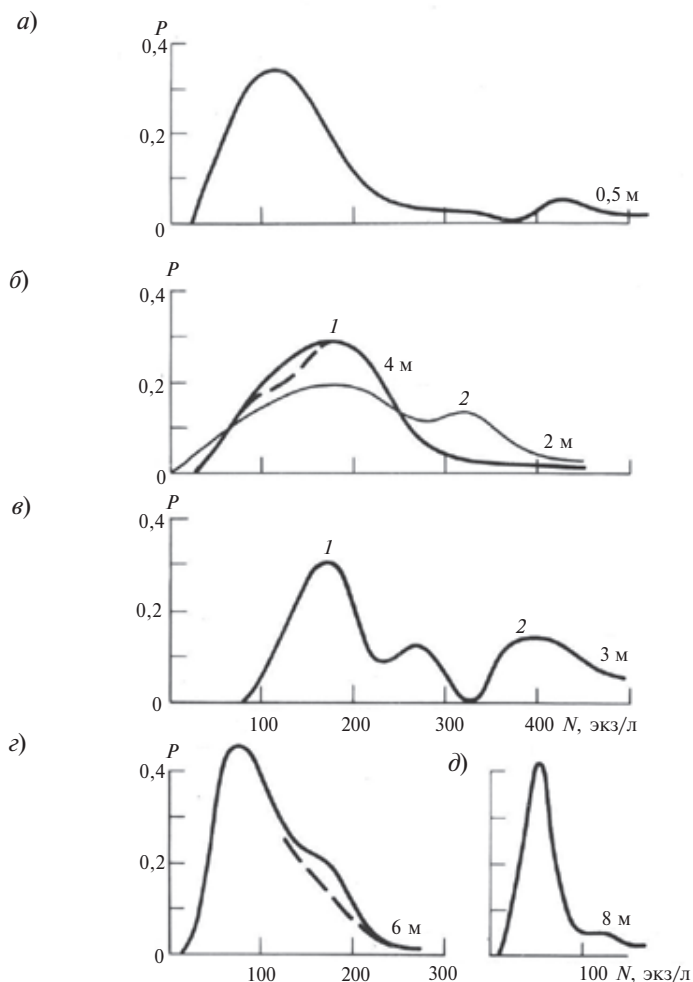


Рис. 2.80. Вероятностное распределение зоопланктона в оз. Красном.
Влияние видового состава: 1 — коловратки; 2 — ракообразные

3. Обработка показала, что корреляционный и другие виды анализа необходимо проводить, учитывая не только суммарную концентрацию планктона, но и ее составляющие по отдельным группам организмов, что позволит детализировать сущность взаимодействия. Доказательством этого, например, служит двухвершинное распределение плотности вероятности в 3-метровом горизонте, обусловленное в отдельности концентрацией коловраток и ракообразных (см. рис. 2.80, в).

4. Статистические оценки позволяют дать предварительную классификацию вертикального распределения организмов и генерируемого ими потенциала. Функции распределения рассчитаны в соответствии с критериями Пирсона по всей вертикальной зоне миграции [Справочник по теории вероятности..., 1978, с. 123–125].

Общая численность планктона ($\sum N$, экз/л) и соответствующая функция распределения по горизонтам (см. с. 323):

$$\text{а) } 0,5 \text{ м; } 4 \text{ м; } 6 \text{ м; } f(x) = \text{const} (\alpha^2 + x^2)^{-m} e^{-v \arctg \frac{x}{\alpha}}, \quad (2.30)$$

$$\text{где } m \geq 1/2; -\infty < x < +\infty; \text{Const}^{-1} = \int_{-\infty}^{+\infty} (\alpha^2 + x^2)^{-m} e^{-v \arctg \frac{x}{\alpha}};$$

$$\text{б) } 2 \text{ м; } 8 \text{ м; } f(x) = \frac{\alpha^{2m} \beta^{2n} (\alpha + x)^m (\beta - x)^n}{(\alpha + \beta)^{(m+n+1)} B(m+1, n+1)}, \quad (2.31)$$

$$\text{где } -\alpha < x < \beta; m > -1; n > -1;$$

$$\text{в) } 3 \text{ м; } f(x) = \frac{K^{m+1}}{\Gamma(m+1)} (\alpha + x)^m e^{-K(\alpha+x)}, \quad (2.32)$$

$$\text{где } x > -\alpha; K > 0.$$

Градиент потенциала электрического поля ($\Delta\phi$ среды) и соответствующая функция распределения по горизонтам:

$$\text{а) } 0,5 \text{ м; } 6 \text{ м — то же, что и в (2.30);}$$

$$\text{б) } 2 \text{ м; } 3 \text{ м; } 4 \text{ м — то же, что и в (2.31);}$$

$$\text{в) } 8 \text{ м; } f(x) = \frac{(\alpha + \beta)^{-(m+n+1)} \cdot (x + \alpha)^m \cdot (x - \beta)^n}{B(-n-m-1, n+1)}, \quad (2.33)$$

$$\text{где } x > \beta; m > 1; n > -1.$$

г) 0,5 м; 2 м; 3 м; 4 м; 6 м; 8 м — то же, что и в (2.30) для градиента потенциала, измеренного при подъеме зонда.

В перспективе возможна разработка метода исследования динамики планктона на основе строгой классификации его распределения по электрополюметрическим показателям. В настоящее время

данных пока еще недостаточно для того, чтобы точно определить параметры, входящие в уравнения функций.

На основании рассмотренных выше данных проводилось последующее изучение природы вертикальных миграций зоопланктона: синхронно регистрировались колебания геомагнитного поля в УНЧ-диапазоне, распределение градиента потенциала и концентрации планктона по вертикали, а затем вычерчивались динамические карты пространственно-временной структуры этих характеристик в изолиниях [Александров, 1973; 1985].

2.5.3. Магнитобиологическая концепция двигательной активности и вертикальной миграции планктона

В этом разделе выполнен анализ естественных внутрисуточных вертикальных перемещений планктонного сообщества в пресной и морской воде с учетом геомагнитных колебаний. Предложена гипотеза геофизической (геомагнитной) роли в физиологии поведения пелагических гидробионтов.

В гидробиологических исследованиях одной из сложных и нерешенных до сих пор является проблема вертикальных суточных миграций планктонных сообществ в морской и пресной воде. Неясны причины периодической изменчивости концентрации гидробионтов в определенных слоях акваторий, их передвижения из слоя в слой со скоростью, не соответствующей расчетам на основе наиболее популярной гидромеханической концепции миграций. Поэтому было проведено специальное синхронное изучение флуктуаций естественной разности потенциалов и ритмов перемещения зоопланктона по вертикали в воде озер мезотрофного типа (озера Красное и Сиверское) и в Черном море, а также колебаний геомагнитного поля на суше в прибрежной зоне в течение суточного и пятисуточного циклов, тем более, что связь неоднородности структуры электрического поля водоемов с концентрацией пелагических планктеров была установлена автором ранее (см. разд. 2.5.2).

Наблюдения в одной точке с периодичностью в $2 \div 4$ ч выявили корреляцию вертикального распределения градиента потенциала электрического поля* с послойной концентрацией планктона в воде и показали сопоставимость периодичности миграций с планетарными геофизическими ритмами в ионосфере и на Земле.

*В оз. Сиверском градиент потенциала измерялся через $15 \div 20$ мин в течение всего суточного цикла наблюдений.

Обсуждение материала наблюдений проведено не в хронологическом порядке, а с учетом состояния геомагнитного поля при измерениях — от спокойного состояния до состояния магнитной возмущенности, хотя календарные даты и время наблюдений от года к году по возможности сохранялись:

1979 г., 15–20 августа, оз. Красное, пункт № 3, пятисуточный цикл;

1980 г., 14–15 августа, оз. Красное, пункт № 4, суточный цикл;

1981 г., 21–22 августа, оз. Сиверское, суточный цикл;

1983 г., 16–17 августа, Черное море, Кара-Даг, суточный цикл.

На оз. Сиверском наблюдения выполнены в составе экспедиции Института биологии внутренних вод АН СССР с борта э/с “Гидролог” и со вспомогательных шлюпок (см. рис. 2.73,а); на Черном море — в районе биологической станции Института биологии южных морей АН УССР, в составе экспедиции ИЭМЭЖ им. А.Н. Северцова АН СССР с морской шлюпки на расстоянии 200 м от берега*.

Методика измерений рассмотрена в разделах 2.2.2, 2.2.3 и 2.2.5. Возможные источники погрешностей учтены при измерениях, и их влияние сведено к минимальному, или при измерениях введены поправки. Обработка проведена по единой методике (см. разд. 2.2.5) с конечными результатами в виде пространственно-временных диаграмм (планшетов) измеренных и рассчитанных характеристик — концентрации планктона и ее градиента, градиента потенциала электрического поля, элементов геомагнитного поля (N , ΔN ; $\Delta \varphi$; $\bar{B}$, $\bar{H}$). Для детализации результатов дополнительно построены диаграммы изменчивости концентрации отдельных групп зоопланктона и фитопланктона.

В мировой практике подобные длительные суточные наблюдения над миграцией морского планктона проводились советскими биологами [Распределение и поведение..., 1977], но они весьма малочисленны и получены без учета роли планетарных геофизических процессов. Поэтому автором введен дополнительный комплекс измерений для того, чтобы сопоставить ритмику вертикальных перемещений планктеров с суточными геомагнитными ритмами.

Пространственно-временные диаграммы показаны на рис. 2.81–2.86, цв. На диаграммах распределения концентрации планктона, градиента концентрации и градиента потенциала по оси X показано время наблюдений t , ч, а по оси Y — глубины, м. На диаграммах,

*Наименование учреждений намеренно сохранены для облегчения поиска архивных материалов потенциальными потребителями.

характеризующих смещение “трофогенного слоя” по оси глубин (h) на данный час наблюдения нанесены значения максимальных концентраций планктона, а также соответствующие данной концентрации значения градиентов поля $\Delta\varphi_z$. На диаграмме (планшете), характеризующей расчетную схему циркуляции ионосферных токов в течение суточного цикла для широт наблюдений от 60° с.ш. до 60° ю.ш. показаны линии условных направлений токов (положительных и отрицательных). Схема токов на высоте ионосферы ориентирована в плоскости рисунка и соотнесена с периодом наблюдения. Рисунки 2.81, цв., 2.82, цв. (оз. Красное), 2.83, цв. (оз. Сиверское), 2.84–2.85, цв. (Кара-Даг) и 2.86, цв. (оз. Красное) иллюстрируют картину внутрисуточной динамики планктонных сообществ. Видно, что планктон по вертикали распределен неравномерно, выделяются слои с повышенной его концентрацией («биотические слои») и прослеживается перераспределение гидробионтов по экологическим нишам. Интересно, что есть периоды, когда зоопланктон не преследует пищу, и отмечаются такие глубины расположения максимумов концентраций водорослей и животных, где они не совпадают, например, в 0 ч 1 мин — в оз. Сиверском.

Однако пространственно-временное положение областей с высокими градиентами концентраций тех или других гидробионтов совпадают (перед заходом Солнца, ночью и в момент восхода Солнца). Проследим это по данным об электрической неоднородности водоема, а впоследствии и по геомагнитным флуктуациям. При анализе этих данных мы попытались выявить, существует ли ритмичность флуктуаций электрического поля и связаны ли они по периодам с изменчивостью концентрации планктона.

На цветных рис. 2.81, 2.82 (оз. Красное), 2.83 (оз. Сиверское), 2.84–2.85 (Кара-Даг) и 2.86 (оз. Красное) показаны структура электрического поля в воде, ход геомагнитного поля на суше и связь “трофогенного слоя” с градиентом потенциала.

Вечерний период (18–19 ч) характеризуется смещением максимума концентрации животных и водорослей к поверхности и максимальным отклонением градиента потенциала ЭП в отрицательную область на тех же глубинах:

в оз. Сиверском, слой $0 \div 4$ м и $\Delta\varphi = -(3 \div 4)$ мВ/м;

в оз. Красном (14.08.80 г.), слой $0 \div 3$ м и $\Delta\varphi = -(1 \div 2)$ мВ/м;

в оз. Красном (1979 г.), слой $0 \div 2$ м и $\Delta\varphi = -4$ мВ/м;

в Черном море (1983 г.), слой $0 \div 4$ м и $\Delta\varphi = -0,05$ мВ/м.

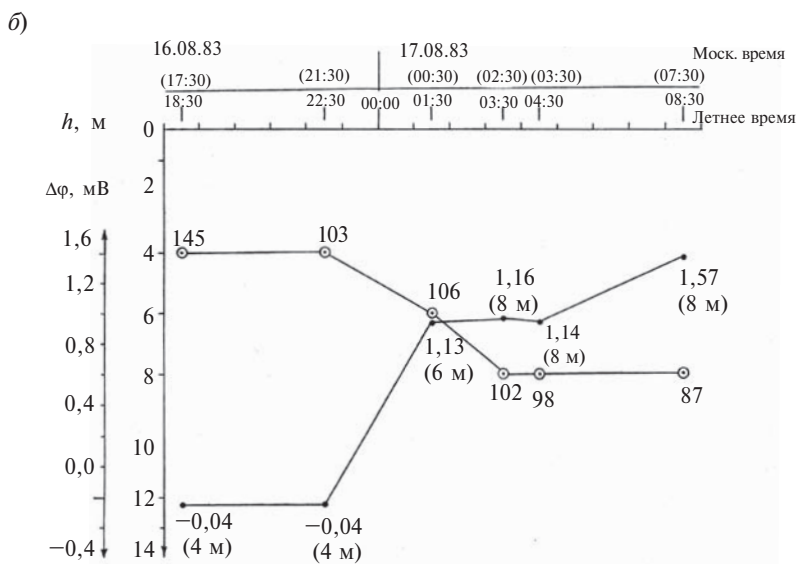
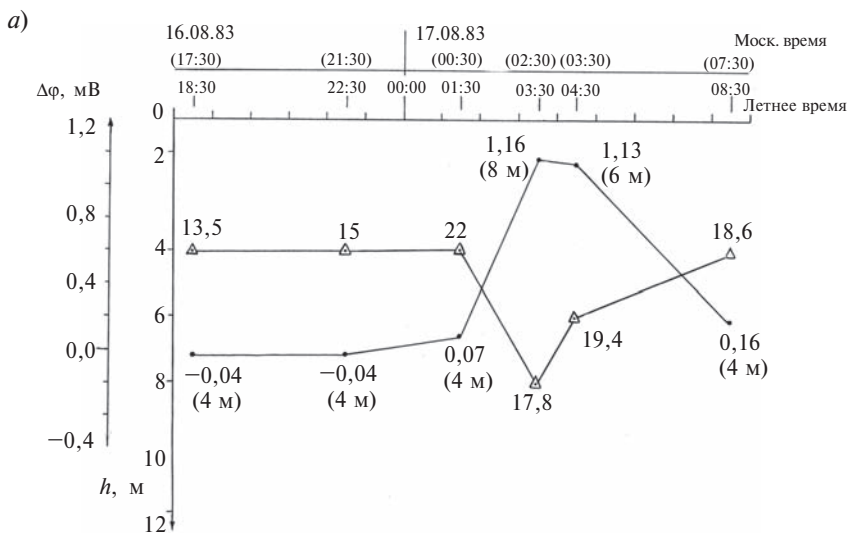


Рис. 2.85. Суточный ритм вертикальных перемещений трофогенного слоя и развития максимальной численности гидробионтов и соответствующего им электрического поля в воде Черного моря (Кара-Даг) 16–17.08.83 г.: а — слой максимальной концентрации зоопланктона и соответствующий ему градиент ЭП, мВ/м; б — слой максимальной концентрации фитопланктона и соответствующий ему градиент ЭП, мВ/м

Зоны, оконтуренные нулевой изолинией градиента потенциала $\Delta\phi$, соответствуют “пятнам” или “сгусткам” концентрации гидробионтов, и по данным $\Delta\phi_z$ интерпретируются как “трофогенные зоны (слои)”.

В ночное время (22–4 ч) максимум концентрации зоопланктона смещается на значительные глубины и регистрируется положительными аномалиями градиента потенциала $\Delta\phi_z$:

в оз. Сиверском на 12 м и $\Delta\phi_z = + 2,4$ мВ/м;

в оз. Красном (14.08.80 г.) на 6 м и $\Delta\phi_z = + 0,2$ мВ/м;

в оз. Красном (1979 г.) на 4 ÷ 5 м и $\Delta\phi_z = +(1 \div 2)$ мВ/м;

в Черном море (1983 г.) слой 6 ÷ 8 м и $\Delta\phi_z = +1,2$ мВ/м.

Концентрация фитопланктона, как правило, практически снижается с глубиной плавно (например, в оз. Сиверском от 130 до 10 экз/л в интервале 18 ÷ 02 ч), и расслоение наступает ранним утром с восходом Солнца (см., например, период от 5 до 8 ч на глубинах 5 ÷ 10 м в оз. Сиверском и в это же время на оз. Красном). Одновременно наблюдается и резкое изменение градиента потенциала $\Delta\phi_z$ по вертикали — переход от положительных значений аномалий до отрицательных; начинается интенсивное передвижение животных к поверхности. Днем снова идет их погружение и стабилизация на глубинах 8 ÷ 10 м (оз. Сиверское), 3 ÷ 5 м (оз. Красное), что так же, как и ночью, регистрируется положительными аномалиями градиента.

Таким образом, можно проследить чередование периодов существования локальных зон отрицательных или положительных аномалий градиента потенциала ЭП и связанные с ними перемещения «ядра максимальной концентрации зоопланктона и фитопланктона». Вырисовывается своеобразное волновое движение “трофогенного слоя”, период колебания такой волны около 8 ч (см. цв. рис. 2.81 и 2.83, характерные моменты 17 ÷ 18 ч, 1 ÷ 2 ч, 10 ÷ 11 ч). Эти данные позволяют ориентировочно определять глубину максимальной концентрации пищи планктофагов и время ее фазового смещения по вертикали. Кроме того, нужно отметить, что изменение градиента потенциала ЭП не столько связано с общей концентрацией планктона, сколько с градиентами концентрации. Это хорошо прослеживается по рис. 2.81 и 2.83, где очевидна корреляция “волнового движения глубины залегания ядра максимальной концентрации планктона” и соответствующего ему градиента ЭП воде. Наблюдается, следовательно, смена знака полярности

“трофогенных слоев”, причем в определенном ритме. Работы 1979 г. на оз. Красном показали, что такая ритмика может быть нарушена в период геомагнитных возмущений, поэтому последующие измерения 1980–1984 гг. были синхронизированы с ходом ГМП [Александров, Кутикова, 1984; 1985; 1986].

Анализ наблюдений над колебаниями геомагнитного поля на суше для координат обсерваторий “оз. Красное”, “Борок” и “Одесса-1” (цв. рис. 2.81; 2.82; 2.83; 2.86) показывает, что суточные колебания элементов земного магнетизма в “спокойный период” имеют характерные сдвиги в отмеченные выше моменты времени — 18 ч, $23 \div 2$ ч, 6 ч, 12 ч, т.е. прослеживается упомянутая семидесятичасовая ритмика колебаний. Этот период замечателен еще и тем, что он соответствует периодам циркуляции вихревых центров в системе ионосферных токов. О таких ритмах внутрисуточных колебаний плотности ионосферных токов стало известно по расчетам Н.П. Беньковой в 1958 г. Наземные данные флуктуаций ГМП были использованы для расчета и построения среднестатистической суточной системы изменчивости электрических токов в ионосфере [Бенькова, 1958; Яновский, 1978]. На рис. 2.81а, цв. представлена картина суточного изменения системы ионосферных токов. Условно этим токам дано наименование положительных или отрицательных в зависимости от направления движения ионосферной плазмы; в северном полушарии вихревые центры отрицательных токов приходятся на часы восхода и захода Солнца, а центр вихря положительных токов — на дневное время.

Ритмика волнового движения “трофогенного слоя”, как показывают данные за 1979–1984 гг., связана с вихревыми центрами токов в ионосфере. Так, на Сиверском озере в ночной период суточного цикла длительностью около 8 ч (с 20 до 4 ч) наблюдалось оседание основной массы зоопланктона на глубину $10 \div 12$ м; на Красном озере ночной период начинался иногда раньше, примерно в $18 \div 19$ ч, но длился столько же времени — 8 ч, а в море — позже — с 22 до 5 ч; сместившийся в глубинные слои планктон зарегистрирован положительными аномалиями $\Delta\varphi_z$. Об аналогичной периодичности смещений “трофогенного слоя” свидетельствуют данные за 1979 г.: 15.08.79 г. — 20 ч, ... 16.08.79 г. — 4 ч, 12 ч, ... , 17.08.79 г. — 4 ч, 12 ч, 20 ч, ... и т.д. (рис. 2.87, цв.). В ночной период существует планетарное ослабление плотности отрицательных токов, циркулирующих между центрами вихрей (рис. 2.87,а, цв.). К вечернему (с $16 \div 17$ ч до 20 ч) и утреннему (с 2 ч до 5 ч 30 мин) периодам, продолжавшимся около $3 \div 3$ ч 30 мин, отнесено перемещение организмов к поверхности, но слои максимальной

концентрации их отмечены, наоборот, отрицательными аномалиями градиента ЭП в воде. Время обнаружения слоев повышенной концентрации планктеров вблизи поверхности водоема совпадает с моментом установления в ионосфере центров вихрей отрицательных токов, между которыми длится дневной период циркуляции положительных токов (рис. 2.81,а, 2.83,а, цв.). Следует подчеркнуть, что в озерах в данные периоды наблюдений отмечалась незначительная термическая стратификация водных слоев. В Сиверском озере температура изменялась от 16,2 до 15,8 °С в слое 0 ÷ 10 м и плавно — от 15,8 до 6 °С — в слое 10 ÷ 20 м; в Красном озере — гомотермия в слое 0 ÷ 4 м (17,7 °С) и плавное уменьшение с 17 до 16,2 °С в слое — 5 ÷ 9 м. Концентрация растворенного кислорода не отличалась от многолетней нормы и плавно уменьшалась от поверхности до дна (в оз. Сиверском от 4,7 до 0,55 О₂, мг/л). В течение суток эти показатели не имели определенно выраженной ритмичности колебаний, поэтому прослеженную нами периодичность флуктуаций слоя максимальной концентрации зоопланктона по конкретным наблюдаемым данным и по косвенным данным о градиенте ЭП мы связываем в значительной степени с действием внешних факторов синхронизации — с геомагнитными и ионосферными источниками.

Значительный объем статистического материала пятисуточного цикла наблюдений на оз. Красном позволяет проследить особенности вертикального распределения планктеров (градиент концентрации) в зависимости от того, в какой конкретный момент по местному времени выполнены измерения, т.е. имеются ли отличия в распределении, обусловленные суточным ходом геомагнитного поля.

Рассмотрим еще раз рис. 2.77 и 2.78. Как показано на рисунках, вид распределения отличен (см. разд. 2.5.2) для разных моментов наблюдения:

на рис. 2.77,а — дневные наблюдения 16.08.79 г. в 12 ч 35 мин ÷ 13 ч 35 мин, к этому времени в ионосфере устанавливается “вихрь положительно направленных электрических токов”;

на рис. 2.77,б — вечерние наблюдения 15.08.79 г. в 16 ч 20 мин ÷ 17 ч 20 мин, к этому времени в ионосфере происходит переход от “вихря положительно направленных токов” к “вихрю отрицательно направленных токов”;

на рис. 2.78,а — ночные наблюдения 19.08.79 г. в 0 ч 20 мин ÷ 1 ч 30 мин, в ионосфере устанавливается состояние с минимальной плотностью электрических токов, циркулирующих между двумя центрами “вихрей с отрицательно направленными токами”;

на рис. 2.78,б — наблюдения раннего утра 16.08.79 г. — в 4 ч 25 мин ÷ 5 ч 10 мин, в ионосфере устанавливается переходное

состояние движения токов от “вихря отрицательно направленных токов” к “вихрю положительно направленных токов”;

на рис. 2.78, в — наблюдения позднего утра 16.08.79 г. — в 8 ч 20 мин ÷ 9 ч 10 мин, когда завершается переход от “вихря отрицательно направленных токов” к “вихрю положительно направленных токов” в ионосфере.

Таким образом, дальнейшие исследования по рассматриваемой проблеме следует проводить в моменты, по возможности ближе приуроченные к характерным состояниям в системе ионосфера—геомагнитное поле. В настоящее же время эти особенности геофизических факторов биосферы, играющие синхронно-ориентационную роль, в стандартных гидробиологических наблюдениях не учитываются.

Особенности вертикального распределения электрического поля, генерируемого планктоном, связаны с влиянием различных групп организмов, с их жизненными циклами. По материалам удалось проследить, что в “биотическом слое” существует некоторая периодичность в развитии максимальной и минимальной численности отдельных групп планктона. Например, максимальная численность коловраток приходится на 4–8 ч, минимальная — на 16 ч, ракообразных — на 8–12 ч и 16 ч соответственно (см. рис. 2.82, цв.). Однако коловратки в момент восхода Солнца достигали предельно высокой численности также и в поверхностном слое воды (см. рис. 2.82, цв.). Причем в момент восхода они регистрировались максимальными отрицательными аномалиями градиента поля, а в момент захода — незначительными положительными. Минимумы концентраций (около 16 ч) регистрировались положительными аномалиями поля. Определенную роль в создании электрического эффекта градиента концентрации животных играют веслоногие рачки (*Copepoda*); ночью (22 ч ÷ 4 ч) эти животные занимают слой 4 ÷ 7 м, днем 1 ÷ 4 м. Однако утренняя (около 6 ч) отрицательная аномалия электрического поля обусловлена явно резким возрастанием численности коловраток (*Rotatoria*) в слое 1 ÷ 2 м (см. рис. 2.82, цв.). Ветвистоусые рачки (*Cladocera*) следуют за ритмикой поля, но максимумы концентрации их, как правило, соответствуют минимумам концентрации коловраток, кроме того, численность их не велика и влияние на эффект градиента концентрации, как мы полагаем, было менее существенным.

Жизненные циклы планктонных сообществ связаны с внешними воздействиями, и это еще раз напоминает о необходимости выбирать конкретное время наблюдения. Например, в период усиления геомагнитного минимума после момента верхней кульминации

Луны (около 12 ч) отмечаются увеличение численности животных организмов и смещение их в более глубокие слои воды ($7 \div 8$ м), в период геомагнитного максимума, предшествующего нижней кульминации Луны (около 0 ч), наоборот, — снижение численности и перемещение животных к поверхности ($2 \div 3$ м). Для фитопланктона можно отметить лишь расслоение популяции в периоды верхней кульминации Луны и стабильное состояние в течение 3–4-х часов, при этом плотность концентрации плавно снижается от поверхности до дна, в период нижней кульминации Луны. Анализируя распределение коэффициента корреляции между концентрацией планктона и вектором геомагнитного поля ($\vec{B}$), отмечаем, что на горизонте около 4 м значение r достигает 60 %, т.е. именно в «трофогенном слое» наиболее полно отражается связь биоты с геомагнетизмом (рис. 2.86, цв.).

Таким образом, рассмотренные примеры волнового движения “трофогенного слоя” водоемов в его связях с геомагнитными колебаниями на суше и ритмикой в системе ионосферных токов позволяют отметить следующее: на периоды смены знака в системе ионосферных токов (области высоких градиентов напряженности поля в горизонтальной плоскости на высоте около 100 км над земной поверхностью) приходится моменты интенсивных вертикальных перемещений планктеров — оседание ночью и всплытие в утренние и вечерние часы. Можно предположить, что магнитосферные источники флуктуаций электромагнитного поля Земли могут служить «спусковым механизмом, синхронизатором» при индуцировании магнитогидродинамических сил, оказывающих воздействие на движение биоэлектрически активных компонентов водной среды — планктона.

Известно, что геомагнетизм характеризуется периодами невозмущенного и возмущенного состояний напряженности электрического и магнитного полей. Период наших наблюдений на оз. Красном совпал по времени с двумя состояниями магнитосферы — моментом так называемых “спокойных” дней (утренние часы 15.08.1979 г. — вечерние часы 17.08.1979 г.) и моментом “неспокойных” дней, с периодом магнитной бури (вечерние часы 17.08.1979 г. — ночные часы 19.08.1979 г.), достигшей более 150 нТл и сопровождавшейся полярным сиянием. В спокойные дни наблюдался суточный ритм ГМП инфранизкочастотного диапазона, соответствующий средним многолетним данным. В эти дни в динамике планктона прослеживалась упомянутая ритмика. В период геомагнитного возмущения градиенты концентрации планктона и соответствующая им электрическая неоднородность поля существенно отличались, и ритмика нарушилась. Уровень градиента поля в “трофогенном слое” сместился в положительном направлении, и модуль его уменьшился, линии равного

градиента приблизились к вертикальной ориентации (15–16 августа 1979 г. эта ориентация была в большей степени горизонтальной). Аномальность колебаний ГМП выразилась в том, что 18 августа 1979 г. полуденный минимум его был ниже нормы примерно в 2 раза, в 22 ч началось резкое снижение напряженности, которое достигло минимума в 1 ÷ 3 ч ночи 19 августа 1979 г. (около 150 нТл). В этот период концентрация зоопланктона в “биотическом слое” снизилась примерно в 2 ÷ 3 раза, и распределение его по слоям стало менее четким (градиенты концентрации невелики) (см. рис. 2.86, цв.) [Александров, 1985].

В период возмущенного состояния магнитосферы электромагнитное поле Земли имеет ярко выраженный нестационарный аperiodический режим. Геофизические наблюдения, полученные в такие периоды, исключаются из обработки при статистическом анализе вариаций поля. В условиях сформулированной нами задачи наблюдений над вертикальной миграцией животных такие данные, наоборот, представляют определенную ценность, поскольку мы ищем объяснение аномальному распределению планктеров и сопряженного с ними электрического поля. Как известно, во время магнитных возмущений колебания магнитных элементов имеют амплитуды, превышающие средние значения в несколько раз, отмечаются аномальные скорости их изменения. В ионосферу высоких широт в такие периоды поступает аномальное число частиц высоких энергий (электроны более 0,1 кэВ и протоны более 1,0 кэВ). Это приводит к индуцированию в ионосфере электрических токов, текущих вдоль зоны полярных сияний и обуславливающих последующее возмущение геомагнитного поля. Упомянутый поток частиц солнечного ветра (плазмы) усиливает конвективные движения в магнитосфере, в результате чего частицы переносятся в высокие широты, плотность электрических токов возрастает, возникает магнитная буря. В этот период резко возрастает и плотность вертикальных токов к поверхности Земли, напряженность ГМП падает, что мы и наблюдали (см. разд. 1.3).

Таким образом, материалы позволяют полагать, что магнитосферные источники изменчивости электрического поля Земли могут влиять на состояние биосенсорных компонентов водной среды, электрическое поле которых служит индикатором этого состояния и помогает прогнозировать пространственно-временную динамику “трофогенного слоя”. Следует упомянуть, что в наблюдениях 14–15.08.80 г. на Красном озере отмечались колебания ГМП и флуктуации $\Delta\phi$ в воде одинаковой периодичности — 25, 40 ÷ 42, 80, 105 ÷ 106, 180 ÷ 210, 240 с, которые зарегистрированы примерно в одно время — 17 ч 06 мин, 18 ч 03 мин, 19 ч 20 мин и т.д. (см. разд. 2.1.3). Это дает основание полагать, что ряд характерных

колебаний (тип *pc5*, *pc3* и др.) как на поверхности Земли, так и в воде возбуждается одним источником — магнитосферными возмущениями. Поэтому не следует исключать возможность генерации долгопериодных (часы) колебаний “трофогенного слоя”, который несет высокий объемный электрический заряд и перемещается волнообразно по вертикали в течение суток синхронно с суточным ходом геомагнитного поля.

2.5.4. Электромагнитные характеристики среды обитания и физиологические реакции водных животных

В предыдущих разделах (разд. 2.5.1, 2.5.2) мы показали, что исследования электрической чувствительности рыб и степени ее участия в поведенческих реакциях даст возможность понять нейрофизиологические основы электрорецепции и пути ее эволюции в связи со средой обитания и развитием двигательного аппарата водных животных.

В настоящее время уже не вызывает сомнения тот факт, что магнитное поле влияет на жизнедеятельность животных организмов. Многочисленные эксперименты и многолетние наблюдения над животными, человеком, микроорганизмами показали, что колебания напряженности геомагнитного поля оказывают существенное влияние на развитие практически всех живых существ биосферы Земли. Возникла и утвердилась область науки — *магнитобиология*. Механизм воздействия слабых магнитных полей естественного амплитудно-частотного диапазона пока не выяснен окончательно. Рыбы с этой точки зрения являются наиболее интересным объектом исследования. Существуют гипотезы о том, что для многих рыб магнитное поле Земли является ориентирующим фактором при миграциях, тем более, что на электрорецепторах баренцевоморских скатов зафиксированы электрические токи, вызванные геомагнитной бурей [Броун, Ильинский, Муравейко и др., 1978]. Это, естественно, обостряет интерес к вопросу об определении реальной чувствительности рыб к геомагнитному полю и его аномалиям*.

Интересные работы в этом плане были выполнены объединенной группой сотрудников Всесоюзного института разведочной геофизики (ВИРГ), лаборатории биофизики АН БССР и Атлантического НИИ рыбного хозяйства и океанографии. Объектом исследования был выбран европейский угорь в возрасте двух лет, что обусловлено нерестовыми миграциями, при которых рыбы пересекают Атлантический океан. Известно, что угри встречаются в северной части океана, в Балтийском море, в Ладожско-Онежском

бассейне, спускаясь на юг вплоть до Балканского полуострова. Такой большой ареал распространения не объясняется лишь пассивным переносом за счет системы течений, зачастую миграция идет против течений. Возможным ориентирующим фактором здесь являются электрическое и магнитное поля. Для проверки предположения о том, что магнитное поле — один из основных ориентирующих факторов при миграции, проводили специальные наблюдения в лаборатории в аквариуме-лабиринте. Авторы проведенного эксперимента [Франтов, 1982] отметили:

магнитное поле не является единственным раздражителем, действующим на рыбу;

магнитное поле играет роль фактора, связанного лишь с рефлексом ориентации животных во время их движения и не имеет отношения к поиску пищи и уходу от опасности;

при блуждании рыб в лабиринте угол ориентации по отношению к меридиану сохраняется для разных групп угрей и не зависит от конструктивных особенностей экспериментальной установки;

при компенсации геомагнитного поля ориентация угрей исчезает так же, как и при предварительном воздействии электромагнитным полем с индукцией около 0,27 Тл, т.е. ориентация является двигательной реакцией стекловидного угря на изменение естественного магнитного поля Земли;

обладая системой восприятия геомагнитного фона, угри способны различать направления север—юг, запад—восток в совершенно изолированном помещении. Характер движения их зависит от напряженности и направления вектора магнитного поля;

основным информационным параметром магнитного поля для рыб является направление вектора геомагнитного поля;

характер кривой спектральной чувствительности рыб не меняется под действием шума (электрических помех). Предварительный вывод по экспериментам сводится к утверждению, что электрические рыбы воспринимают ЭМП за счет рецепции индуцированных в воде электрических переменных токов, а неэлектрические реагируют на изменение направления электромагнитного поля Земли*. Можно считать доказанным, что бионические принципы поиска источников изменения электрических и магнитных полей в будущем удастся реализовать в геофизике — электроразведке. Пока наиболее удобным объектом для изучения биологических электромагнитных

*Технические устройства и механизмы для внедрения современных методов генерации и накопления электроэнергии, обусловленной ее естественными источниками (ветер, гидравлические явления и др.), приводят к аномальному поведению гидробионтов (рыб) и разрушают эволюционное их физиологическое состояние.

систем являются рыбы, поскольку только у них наблюдаются высоко развитые электромагнитные органы, позволяющие проводить технические наблюдения.

Восприятие электромагнитных колебаний Земли мелкими формами гидробионтов изучено недостаточно. Поэтому отмеченные нами элементы связи между динамикой планктона и геомагнитными пульсациями и их суточным ритмом заставляют обратить особое внимание на возможную прямую зависимость явления миграции от внешнего воздействия. В работе Я.П. Белова и Н.Г. Бочкарева (1964 г.) отмечалось, что для объяснения биомагнитных эффектов на уровне слабого геомагнитного поля ($\sim \bar{H} = 32 \text{ А/м}$) можно было бы привлечь соображения о резонансе биотоков механической системы. В этом случае следует иметь в виду, что амплитуда возбуждаемых полем $\bar{H}$ механических колебаний должна зависеть от угла между направлением локального биотока и направлением $\bar{H}$. Не исключается, что именно этим резонансным механизмом объясняется предполагаемая способность некоторых животных ориентироваться в геомагнитном поле, и это требует новых направленных экспериментов [Белов, Бочкарев, 1984].

В области биоритмологии достаточно авторитетными работами доказана ярко выраженная периодичность физиологических актов различной этиологии [Harris, 1963; Enright, Homner, 1967; Дубров, 1974; Иванов-Муромский, 1977; Рудяков, 1977; Сердюк, 1977; Лайзан, Гусев, 1979; Erb et. al., 1979; Маркевич, 1982]. Наблюдения автора показывают, что периодические физиологические акты, как, например, суточные миграции планктеров, иногда точно, иногда с небольшими сдвигами укладываются в суточную ритмику колебаний геомагнитного поля. Экологическую роль геомагнитных ритмов в биосфере можно подтвердить рядом косвенных работ, выполненных в пресноводных и морских водоемах. Авторы работы [Раухияйнен, Сеничева, 1977] отмечают, что повышенное количество жгутиковых водорослей в водоемах наблюдается в утренние (около восхода Солнца) и в вечерние (около захода Солнца) часы за счет повышения темпа деления клеток в эти моменты. Наблюдения М.Н. Лебедевой с соавторами над суточной динамикой биомассы бактериопланктона в Ионическом и Сардинском морях показали (рис. 2.87), что в слоях $0 \div 50$ (1), $50 \div 100$ (2) и $100 \div 500$ (3) м прослеживается четкая ритмика в увеличении или снижении численности бактерий: около 18 ч и 6 ч — рост численности, около 0 ч и 12 ч — снижение численности (рис. 2.87, а) [Лебедева, 1982]. Польские биологи Kailliszi L. и Suchecka T. (1966 г.) установили, что наибольшие величины насыщения прудов кислородом получены в интервале

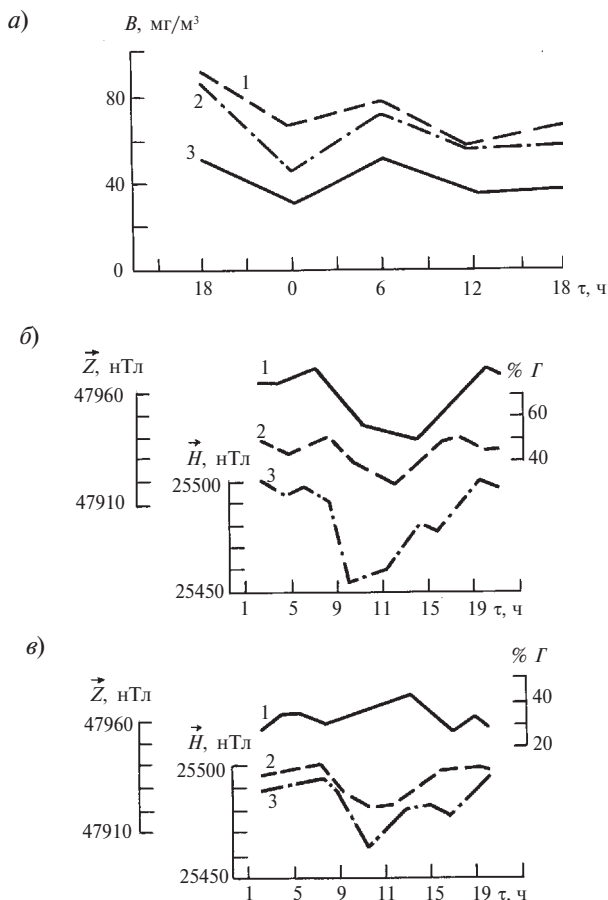


Рис. 2.87. Биологические и геомагнитные ритмы:

a — суточные изменения концентрации биомассы в Сардинском море; $б$ — суточные изменения гемолиза животных; $в$ — ритм геомагнитного поля (внизу) [Лайзан, Гусев, 1979]

14 ÷ 17 ч, а наименьшие — в 5 ч по местному времени за счет дыхания клеток водорослей. Сопоставив эти наблюдения с нашими (см. рис. 2.81; 2.83; 2.85), обращаем внимание на то, что период 15 ÷ 18 ч характеризуется максимальным градиентом плотности ионосферных токов (переход от положительного вихря к отрицательному) и 5 ÷ 8 ч — также максимальным градиентом плотности (переход от отрицательного вихря к положительному) и что при этом изолинии $\Delta\varphi_z$ в воде приобретают четкую вертикальную

ориентацию и максимальную плотность (на единицу времени). Не исключено, что физиология бактерий и водорослей также связана с внешними ритмами электромагнитного поля ионосферы, тем более, что экспериментально доказано наличие природного ферромагнетика ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) в тканях и клетках планктона и бактерий [Blakemore, Frankel, Kalmijn, 1980; 1981] (см. разд. 1.2, 2.2.1).

Интересные результаты приводит З.И. Журбицкий (1975 г.) о влиянии атмосферно-электрического поля на адсорбцию CO_2 листьями растений. Специальные опыты и наблюдения в природе показали, что при обычном состоянии атмосферы (преобладание положительно заряженных аэронов над отрицательными) днем изменение фотосинтеза связано с ее потенциалом: в полуденные часы отмечаются снижение фотосинтеза и уменьшение положительного потенциала атмосферы, а перед грозой — прекращение фотосинтеза.

В разделах 1.1. и 1.3 отмечалось, что ход атмосферно-электрического поля обусловлен магнитосферными процессами, и это подтверждается прямыми экспериментами. В работе “Структура электромагнитного поля...” (1980 г.) представлены сонограммы градиента потенциала атмосферно-электрического поля: минимум значения градиента приходится на $3 \div 4$ ч, максимум — на $19 \div 20$ ч по гринвичскому времени. При отсутствии электрических полей (шума), обусловленных чисто атмосферными причинами (конвекция, перенос пространственного заряда и др.), в магнитном и электрическом полях в воздухе наблюдаются одновременно возникающие колебания с равными частотами. Это свидетельствует о возможности генерации части колебательного процесса в вертикальном компоненте электрического поля каким-то источником, который является также источником геомагнитных пульсаций. О влиянии внешних электромагнитных полей в определенные моменты суток на животный и растительный мир указывается в работе [Торнуев, Куделькин, 1981], где отмечается еще и отрицательная роль экранирования биобъектов от естественного геомагнитного поля. В ряде работ приводятся сведения, где все очевиднее подтверждается связь биоритмов с геомагнетизмом: М.И. Черногоренко — о роли периодичности суточного ритма в экологии церкарий (1981 г.), А.С. Лопухин — о суточной динамике АТФ в физиологии микропланктона Атлантического океана и Черного моря (1987 г.), В.А. Гушин — о формировании волн пролиферации в живой клетке (1983 г.). Л.К. Лайзаном и Н.И. Гусевым (1979 г.) показана $7 \div 9$ -часовая периодичность резкого изменения течения физиологических процессов, хорошо согласующаяся с суточным ходом ГМП (рис. 2.87,б).

Автором в 1985 г. высказана гипотеза о возможной экологической роли вертикального компонента электромагнитного поля Земли в синхронизации вертикальных перемещений планктона водоемов при установлении над точкой наблюдения по местному времени области интенсивных градиентов плотности тока в ионосфере (см. разд. 2.5). В работе [Степанов, Светличный, 1981] имеются данные, которые можно привлечь для подтверждения идеи, высказанной в гипотезе. Так, наблюдалось, что масса планктонной популяции *C.helgolandicus* в море поднималась из глубин к поверхности воды ($0 \div 10$ м) в промежуток времени с 16 ч 03 мин до 16 ч 58 мин без видимых на то причин. Обнаружены повторные миграции за $5 \div 6$ утренних часов у рачков *C.helgol* и *C.atlenuatus*. Первый вид в пределах слоя 70 м трижды повторял миграционный путь, второй — дважды. Эти результаты трудно сопоставить с какой-либо из существующих в настоящее время гипотез о миграции. Авторы также показали, что рачки (*Copepoda*) не могут долго двигаться с максимальными скоростями, а ночью их двигательная активность снижается. В то же время Е.В. Павлова с соавторами отмечает суточные перемещения животных до 140 м [Степанов, Светличный, 1981]. Здесь, по-видимому, объяснение можно искать в существовании в отмеченные периоды суток ($16 \div 17$ ч и утренние часы) максимальных градиентов напряженности поля ионосферных токов. Таким образом, наши наблюдения и наблюдения упомянутых выше авторов не дают основания для безоговорочного принятия существующей концепции вертикальной миграции планктона (например, гидромеханической). Электромагнитные силы могут явиться движущим фактором при послойном вертикальном перемещении планктона в воде. Не исключена также возможность стимулирующей роли компонента $\bar{E}_z$ при росте и развитии популяции, поскольку в определенные периоды наблюдаются вспышки роста численности организмов. В общей цепи электромагнитных факторов, воздействующих на живые системы, нельзя не учитывать известного влияния ГМП на темп реакций в суспензиях, водно-коллоидных растворах и других средах [Пиккарди, 1967; Физико-математические..., 1975; Шноль, Коломбет и др., 1980; Шноль, 1982; Тезисы докладов..., 1982].

Исходя из рассмотренных фактов, можно предполагать, что ритм питания зоопланктона (по крайней мере, тех групп, которые попали в поле зрения наблюдателей) связан с геофизическими ритмами: вечерние часы (18 ч), ночные часы ($0 \div 2$ ч), ранние утренние

часы ($5 \div 6$ ч) — идет интенсивное питание, и это регистрируется интенсивными отрицательными аномалиями ЭП (вечером и утром) и положительными аномалиями (ночью). В поздние утренние часы ($9 \div 10$ ч) и полуденные часы — питание неинтенсивно, и это регистрируется незначительными отрицательными аномалиями электрического поля.

Теория миграций планктонных сообществ в проводящей среде с точки зрения учета естественного электромагнетизма системы Солнце—Земля может быть развита на основе известной геофизической концепции геомагнитных возмущений Чэпмена—Линдемана—Ферраро. В данной работе этот вопрос может быть только поставлен.

Завершая обзор об исключительно интересной, но в то же время весьма спорной области магнитобиологии, связанной с непосредственным воздействием системы ионосфера — геомагнитное поле на мигрирующие водные организмы, можно отметить:

В результате исследования биоэлектрических полей планктонных сообществ в пресной и морской воде установлена возможность экспресс-обнаружения трофогенных слоев в глубинах водоемов, слежения за их перемещением в пространстве и времени. Проанализированы корреляционные связи биоэлектрических полей с элементами геомагнитного поля. Дана общая оценка восприятия электромагнитных воздействий биокомпонентами водной среды (планктон, планктофаги), показана эволюционная роль слабых электрических полей в жизни гидробионтов.

На основании известного метода расчета потенциала и тока оседания частиц в монодисперсных системах (Смолуховский) и применения его к полидисперсным системам реализован экспериментальный электрополюметрический поисковый метод индикации водных слоев с максимальной концентрацией планктона. Статистический анализ результатов синхронных наблюдений показал, что трофогенные (биотические) слои оказываются наиболее коррелированными с аномальными значениями электрического потенциала (градиента). Дисперсионный однофакторный анализ (по Р. Фишеру) подтвердил целесообразность применения электрополюметрии для поисковых работ. Произведена предварительная классификация вертикального распределения организмов и генерируемого ими потенциала.

Проанализирована периодичность внутрисуточных вертикальных перемещений планктеров с учетом геомагнитных ритмов.

Показано, что планктон в конкретное время суток распределяется по вертикали по-разному. Выявлено волнообразное движение трофогенного слоя в пространственно-временных координатах, причем активные перемещения планктона наблюдаются перед заходом Солнца, ночью и в момент восхода Солнца; период волнового движения длится около 8 ч. Полученные данные соответствуют геомагнитным ритмам по местному времени и сопоставимы с ритмикой циркуляции электрических токов в ионосфере. Сделан вывод о необходимости корректирования времени гидробиологических наблюдений в водоемах в соответствии с конкретным состоянием ЭМ поля в системе магнитосфера—ионосфера—Земля. Подчеркивается перспективность исследований для выполнения государственной продовольственной программы.

**МАГНИТОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
И ПОВЕДЕНИЕ ЭКОСИСТЕМ**

В третьей части монографии рассматриваются важные практические вопросы, связанные с регуляцией физиологии экосистем в естественных условиях, с моделированием воздействия слабых внешних электромагнитных факторов на биологические и физико-химические системы, а также с оценкой детерминирующей роли современных электромагнитных методов в здравоохранении и в области новых биотехнологий. В этом разделе достаточно полно отражены вопросы электрогенеза экосистем на примере крупных и мелких пресноводных озер и морских акваторий, поскольку в озерах, как в зеркале, отражается вся созидательная и разрушительная деятельность человека. Анализируются проблемы, возникающие у животных и человека, подвергающихся воздействию неионизирующего электромагнитного излучения.

В модельных экосистемах подтвердились данные, полученные в открытых акваториях и на суше.

**3.1. РЕГУЛЯЦИЯ ФИЗИОЛОГИИ ЭКОСИСТЕМ
В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

- 3.1.1. Электромагнитное излучение биологической природы**
- 3.1.2. Восприятие нестационарных сигнально-информационных
слабых электромагнитных полей животными и растениями**
- 3.1.3. Естественная электромагнитная среда и человек**
- 3.1.4. Лабораторные и клинические наблюдения над реакциями
живых систем с учетом действия магнитных полей**

3.1.1. Электромагнитное излучение биологической природы

Кратко вспомним о биосфере и ее функции на Земле.

Биосфера — оболочка Земли, состав, структура и энергетика которой определяются совокупной деятельностью живых организмов. В.И. Вернадский рассматривал биосферу как область жизни, включающую наряду с организмами и среду их обитания, а именно:

- часть атмосферы от поверхности Земли до высоты озонового экрана ($20 \div 25$ км) — аэrobiосфера;
- часть литосферы, особенно кора выветривания, и вся гидросфера (глубины ее $\approx 2 \div 3$ км на суше, $1 \div 2$ км ниже ложа океана и $\approx 6 \div 7$ км над поверхностью земли) [Реймерс, 1991, с. 70].

Однако в верхней атмосфере даже на высоте около 80 км обнаружены некоторые виды жизнеспособных организмов в состоянии покоя.

Тонкий слой биосферы составляет менее 1 % общего объема нашей планеты.

Живые организмы, как отметил В.И. Вернадский, являются функцией биосферы и теснейшим образом материально и энергетически с ней связаны. Он рассматривал живые организмы как нечто целое и единое — живое вещество (т.е. совокупность всех живых организмов, существующих в данный момент), численно выраженное в элементарном химическом составе, весе и энергии. В итоге вещество биосферы, по мнению В.И. Вернадского, — оно не потеряло своего значения и в настоящее время — является результатом деятельности сложного космического механизма и представляет собой в конечном счете “трансформаторы”, переводящие космическое излучение в действенную земную энергию — электрическую, химическую, тепловую, механическую.

“Развитие этих представлений в научном мировоззрении ученого выражало стремление взглянуть на планету Земля, ее живое вещество не “изнутри”, не через непосредственно окружающий человека живой мир природы, не через факты и явления жизнедеятельности бесчисленных живых существ, но обозреть эту жизнедеятельность как единый закономерный процесс из космических просторов Вселенной. Это видение есть величайшее достижение и смелое дерзание научной мысли, оно снимает односторонний, антропоцентрический и геоцентрический взгляд на живую природу, включая самого человека” [Казначеев, 1983].

Выявление планетарных функций живого вещества закономерным образом подводит В.И. Вернадского также к осмыслению космических функций живой материи. Живое вещество активно проявляет себя уже в самые начальные периоды геологической истории

Земли; оно не только пронизывается потоком космического излучения, значительная часть которого еще не известна науке, но суть в том, что космическое и земное связаны обоюдно, что для проявления земной жизни необходимы космические силы*. Заметим, что естественнонаучные концепции В.И. Вернадского о живом веществе и эволюции биосферы воплотились в учение о переходе биосферы под влиянием социальной и научной деятельности человека в качественно новое состояние — ноосферу (от греческого слова *noos* — разум).

Живое вещество биосферы представлено биологическими системами, или биологическими объектами различной степени сложности — клетки и ткани, органы, системы органов и организмы, биоценозы (экосистемы). Как правило, такие системы имеют несколько уровней структурно-функциональной организации. Биологические системы представляют собой совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов. Они обладают свойствами целостности (т.е. свойства системы не сводятся к сумме свойств ее элементов) и относительной устойчивости, а также способностью адаптироваться к изменениям внешней среды.

“Любая биологическая система (**БС**) является динамической — в ней постоянно протекает множество процессов, часто сильно различающихся во времени. Однако БС — открытые системы, условием существования которых служит обмен энергией, веществом и информацией не только между частями системы (или подсистемами), но и с окружающей средой. Важнейшая особенность состоит в том, что такой обмен осуществляется под контролем специальных механизмов реализации генетической информации и внутреннего управления, которые позволяют избежать “термодинамической смерти” путем использования энергии, извлекаемой из внешней среды. Устойчивость стационарных состояний БС (сохранение постоянства внутренних характеристик на фоне нестабильной или изменяющейся внешней среды), а также способность их к переходу из одного состояния в другое (свойство неустойчивости стационарных состояний БС) обеспечиваются многообразными механизмами саморегуляции” [Большой энциклопедический словарь, 1989, с. 65; далее — БЭС].

В предыдущих разделах было показано, что Земля и ее биосфера постоянно испытывают влияние ЭМИ, корпускулярное действие внеземного источника, сама Земля является источником

*Например, весь кислород атмосферы обновляется через живое вещество в течение 2000 лет. Напряженность геомагнитного поля (т.е. геоинтрического диполя) уменьшается со скоростью, которая может привести к его исчезновению также примерно через 2000 лет.

ЭМП — все это приводит к биохимическим, физиологическим, генетическим и другим изменениям, возникающим в живых клетках и организмах. Важное значение в познании физико-химических явлений, протекающих в живых организмах, имело открытие в конце XVIII в. Л. Гальвани “животного электричества”. В XIX–XX вв. были заложены основные представления о принципах энергетики организмов и, в частности, об электрических явлениях в тканях и клетках. Биоэлектрические процессы обусловлены возникновением биоэлектрических потенциалов — электрических потенциалов, генерируемых в тканях и отдельных клетках живых организмов; они являются основными компонентами процессов возбуждения и торможения. Первые прямые измерения биопотенциалов с применением гальванометров были проведены К. Маттеуччи в 1837 г., а систематическое изучение было начато Э. Дюбуа-Реймоном (1848 г.), который показал, что между внутренним содержимым клетки (нервы, мышцы) и наружной средой в покое существует стационарная разность потенциалов (потенциал покоя), которая изменяется при возбуждении. В 1868 г. Ю. Бернштейн разработал метод, впервые позволивший проанализировать форму одиночного, длящегося миллисекунды, колебания потенциала (потенциала действия, ПД) при распространении возбуждения по нервному волокну. В 1883 г. Н.Е. Введенский использовал телефон для прослушивания ритмических разрядов импульсов в нерве и мышце. В 1910 г. английский ботаник М. Поттер обнаружил, что некоторые микроорганизмы при питании вырабатывают электрический ток. Однако его исследования долго не получали дальнейшего развития. И лишь недавно группа ученых Великобритании продолжила эти исследования. На основе 1 мл выделенной ими культуры микроорганизмов с плотностью до 100 млрд. клеток в миллилитре можно создать батарейку мощностью около 0,2 Вт, если микробов питать сахаром. Батарея из них объемом 10 м³ (размером с небольшой бассейн) смогла бы, потребляя в час 200 кг сахара, давать электроэнергию для целого поселка [Александров, 1985; “Электроэнергию вырабатывают микробы” // Физика в школе. 1997. № 6. С. 12.].

В XX веке произошел существенный прогресс в изучении биопотенциалов — появление электронно-измерительной техники, разработка методики микроэлектродного внутриклеточного отведения потенциалов. В 1947–1952 гг. А. Ходжкин, А. Хаксли и Б. Кац расшифровали ионный механизм возникновения ПД и сформулировали мембранную теорию биопотенциалов. Изучение ПД у животных важно для понимания физико-химических процессов в живых системах и применяется в клинике с диагностической целью (электрокардиография, электроэнцефалография, электромиография и др.).

Одновременно с исследованием электрогенеза животных клеток велось изучение биопотенциалов растений. Э. Дюбуа-Реймон доказал (1882 г.) общность биоэлектрических явлений у животных и растений, а Д.Ч. Бос (1926 г.) установил, что биопотенциалы и электрические ответы на раздражители присущи всем растениям. Он исследовал электрические реакции растений при действии физических и химических раздражителей. Классический объект исследований ионной природы биопотенциалов — крупные клетки харовых водорослей. Сложились и развились важнейшие отрасли биологии и медицины — электрофизиология и электробиология, клеточная и мембранная теория генерации и передачи электрических сигналов внутри биоструктур.

Источником электрических полей живых систем является биоэлектрическая активность электрогенных живых тканей, которая сопровождается протеканием в организме электрических токов, создающих на поверхности тела мозаику биопотенциалов. Генерируются они и за счет биохимической, физиологической и морфологической неоднородностей тканей организма, биоповреждений и т.д. Шерсть зверей, перья птиц и хитиновые покровы насекомых в результате трения приобретают заряды, которые перераспределяются за счет двигательных актов — дыхания, механических сокращений сердечной мышцы, моторики желудочно-кишечного тракта, движения органов тела и т.д. И поскольку все процессы жизнедеятельности сопровождаются электромагнитными явлениями, частота которых колеблется от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^3$ герц, на поверхности тела можно зарегистрировать переменное электрическое поле (ЭКГ, ЭМГ, ЭЭГ и др.). Естественно, что электрическая активность отдельных органов и тканей не ограничивается миграцией токов в проводящей среде организма, но создает и внешние ЭМП. Наибольший уровень внешних полей в воздухе имеет место в УНЧ- и НЧ-диапазонах, и при регистрации полей биообъектов фиксируются индукционные электромагнитные поля.

Источники внешних ЭМП живых организмов могут быть подразделены на три основные группы:

- электрическое и магнитное поля, генерируемые отдельными органами целостного организма;
- ЭП, обусловленные существованием поверхностного электрического заряда на теле человека или животного;
- ЭМП, обусловленные динамикой электрофизических свойств биотканей (α , ϵ , μ).

ЭП первой группы создаются мышцами и внутренними органами и не превышают по амплитуде единиц мВ, амплитуда МП = $10^{-13} \div 10^{-9}$ Тл.

ЭП второй группы отражают механическую работу и перераспределение поверхностного заряда, достигая $10^2 \div 10^3$ мВ.

ЭП третьей группы регистрируются вблизи объекта и изучены недостаточно, достигают сотен мВ*.

Особого внимания заслуживают электрические поля, обусловленные существованием и перераспределением электрического заряда на поверхности биологических объектов или их отдельных частей (клеток, тканей, внутриклеточных структур и т.д.), которые могут быть постулированы наличием электретного состояния вещества и, в частности, биосистем. Электреты начали систематически изучать с 1919 г., когда японский физик Егута [Егучи, см. БСЭ, 1989] получил их путем термического охлаждения расплавов во внешнем электрическом поле. В настоящее время под электретом понимают определенной формы диэлектрик, долго сохраняющий заряды разного знака, т.е. обладающий квазипостоянным электрическим зарядом. Заряд электрета может складываться из “реальных” зарядов, представленных либо поверхностными заряженными слоями, либо объемными структурами; это может быть распределение зарядов, отвечающих “истинной” поляризации; возможна также и комбинация обоих этих зарядов.

В то время как “истинная” поляризация обычно обусловлена замораживанием ориентированных диполей, реальные заряды образуют слои захваченных положительных и отрицательных носителей, часто располагающихся на противоположных поверхностях образца или вблизи них. В большинстве случаев суммарный заряд электрета равен или близок к нулю, поэтому обычно электрическое поле обусловлено не наличием скомпенсированного заряда, а лишь разделением различных по знаку зарядов. Таким образом, электреты могут создавать внешнее электрическое поле. Так будет, если поляризационные и реальные заряды не компенсируют друг друга в каждой точке диэлектрика. Такой электрет в некотором смысле есть электростатический аналог постоянного магнита, хотя, конечно, электретные свойства могут обуславливаться не только наличием диполей, но и присутствием зарядов одного знака. Магнитные же свойства, как известно, отвечают наличию только магнитных диполей. Существование внешнего поля и аналогия с постоянными магнитами часто лежит в основе определения понятия электрета [Электреты, 1983, с. 11–12].

Для искусственного получения электретов диэлектрик помещают в электрическое поле, подвергают определенному внешнему

*Бинги В.Н. Магнитобиология: эксперименты и модели. М., “МИЛ-ТА”; 2002. — 592 с.

воздействию, в результате которого ускоряется процесс миграции ионов и электронов и уменьшается время релаксации диполей. После прекращения внешнего воздействия время сохранения зарядов резко возрастает. Роль внешних воздействий могут играть рост температуры, освещение, МП, радиоактивное облучение и др. В частности, болгарский физик, иностранный член АН СССР Г. Наджакофф, в 1938 г. [Nadjakoff G., C.R. Acad. Sci., 204, 1937; Электреты, 1983, с. 14] исследовавший влияние света на фотоэлектрические слои, показал наличие разделения зарядов в таких слоях, происходящее при одновременном воздействии света и электрического поля. Таким образом, были открыты фотоэлектреты. Мы полагаем, что на это стоит обратить внимание, так как в реальных условиях, при измерении ЭП в воде и биоактивных слоях, нами были зафиксированы скачки градиента потенциала в момент мгновенного освещения водной поверхности Солнцем, вышедшим из-за кучево-дождевых облаков. Электреты могут быть получены непосредственным внедрением зарядов в диэлектрик (облучением электронами, ионами, коронным разрядом). Это — искусственные электреты.

Существуют и природные электреты — ткани животных, растений, человека. Их называют биоэлектретами. Важность электретного эффекта в биосистемах обусловлена как их биомедицинскими приложениями, так и возможной ролью в ряде фундаментальных биофизических явлений. Электретный эффект найден в большинстве важнейших биополимеров — белках, полисахаридах и некоторых полинуклеотидах. Наиболее фундаментальные для биологии молекулы (*коллаген, гемоглобин, ДНК и хитин*) не только проявляют электретные свойства, но и могут иметь разные центры (или, говоря биологическим языком, “компартменты”), которые запоминают поляризацию и заряд, диполи и связанные с молекулами ионы. Такая картина известна, например, при описании Доннановского равновесия в биофизических моделях мембранных процессов [Электреты, 1983]. Электретное состояние рассматривается в целом ряде разделов биофизики в качестве основы для понимания не только модели мембраны, но и для описания проведения нервного импульса, явлений биологической памяти и электрических связей в процессах регенерации и роста тканей и т.д. [Плонси, Барр, 1992].

В настоящее время сложилось представление о том, что электрический эффект является общим свойством биополимеров — полипептидов, полинуклеотидов, полисахаридов и ферментов. Типичен электретный эффект, найденный в *кератине*.

Наиболее последовательное определение электретов (особенно биоэлектретов) может быть дано в терминах времени релаксации: *вещество называется электретом, если время исчезновения*

запасенной поляризации гораздо больше характерного времени, в течение которого шел процесс накопления поляризации (заряда), т.е. в течение которого действовало поляризующее поле E_p в эксперименте или в естественных условиях.

В процессе поляризации биообразца могут возникнуть две ситуации:

1. Каким образом физически запасается заряд или поляризация в электрете и как можно идентифицировать соответствующий источник на основании свойств стимулирующего тока деполяризации?

2. Почему накапливаемый запас заряда или поляризации важен для биофизических явлений и биомедицинских приложений?

Биофизика дает ответы. Существуют места, центры, или компартменты, где происходит запасание заряда (поляризации):

диполи самого материала, а также примесей и дефектов;

ионы, обеспечивающие как собственную, так и примесную проводимость материала;

легкие носители заряда — электроны и дырки;

структурированная вода, связанная с молекулами материала (важно для биомакромолекул).

Ионная проводимость, приводящая к так называемому пространственному разделению заряда, обычно становится существенной и приводит к пику тока деполяризации для биомолекул в пределах комнатной температуры и выше.

Природные белки (гидрофобные, гидрофильные аминокислоты) содержат полярные остатки и в принципе могут быть приведены в электретное состояние, а такие белки, как кератины, в нативном, или природном, состоянии являются электретами, приобретая электретные свойства без приложения поля за счет **эф-фекта Косты—Рибейро*** [Ribeiro Costa I. // An Acad. Bras. Cienc. 1950. № 22. P. 325; Eyerer P. // Adv. Colloid Interface Sci. 1972. № 3. P. 233: Электреты, разд. 6.26] или **непосредственно при биологическом росте** [Электреты, разд. 6.10; 6.24]. Кроме того, кератин обладает одновременно электретными и пьезоэлектрическими свойствами. В коллагене и желатине присутствуют дипольные группы, что обуславливает электрическую компоненту, зависящую от ориентации диполей. Однако, если белок или другой биополимер гидратирован, то электретное поведение может быть обусловлено так называемой **связанной водой**.

*Эффект Косты—Рибейро — выброс спонтанного тока, связанный с фазовым переходом твердое тело — жидкий кристалл.

Связанная (структурированная, или биологическая) вода, которая существует в контакте с белками и другими биополимерами, является фактором принципиальной физической и биологической важности. Увлекательная история проблемы связанной воды началась в 1938 г. с фундаментальной работы Теллера с сотрудниками [Электреты, 1983, разд. 6.29]. Связанная вода также может находиться в электретном состоянии. И если это так, то вращательная энергия диполей связанной воды может изучаться наиболее прямым путем. Как полагают некоторые авторы, анализируя экспериментальные данные с поляризационными эффектами на воде и желатине, молекулы воды образуют структуры, подобные цепям, навитым на полипептидный остов. Тот факт, что энергетический пик спектра Фурье $G(T)$ отвечает температуре около $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, свидетельствует о присутствии воды в структурированном состоянии, в котором при этой температуре остается определенный барьер. То есть, стоит вопрос о том, ближе ли связанная вода к жидкости или к твердому телу? Электретное поведение связанной воды в эксперименте, видимо, свидетельствует о кристаллоподобности состояния воды, связанной вокруг биополимера. Дипольные ОН-группы могут, в принципе, обеспечить электретное поведение. Вода структурируется вблизи фибрилл. Водородные связи для гидроксильных групп весьма слабы, поэтому некоторые диполи могут свободно ориентироваться под действием внешнего поля. Но электретное состояние может возникнуть без участия внешнего поля, а именно *in vivo* — за счет адсорбции иона на макромолекуле, что может привести к возникновению локального поля порядка 10^4 В/см .

Диэлектрики способны длительно сохранять наэлектризованное состояние, т.е. существуют эффекты, связанные с удержанием зарядов, что исключительно перспективно для биологии и медицины:

предпринимаются попытки улучшить совместимость полимеров с кровью путем осаждения на них отрицательного заряда, а также наблюдения электретных свойств тканей человеческих и других костей и стенок кровеносных сосудов;

пленочные электреты, накладываемые контактным способом на места трещин и переломов костей животных, вживаясь в ткань, вызывают ускоренное нарастание костной мозоли;

изоляционная электретная пленка, наложенная на участок травмированной кожи, значительно повышает крепость зажившей раны на разрыв.

Все ЭП биообъекта несут информацию о его состоянии, образуя суммарный электрический эффект. В реальных условиях он трудно поддается разделению на составляющие и четкому обоснованию

источника информации. В частности, существует ряд проблем передачи активирующего (пускового) сигнала от возбужденной поверхности мембраны к внутриклеточным эффекторам.* “В этих процессах, как известно, важную роль играют ионные токи Na^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} , которые информационно обеспечивают мышечное сокращение, а также связь между характером относительного изменения параметров тканевого распределения этих катионов и этапноностью преобразования функциональной организации биосистемы в ходе эволюции мышц” (по сообщению В.П. Нестерова, ИЭФиБ). Однако такие и подобные им проблемы рассматриваются в специальной литературе по биоэлектричеству и биохимии и уводят нас от явлений макроскопических в область микромира, что не входит в задачи нашей книги.

Магнитные поля биообъектов регистрируются в более сложной обстановке с точки зрения обеспечения высокоточной аппаратурой (но об этом см. разд. 3.2).

3.1.2. Восприятие нестационарных сигнально-информационных слабых электромагнитных полей животными и растениями

Энергетическое воздействие электромагнитного поля Земли (ЭМПЗ) на биосферу исследуется путем анализа реакции живых систем в прямых экспериментах в естественных и моделируемых условиях.

В указанной фундаментальной проблеме основным вопросом считается выявление механизма передачи внешней информации в

***Эффекторы** — (лат. *effector* — создатель, творец): 1) в физиологии это исполнительные органы, обеспечивающие ответные реакции организма на раздражители; 2) в биохимии это продукты обмена веществ, которые, действуя на **ферменты**, повышают или понижают их активность; 3) в генетике — вещества, обычно низкомолекулярные, которые в соединении с репрессором влияют на его взаимодействие с оператором [БЭС, 1989, с. 744.]

Ферменты — это биологические катализаторы, встречающиеся лишь в живых организмах. Благодаря наличию ферментов в клетках происходят многочисленные химические реакции, которые составляют единую согласованную систему, именуемую обменом веществ. Ферменты обеспечивают возможность течения химических реакций в мягких условиях, свойственных живым организмам, т.е. при нормальном атмосферном давлении, невысокой температуре, близкой к нейтральной реакции среды (рН). При температуре ниже 10°C обусловленные ферментами процессы замедляются, а при $T^\circ > 40^\circ\text{C}$ ферменты перестают действовать.

центральную нервную систему живых организмов. Помимо выяснения энергетической роли ЭМП, безусловно, остается задача изучения сигнально-информационной и генетической функции именно слабых полей в диапазоне природных флуктуаций (УНЧ-диапазон, $10^1 \div 10^{-4}$ Гц).

В этом разделе данную проблему мы рассмотрим на примере различных биосистем с учетом новых сведений по экологии и физиологии человека.

В условиях хронического воздействия относительно слабых ЭМП естественного происхождения развивалась и в настоящее время протекает жизнь на Земле. Эти поля являются постоянно действующим экологическим фактором, и у большинства специалистов укоренилось мнение, что живые системы адаптированы к ним и переносят их изменчивость без существенных реакций.

Однако живые компоненты биосферы Земли вряд ли были генетически подготовлены к той мощной дозе электромагнитного излучения, которая в настоящее время обусловлена всем комплексом планетарных инженерно-технических средств и промышленных объектов. Тем не менее, влияние этого поля на живые организмы оценивается в очень широких пределах — от полного отрицания возможности каких-либо эколого-физиологических последствий до неоправданного преувеличения прогнозируемой опасности нарушения естественного хода эволюционного процесса. Ошибочность таких представлений обнаруживается при рассмотрении наблюдений в различных областях физиологической науки.

В предыдущем разделе (разд. 3.1.1) мы подошли к выводу о том, что биоэлектрические поля — неотъемлемое фундаментальное свойство живой материи [Биофизика. 1982. Т. 27, № 3; Там же. 1981. Т. 26, № 4; Кулин, 1980].

Необходимо подчеркнуть особую роль ЭМ полей, которая проявляется в действии на нервную систему животных и человека, заставляя их менять поведение.

Многочисленные эксперименты показывают, что животные обладают способностью чувствовать ГМП и ЭП, при этом значительная часть их за счет биохимического накопления природного магнетита в тканях организма приспособилась к передаче информации о ГМП в нервную систему (рис. 3.1).

Выяснилось из опытов, что существуют, по крайней мере, два типа магниторецепции:

один ответственен за определение направления поля с N на S с помощью сравнительно “малочувствительного” компаса;

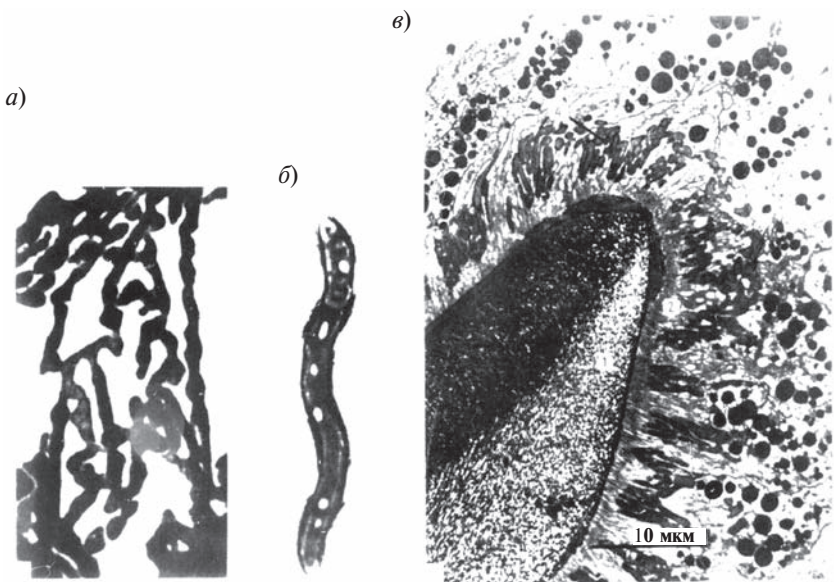


Рис. 3.1. Электронная микрофотография структуры магнетита (искусственного — *а* и биогенного — *б, в*):

а — образец структуры распределения продолговатых частиц железа, полученного электроосаждением; размеры на фотографии соответствуют площади участка $0,4 \times 0,7$ мкм;

б — фотография бактерии (*Spirilla MS-1*), обладающей магнитотаксисом [Frankel, Blakemore, 1980]. Здесь длина вертикальных отрезков соответствует $0,5$ мкм, т.е. длина бактериальной клетки примерно 3 мкм.

Пояснения: видна цепочка магнитных частиц в бактериях, для которых характерен магнитотаксис [Биогенный магнетит. 1989. Т. 1. С. 49; т. 2, с. 22].

Бактерии способны ориентироваться в МП и перемещаться вдоль его силовых линий, так как содержат богатые железом электроплотные частицы. Частицы состоят из Fe_3O_4 (однодоменная магнитная структура). Магнитный момент μ позволяет бактерии ориентироваться в ГМП при комнатной температуре. Этот живой компас перемещает клетки в северном направлении (в Северном полушарии) и в южном направлении (в Южном полушарии);

в — фотография магнитосомы. Показаны магнитные включения с обволакивающей их мембраной [Blakemore, Short et al, 1985]

другой ответственен за чувствительность к малым флуктуациям его абсолютной величины (так называемое чувство “карты” позвоночных). Это осуществляется с помощью более чувствительных систем организма.

К ориентационным эффектам (они обусловлены органеллами внутреннего “компаса”) можно отнести установленные факты:

пассивная ориентация магнитотаксических бактерий и водорослей;

ориентация танца пчел на горизонтальных сотах;

перемещение мальков лосося, пластиножаберных рыб, угрей*;

определенная ориентация амфибий (саламандры, тритоны);

ориентация голубей и мигрирующих птиц в облачную погоду.

Как может работать этот внутренний компас? Было доказано, что магнитотаксис бактерий связан с наличием у них **однодоменных**** кристаллов магнетита; бактериальные клетки обладают достаточно большим магнитным моментом μ , чтобы они могли поворачиваться и ориентироваться вдоль сравнительно слабого ГМП ($50 \text{ мкТл} = 50\,000 \text{ нТл}$). Это возможно, когда магнитная энергия превышает энергию теплового движения, т.е.

$$\mu B \cos \Theta \gg kT,$$

*Недавно новозеландские исследователи обнаружили у рыб (а именно — у радужной форели) нерв, который реагирует на магнитное поле, а над ноздрями — скопление частиц, содержащих железо (по-видимому, кристаллы магнетита). Теперь ученые намерены изолировать содержащие магнетит клетки, чтобы исследовать чувствительность этого компаса к интенсивности магнитного поля и его направленности. Следующий этап их работы — получение данных о том, как работает мозг с поступающей к нему информацией о магнитном поле [Физика в школе. 1997. № 6. С. 12].

**Домены (фр. *domain* — владение, область, сфера) — области химически однородной среды, отличающиеся электрическими, магнитными или упругими свойствами либо упорядоченностью в расположении частиц. Ферромагнитные домены — области самопроизвольной намагниченности, намагниченные до насыщения части объема ферромагнетика, на которые он разбивается ниже критической температуры (Кюри точка). Обычно домены имеют размеры $\approx 10^{-2} \div 10^{-3} \text{ см}$, они доступны непосредственному наблюдению (микроскоп). При уменьшении размеров ферромагнетика до некоторой критической величины разбиение на домены может стать энергетически невыгодным, образуется так называемая однодоменная структура: каждая ферромагнитная частица представляет собой один домен. Однодоменные ферромагнитные частицы: малые частицы ферромагнитных веществ, являющиеся одиночными доменами; для большинства ферромагнетиков $D_{\text{кр}} \approx 10^{-4} \div 10^{-6} \text{ см}$ — их намагниченность остаточная $J_r = J_s$, где J_s — вектор намагниченности, J_r — намагниченность [ФЭС. 1983. С. 182, 483].

где μ — магнитный момент клетки; B — индукция поля; Θ — угол между векторами μ и B ; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Из модели магниторецепции, учитывающей тепловые возмущения, следует, что магнитные моменты соответствующих оргanelл должны (или могут?!) различаться по величине в 3 и более раз. Это позволяет делать в той или иной степени расчеты и предсказания, поддающиеся проверке.

Чувствительность человека к метеофакторам, сопряженным с сопутствующими электромагнитными полями, к их высокой градиентности, обуславливает достоверно отмеченные факты летальности от них.

Установлено, что наибольшее количество скоропостижных смертей человека от инфаркта миокарда приходится на вторые сутки после магнитных возмущений (бурь). Некоторые исследователи увязывают такие эффекты с влиянием атмосферного электричества [Арабаджи В.И. // Биофизика. 1991. Т. 36, вып. 5. С. 919]. Наибольшая смертность людей наблюдается в промежутке $4 \div 10$ часов по местному времени, когда отмечается максимум объемной плотности электрического заряда в приземном слое воздуха, а также в $19 \div 20$ часов по местному времени, когда отмечается минимум плотности объемного заряда. То есть, объяснение эффекту ищется в отклонении плотности объемного заряда от среднего значения, которое обуславливает нарушение передачи электроимпульсов по трансмембранным путям биосистем организма человека. Известно, что среднее значение плотности электрического заряда в приземном слое атмосферного воздуха составляет примерно $3 \cdot 10^{-14}$ Кл/м³. В ослабленном организме отклонение от данного значения может послужить толчком к летальному исходу, что и подтверждалось уже давно А.Л. Чижевским [Космический пульс жизни, 1995]. Одновременно это является и указанием на чувствительность человека к суточным и полусуточным ритмам изменения электрического состояния окружающей среды [Биофизика. 1991. Т. 36, вып. 5. С. 919].

Исходя из этих замечаний, рассмотрим ряд примеров, показывающих высокую чувствительность различных организмов, обладающих собственным ЭМ излучением, к геомагнитному и электрическому полям среды обитания.

1. Напомним, что в 1979 г. В.В. Александровым с соавторами на открытой акватории Красного озера (Ленинградская обл.) впервые в мире был обнаружен эффект синхронизации вертикальных

перемещений зоопланктона геомагнитными ритмами. Моменты вертикальных активных подвижек совпадали с фазами Солнца*, а также коррелировали с динамикой вихревых электрических токов в ионосфере по местному времени. Во время геомагнитной бури ($\Delta B_Z \approx 200$ нТл) произошло нарушение ритма миграций, и наблюдалась деградация биомассы планктеров в трофогенном слое. В публикациях автора была высказана гипотеза о непосредственном влиянии ЭМП Земли на экосистемы водоемов и его синхронизирующую роль в регуляции двигательной активности планктонных сообществ. Биоэлектрические поля планктона явились индикатором концентрации биомассы, давали возможность проследить суточные миграции животных и были связаны с колебаниями ГМП. Результаты послужили основанием для продолжения исследования миграций планктонных сообществ на других озерах России и в Черном море в 1980–1984 годах. Биоритмы миграций действительно согласовывались с геомагнитным ходом по местному среднему времени. Однако в дальнейшем аналогичной обстановки по влиянию магнитных возмущений наблюдать не представилось, поэтому статистических данных в настоящее время нет. Результаты анализа заставляют обратить особое внимание на возможную прямую зависимость явления миграции от внешнего воздействия (см. разд. 2.5.3).

*В работе Т.Е. Вальчук [Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5, С. 776–778] рассматриваются отмеченные еще в 30-е годы XX в. А.Л. Чижевским изменения белково-коллоидного равновесия в крови, которые также связаны с суточными фазами Солнца. Прежде всего было отмечено, что реакция флуктуации имеет хорошо выраженный суточный ход, а характерной особенностью является то, что за $6 \div 8$ мин до астрономического восхода Солнца реакция флуктуации внезапно увеличивается примерно на 20 %. На протекание реакции флуктуации не влияют метеорологические условия, орографические факторы, атмосферное давление. В книге А.Л. Чижевского “Солнце и мы” подчеркивается, что увеличение реакции начинается именно до астрономического восхода Солнца, и даже если восточная часть горизонта закрыта горами и Солнце показывается лишь через час после восхода, на протекании реакции это не сказывается. От утренних до вечерних часов наблюдается возрастание реакции флуктуации, а после захода Солнца — постепенное ее уменьшение. Следовательно, фактор, влияющий на реакцию флуктуации, обнаруживает себя до астрономического восхода и закономерным образом изменяется во время геомагнитно-спокойных суток, достигая минимума перед восходом Солнца.

Воздействие конкретными физическими агентами — видимым светом, ультрафиолетовыми и мягкими рентгеновскими лучами, радиоволнами — не сказывалось на течении реакции флуктуации. Жесткий рентген ($0,1 \div 0,07$ Å), γ -лучи и нейтроны вызывают увеличение реакции только при таких значениях интенсивности, которые в природе не встречаются. Это позволяет утверждать, что не перечисленные выше конкретные агенты влияют на реакцию флуктуации.

Биомагнитные эффекты на уровне слабого геомагнитного поля (≈ 32 А/м) объясняются резонансом биотоков механической системы [Белов, Бочкарев, 1985]. В этом случае следует учитывать, что амплитуда возбуждаемых этим полем механических колебаний должна зависеть от угла между направлением локального биотока и направлением вектора геомагнитного поля. Не исключено, что именно этим резонансным механизмом объясняется предполагаемая способность некоторых животных ориентироваться в ГМП, и это требует новых направленных экспериментов.

2. На рис. 3.2 представлены записи изменения потенциала электрического поля $\Delta\phi$ относительно Земли в полосе частот $40 \div 3500$ Гц, произведенные вблизи различных биообъектов в естественных условиях:

а — фон $\Delta\phi$ в лесу в отсутствие насекомых в пределах 5 м от датчика;

б — рой комаров внутри брезентовой палатки;

в — слепень, пролетающий в $25 \div 50$ см от антенны;

г — ЭМ сигналы геофизических источников (под открытым небом, полночь);

д — $\Delta\phi$, обусловленное ударом по стволу березы; запись произведена в пределах 25 см от места удара; моменты удара показаны стрелками на рисунке [Электромагнитные поля в биосфере. 1984. Т. 1. С. 122.].

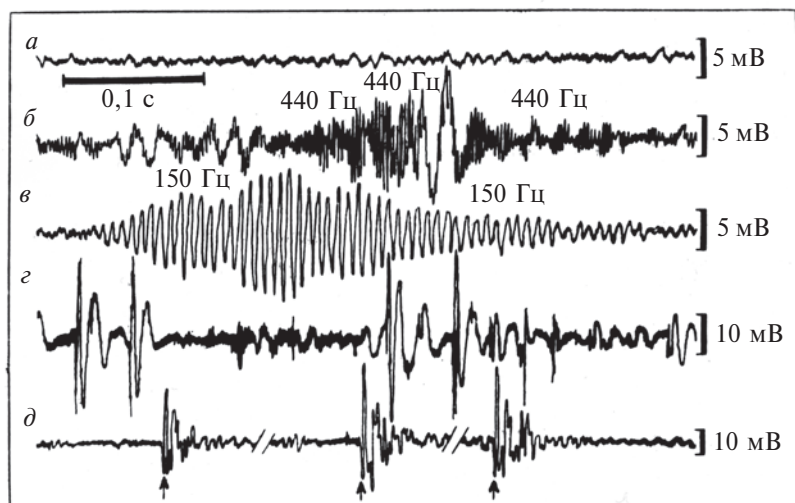


Рис. 3.2. Электрофизические эффекты, производимые биологическими объектами

В этой связи интересно отметить согласованность ЭП, генерируемого насекомыми, и ГМП. Так, энтомологами в 1980 г. во время геомагнитной бури наблюдались резкое искажение суточных миграций насекомых и частичная инвертированность практически у всех исследованных видов. Известно стало также об аналогичном поведении рептилий не только перед землетрясением, но и в период геомагнитных возмущений, когда ящерицы, вопреки обычному горизонтальному расположению на плоскости, размещались на вертикальных поверхностях [Корреляции биологических и физико-химических ..., 1993].

К выяснению механизма восприятия и последующего поведенческого акта подошла в 1989–1995 годах группа сотрудников НИИ физики СПбГУ и ЦНИРРИ РАМН под руководством Н.К. Белишевой. Были проведены работы в высоких широтах ($\varphi = 66,3^\circ$ с.ш., $\lambda = 33,7^\circ$ в.д., о.Средний, Белое море, Чупинская губа, Карелия) на фоновом геофизическом полигоне, свободном от источников промышленных ЭМ помех. Целью исследования являлась синхронная регистрация динамики морфофункционального состояния клеточных культур и вариаций ГМП [Белишева и др., 1993; 1995]. Было показано, что в культурах клеток, растущих *in vitro* и имевших различное онтогенетическое и физиологическое происхождение (мышь, хомяк, форель), при возмущении ГМП возникают множественные морфофункциональные изменения. Эти изменения связаны с поляризацией клеточных отростков, с усилением межклеточной адгезии, с обогащением клеточных популяций многоядерными структурами, а также с появлением гигантских ядер и с выбросами ядерного материала. Степень выраженности этих изменений зависит от исходного уровня изучаемого показателя. Исследования совпали с отрезком времени, включающим как спокойный период, так и сильное магнитное возмущение (Мировая магнитная буря 19–23 октября 1989 г., $\Delta B_Z \approx 1300$ нТл).

Начало биологических наблюдений пришлось на исключительно спокойный геомагнитный период, а примерно средняя часть ряда — на интенсивное возмущение, и в конце периода (в фазе восстановления) — умеренная геомагнитная активность. Такая геомагнитная ситуация позволила выявить значительные отличия в состоянии клеточных культур. Колебательный характер кривых уровня индекса многоядерных клеток, по оценке авторов, отражает преобладание тех или иных форм реорганизации генетического материала. Эти формы, по всей вероятности, обусловлены тремя процессами, одновременно идущими в популяциях:

1) слиянием клеток и образованием многоядерных структур после возрастания ГМП; 2) компактизацией ядер в ядерных ассоциатах с образованием одиночных гигантских ядер; 3) распадом многоядерных ассоциатов и гигантских ядер с последующей реутилизацией ядерного материала. В восстановительный период морфофункциональные особенности клеточного монослоя свидетельствуют о том, что после возмущения ГМП начинают доминировать процессы деструкции ассоциатов. Высокий коэффициент корреляции изменений в состоянии клеточных структур с уровнем геомагнитных вариаций ($\approx 18\%$) свидетельствует, с одной стороны, о наличии общей для этих изменений причины, а с другой — об универсальном характере реакций клеточных популяций на переменные условия среды.

Таким образом, в качестве внешней причины, меняющей “стратегию” жизни клеточных популяций, можно рассматривать вариации ГМП (безусловно, в общей цепи флуктуирующих внешних геофизических факторов, первопричиной которых является действие Солнца). В итоге популяция может обогатиться новыми клеточными вариантами, повышающими жизнестойкость системы в целом. В этом случае вариации ГМП следует рассматривать как реорганизирующую силу, способствующую в определенных случаях прогрессивному развитию биосистем и, возможно, содействующую их эволюции. Тем не менее, авторы справедливо отмечают, что в каждом отдельном случае при регулярной дестабилизации устойчивых состояний возможны и нежелательные формы адаптаций, которые могут приводить к неограниченному росту соматических клеток.

Серьезную попытку в изучении механизма воздействия внезапных изменений ГМП на клеточные и бактериальные культуры *in vitro* предпринимали исследователи Симферопольского государственного университета [Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 773–782]. Объектами для этой цели взяты морские светящиеся организмы, в частности фотобактерии рода *Photobacterium*, которые имеют внутриклеточный ферментативный световой “датчик”, чувствительный к воздействию электромагнитных полей. Было обнаружено, что в магнитоспокойные дни характеристики биолюминесценции бактерий стационарны, но существенно изменяются во время магнитных бурь. Во время бури, в зависимости от ее фазы, свечение либо увеличивается на несколько порядков, либо значительно уменьшается. Оказалось, что магнитные бури и предшествующая им нестабильность ГМП приводят к определенным

морфологическим изменениям в культуре бактерий и к полному гашению светового сигнала клеток. Примером такого состояния изучавшегося клеточного материала в культуре бактерий служат изменения, произошедшие во время многодневной магнитной бури 20–23 сентября 1996 г. (вариации поля в пределах от -80 до 80 нТл, буря с внезапным началом). Фотографии культуры бактерий показывают, что до возмущения колонии были полупрозрачными, имели выпуклую линзоподобную форму с диаметром до 3 мм. После интенсивного геомагнитного возмущения наблюдалось значительное уменьшение размеров колоний, связанное с замедлением роста клеток. Все дефектные колонии имели слабую биолюминесцентную активность или не имели ее совсем. Отмеченная дифференциация клеток по ростовым и световым характеристикам была обусловлена как мощностью, так и продолжительностью магнитной бури. То есть авторы выявили “спонтанные” мутации фотобактерий, которые “запускаются” космофизическими факторами. Тем не менее, они полагают, что физический механизм такого влияния остается открытым и нуждается в дальнейшем изучении.

3. В данном разделе особое внимание мы уделяем вопросу о чувствительности животных к действию магнитных раздражителей и в первую очередь рыб. У них были изучены собственные электрические поля, восприятие ЭМП различного происхождения и свойства центральных нейронов путем использования электрофизиологического и условнорефлекторного методов, а также анализа поведенческих и ориентационных реакций (рис. 3.3).

Обозначения на рис. 3.3:

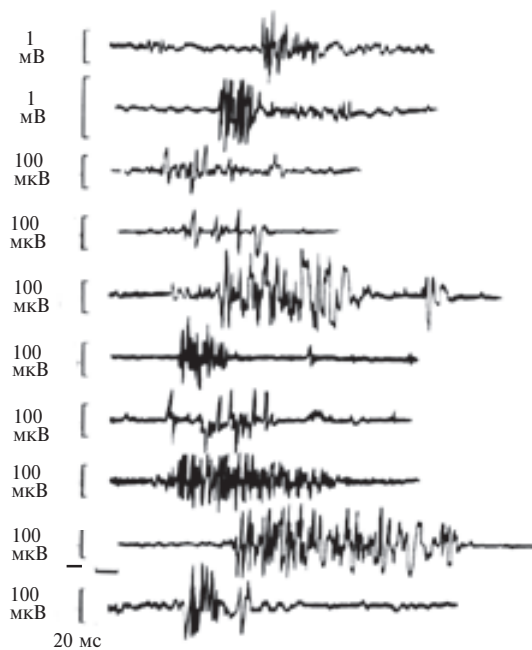
Разряды, создаваемые рыбами: *a* — речной угорь, *b* — обыкновенный сом, *в* — судак, *г* — жерех, *д* — осетр, *е* — русский осетр, *ж* — налим, *з* — щука, *и* — белуга, *к* — окунь.

Электрические разряды (*A*) и градиент потенциала квазистатического ЭП вблизи неэлектрических рыб (*B*): *a* — угорь, *b* — щука, *в* — окунь, *г* — судак, *д* — налим, *е* — плотва, *ж* — радужная форель, *з* — лещ, *и* — ерш, *к* — карась, *л* — линь.

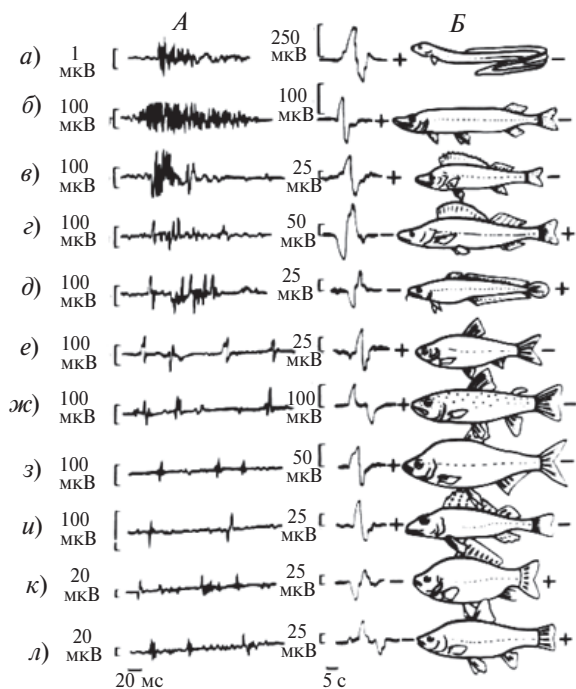
Дыхательные потенциалы рыб: *a* — щука, *b* — окунь, *в* — судак, *г* — налим, *д* — альбинос цихлосомы, *е* — плотва, *ж* — радужная форель, *з* — карась, *и* — линь, *к* — речной угорь.

Электроразряды неэлектрических рыб: *a* — плотва, *b* — линь, *в* — карась обыкновенный, *г* — карась серебряный.

a)



б)



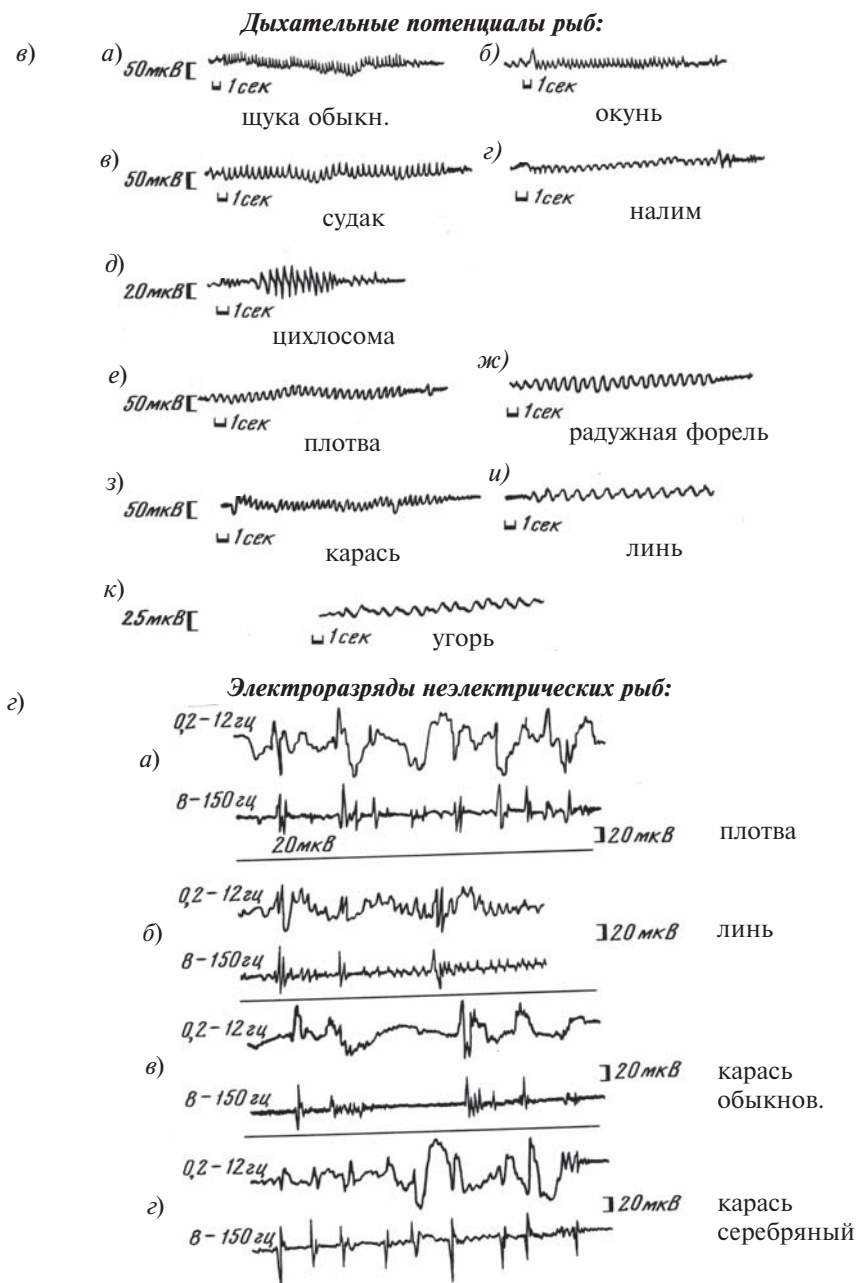


Рис. 3.3. Генерирование электрических полей пресноводными незлектрическими рыбами разных пород [Басов, 1985]

Однако лишь обнаружение в составе боковой линии электро-рецепторных структур открыло реальные подходы для нейрофизиологического изучения этой проблемы [Bastian, 1976]. Не рассматривая вопросы электрорецепции (существуют многочисленные публикации по проблеме), укажем только, что наличие специализированных морфофункциональных структур (ампулированные или бугорковые рецепторы) позволяет некоторым рыбам проявлять исключительно высокую чувствительность к действию электрического и магнитного полей в морской воде (акулы, скаты) [Сенсорные основы поведения..., 1991].

***Описание рефлекторных поведенческих реакций
на примере морских и пресноводных рыб и животных
(работы ФИН РАН и ИЭФ РАН)***

1. Первые работы по обнаружению безусловнорефлекторных реакций на линейное изменение магнитного потока через тело рыбы были проведены со скатами (*Raja* и *Trygon*) [Броун, Ильинский и др., 1972]. В специальных опытах была показана принципиальная возможность восприятия животными магнитной стимуляции, выявлены изменения тканей центральных и периферических структур мозга рыб [Броун, Ильинский и др., 1977; 1978]. Наибольшей чувствительностью к изменению МП обладают рецепторы с низкими значениями порогов к электрическому полю, а структура ответа на магнитную стимуляцию аналогична таковой при электрической стимуляции. Импульсный ответ на изменение МП сменяется тормозным периодом, длительность которого определяется интенсивностью предшествующего стимула. Интенсивность реакции определяется скоростью изменения магнитного потока, проходящего через тело рыбы. В то же время постоянное МП при отсутствии движения животного или движения воды не влияет на импульсную активность вне зависимости от напряженности поля. Характер импульсных реакций определяется не только направлением магнитных силовых линий, но и направлением движения рыбы или воды. Интенсивность реакции линейно зависит от напряженности магнитного поля и скорости движения. В лабораторных условиях при компенсации ГМП в кольцах Гельмгольца была зафиксирована реакция электрорецепторов ромбовидного ската *Raja*: при скорости потока воды 24 см/с обнаруживали статистически достоверную реакцию нервного волокна на

предъявление и компенсацию ГМП [Броун, Ильинский и др., 1984].

Наиболее показательными из серии опытов данной направленности явились результаты достоверной регистрации колебаний ГМП при его градиенте $\approx 0,2 \div 1$ нТл/с и синхронных с ними колебаний электрических токов в морской воде с амплитудой $\approx 5 \cdot 10^{-5}$ В/м, которые вызвали импульсные реакции рецепторов [Броун, Муравейко и др., 1980]. Впоследствии эти результаты были расценены государственной экспертизой как открытие, однако дальнейшие исследования развиваются весьма пассивно из-за смерти основного специалиста по работе на нервных волокнах ампулированных структур — Броуна Герберта Романовича (Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН). Было доказано, что чувствительность рецепторного аппарата рыб ($\approx 10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-3}$ В/м) допускает достоверную реакцию на вариации ГМП непосредственно — через индукционные электрические токи, а их способность воспринимать даже слабые магнитные поля гидродинамических источников (волны, течения) предполагает их биологическую значимость в ориентационно-навигационной деятельности животного.

В последнее время начинает утверждаться мысль о наличии магнорецепторного аппарата у рыб, в частности, у лососевых (*Salmonidae*), что подтверждается в электрофизиологических и нейроанатомических опытах (тройничный нерв — его одиночный нейрон — как индикатор изменения интенсивности МП в пределах 25 мкТл и частотой $0,5 \div 1$ Гц) [Mann, Sparks et al., 1988; Ogura M. et al., 1992]. При этом авторы [Walker et al., 1993] свою работу очень корректно завершают замечанием, что связь между нервной системой и природными частичками магнетита еще окончательно не установлена. Действительно, кратковременные индукционные действия МП, применявшиеся в опытах, по порядку сопоставимы с уровнем постоянного ГМП, поэтому такие резкие изменения (аномалии) вряд ли смогут встретиться животным в открытой системе крупных водоемов. Работы в этом направлении будут продолжаться, включая исследования на поведенческом уровне [Биофизика. 2004. Т. 49, вып. 1. С. 140–144; разд. 3.1.4].

2. Именно недостаток экспериментального материала для анализа ответных реакций рыб на воздействие МП на поведенческом уровне, который отмечается в отечественных и зарубежных публикациях, попыталась восполнить комплексная группа ИЭФиБ

им. И.М. Сеченова РАН в 1988–1995 годах, в 1993 г. к ней присоединились сотрудники РГГМИ [Александров, 1995]. Общим для этих работ являлось принятие единой методики исследования результатов воздействия внешних физических факторов на двигательную активность гидробионтов (см. разд. 2.2).

Поскольку выяснение механизмов передачи информации из окружающей среды в рецепторную систему живых организмов представляет собой весьма трудную задачу, то изучение поведения, движения и ориентации животных в открытых экосистемах при наличии сложно изменяющегося ЭМП практически неосуществимо. Поэтому на начальном этапе исследования выбран путь физического моделирования в примитивных лабораторных экосистемах, не содержащих растений. В качестве физиологических тестов были использованы локомоторная активность (ЛА) и биоритмы (БР) поведенческих реакций карповых рыб (*Cyprinidae*, *Carassius auratus*). Рыбы помещались в аквариальную систему, где электрополюметрическим методом измерялись флуктуации ЭП, генерируемого рыбами при их свободном движении в аквариуме [Юбил. сб. СПбГТУ. 2000; Вестник МАНЭБ. 2001. № 3 (39)]. Использовались рыбы одного помета в возрасте от 1 года до 3 лет. Проводились непрерывные измерения разности потенциалов между электродами бесконтактного зонда, возникающей при свободном движении в воде одной или нескольких особей. Гармонические составляющие электрического сигнала выявлялись с помощью стандартных процедур Фурье-анализа. За меру интенсивности ЛА были приняты значения энергии Фурье-спектра. Эту величину можно считать характеристикой степени восприятия животными внешних ЭМ воздействий. Статистическая значимость пиков в Фурье-спектре устанавливалась с 95-процентной доверительной вероятностью.

Обработка результатов проведена в соответствии с требованиями статистического анализа по стандартным программам (“Statgraph”, “Mezozaur” и др.) с применением компьютерной техники системы IBM. Результаты длительных (≈ 4 сут) реализаций синхронизированы с данными по ГМП на обсерватории “Воейково” (Ленинградская обл.). Таким образом, в рассматриваемом примере представлена физическая модель: физический фактор и синхронизатор — естественное ЭМП, воспринимающая изолированная биосистема — группа аквариумных рыб.

В последние годы значительный объем исследований был посвящен количественной оценке устойчивости рыб к действию экстремальных электрических и магнитных полей.

Как известно, устойчивость организмов к воздействию среды обитания в биологии рассматривается как способность, или свойство их противостоять влиянию экстремальных факторов среды. Это свойство вырабатывалось в процессе эволюции и генетически закрепились. Следует отметить, что устойчивость к действию электромагнитных факторов еще недостаточно изучена, несмотря на обширные исследования в этой области как в биологии, так и в медицине. Обычно присущий животным уровень устойчивости выявляется лишь при действии экстремального фактора среды, и если оно не достигло порогового значения, наступает фаза адаптации. Адаптированные организмы значительно меньше реагируют на повторное или усиливающееся воздействие экстремального фактора, в чем мы убедились, проводя наблюдения в камере с компенсированным геомагнитным полем или в условиях пульсирующего соленоидального магнитного поля различных частот ($1 \div 2000$ Гц), а также в опытах по действию переменного электромагнитного поля (ПеЭМП).

В качестве количественной меры устойчивости организма в поведенческих опытах нами был принят критерий, характеризующий локомоторную активность рыб. Локомоторная активность в течение суток существенно изменяется в зависимости от времени наблюдения, т.е. практически от состояния электромагнитного фона среды, связанного с внешними воздействиями на ГМП, или в результате локального действия сильных техногенных ЭМ факторов (рост напряжения и силы электрического тока, наличие неионизирующего СВЧ-излучения и т.д.) Поэтому ЛА мы регистрировали непрерывно в течение одного ÷ четырехсуточного циклов наблюдений с тем, чтобы выявить неустойчивое состояние животных, оценивая активность как функцию либо геомагнитных возмущений, либо прямого действия искусственного ЭП промышленной частоты.

Таким образом, рассматривались конкретные задачи исследования тонкой структуры ЭП, генерируемого рыбами, а именно:

- амплитудно-частотные характеристики ЭП рыб как функции элементарных актов движения;
- структура энергетического спектра ЭП рыб как функции биоритмов в хроническом эксперименте;
- биоритмы ЛА, связанные с изменением ЭМ характеристики внешней среды.

Устойчивое состояние рыб семейства карповых (*Cyprinidae*, *Carassius auratus*) при отсутствии экстремальных факторов среды

А. Индивидуальное поведение

Животные исследовались в условиях, имитирующих естественную примитивную экосистему, невозмущенную действием внешних физических факторов в экранированной камере. Электрограммы ЛА зафиксировали всевозможные виды движения с переменной амплитудой сигналов (статистика более 1000 опытов): $60 \div 220$ мкВ (активные повороты животного), $20 \div 60$ мкВ (движения хвоста), $100\text{--}150$ мкВ (изгибание тела), $80 \div 100$ мкВ (активные проплывы), $60 \div 100$ мкВ (опускание—подъем), 120 мкВ (резкие броски), $100 \div 160$ мкВ (беспорядочные движения при гипоксии) и т.д. Локомоторная активность даже в такой простейшей модели экосистемы (без растений) оказалось исключительно разнообразной, отличалась периодами подъема и спада в различные часы суток, поэтому выделить конкретные участки электрограмм, соответствующие определенным видам (типам животных), весьма непросто, и требуется дополнительное визуальное наблюдение оператора. Оценку ЛА провели с помощью спектральной плотности энергии электрических сигналов, обусловленных различными видами движения рыб, при сравнении их с фоновым состоянием ЭП в аквариуме. При полной неподвижности рыбы (длиной 21 см, весом 200 г) максимум спектральной плотности ЭП находится в пределах УНЧ-диапазона колебаний и соответствует частоте $0,10 \div 0,11$ Гц. Выше 0,5 Гц поле флуктуирует в большей степени на уровне шума.

Общий спектр сигналов, описывающий все многообразие ЛА, лежит в пределах $0,1 \div 2,5$ Гц, причем движения, сопровождающиеся поворотами животного, приводят к концентрации энергии в области $0,1 \div 0,5$ Гц с максимумом ее $G(f)$ на $f = 0,125$ Гц (рис. 3.4, цв.). Однако рост $G(f)$ может быть связан не только с интенсивностью и сложностью движения, а варьировать в течение суток в $1,5 \div 4$ раза, смещаясь в область $1,0 \div 1,5$ Гц, и зависеть от внешнего синхронизатора, на что указывает изменение биоритмов, отмеченное в многосуточных записях. Так, наблюдали в групповом поведении рыб ($3 \div 5$ особей) 5-минутный рост энергии ЛА и сдвиг частоты $G(f)$ в область $1,0 \div 1,5$ Гц, затем 15 $\div$ 20-минутный период относительно спокойного поведения и сдвиг максимума $G(f)$ снова в область $0,1 \div 0,2$ Гц.

Б. Волновая структура ЭП как функция рефлекторно-поведенческих реакций в течение суток. Ультрадианные биоритмы ЛА

Эти характеристики активности животных рассмотрены нами как показатели устойчивости их к экстремальным условиям в ЭМ обстановке региона.

Действительно, изучение электрограмм ЛА с продолжительностью регистрации от 2 ч до $3 \div 4$ суток показало, что ЭП, генерируемое рыбами, представляет собой суперпозицию полей волнового типа. Волновое поле электрограммы локомоторной активности анализировалось путем последовательного интегрирования волновых пакетов $\Delta\phi$ на интервалах в 1 ч, что позволило оценить функциональное состояние рыб по степени их активности. Распределение энергии активности в течение суток с учетом геомагнитной обстановки в Северо-Западном регионе по локальным K -индексам (“градиентное состояние” крупных внутрисуточных биоритмов роста или спада ЛА было проведено с учетом моментов восхода и захода Солнца и Луны).

Именно “градиентное состояние” при росте или спаде ЛА позволило обнаружить крупные внутрисуточные (ультрадианные) биоритмы в поведенческих реакциях целостного организма, которые изучены весьма неполно и до сих пор вызывают споры в научных аудиториях. Так, например, чередование всплесков активности и покоя с интервалом около 2 ч требует объяснения, действительно ли оно является результатом “эндогенного ритма или это только лишь результаты чисто стохастических процессов определенного типа?” [Ашофф]. В пользу последнего утверждения могут склонить полученные нами результаты. Так, были выявлены долгопериодные биоритмы $8 \div 9$ -часовой (солнечный) и $8 \div 12$ -часовой (лунный). На фоне такого ритма выделяются более короткопериодные ритмы активности: $15 \div 20$ -минутные ритмы снопоподобного состояния; $4 \div 11$ и $15,7$ -минутные ритмы следования импульсных “волновых пакетов”, характерных для моментов “градиентного состояния” в ЛА утром и вечером.

Спектрограммы энергии для моментов с высокой активностью животных обнаруживают микропульсирующие гармоники: $60 \div 62,5$; $14,6 \div 14,7$; $12 \div 12,1$; $9,4 \div 9,6$ и $6 \div 6,5$ секунды с уровнем значимости 95 %. Такие пульсации известны в магнитосфере и магнитном поле Земли.

Потеря устойчивости организмами, связанная с геомагнетизмом

А. Волновая структура ЭП рыб как функция неоднородности ГМП в Северо-Западном регионе по локальным K -индексам

Интегральная характеристика $\Delta\phi$ показала, что в нарушении устойчивости поведения животных существенную роль играют возмущения ГМП. Так, рост магнитной активности (K -индекс более

4 ÷ 5) сначала иллюстрируется вспышкой ЛА, а затем ее существенным спадом (периодом состояния с крайне низкой активностью).

Б. Спектральная структура ультрадианных ритмов активности в магнитоспокойные и магнитоактивные дни

Такая оценка была проведена с учетом предварительной фильтрации Δf , т.е. были исключены из обработки отрезки записей, приуроченные к восходу или заходу Солнца и Луны, влияние которых было отмечено ранее на электрограммах суммарного волнового поля (рис. 3.5, б). Таким образом, детальной спектральной обработке временных суточных рядов ЭП были подвергнуты только отрезки времени с 08 до 18 часов и с 22 до 06 часов по московскому времени, что, безусловно, обедняет общие результаты.

3. В качестве примера рассмотрим два состояния ГМП в Северо-Западном регионе России. В магнитоспокойные дни (K -индекс не более 3 баллов по Международной шкале) 3–5 мая 1993 г. общий максимум $G(f)$ приходится на биоритмы $3 \div 3,5$ ч, второй максимум — на ритм $1 \div 1,5$ ч, причем рефлекторно-поведенческие реакции животных соответствуют устойчивому состоянию организма, без резких изменений в течение суток (рис. 3.5). Эти биоритмы активности, как было показано в разд. 1.2–1.3, могут быть обусловлены ритмами ионосферных электрических токов.

При росте магнитной активности (K -индекс 4 ÷ 5 баллов) отмечается сначала вспышка ЛА, а затем существенный спад ее (состояние низкой и крайне низкой активности). Для неустойчивого состояния организмов, связанного с экстремальными характеристиками ГМП и циклональной циркуляцией атмосферы, выявлено значительное изменение в величине энергии и длительности основных биоритмов ЛА. Так, в магнитовозмущенные дни (K -индекс свыше 6 баллов, буря 100 ÷ 180 нТл 8–10 мая 1993 г.) биоритм активности, равный $3 \div 3,5$ ч, сохраняется, но значение $G(f)$ уменьшается в несколько раз или на порядок, ритм в $1 \div 1,3$ ч практически выражен нечетко, т.е. магнитное возмущение, видимо, способствует снижению активности именно в пределах данных ритмов (см. рис. 3.5).

Следует подчеркнуть, что визуальные наблюдения подтверждают инструментальные данные. В частности, сведений о геомагнитных возмущениях в период экспериментов у нас не было, но в дневнике за 9 мая 1993 г. зарегистрировано пассивное поведение

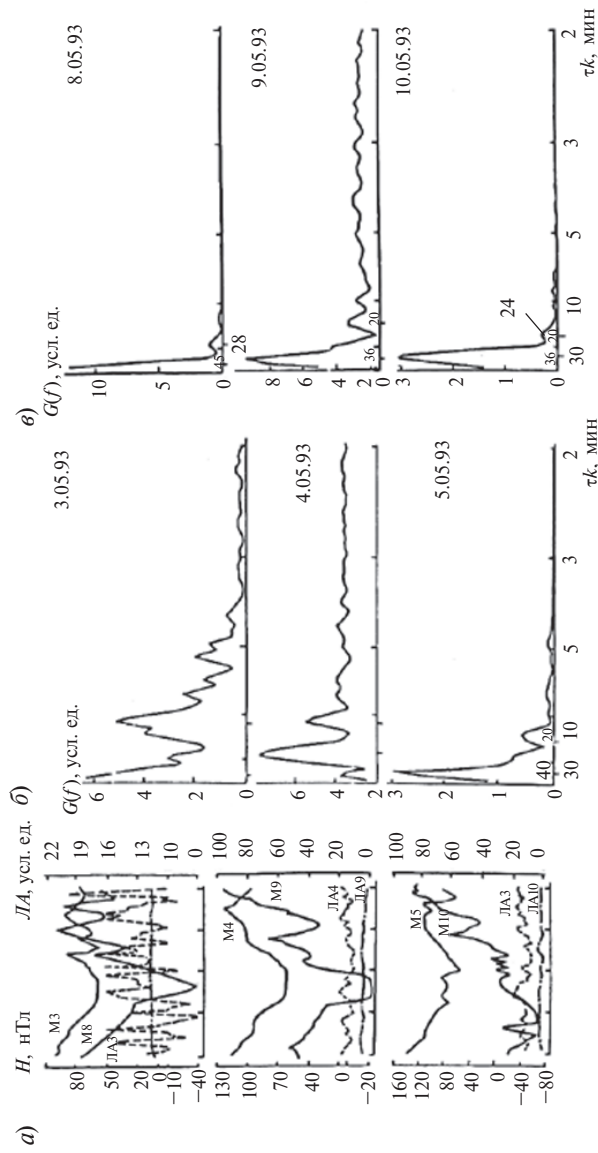


Рис. 3.5. Рефлекторно-поведенческие реакции животных: а — корреляция устойчивости локомоторной активности (ЛА) рыб с изменением геомагнитного поля. М3—М5 — магнитограммы за период невозмущенных дней; ЛА3—ЛА5 — электрограммы за период невозмущенных дней; М8—М10 — магнитограммы за период магнитоактивных дней; ЛА8—ЛА10 — электрограммы за период магнитоактивных дней; τk — ось периодов, где $k=25$ мин; ноль соответствует 08 ч московского времени; б — спектральная плотность энергии электрического поля локомоторной активности рыб в период невозмущенных дней, 3–5 мая 1993 г. τk — ось периодов, где $k=5$ мин; θ — спектральная плотность энергии электрического поля локомоторной активности рыб в период магнитоактивных дней, 8–10 мая 1993 г. τk — ось периодов, где $k=5$ мин

рыб и вялое сьедание корма. На рис.3.5,*a* даны непосредственные реализации магнитограмм и электрограмм, скомпонованные попарно, для наглядного представления связи существенного снижения активности рыб с резким возмущением ГМП, при этом 3.05.93 масштаб для амплитуд (ЛА) взят в 5 раз крупнее, чем 4–5.05.93 с тем, чтобы показать характер флуктуаций поля в магнитоспокойные дни. Эти новые лабораторные данные подтверждают ранее полученные сведения о деградации биомассы озерного планктона в момент геомагнитной бури (см. разд. 2.5.3).

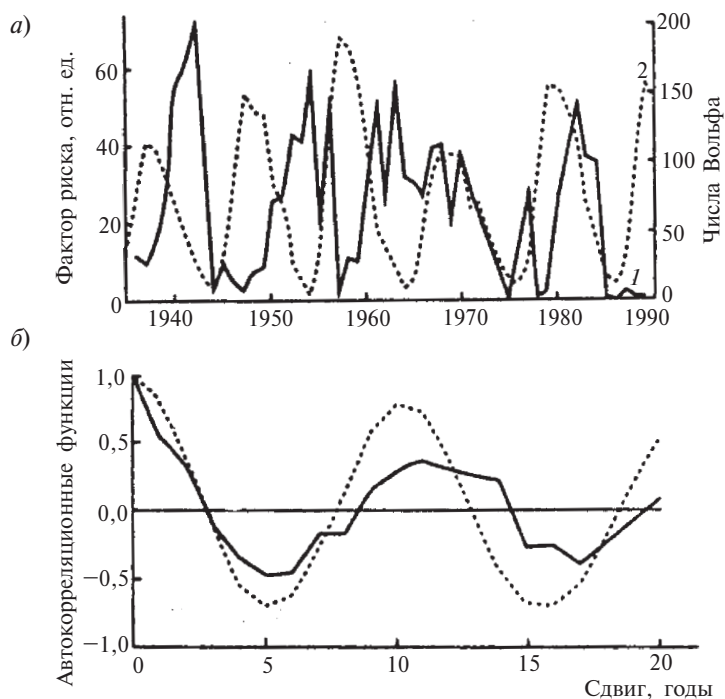


Рис. 3.6. Многолетняя динамика гибели интродуцированных древесных видов (*a*) и ее автокорреляционный анализ (*б*) в Полярно-альпийском ботаническом саде-институте (ПАБСИ) по сравнению с числами Вольфа: 1 — фактор риска; 2 — числа Вольфа [Кашулин, Ролдугин // Биофизика. 2000. Т. 45, вып. 5]

Таким образом, гидробионты теряют свою устойчивость и не сохраняют обычную ЛА в период геомагнитных возмущений (экстремальный фактор среды), адаптация у животных к воздействию не наблюдалась или наблюдалась через длительное время.

4. Хронобиологические наблюдения (гелиогеосферные модуляции, космофизические факторы, слабые низкочастотные ЭМ воздействия) позволили установить неравноценность влияния различных сезонов года в протекании биологических процессов, особенно в авроральной или полярной зонах субарктики [Биофизика. 2000. Т. 45, вып.5. С. 950–953]. Это выражается в географическом лимитировании распространения ряда особенностей поведения животных на популяционном уровне, в биологической продуктивности и генеративных процессах у растений, а также, что крайне важно, в отклонениях от нормы физиолого-медицинских показателей человека. К числу таких лимитирующих факторов относят 11-летнюю периодичность СА, квазидвухлетние колебания ветровой струи в стратосфере над экватором, квазичетырехлетние колебания морских течений в южном полушарии Эль-Ниньо, пересечения Землей через 1–2 недели секторной структуры МПМП (см. ч. 1.1) и др. Причинно-следственные связи между различными геофизическими явлениями и процессами сложны и не всегда ясны, но эффекты солнечной и космической активности проявляются на Земле в первую очередь в высоких широтах. Так, например, на рис. 3.6 представлены данные по периодичности гибели интродуцированных древесных пород и травянистых растений на Кольском полуострове в ритме СА. Таким образом, прослеживается модулирующая роль влияния гелиогеофизических факторов на характер многолетней динамики биопродуктивности и продолжительность жизни интродуцируемых видов растений в субарктических условиях.

3.1.3. Естественная электромагнитная среда и человек

Рассмотрение этого актуальнейшего вопроса, видимо, целесообразно начать с изложения общих электрических и магнитных характеристик человеческого организма, проявляющихся в пространстве и времени и подвергающихся модуляции внешними ЭМ источниками.

На рис. 3.7–3.11 представлены типичные осциллограммы потенциалов электрической активности человека и его отдельных органов в ультранизкочастотном диапазоне колебаний [Электромагнитные поля в биосфере. 1984. Т. 1. С. 122]. Собственные поля человека могут проявлять себя и в других диапазонах частот (табл. 3.1) и неизбежно взаимодействуют с общепланетарными и локальными

геомагнитными колебаниями*. Возникает комплекс эмоциональных реакций, который на примере синдрома “полярного напряжения” изучался в работе [Белишева и др., 1993; 1995]. Авторами была обнаружена зависимость между уровнем геомагнитной возмущенности и динамикой поведения отдельных характеристик крови, неравнозначность параметров ГМП для функционирования различных систем организма, избирательная чувствительность отдельных функций организма к амплитудно-частотному “дозовому” спектру ЭМП, колебательный характер неспецифической резистентности организма школьников, сопряженный с колебаниями ГМП.

Подобные результаты получены по материалам скорой помощи Москвы [Гурфинкель, 1995], где отразилось убедительное влияние синхронизирующего воздействия магнитосферных процессов на физиологию человека. Статистика наблюдений в течение трех лет охватила более 1 млн. человек, оказавшихся так или иначе под

*Недавно в печати вновь появилось сообщение о структуре и методах измерения электрических потенциалов на кожных покровах и слизистых оболочках человека в виде электрокардиограмм (ЭКГ), электроэнцефалограмм (ЭЭГ), вызванных потенциалов (ВП), электрограмм при открывании и закрывании глаз человека (ЭОГ) и др., но с новыми результатами, касающимися тонкостей взаимодействия внеклеточных ЭМ полей с ближайшим пространством, показывающими высокую информативность электрокинетических явлений с точки зрения диагностики и функционального состояния организма *in vivo* [Дубров А.П., Галеев Р.М., Кравченко Ю.П., Савельев А.В.; <http://skyzone.al.ru/tech/fasoaurometr.html>]. Авторы методологического подхода и новой аппаратуры исследования слабых ЭМ полей, излучаемых человеком, рассматривают измерительную технику нового поколения серии ФАЗОАУРОМЕТР, регистрирующую поля в диапазоне $5 \div 10$ кГц. Новые приборы производят спектральную обработку ординат излучаемого сигнала с расчетом его фазового сдвига относительно частоты опорного сигнала, т.е. оценивается в итоге ЭМП человека на отдельных фиксированных частотах и проводится топологическая съемка эквипотенциальных поверхностей вокруг его тела. Показано, что фазовая поверхность в норме у здорового человека описывается эллипсоидом вращения на расстоянии $50 \div 75$ см от кожных покровов. Конфигурация эквипотенциалей характеризует защитные силы организма: функциональные и морфологические изменения в тканях и органах выявляются по локализации патологических очагов на поверхности эквипотенциали относительно тела пациента. Созданные приборы фактически представляют собой томографы биоэлектрической оболочки объекта в трехмерном пространстве [<http://apdubrov.inc.ru>].

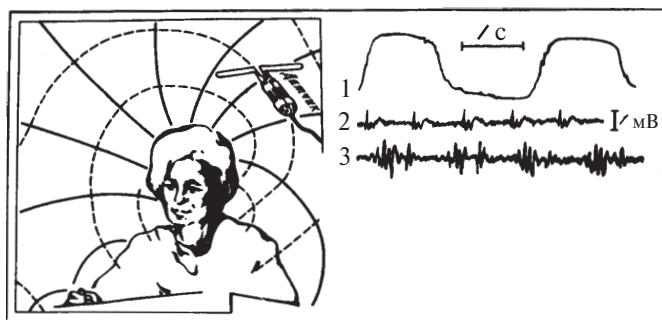
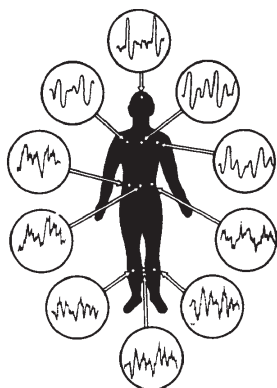


Рис. 3.7. Распределение электрических потенциалов в УНЧ-диапазоне в окрестностях человеческого тела.

Справа: 1 — дыхательные потенциалы; 2 — потенциалы активности сердца; 3 — сейсмокардиограмма (механоактивность).

Слева: электрическая активность в пределах головы. Сплошные радиальные линии — силовые линии ЭП, пунктирные кривые — эквипотенциальные линии

a)



б)



в)

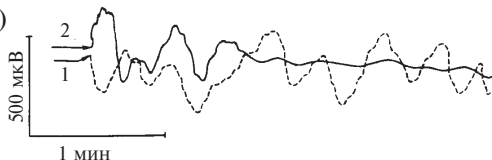


Рис. 3.8. Кинетика ЭП человека при различных условиях регистрации: а — электрограммы электрического поля человека при его регистрации над различными точками тела. Время регистрации 1 с; записи получены при различных усилениях и несравнимы по амплитуде; б — сравнительные записи электрогастрограммы (1) и электрического поля человека (2) после приема пробного завтрака; в — фоновые записи до физиологического воздействия

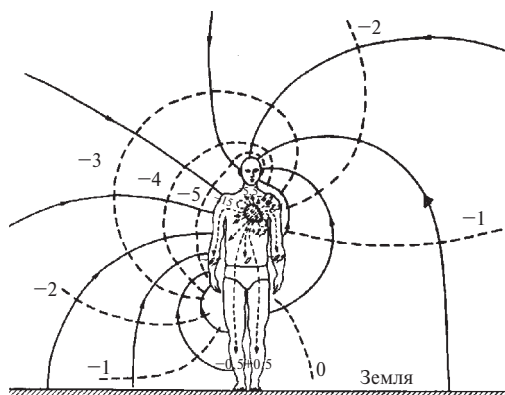


Рис. 3.9. Электрические потенциалы в пределах тела человека, вызванные биоэлектрической активностью сердца:

сплошные линии — силовые радиальные кривые; пунктирные линии — эквипотенциальные линии; цифровые значения — величина потенциала ЭП, мВ, на поверхности кожи или в воздухе относительно Земли.

Распределение ЭП получено расчетным методом на физической модели и соответствует моменту амплитудного максимума зубца R для ЭКГ (т.е. кардиоцикл)

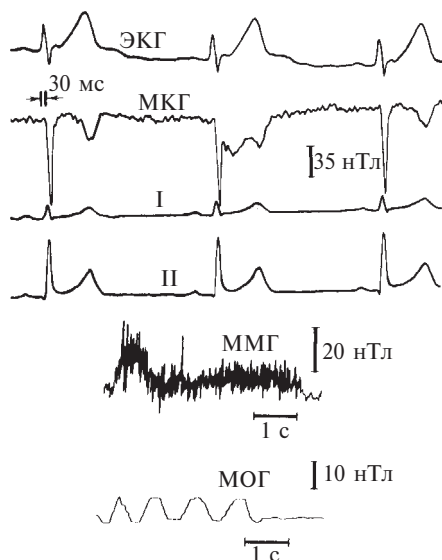


Рис. 3.10. Образцы синхронной регистрации магнитокардиограммы (МКГ) и электрокардиограммы (ЭКГ) здорового человека в одной и той же точке (I и II — стандартные отведения для ЭКГ).

ММГ и МОГ — образцы регистрации магнитограмм при сокращении двуглавой мышцы руки и при открывании и закрывании глаз человека, соответственно

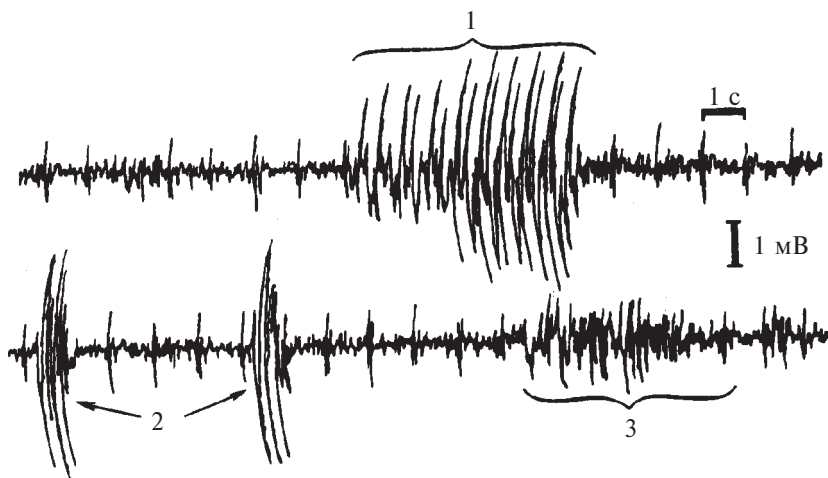


Рис. 3.11. Образцы осциллограмм регистрации потенциалов ЭП, возникающих при: 1 — движении ресниц человека; 2 — напряжении мышц рта; 3 — движении языка при закрытом рте.

Неоцифрованные (промежуточные) участки записи — ритмы сердечной мышцы. Датчик расположен в 10 см от середины лба, с использованием фильтра частоты 50 Гц

врачебным контролем в период геомагнитных бурь. Например обнаружено [Бреус и др., 1993; 1995], что имеется возрастание числа инфарктов миокарда и инсультов во время геомагнитных бурь с внезапным началом и сопровождающихся резким изменением ориентации вектора индукции межпланетного магнитного поля B_z . Это действительно не противоречит лабораторным экспериментам по изучению влияния УНЧ МП на биосистемы, которые находятся в нестабильном состоянии или в динамике — процессе деления клеток, их репродукции или роста [McLeod et al., 1992]. С этой точки зрения наибольшую группу риска составляют младенцы, люди старческого возраста или имеющие патологию сердечно-сосудистой системы, когда они испытывают адаптационные стрессы при резких и нерегулярных сбоях физиологических биоритмов, сформированных в процессе эволюции.

Физические поля человека*

Пульсирующее излучение		Квазистатические поля	
Диапазон излучения	Энергия излучения	Источник излучения	Напряжённость поля и индукция
Инфракрасный спектр	$10 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$	Биохимическое взаимодействие: H_2O , CO_2	—
Оптический спектр	$10^{-17} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$	Баллистическое электростатическое поле*, E_6^{**}	$10^{-2} \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ при $L=0,5 \text{ м}$
СВЧ-диапазон (ГГц)	$10^{-11} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$	Электростатическое поле на мембранах, $E_{\text{мб}}$	$10^{-5} \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ при $L=0,03 \text{ м}$
Акустический диапазон, МГц	$10^{-11} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$	Магнитная индукция	10^{-12} Тл при $L=10 \text{ см}$

*Учтены также и данные Ю.В. Гуляева [II Международный конгресс “Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине”, 2000, СПб].

** E_6 — поле, измеренное баллистическим гальванометром — величина, пропорциональная импульсу количества электричества (тока, протекающего через рамку гальванометра) или заряду, протекающему через гальванометр [Физ. энцикл. словарь. 1989, с. 48].

В исследованиях комплексной группы медицинских работников (Центральная клиническая больница № 3 МПС, Москва) и геофизиков (ИЗМИР РАН, г. Троицк, Моск. обл.) под наблюдением находилось 80 человек, страдающих ишемической болезнью сердца (ИБС) [Биофизика. 1995. Т. 40, № 4. С. 793–799]. У больных исследовались капиллярный кровоток и показания сердечно-сосудистой системы (ССС), а именно: перикапиллярный отек, наличие и степень выраженности сладжа (агрегации эритроцитов), наличие стаза (остановка движения крови в микрососудах) и скорость кровотока. Ухудшение капиллярного кровотока для больных ИБС чревато нарушением витальных* функций органов и тканей. Если скорость кровотока замедлена, а эритроциты склеены в агрегаты и

“сладжи”, естественно ожидать тканевой гипоксии, ишемии. Стаз приводит к восходящему тромбированию приносящих артериол и артерий, к образованию в них макротромбоза, к нарастанию коагуляционных и антикоагуляционных эффектов, итогом которых могут явиться стенокардия, инфаркт миокарда, нарушение мозгового кровообращения.

Полученные данные сопоставлялись методом “наложения эпох” с ежедневными значениями *A*-индекса, с суммой 8- и 3-часовых значений *K*-индекса и с данными об атмосферном давлении. Ухудшение показателей капиллярного кровотока в день магнитной бури отмечено у 71,5 % больных с острым инфарктом миокарда, у 64,8 % в группе больных стенокардией II–III функционального класса. Количество больных ишемической болезнью сердца с реакцией коронарного кровотока на возмущенность ГМП превышает количество реагирующих на изменение атмосферного давления в $2,5 \div 3$ раза. Авторы рассматривают вероятную модель механизма действия магнитной бури, предполагая наличие в тканях магниторецепторов и используя экспериментальные исследования [Биогенный магнетит и магниторецепция, 1989; Проблемы бионики, 1981].

Из весьма большой выборки сообщений и публикаций о связях медикобиологических показателей животных и человека с параметрическими характеристиками вариаций или возмущенности ГМП хотелось бы отметить конкретное исследование группы студентов Университета дружбы народов, Института космических исследований РАН и ИЗМИР РАН [Корреляции биологических..., 1993, с. 41–42; Чибисов // Биофизика. 1995. Т. 40, № 5. С. 959–968].

Авторы проводили биологический эксперимент по выявлению сезонных эффектов в функциональных показателях сердечной деятельности у кроликов четыре раза в году — в периоды весеннего и осеннего равноденствий и летнего и зимнего солнцестояний. Однако существенную корректировку в анализ экспериментальных данных пришлось ввести из-за произошедших в период эксперимента планетарных геомагнитных бурь в 1984 г. У животных через каждые три часа исследовались шесть физиологических показателей сердечной деятельности (систолическое и диастолическое АД, внутрижелудочковое реальное и максимальное давление в правом и левом желудочках сердца, кислотно-основное состояние крови, уровень свободных жирных кислот и напряжение кислорода в крови). В конце цикла второго

*Витальные функции (от лат. *vitalis* — жизненный, жизнотворный, живой) — имеющие отношение к жизненным явлениям (противоп.: *летальный*).

опыта сердце животного вырезалось для проведения трансэмиссионной электронной микроскопии кардиомиоцитов при увеличении в 6 и 20000 раз. Сопоставлялись данные физиологических показателей для периодов геомагнитного возмущения и периода геомагнитно-спокойных условий. Авторам удалось пронаблюдать биоэффекты, характерные для всех фаз геомагнитной бури — от начальной и главной до восстановительной в течение 21–23 сентября 1985 г.

Оказалось, что начальная и главная фазы геомагнитной бури сопровождаются существенной десинхронизацией средних показателей хроноструктуры циркадианного ритма различных систем организма (сердца, печени, тканей и т.д.), возникновением феномена угасания этого ритма, приводящим по мере развития бури к резкому падению сократительной силы сердца. На клеточном уровне главная фаза бури сопровождается однотипными изменениями ультраструктуры сердечных клеток — деградацией и деструкцией митохондрий кардиомиоцитов, что свидетельствует об их гиперфункционировании. Так, например, по мере развития бури резко увеличивается образование коллагеновых муфт вокруг сосудов. В норме они редко встречаются в этот сезон года, что свидетельствует о проникновении токсичных компонентов из крови в ткань. В данном случае такими агентами являются свободные жирные кислоты, которые (по образному выражению авторов) буквально “нашпиговывают” клетки сердца. Далее идет процесс нарушения проницаемости лизосомных мембран. Во время главной фазы бури при уменьшении концентрации кислорода в крови и сдвиге кислотно-основного баланса в щелочную сторону свободные жирные кислоты не окисляются в полной мере и начинают оказывать токсическое действие на кардиомиоциты. Возникновение и увеличение числа коллагеновых муфт ($34,5 \pm 15$ до 253 ± 95 нмоль/мл) является защитной реакцией организма, стремящегося препятствовать проникновению в ткань сердца свободных жирных кислот. Наиболее значительные нарушения происходят на уровне митохондриального аппарата: в период главной фазы магнитной бури наблюдается чрезмерное набухание органелл, что приводит к разрыву наружной мембраны митохондрий и к их деградации с уменьшением в 2 раза коэффициента энергетической эффективности органелл и кардиомиоцитов в целом. Следствием этих процессов является падение сократительной силы сердца.

В фазе восстановления геомагнитной бури наблюдались возвращение синхронного ритма показателей сердечной деятельности к норме и восстановление ультраструктуры клеток. Таким образом, авторы отмечают, что реакция организмов животных на функциональном и клеточном уровнях, очевидно, не выходит за рамки адаптационных пределов организма. Однако целая популяционная

выборка здоровых животных (125 экз.) реагировала на возникновение геомагнитного возмущения однотипным образом.

Резюмируя результаты многочисленных наблюдений и специальных исследований физиологического состояния человека, обусловленного внешним ГМП в период магнитных бурь и роста СА, отметим:

- с точностью не менее 80 % можно предсказать число случаев инфаркта миокарда, а при учете и метеообстановки в регионе оправдываемость прогноза составляет 90 %. Число случаев инфаркта достигает максимума на следующий день после солнечной вспышки, и в этот же день уже начинается магнитная буря (т.е. по достижении солнечных корпускул магнитосферы Земли, см. разд. 1.1).

Во время магнитной бури свертываемость крови увеличивает-ся, активизируется образование тромбоцитов, приводя к СС катастрофе, которая тяжелее протекает именно в такие моменты. Наибольшее число инфарктов миокарда развивается в первые и вторые сутки после начала магнитной бури. Далее наступает вероятность снижения тромбообразования и увеличения концентрации анти-тромбоцитов, что может вызвать на 3–4-е сутки после начала магнитной бури кровотечение (падает вязкость крови). Спустя три дня после магнитной бури вязкость крови восстанавливается до нормы, свойственной конкретному пациенту;

- у пациентов со стенокардией число нарушений сердечного ритма во время магнитной бури увеличивается в 2,5 раза (в покое); а при физической нагрузке число нарушений увеличивается только в 1,5 раза (сравнительная характеристика);

- при гипертонической болезни I и II степени наблюдается рост АД и ухудшается самочувствие, однако констатируется разнообразие во времени наступления ответной реакции — начало, середина или окончание магнитной бури; наиболее пагубное действие возмущения отмечено в начальной фазе бури. Таким образом, зная время надвигающегося изменения геомагнитной обстановки, можно предупредить обострения гипертонических кризов;

- у пациентов с патологией печени в условиях магнитной бури усиливается проницаемость мембран клеток и сосудов, и тогда печень не справляется с полноценным синтезом липидов, т.е. растет уровень их перекисного окисления, который приводит к истощению запасов внутренних антиокислителей и начинает действовать повреждающий процесс перекисного окисления липидов. Необходима терапия с добавлением антиоксидантов;

- отмечены и хорошо известны отрицательные последствия магнитных бурь для хронических больных с пониженной функцией легких, психически нездоровых людей, беременных женщин с токсикозами, людей с патологией зрительной системы (глаукома, катаракта

и др.), страдающих злокачественными новообразованиями, для женщин репродуктивного возраста, находящихся в ответственных и напряженных периодах в физиологические циклы и т.д.;

- установлены высокосignимые множественные корреляционные связи физиологических показателей четырех систем здоровых людей (сердечной, дыхательной, вызванных потенциалов головного мозга и психологического статуса) с комплексом ионосферных параметров (вариации ГМП, а именно: K -индексы, индукция B , интенсивность солнечного радиоизлучения, атмосферное давление, основная частота ионосферного волновода 8 Гц, критические частоты слоев F_2 и E_s , минимальной частоты $f_{\min}$, коэффициента $M^{(3000)}F_2$ и минимальной действующей высоты h слоя F , зарегистрированных в Северо-Западном регионе России, п. Воейково, ИЗМИР РАН). Это подтверждает гипотезу о влиянии магнитосферных колебаний на процессы переработки информации в центральной нервной системе [Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 840–843]. **Максимальный период биотропности начинается за 1 день до возникновения бури и кончается через 2 дня после ее прекращения** [там же, с. 844–847];

- по результатам контроля космонавтов во всех экипажах транспортного корабля “Союз” (1986–1995 гг.) и станции “Мир” (1996 г.) при спокойных и возмущенных геомагнитных условиях выявлено: усиление активности симпатического звена* вегетативной регуляции именно во время магнитной бури так же, как это происходит у больных ишемической болезнью сердца на Земле, что свидетельствует о явлениях дисбаланса в центральном контуре регуляции ЦНС, дестабилизации сердечного ритма и о том, что эта реакция соответствует состоянию поиска организмом оптимума после стресса (адаптационного стресса) [Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 819–826]. Отмечено, что наиболее серьезные последствия эффекта геомагнитных возмущений проявляются на следующие сутки после начала бури, которая изменяет сосудистый тонус организма космонавтов, снижает амплитуду максимума спектра дыхательных волн и медленных волн второго порядка ЦНС (так называемая неспецифическая адаптивная стресс-реакция) [Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 811–818];

*Симпатическая нервная система — отдел вегетативной нервной системы; возбуждение этой системы стимулирует деятельность тех систем органов, усиление функций которых необходимо для преодоления какой-либо трудной ситуации (физической нагрузки) [Андреев В.П., Марков А.Т. и др. Биология: Толковый словарь. СПб., 1999, с. 322].

- анализ данных (1867–1996 гг.) по геомагнитной активности, разделенных на годы с высокой штормовой активностью и годы спокойного уровня, показал, что смертность в годы бурь на 30 % выше, чем в спокойные годы. Сезонные вариации геомагнитных бурь и смертности в спокойные годы имеют максимум вблизи равноденствия, а в штормовые годы пики смертности сдвинуты на лето и зиму. Аномалии погоды оказали менее заметное влияние на смертность, чем космические бури [Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 833–839].

3.1.4. Лабораторные и клинические наблюдения над реакциями живых систем с учетом действия магнитных полей

Анализ большого объема экспериментальных данных показывает неоднозначность интерпретации результатов различными авторами. В частности, в качестве основного регулирующего фактора выделяют не ЭМП, а гравитационные, инфразвуковые, световые, тепловые и другие воздействия на живые системы. Оспаривать эти точки зрения — не наша задача. Однако и настаивать только на решающей роли ЭМ факторов вряд ли целесообразно. Поэтому убедительными могут быть в той или иной степени результаты лабораторного моделирования, причем подбор действующих агентов должен соответствовать реальным природным амплитудно-частотным характеристикам физического поля, в частности электромагнитного. Здесь возможны такие сочетания: действует природный фактор — воспринимает изолированная система, действует искусственный фактор — воспринимает изолированная система. В обоих случаях изолированная биосистема не лишена основных естественных компонентов — питания, информационного общения и т.д. Причем изолированная система может представлять собой также анатомический изолированный объект — ткань, нервное волокно и т.д.

Существует еще ряд проблем, связанных с чувствительностью организмов к электромагнитному полю и с его влиянием на процессы развития и роста организмов. Рассмотрим ряд примеров из биологической и медицинской практики, подтверждающих существование сложных и во многом нерешенных проблем действия естественных и техногенных электромагнитных полей и электромагнитного излучения.

1. В.В. Аброськин (1966 г.) наблюдал за развитием куриного эмбриона, когда яйца в инкубаторе были ориентированы относительно магнитного меридиана. Часть яиц располагалась острым концом на восток, другая — на запад, голова зародыша была направлена соответственно на север и на юг. Обнаружено, что ориентация существенно

сказывается на отношение полов: расположение эмбриона головным отделом на север приводит к повышению вероятности появления мужских особей, и наоборот — при южной ориентации.

В 1975 г. В.В. Аброськин проанализировал 1452 случая ориентации в геомагнитном поле матерей в первые два месяца беременности во время сна и сопоставил их с полом рождавшихся детей. Предполагалось, что эмбрион в период формирования первичных половых признаков занимает по отношению к материнскому организму вполне определенное положение. Оказалось, что при преимущественном положении плода головой на север чаще рождаются мальчики. Результат, безусловно, может быть спорным.

2. Электромагнитный фон, как уже известно, существенно меняется при вариациях солнечной активности, циклические изменения с квазипериодами 11 и 22 года, по всей вероятности, влияют и на эмбриональное развитие. Так, обнаружены конституциональные различия для организма человека в зависимости от фазы 11(22)-летнего цикла солнечной активности, на которую приходится дата рождения: уровень артериального давления школьников тем выше, чем выше был уровень солнечной активности в год их рождения; чем выше был уровень солнечной активности в период эмбрионального развития, тем глубже нарушения функции поджелудочной железы, тяжелее протекают хронический гастродуоденит, панкреатит, выше уровень смертности при заболевании гепатитом, пневмонией и т.д.

Кратковременное воздействие на кисти рук магнитного поля ≈ 20 нТл дает существенно разный отклик в определенных физиологических показателях молодых мужчин в зависимости от того, родились ли они в годы максимальной солнечной активности или нет. К. Берцэле (1966 г.) после обследования 2 тысяч лиц по специальной методике оценил, что уровень магнитной активности в месяц зачатия определял и тип симпатической возбудимости человека. То есть намечается закономерность: некоторые психологические показатели человека определяются фазой 11-летнего цикла солнечной активности, в которую он родился. Отражением этого являются циклические вариации частоты появления выдающихся (одаренных) людей. Были найдены два четких периода — 9 лет и 55–60 лет.

3. Проведена статистическая оценка изменчивости антропометрических данных новорожденных на больших интервалах времени [Никитюк, 1987] для городов Москвы и Алма-Ата (по 10^4 случаев на город). Результаты показали:

а) длина тела зависит от уровня магнитной возмущенности (K -индекс) и интегрального показателя солнечной активности (числа Вольфа W) — антикорреляция;

б) энергетические спектры для K -индекса и длины тела — аналогичны по форме;

в) максимумы акселерации и ретардации (замедление темпов эмбрионального развития) приходятся на определенные годы 22-летнего цикла. Связь длины тела и солнечной активности значительно лучше выражена для четных 11-летних циклов, чем для нечетных. При четных циклах солнечной активности преобладают рекуррентные возмущения, при нечетных — спорадические.

В общих чертах эти связи были известны еще и А.Л. Чижевскому, но они более 50 лет находились вне поля зрения исследователей.

Результатом обширного исследования по проблеме акселерации является электромагнитная гипотеза, суть ее состоит в том, что процесс увеличения среднего роста и ускорение полового созревания у людей с 30-х годов XX века совпал по времени со стремительным развитием радиовещания и появлением и усилением “радиофона” — т.е. электромагнитного поля радиопередающих энергосистем на частотах 10^5 Гц.

А.С. Пресман (1974 г.) выдвинул предположение, что причиной акселерации является возрастание среднего фона электромагнитного поля, т.е. как ответная реакция гиперкомпенсации на влияние электромагнитных полей, угнетающих процессы роста и развития.

П.В. Василик связал антропометрические данные с глобальным эффектом изменения магнитного момента Земли (5 тыс. лет): увеличение напряженности геомагнитного поля приводит к ретардации, уменьшение, — напротив, к акселерации. Современная акселерация в общем укладывается в эту зависимость, поскольку магнитный момент m_M уменьшается на 27 нТл/год.

4. В специальной работе Т.П. Рябых и Л.Г. Мансуровой проведено исследование возможной синхронизации изменений в биологической системе за счет прохождения Земли через секторную структуру в ММП: показано, что содержание гемоглобина и число лейкоцитов в стандартном объеме крови зависят от знака ММП; оба показателя выше при положительном ММП, чем при отрицательном.

У мышей, инъецированных канцерогеном, содержание гемоглобина при положительном ММП преимущественно выше, а при отрицательном ММП преимущественно ниже, чем в контрольной группе. Поскольку реакция на смену знака ММП у мышей после канцерогенного воздействия количественно отличается от контроля, мы видим, что происходит выход за границы гомеостаза. Это нарушение реакции на внешние факторы наряду с положительным падением числа лейкоцитов, видимо, отражает подавление системы естественной резистентности организма, следствием чего является развитие опухолевого процесса.

5. Выяснены некоторые факты влияния геомагнитного поля на изменение энергетических характеристик у детей. В качестве факторов внешней среды использовали: показатель солнечной активности, геомагнитную возмущенность, атмосферное давление и его суточные перепады, температуру атмосферного воздуха. Оказалось: на фоне спокойного геомагнитного поля отметили более высокие значения активности в развитии детей, а на фоне роста геомагнитной возмущенности происходят снижение уровня активности и смещение возрастного максимума в более ранний возраст (нечто подобное скорейшему старению организма — аналогия с рыбами). Было показано, что реакция лимфоцитов на магнитную бурю носит фазный характер. Различные физические факторы, действуя одновременно, могут нивелировать эффект влияния каждого в отдельности. Если внутриутробное развитие здорового доношенного ребенка происходило в год активного Солнца, то можно ожидать более раннее его развитие (смещение максимума в более ранний возраст). Важно отметить, что совместное влияние изменений геомагнитного поля и атмосферного давления влияет на недоношенного ребенка отрицательно, вызывая депрессию окислительно-восстановительных ферментов, тканевую гипоксию, способствует дополнительным заболеваниям и аллергическим реакциям, усиливая чувствительность к действию антропогенных факторов [Биофизика. 1992. Т. 37, вып. 4. С. 720–728].

6. Измерения в модельных системах показали, что искусственные слабые магнитные поля, имитирующие естественные геомагнитные возмущения, изменяют морфофункциональное состояние центральной нервной системы и ответные реакции организма человека и животных в целом.

Переменное магнитное поле с $f = 8$ Гц, $B = 5100$ нТл выявило волнообразные изменения биотоков в нейронах коры больших полушарий головного мозга и гипоталамической области. В общей картине ЭЭГ после применения данного физического агента наблюдались процессы как активации, так и торможения. Отмечена большая биологическая активность переменного магнитного поля именно с $f = 8$ Гц, что, видимо, связано с близостью этой частоты к периодике некоторых процессов головного мозга, отражаемых в ЭЭГ. Обнаружено, что при многократных воздействиях переменного магнитного поля в центральной нервной системе развивались адаптационные процессы: после 20-кратного воздействия у животных в поведении и условно-рефлекторной деятельности не отмечалось статистически достоверных изменений. Данные параметры переменного магнитного поля успешно применили в качестве профилактического средства при расстройствах высшей нервной деятельности, возникающих, например, при гравитационных перегрузках и ионизирующих излучениях.

В эксперименте на животных выяснено, что между уровнем геомагнитной возмущенности и показателями условно-рефлекторной деятельности существует отрицательная корреляционная связь ($R = -0,797$; $F = 17,8$). В период геомагнитных бурь в нейронах, локализующихся в областях проекций как задних, так и передних конечностей моторной зоны коры головного мозга, увеличивалось время, необходимое для вовлечения нервной клетки в ответную реакцию на поступление сенсорной информации. При этом продолжительность первичного возбуждательного ответа снижалась, а первичного тормозного — возрастала.

У здоровых людей в периоды развития магнитных бурь отмечалось увеличение времени простой двигательной реакции ($p < 0,05$), увеличение числа лейкоцитов периферической крови ($p < 0,01$), снижение цитохимических показателей ($p < 0,001$) и частоты сердечных сокращений ($p < 0,05$). По-видимому, с изменениями функционального состояния различных органов и систем и в первую очередь центральной нервной системы, наблюдаемыми у здоровых людей во время магнитных бурь, связано увеличение травм, количества несчастных случаев на производстве и в быту [Биофизика. 1992. Т. 37, вып. 4. С. 647–652].

По анализу историй болезней у 57 % обследованных пациентов обнаружена высокая чувствительность к сменам секторных границ ММП (по симптомам обострения).

7. Большое количество данных накоплено о корреляции геомагнитной активности с проявлениями высшей нервной и психической деятельности у людей.

Еще А.Л. Чижевским было обнаружено влияние солнечной активности в статистике несчастных случаев и травматизма на транспорте и в производстве, а именно: число несчастных случаев возрастает с ростом солнечной активности и уровня возмущенности геомагнитного поля. Явление выражается в снижении внимания, увеличении времени реакции на сигнал, в повышении вероятности принятия неправильных решений [Владимирский, Кисловский, 1995]. Пространственно-временная неоднородность геомагнитного поля может быть оценена по характеру магнитотропных реакций биосистем, исследованных в различных гелиогеофизических ситуациях. Показана прямая корреляционная связь между изменениями геомагнитного поля (по индексу A_p) и колебаниями частоты сердечных сокращений за 1 минуту (ЧСС). У здоровых людей она описывается уравнением [Кайбышев, 1968; Казначеев, 1983]:

$$P = 68,4 + 0,51A_p.$$

В дни возмущенного геомагнитного поля у здоровых обследуемых лиц отмечено уменьшение размаха адаптивных перестроек

температуры тела и частоты сердечных сокращений. Выявлена неодинаковая чувствительность к влиянию геомагнитного поля таких показателей, как артериальное давление и кровоток. Особенно сильно это проявляется в вечерние часы, приводя к нарушению фазовых соотношений суточных кривых [Рыжков и др., 1982]. Ослабляется биоэлектрическое поле организма человека при резком возрастании градиента напряженности геомагнитного поля (видимо, имеется в виду не сама горизонтальная компонента H_x , а K -индекс активности, а это следует трактовать, как “падение” напряженности геомагнитного поля), изменяются величины электрических потенциалов кожи человека, появляется или усиливается асимметрия в их распределении [Колодченко и др., 1972]. В специальных опытах выявлена асимметрия магнитотропных реакций, зависящая от сезонных и суточных гелиогеофизических периодов по местному времени (характерные моменты: $08 \div 11$, $13 \div 17$ [Деряпа и др., 1985]). Это позволяет рассматривать функциональные различия левой и правой половины тела человека в качестве одного из показателей гетерогенной энергетической и информационной роли активности геомагнитного поля. Электромагнитная обстановка на Земле, как мы видим, оказывается небезразличной для человека с первых дней его существования, когда происходит своего рода “закладка” типов ответных реакций на магнитные воздействия. В частности, отмечали: чем меньше дней с магнитными бурями, тем больше случаев снижения артериального давления у больных с артериальной гипертензией, которых лечили специальными магнитотерапевтическими методами через точки рефлексотерапии. Таким образом, целесообразно применение лечения в период невозмущенной магнитосферы Земли и спокойного Солнца.

Следует быть осторожными людям с сердечно-сосудистой патологией: при повышении геомагнитной активности (локальный K -индекс > 8) число смертельных случаев от инфаркта миокарда зимой увеличивается в полтора раза на четвертый день после магнитной бури.

В проблеме воздействия СА на живое вещество биосферы В.П. Казначеевым была высказана гипотеза [Казначеев, Михайлова, 1985] о механизме воздействия на развитие эмбриона человека, который получил название “гелиофизического импринтинга”*. Суть этой гипотезы состоит в том, что если рождение

*Импринтинг (англ. imprinting) — от *imprint* — отпечатывать, запечатывать; запечатление, формирование в раннем периоде развития особи устойчивой индивидуальной избирательности к внешним стимулам. Основы научной концепции заложены в 30-е гг. 20 века К. Лоренцом [Биологический энциклопедический словарь. М. Сов. энциклопедия. 1989. С. 228].

человека приходится на период, близкий к максимуму СА в 11-летнем цикле, то его естественная смерть (67 % случаев) наступает в период минимальной СА. И наоборот, если рождение приходится на период, близкий к минимуму СА, то естественная смерть наступает в период максимума СА. В настоящей работе мы не анализируем и не комментируем высказанную мысль акад. РАМН В.П. Казначеева, но обращаем внимание медицинских работников (геронтологов, в первую очередь) на важность проблемы.

8. В 1993 г. проходил III Международный симпозиум НИИ экспериментальной диагностики и терапии опухолей Онкологического научного центра АМН России в Пущине. В одном из докладов (Т.П. Рябых, Н.Б. Бодрова) была затронута тема вероятности возникновения онкологических заболеваний молочных желез в связи с солнечной активностью. Это не просто интересно с научной точки зрения, но и архиважно в практическом здравоохранении. Я постарался найти отражение этой проблемы в современных медицинских официальных публикациях и монографиях. В частности, монография [Семиглазов, Веснин, Моисеенко. Минимальный рак молочных желез. СПб.: Гиппократ, 1992] в разделе о факторах, влияющих на метастазирование молочных желез, обходит этот вопрос молчанием. Официальная наука до сих пор “боится” затрагивать эти щекотливые вопросы.

В упомянутом докладе показано, что рак молочных желез у женщин в развитых странах последнее время занимает ведущее место в структуре онкологических заболеваний. К числу факторов риска развития рака молочных желез наряду с другими относятся раннее менархе (половое созревание) и доброкачественные заболевания молочных желез.

Поскольку ритмические процессы внешней среды служат синхронизатором генетически детерминированных биоритмов организма, проблема выявления корреляций между изменениями космофизических факторов и риском возникновения злокачественных опухолей представляет практический интерес.

Установлено следующее:

- процент женщин с ранним менархе (это фактор риска рака молочных желез) постепенно увеличивается;
- периоды изменения физиологического состояния составляют 3,5; 7 и 12 лет и коррелируют с числами Вольфа (W), т.е. с солнечной активностью;
- частота доброкачественных заболеваний молочных желез (это фактор риска рака молочных желез) в возрастной группе 20–50 лет зависит от года рождения и обладает периодом 11,3 лет и находится

в отрицательной корреляции с числами Вольфа (W) в момент рождения;

- максимальное число девочек с гормональным статусом, обуславливающим раннее половое созревание, рождается через 4 года после достижения максимальной солнечной активности;

- частота доброкачественных заболеваний молочных желез (это фактор риска рака молочных желез) будет минимальна в группе женщин, родившихся через 3 года после года максимальной активности Солнца;

- в целом после 40 лет процент патологии молочных желез у женщин с ранним менархе достоверно выше, чем у женщин со средним и поздним типом менархе (31 и 21 % соответственно, $p < 0,01$); это позволяет прогнозировать увеличение заболеваемости раком молочных желез в ближайшие несколько десятилетий. Видимо, можно предполагать, что процент женщин с ранним менархе в общей популяции будет уменьшаться по мере уменьшения солнечной активности, что впоследствии также повлечет уменьшение частоты рака молочных желез.

- Если определенный уровень солнечной активности может оказывать отрицательный эффект в момент рождения, то женщины с ранним менархе имеют больший риск, так как будут подвергнуты этому воздействию вторично в период наступления половой зрелости (средний возраст раннего менархе в данном случае — 11 лет), т.е. может иметь место своего рода резонансный эффект. В группе женщин со средним и поздним менархе (~ 15 лет) этот эффект заведомо исключен [Биофизика. 1992. Т. 37, вып. 4, С. 710—715].

9. Как уже можно заметить, накопленные многочисленные данные о влиянии гелиокосмических факторов на биообъекты касались в основном живых организмов в целом. Однако особый интерес вызывает развитие эмбриона человека, подверженного упомянутым воздействиям.

Онтогенетическое развитие человека включает в себя ряд этапов, в каждом из которых наблюдается критический период с высокой чувствительностью к действию среды; в течение этого периода совершаются процессы детерминации развития зачатка. За ним следуют периоды видимой дифференциации и роста. Физиологический смысл периодического повышения чувствительности к внешним воздействиям заключается в обеспечении восприятия зародышем и его частями сигналов, ответом на которые являются акты онтогенеза [Светлов П.Г. Вопросы цитологии и общей физиологии. М., 1960. С. 263—285]. Соответственно часть заболеваний внутриутробного периода жизни и раннего детского возраста может быть

результатом повреждений, полученных эмбрионом на ранних стадиях развития, а также в момент рождения, являющегося, как и зачатие, важнейшим критическим периодом.

В частности, **Н.И. Моисеева** (Институт экспериментальной медицины РАМН, СПб) провела исследование влияния гелио-геофизической обстановки, соответствующей моментам зачатия и рождения, на состояние новорожденных [Биофизика. 1992. Т. 37, вып. 4. С. 700—704]. Она отмечала:

- прослеживается отчетливая закономерность изменений частоты различных видов патологии в зависимости от влияния гелио-космических флуктуаций, которые характерны для различных месяцев года (числа Вольфа, плотность потока солнечного излучения);
- показано отличие частоты появления тех или иных видов патологии в зависимости от месяца зачатия и месяца рождения; оказывается, благоприятными или неблагоприятными месяцами для рождения являются сроки, отстоящие на 9 месяцев от примерно таких же по влиянию на здоровье ребенка сроков зачатия; т.е. исходя из ожидаемых форм патологии, важнее отметить вероятность возникновения опасного критического периода в момент зачатия, чем критический период при рождении;
- исходя из таких видов патологии, как пороки развития сердца, развития костно-мышечной системы, гемолитическая болезнь, диабетическая фетопатия*, недоношенность, наиболее благоприятными месяцами для зачатия являются конец октября, ноябрь и декабрь, а неблагоприятными — май, июль, август и сентябрь. Соответственно наиболее неблагоприятными месяцами рождения являются февраль, апрель, май, июнь; могут оказаться неблагоприятными для зачатия март, апрель, а для рождения соответственно декабрь и январь в зависимости от вида патологии (недоношенность, пороки костно-мышечной системы);
- в итоге анализа почти 30 тысяч историй родов и историй развития новорожденных (ИАГ им. Отта, 1980—1985 гг.) автор утверждает, что усиление гелиокосмических флуктуаций влечет за собой возрастание частоты появления патологии эмбрионального развития.
- делается вывод, что закономерно возникающие (и, следовательно, предсказуемые) флуктуации космо-гелио-геофизической обстановки оказывают существенное влияние на эмбриональное развитие человека.

10. Цитогенетический эффект действия импульсных электромагнитных полей на человека.

*Фетус — зародыш (лат.). Речь идет о зародышевой, или фетопатийной предрасположенности к диабету.

В настоящее время проблема генетического действия нетепловых электромагнитных излучений не имеет однозначного решения. В соответствии с положениями классической радиобиологии считается, что электромагнитное излучение нетепловых интенсивностей не обладает необходимым запасом энергии для повреждения первичной структуры ДНК. В то же время имеются экспериментальные данные, свидетельствующие об индукции мутационного процесса при действии неионизирующей радиации. В работе Г.Б. Хомутова [О возможной роли ионов железа в изменениях состава комплексов ДНК и их магнитных свойств в процессах клеточного цикла // Биофизика. 2004. Т. 49, вып. 1. С. 140–144] сформулирована гипотеза о возможной роли ионов железа в изменениях состава нуклеопротеидных комплексов ДНК и их магнитных свойств на определенных стадиях клеточного цикла.

Еще Л.А. Блюменфельдом и сотр. (1959 г.) было показано, что в препаратах ДНК наблюдались “аномальные магнитные свойства”, которые связаны с определенными фазами клеточного цикла, и, следовательно, магнетитовые микрочастицы имеют биогенное происхождение, так называемые магнетитовые наночастицы железа в препаратах ДНК. Выяснилось, что если ионы железа — эти слабозаряженные магнитные наночастицы — удалить из комплексов ДНК путем изменения их заряда в ходе окислительно-восстановительных реакций, окажется, что особые магнитные аномалии (широкие линии в сигнале ЭПР, характерные для ферромагнитных систем) не проявляются. Проф. С.Э. Шноль подчеркнул, что в этом состоит научное событие: ДНК может существовать только при наличии биогенного магнетита в клеточном цикле. Так, у покоящихся дрожжевых клеток сигнал ЭПР практически не наблюдается и достигает максимальной величины незадолго до начала их интенсивного деления.

Целью исследования являлось [Т.В. Гришанкина] изучение генотоксической активности импульсного электромагнитного поля в соматических клетках человека* с помощью микроядерного теста.

Микроядерный тест является общепринятым методом оценки мутагенного действия агентов различной природы. Регламентирующие органы в области охраны окружающей среды придают ему особое значение, поскольку тест, выполненный *in vivo*,

*Соматические клетки человека (от греч. soma) — тело; совокупность клеток многоклеточного организма (исключая половые). В генетике соматический означает относящийся к клеткам тела (не к гаметам), например соматическая мутация [Биолог. энци. словарь, М. Сов. энциклопедия, 1989. С. 593].

лишен очевидных недостатков, связанных в том числе с экстраполяцией экспериментальных результатов.

Биологический смысл метода заключается в следующем. Те или иные агенты способны повреждать генетический материал в ядрах клеток. Часто при этом нарушается целостность хромосом. Считается, что ацентрические фрагменты и аберрантные хромосомы удаляются из клеточного ядра в цитоплазму в виде микроядер. Таким образом, уровень микроядер в клетках может служить критерием генотоксической активности того или иного фактора окружающей среды, действующей на организм.

В упомянутой работе исследовалась частота появления микроядер в эпителиоцитах человека. В натурном эксперименте принимали участие пять лиц мужского пола в возрасте 28–34 лет — персонал, обслуживающий источники электромагнитного излучения. Изучалась генетическая активность импульсного электромагнитного поля при однократной экспозиции в течение 8 часов. Соскобы слизистой полости рта у испытуемых брали в первый день эксперимента до начала смены (контроль) и через 24 часа после окончания действия электромагнитного поля (опыт). Препараты окрашивали по Фельгену и лихт-грюном (по модификации Л.В. Китаевой). В соответствии со стандартным протоколом анализировали по 2000 ядросодержащих клеток от каждого индивидуума.

Частота появления клеток с микроядрами у военных специалистов в контроле составила 0,79. После однократной экспозиции импульсного электромагнитного поля у них наблюдалось достоверное повышение количества клеток с микроядрами — 5,01 ($p < 0,05$), что свидетельствует о генотоксическом действии исследуемого фактора.

Таким образом, в результате микроядерного анализа зафиксирован цитогенетический эффект действия импульсного электромагнитного поля на человека (при однократной экспозиции в течение 8 часов). Авторы считают, что окончательное решение о генетической активности рассматриваемого фактора требует дополнительных экспериментов [Т.В. Гришанкина, НИИ военной медицины МО РФ, Санкт-Петербург, Россия].

3.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛАБЫХ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ФАКТОРОВ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

3.2.1. Водные экосистемы как объект физического моделирования

3.2.2. Методический подход к исследованию

3.2.3. Обсуждение результатов измерений

3.2.1. Водные экосистемы как объект физического моделирования

В мировой практике исследования действия неионизирующего электромагнитного излучения на биосферу накоплен значительный опыт по оценке влияния высокочастотных и сильных полей. Разработаны способы защиты от подобных влияний, известны нормативные документы, устанавливающие пороговые значения интенсивности излучения современных технических средств. Напротив, в области ультранизкочастотных электромагнитных излучений проблема реакций живых организмов на техногенное воздействие плохо изучена и далека от разрешения. В настоящее время она привлекает внимание широкого круга специалистов — от биологов и врачей до разработчиков новой измерительной техники.

Известно, что наибольшей активностью обладают неоднородные магнитные и электромагнитные поля ультранизкочастотного и низкочастотного диапазонов (НЧ, УНЧ) при их действии как на отдельные органы, так и на целостный организм. Тем не менее, механизм лечебного действия таких полей по сравнению с известными постоянными МП и однородными ЭМП выяснен не полностью ввиду недостатка информации об ответных реакциях организма на воздействие техногенных средств. Этические проблемы обуславливают сложность сбора необходимой информации непосредственно от человека, а фундаментальные исследования на популяционном уровне растягиваются на долгие годы. Именно поэтому в экспериментальной работе издавна использовались водные организмы от планктона до рыб.

Известно, что популяционно-видовой уровень организации биосферных экосистем образуют сообщества разных видов, находящиеся в сложных взаимоотношениях как между собой, так и со средой обитания. В подобных ситуациях, с точки зрения структурно-функциональной и информационной, экспериментальная работа в открытых неравновесных водных экосистемах на онтогенетическом

уровне должна прояснить не только проблему собственных способов кодирования, переработки информации и управленческие связи в иерархической структуре сообществ. Необходим всесторонний учет существенной роли влияния внешних факторов среды обитания, в частности, естественных и техногенных неионизирующих электромагнитных полей и излучений, на физиологическую экологию водных организмов, которая в природных условиях наименее изучена. Это обусловлено высокими материальными затратами и многообразием сопутствующих физических факторов, способных завуалировать роль слабых полей и излучений. Поэтому в общей цепи экологического контроля и мониторинга среды обитания животных и человека эту задачу предлагается исследовать на лабораторных физических моделях, имитируя явления ответных поведенческих и адаптационных реакций *in vivo* на электромагнитные воздействия.

Поскольку многие современные формы рыб существуют в неизменном виде уже около 0,5 млн. лет и в настоящее время составляют около 50 % всех современных позвоночных [БЭС. 1989. С. 550], весьма вероятно и существенна их филогенетическая роль в возникновении и развитии сухопутных животных и человека. Именно поэтому целесообразно этих животных использовать для модельных исследований с перспективой оценивать результаты опытов для понимания физиологических особенностей человека.

Конкретная фундаментальная задача решалась проведением сравнительного анализа процессов свободного поведения рыб и их стрессовых реакций на изменение комбинированных магнитных полей (синергизм двух или более факторов). Тестовым показателем являлись двигательная активность, ориентационное поведение рыб в пространстве и времени, биоритмы, скорость перемещения, появление признаков патологии и т.д.

В течение последних 10 лет нами исследовалась физиология поведения новой популяции вариетета золотой рыбки ***Carassius auratus japonicus flabellicaudatus***, Slutsky, 1985 (рис. 3.12, цв.), которую культивируем с 1970 г. по настоящее время на основе близкородственного скрещивания организмов, имеющих общих предков (жесткий инбридинг). В каждом экспериментальном поколении общность происхождения скрещиваемых особей увеличивала вероятность наличия у них одних и тех же структурных состояний гена (аллелей), которые поддерживались специально в трех чистых линиях*.

*Экспериментальные животные в настоящее время культивируются в Государственном Научно-исследовательском институте охраны рыбного хозяйства (ГОСНИОРХ), СПб.

Рыб каждого поколения и каждой аллели подробно исследовали по различным экстерьерным и интерьерным признакам, а также по ряду физиологических и этологических показателей. Особый интерес представляют поведенческие реакции и активность рыб, подверженных действию звуковых волн, электрических и магнитных полей при различных температурных режимах. Эти воздействия применялись для создания схемы эффективного кормления рыб.

Для указанной цели было создано специальное стадо производителей, потомки которых исследовались по различным возрастным группам — личинки, молодь, взрослые особи. Число особей по различным аллелям, смешанным генетическим группам и отдельным генерациям составляло одновременно не менее 350 экзemplаров. Поведение этих рыб исследовалось после воздействия ЭМП различной интенсивности и частоты.

В экстремальных условиях, характеризующихся значительными градиентами изменения физических полей по времени ($d\Phi/dt$), органические и абиотические системы находятся в неравновесном состоянии. Поэтому происходящие в них процессы подчиняются общим законам неравновесных систем, обуславливающим ярко выраженные ответные реакции при малых дозах воздействия. Эти “аномальные реакции”, выходящие за рамки адаптационных возможностей животных и человека, зависят именно от факторов внешней среды. Такими факторами в наших экспериментах выступают параметры создаваемых ЭМ полей в измерительной регистрирующей установке.

При обосновании выбора оптимальных параметров электромагнитных полей, способных физиологически воздействовать на подопытные организмы, предполагается, что экспериментальные исследования поведения последних могут послужить исходным материалом для установления общих закономерностей развития взаимообусловленных событий в искусственно созданных экстремальных условиях. Процессы жизнедеятельности изолированных экосистем (аквариумные группы рыб) подчиняются общим физико-химическим законам, поэтому даже в искусственных условиях относительного постоянства абиотической окружающей среды живые объекты (и только они) способны изменять свое состояние. Освобождающаяся при этом энергия может проявляться в различных формах, в частности при реально заданных “внешних условиях” лаборатории, — в форме флуктуирующих электрокинетических явлений (эффектов).

Таким образом, работа живых систем при любых внешних условиях должна быть направлена против равновесия, которое не наступает при заданном начальном состоянии абиотической

среды. Такое состояние живых систем сохраняется постоянно, т.е. обладает всеми признаками устойчивости. Высказанные здесь утверждения не противоречат общебиологическому **“принципу устойчивого неравновесия”**, сформулированному Эрвином Бауэром [Бауэр, 1935; Эрвин Бауэр, 1993].

Нас интересует вопрос, возможно ли такое состояние абиотической среды, а именно, искусственно смоделированного флуктуирующего электромагнитного поля (суперпозиция квазипостоянного геомагнитного и пульсирующего в соленоиде), когда его “поведение” способно изменить жизнедеятельность живой системы, ее биоритмы как в пределах адаптационных возможностей организмов, так и за их пределами?

Именно высокие значения $d\Phi/dt$, сопровождающие экстремальные внешние воздействия, могут в ряде случаев серьезно повлиять на адаптационные возможности живых организмов. В подобных ситуациях у животных могут возникнуть необычные, но характерные реакции, изучение которых может быть положено в основу проблемы опасных воздействий на нервную систему, с одной стороны, и биологического прогноза о наступлении экстремальной ситуации, например, электромагнитных возмущений геомагнитного поля (бури), с другой. Таким образом, можно ожидать, что в такой период физико-информационные связи между неравновесной экосистемой наблюдаемого живого объекта (рыбы в аквариуме) и нестационарной системой искусственного ЭМП резко возрастут.

3.2.2. Методический подход к исследованию

Анализ публикаций 1997–1999 гг. свидетельствует о том, что применение МП УНЧ-диапазона в полосе частот менее 50 Гц для воздействия на различные биообъекты (клетки, ткани, целостный организм) весьма ограничено. Заметны в этой области новые работы России, США, Испании (см. список лит-ры во введении). В частности, подтверждением правильности нашего выбора частотного диапазона воздействия в пределах $0,1 \div 10$ Гц явились работы, проведенные (вне связи с нами) в Институте биофизики клетки РАН, Пушкино Московской области. Авторы [Биофизика. 1999. Т. 44, № 2. С. 224–230; Биофизика. 1998. Т. 43, № 6. С. 977–980] показали, что воздействие слабыми комбинированными магнитными полями ($\Delta B_{\text{const}} = 42$ мкТл, $\Delta B_{\text{var}} = 40$ нТл при $f = 3 \div 5$ Гц) обуславливает изменение интенсивности собственной флуоресценции ряда белков — цитохром с, бычий сывороточный альбумин, пероксидаза

хрена, щелочная фосфатаза. Этот эффект исследователи интерпретируют как изменение конформационного состояния белков в водной среде при действии слабых магнитных полей, настроенных на циклотронный резонанс заряженных аминокислот. При изучении молекулярных механизмов описанного эффекта обнаружили существенное снижение функциональной активности белковых макромолекул за счет их структурных изменений. Следует отметить, однако, что измерения выполнялись в экранированной камере, что устраняет связь исследуемого объекта с естественной изменчивостью геомагнитного поля.

Кроме того, мы убедились в объективности исследований именно на организменном уровне, получая достоверную информацию о поведенческих реакциях как отражение внешних воздействий, нежели при работе с изолированными отдельными биоструктурами и растворами *in vitro*.

В современных исследованиях по экологической физиологии используются автоматизированные электро- и магнитометрические установки для оценки состояния живых биосистем, в частности, для диагностики реакции водных организмов на естественные внешние геофизические и антропоферные воздействия электромагнитного излучения в ультранизкочастотном диапазоне колебания волн. В таких исследованиях регистрируются суммарные электрокинетические эффекты в среде: потенциалы действия, связанные с активностью животных, электрохимические потенциалы, вызванные сдвигом ионной проницаемости возбудимых мембран. Фиксируются траектории перемещений и ориентационное поведение в замкнутых объемах.

Регистрация электрических потенциалов производится с помощью электродных зондирующих устройств — биполярных или мультиэлектродных зондов, контактирующих с исследуемой водной средой и ее обитателями [Броун и др., 1977; 1984]. Как в естественных природных, так и в изолированных водных экосистемах электрофизические эффекты (явления) протекают в системах неравновесных, содержащих электрически заряженные частицы.

В неравновесных системах наряду с понятием “концентрации частиц” следует учитывать локальное переменное электрическое поле. Полагают, что определяемые этим полем числовые характеристики системы также будут иметь пространственные или временные осцилляции. Исходя из этого положения, лабораторное моделирование природных электрофизических явлений в целом

нецелесообразно, хотя некоторые конкретные источники генерации поля могут быть достаточно успешно смоделированы.

Опыт лабораторного изучения электрических биоэффектов в изолированных системах показал целесообразность внедрения многоэлектродной установки, где можно применять систему из неподвижных попарно смонтированных датчиков или систему также неподвижных датчиков, но соотнесенных к нулевому электроду в виде единой цепи, суммирующей потенциалы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots \varphi_n$ в нескольких точках пространства. Поскольку по всему объему флуктуирующей среды существуют пространственно-временная нестабильность и неоднородность поля в трехмерном пространстве (простейшая модель), мы полагаем, что не следует стремиться к измерению средних величин характеристик поля (амплитуд, периодов). Отсюда следует существенный методический вывод: при исследовании электрических характеристик среды не всегда целесообразно добиваться воспроизводимости результатов, это приводит лишь к затягиванию экспериментальных работ и трате сил. В ряде случаев локальные поля оказываются достаточно стабильными, и желаемая воспроизводимость измерений позволяет выполнить расчеты усредненных характеристик и ввести статистические оценки. Для этого оператору необходимо грамотно оценить продолжительность квазистационарности наблюдаемого явления и связанного с ним электрического поля с тем, чтобы применить соответствующие методы математической обработки результатов.

Возможно ли лабораторное моделирование поведенческого адаптационного синдрома у водных организмов электромагнитными методами? Своеобразная неопределенность прозвучала в этом вопросе, и это не случайно, а обусловлено результатами многолетнего изучения поведения водных организмов *in vivo*, реагирующих на воздействие слабых ультранизкочастотных электромагнитных полей. Сомнительность эта сопутствует всем исследованиям, посвященным проблеме выяснения механизма передачи управляющего сигнала из внешней среды в центральную нервную систему (ЦНС) животных и человека. Необходимо отметить вероятностную особенность моделируемых физико-биологических открытых систем.

В конкретных лабораторных условиях обычно реализуют некоторое ограниченное число свойств, которые определяют и поддерживают состояние макроскопической физической системы, или модели. В термодинамике состояние физической системы выражается ее макроскопическими характеристиками, например, плотностью,

температурой, давлением, удельной электрической проводимостью, магнитной восприимчивостью и другими измеряемыми величинами. В равновесном состоянии созданная лабораторная аквариумная физическая система формирует условное фоновое состояние среды, которое принимают за начало отсчета при проведении экспериментальных работ. Однако при одних и тех же макроскопических значениях среды частицы системы могут находиться в разных координатах ее объема и иметь различные значения энергии или импульса. Такая система с распределенными параметрами является термодинамической вероятностной макросистемой, где параметр W (*термодинамическая вероятность*) выражается суммой микросостояний и представляет собой термодинамически равновесную систему. Известно, что $W \geq 1$ [ФЭС. 1964], однако вычисление этого параметра для реальных макросистем вряд ли осуществимо, так как они характеризуются именно неравновесным состоянием или, по терминологии Эрвина Бауэра, “*состоянием устойчивого неравновесия*” [Бауэр, 1935]. Внедрение в аквариумную квазистационарную систему дополнительно живых организмов приводит к формированию сложной флуктуирующей, термодинамически неустойчивой макросистемы. Таким образом, при моделировании физико-биологического нестационарного случайного процесса в ограниченном, но в то же время открытом объеме, термодинамическая вероятность приобретает черты статистической *математической вероятности* $P \leq 1$, что обуславливает необходимость вести обработку результатов методами вероятностной статистики.

Цель настоящего исследования состояла в получении достоверной совокупности измерений, наблюдаемых на организменном уровне у аквариумных рыб при стрессе. Стресс возникает при воздействии ЭМП и проявляется в изменении ориентационного положения рыб в пространстве и времени, биоритмов, скорости перемещения, в появлении признаков патологии и т.д.

В работе использовались опыт и результаты прежних исследований, она была субсидирована по гранту Фонда *Hasselblad* (Швеция) в 1998–1999 годы. [The Project by Saint-Petersburg State Technical University, 1999–2000].

Методика бесконтактной регистрации поведенческих реакций водных организмов как в открытых аквасистемах, так и в лабораторных условиях основана на их электрической активности. При движении (оседании, всплытии, вращении) организмов в полидисперсной системе возникают потенциалы φ и токи, которые могут быть измерены в соответствии с теорией электрокинетических явлений [ФЭС. 1964].

Исходя из реального состояния фоновых колебаний магнитного поля в лаборатории, нами изучалось “комбинированное действие полей” на физиологическую активность рыб. Такое “комбинированное МП” включает в себя:

- квазипостоянную составляющую $\Delta \bar{B}_z = 48 \text{ мкТл} \pm 0,6 \text{ мкТл}$,
- переменную составляющую $\Delta B \approx 200 \text{ нТл} - 6 \text{ мкТл}$, $f = 0,1 - 10 \text{ Гц}$.

Установка для исследования поведения биологических объектов в магнитном поле

Проектирование установки лимитировалось лабораторными условиями и перспективой изменений факторов среды:

- 1) размеры аквариума $0,3 \times 0,35 \times 0,8 \text{ м}$;
- 2) квазипостоянная компонента индукции геомагнитного поля (ГМП) — вертикальная составляющая $B_z \cong 48 \text{ мкТл}$;
- 3) переменная составляющая индукции геомагнитного фона в лаборатории $\Delta B_z \cong 0,6 \text{ мкТл}$;

4) геомагнитные бури мирового класса (сильные возмущения) — в пределах 2 мкТл ;

5) предположительно должно было быть осуществлено воздействие на животных переменным магнитным полем с частотой $0,1 \div 100 \text{ Гц}$ и максимальным значением индукции $B_{\text{max}} \cong 4 \div 6 \text{ мкТл}$.

“Сердце” установки — аквариум, помещаемый в соленоидальное магнитное поле, расчет которого был произведен при проектировании и проконтролирован в реальной обстановке (рис. 3.13) с помощью магнитометра “Нева-4” и электрометра “Нева-Эдн”. Общий вид блока, генерирующего ЭМ поле, показан на рис 3.14, 3.15б, цв.

На рис. 3.15а представлена структурная схема установки, ее функциональные узлы*:

задающий блок, состоящий из генератора низких частот (ГНЧ) и соленоида, включающего в себя пять последовательно соединенных, катушек из электротехнического провода;

измерительный блок, состоящий из системы датчиков, тракта усиления и преобразования сигнала и ЭВМ с платой 16-разрядного аналого-цифрового преобразователя АЦП.

*В разработке установки принимали участие сотрудники СПбГПУ — И.А. Цикин, В.А. Сороцкий, А.Я. Сергеев, В.А. Тартушев и ГНЦ им. академика А.Н. Крылова — Г.В. Соколов. Автор выражает коллегам глубокую признательность. Описание аппаратуры см. в разд. 4.3.2.

Длина, м	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
B_x , мкТл	175	180	182	184	185	185	185	185	184	182	178	173
B_y , мкТл	126	183	185	185	185	185	185	185	184	183	105	

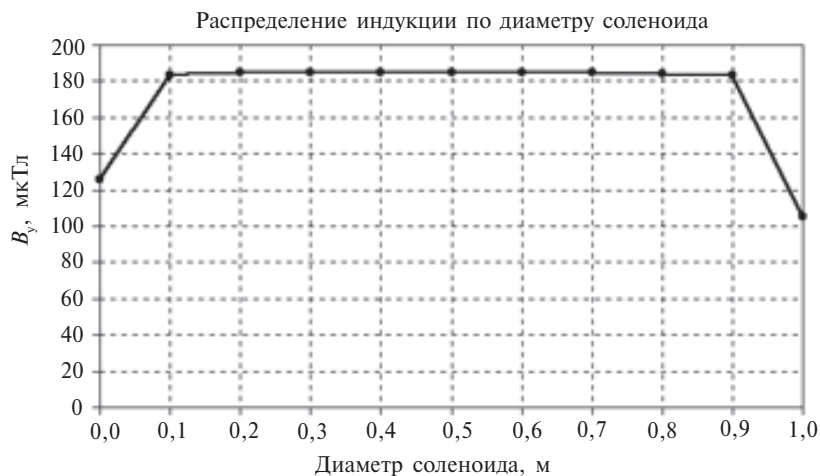
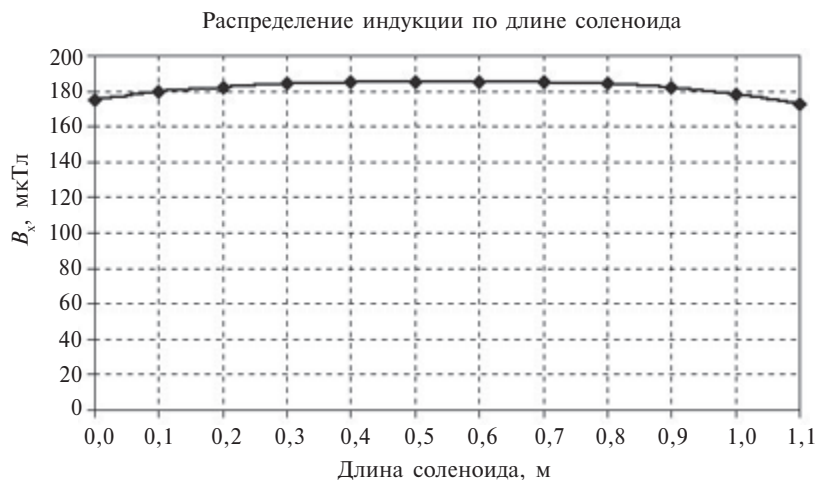


Рис. 3.13. Магнитное поле соленоида

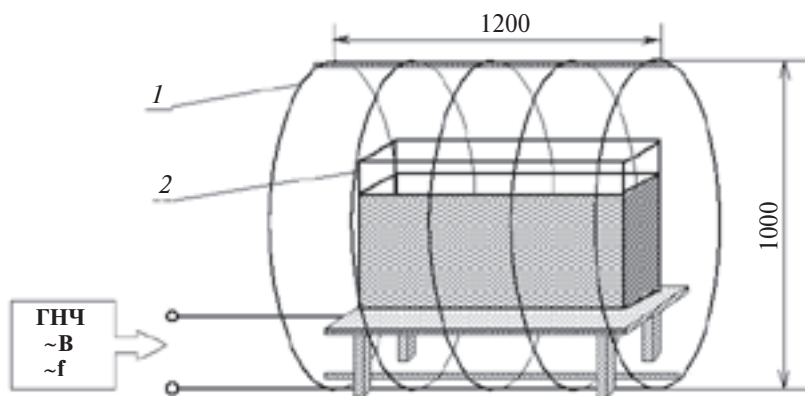


Рис. 3.14. Блок генерирования электромагнитного поля: 1 — соленоид; 2 — аквариум

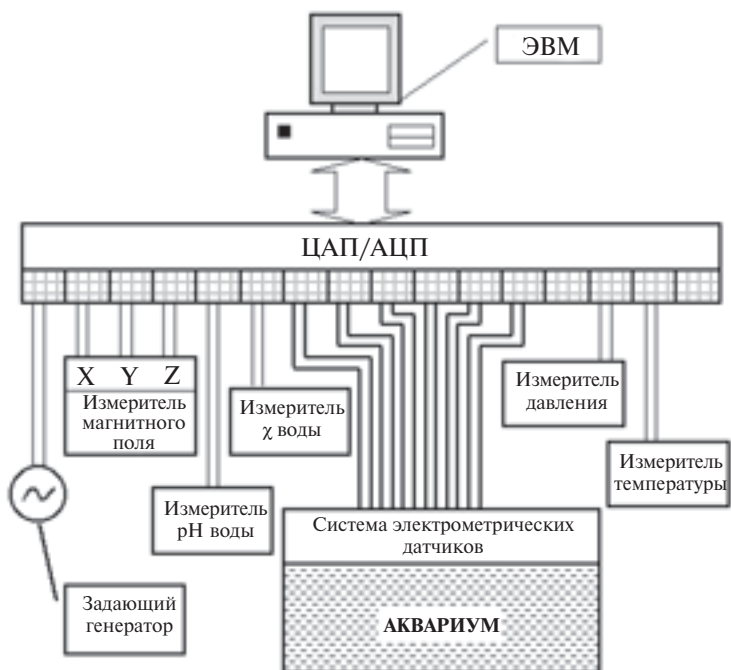


Рис. 3.15а. Структурная схема установки для регистрации воздействий электромагнитных полей на живые организмы и их реакции

Генератор низких частот (ГНЧ) ГЗ-110 обеспечивает в соленоиде амплитуду напряжения $u = U \cos(2\pi ft)$ при $U = 3$ В и нагрузке $Z_{\Sigma} = 100$ Ом в диапазоне частот $f = 0,1 \div 100$ Гц (подтверждено экспериментально). Аквариумная часть установки помещается в соленоид.

Максимальное значение амплитуды тока в соленоиде

$$I = \frac{U}{Z_{\Sigma}} = \frac{3}{100} = 30 \text{ мА}. \quad (3.1)$$

Суммарное сопротивление нагрузки Z_{Σ} для генератора складывается из активного R и реактивного X сопротивления соленоида, а также измерительного сопротивления $R_{\text{изм}}$, включенных последовательно.

Габаритные размеры соленоида — $1,2 \times 1$ м. Его индуктивность может быть оценена по формуле

$$L = \frac{\mu \mu_0 n^2 S}{l} = \frac{1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\pi}{4}}{1,2} \approx 0,2 \text{ Гн}, \quad (3.2)$$

где $\mu \approx 1$; $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; $n = 500$ — общее число витков 5-секционной катушки;

$S = \pi D^2 / 4 = \pi / 4$ — площадь соленоида ($D = 1$ м); $l = 1,2$ м — длина соленоида.

Реактивное сопротивление $X = 2\pi fL$ составляет 62,8 Ом на частоте 50 Гц и 0,628 Ом на частоте 0,5 Гц. Таким образом, можно считать, что в наиболее интересном диапазоне частот $0,1 \div 10$ Гц, где лежат значения критических частот для исследуемых рыб (0,7; 1,2; 4,1; 7,2; 10,5 Гц), реактивным сопротивлением соленоида можно пренебречь по сравнению с его активным сопротивлением $R = 75$ Ом и считать, что сопротивление нагрузки для ГНЧ

$$Z_{\Sigma} \approx R + R_{\text{изм}} = 75 + 25 = 100 \text{ Ом}.$$

Измерения магнитного поля (с помощью магнитометра “НЕВА-4”) внутри соленоида показали, что оно достаточно однородно в пределах габаритов аквариума. Измеренные значения магнитной индукции B , например, при частоте $f = 10$ Гц и $I = 16$ мА составляют 7 мкТл в воздухе и 6,8 мкТл в воде аквариума. Аналогичные измерения на разных частотах диапазона и при разных токах (до 30 мА) показали хорошее совпадение измеренных данных по индукции с расчетными данными по формуле

$$B = \mu \mu_0 \frac{n}{l} I, \quad (3.3)$$

которая дает при токе $I = 10$ мА индукцию $B \approx 5,5$ мкТл. Измеренные значения B оказались на $10 \div 15$ % меньше, чем расчетные, так как соотношение (3.3) не учитывает конечность длины соленоида. Эксперименты показали также практически полное проникновение магнитного поля внутрь аквариума. Внутри аквариума в отстоянной водопроводной воде величина B была лишь на $1,5 \div 2$ % меньше, чем снаружи.

Таким образом, в данном примере, полученном в экспериментальной установке в диапазоне частот $f = 0,1 \div 10$ Гц, обеспечиваются значения магнитной индукции B от 0 до $10 \div 12$ мкТл во всем объеме аквариума.

Измерительный блок (рис. 3.16) состоял из 7 измерительных электродов-преобразователей конструкции НПО "ОкеанГео" в модификации В.В. Александрова [разд 2.2; Литвинов и др., 1966].

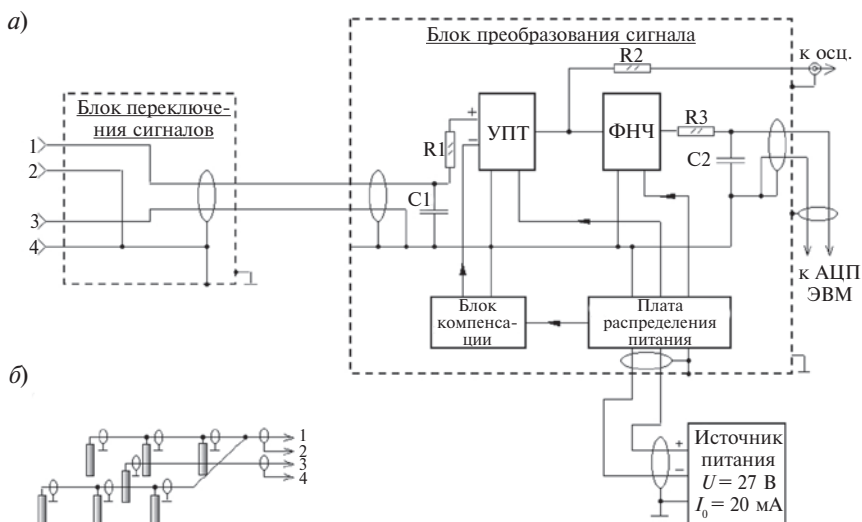


Рис. 3.16. Измерительный блок

В основе измерительной системы применен дихлорид свинца $PbCl_2$, образующий из двух цилиндрических полуэлементов (неполяризующихся электродов) электролитическую цепь Доннана:

Pb	I		III		II		Pb	(3.4)
	PbCl ₂ , твердая фаза	KCl(C ₁) жидкая фаза	MeCl(C ₂) 1 раствор или вода		KCl(C ₁), PbCl ₂ 2 жидкая фаза	твердая фаза		

I и II — две свинцовые-хлорсвинцовые электродные системы, находящиеся во внутреннем растворе KCl концентрации C_1 (это насыщенный раствор KCl, плюс 3%-ный гелевый раствор агар-агара), которые представляют собой два полуэлемента, или электрода в сборе;

III — внешний раствор, содержащий любое металлическое соединение MeCl(C₂) с концентрацией C_2 и возможными концентрациями C_2^I и C_2^{II} на границах раздела 1 и 2 между внутренними растворами электродов или раствором электролитического контакта (жидкостного соединения) в зондирующем устройстве. В рассмотренной цепи на участке III присутствует раствор KCl (для калибровки зонда) или природная вода (при измерении в полевых или лабораторных условиях).

Для наших работ в качестве основы электрода был взят свинец, поскольку относительный электродный потенциал E_0 свинцовой пары в водных растворах, являющийся мерой способности электродов передавать положительные ионы в раствор, оказывается наименьшим. Иными словами, взаимодействие этого металла с водными растворами неактивное (табл. 3.2). Кроме того, свинец является диамагнетиком (его магнитная восприимчивость $-\chi_m < 0$ имеет малое абсолютное значение и слабо зависит от температуры, а также от напряженности внешнего магнитного поля).

Таблица 3.2

Относительный электродный потенциал свинца E_0
(Мелвин-Хьюз, 1962; Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978)

Электрод	Реакция	Потенциал, В
Pb, Pb ²⁺	Pb → Pb ²⁺ + 2e ⁻	– 0,126

Следует отметить, что измерительный сигнал $\Delta\phi$ зависит не только от величины измеряемого поля, но и от собственной ЭДС электродов и их поляризации. Поэтому сами датчики поля являются источниками ошибок. При измерении квазистационарного электрического поля величина собственной ЭДС электродов и ее нестабильность (т.е. поляризация) являются суммарной ошибкой, которую разделить зачастую не удастся. В общем случае собственная ЭДС электродов изменяется случайно и, как известно, весьма плавно [Митрофанов, 1968]. Максимальная погрешность от нестабильной ЭДС_{соб} электродов определяется максимальной скоростью ее изменения (при линейной временной поляризации) и выражается равенством

$$\Delta\phi_{\omega} = \frac{a}{\omega}, \quad (3.5)$$

где a — линейная скорость изменения ЭДС_{соб} электродов; ω — частота измеряемого поля.

Из равенства (3.5) видно, что допустимая скорость изменения ЭДС_{соб} электродов прямо пропорциональна частоте исследуемого поля. Таким образом, при увеличении частоты поля ошибка измерения возрастает, и тогда, очевидно, исходя из принципа измерения компенсационным способом, постоянное электрическое поле можно фиксировать с меньшей ошибкой, чем переменное, за счет поляризации электродов. Это обстоятельство следует отметить как весьма выгодное для наших измерений при изучении локальных полей.

Процесс поляризации электродов, обусловленный физико-химическими реакциями при контактировании их со средой, приводит к тому, что возникающее при этом добавочное поле уменьшает амплитуду сигнала первоначального поля, вызвавшего ток. Кроме того, наблюдается сдвиг фазы первичного сигнала, характерный для гармонического процесса. Для постоянного поля ($\omega = 0$) погрешность измерений из-за поляризации электродов отсутствует, и исследования проводятся с максимальной чувствительностью при работе компенсационной аппаратурой.

Схема расположения датчиков представлена на рис. 3.16,б. Между парой электродов при движении рыбы возникает изменение электрокинетического потенциала. Регистрируется интегральный сигнал $\Delta\phi$ между шестью измерительными электродами и “нулевым” электродом, потенциал которого принят за нуль.

Сигнал с измерительных электродов мал по амплитуде и содержит спектр помех и в чистом виде для обработки не пригоден. Кроме того, сигнал из-за несовершенства самих датчиков и параметров

воды в аквариуме может изменять постоянную составляющую, т.е. появляется тренд. Для согласования этого сигнала со входом АЦП был разработан блок преобразования.

Разность потенциалов с измерительных электродов по экранированным проводам поступает на блок переключения сигналов, сюда же приходит и сигнал из контрольного аквариума. Далее нужный сигнал идет в блок преобразования на положительный вход усилителя постоянного тока (УПТ). На отрицательный вход УПТ подается сигнал с блока компенсации. Назначение блока — компенсация постоянной составляющей входного сигнала таким образом, чтобы на выходе усилителя при сложении входного (с датчиков) и компенсированного сигналов уровень постоянной составляющей был равен нулю (сумму двух сигналов можно наблюдать на осциллографе).

Коэффициент усиления УПТ $K_y = 80$ с возможностью регулирования в обе стороны. Величина компенсированного сигнала равна величине постоянной составляющей входного сигнала. После избавления от постоянной составляющей, измерительный сигнал усиливается и поступает на фильтр низкой частоты (ФНЧ). Фильтр собран по схеме ФНЧ Золоторева—Кауэри III порядка и работает таким образом, что пропускаются частоты от 0 до 15 Гц, а частоты выше 15 Гц срезаются. На частоте 50 Гц K_ϕ составляет менее 70 дБ и далее при увеличении частоты не превышает 46,5 дБ.

Уровень помех в схеме снижается за счет применения специальных мер (экранирование проводов и установка фильтров).

После этих преобразований сигнал подается на вход платы АЦП для “оцифровки” в ЭВМ. К остальным входам АЦП подключаются (см. рис. 3.15,а):

- регистратор вариаций естественного магнитного поля “НЕВА-5” с пределами измерений 1, 10 и 100 мкТл, имеющий аналоговый выход. Контроль индукции естественного магнитного поля осуществляется переводом из [В] в [мкТл], умножением на соответствующий коэффициент;

- регистратор давления “НЕВА-Р” для контроля атмосферного давления и его изменений в лаборатории;

- датчики температуры, pH и проводимости в аквариуме.

Основным средством сбора и обработки информации является персональная ЭВМ класса Pentium®, оборудованная платой ввода—вывода фирмы Real Time Devices®. Передача всех аналоговых сигналов от систем датчиков на ЭВМ происходит через данную плату. Применение аппаратуры именно этой фирмы позволило значительно расширить предел измеряемых величин и увеличить скорость передачи данных на компьютер. Встроенный

аналого-цифровой преобразователь платы производит “оцифровку” сигнала. Оцифрованный и обработанный сигнал передается на компьютер для дальнейшей обработки и сохранения с помощью программного комплекса RtdLinks®. В результате работы программы получается выходной файл данных, в котором представлены состояния всех входов платы ввода–вывода в каждый момент времени, пересчитанные в реальные физические величины. Далее выходной файл данных обрабатывается программными средствами с целью получения графиков реализаций и спектров сигналов*.

3.2.3. Обсуждение результатов измерений

Поскольку мы вправе рассматривать изучаемую лабораторную модель экосистемы как динамическую систему с распределенными параметрами, которой свойственны не только бесконечно большое число “нормальных колебаний”, но и вихревые движения, переменные плотностные и электрокинетические поля (эффект Дорна), вызванные внешними факторами и т.д. [ФЭС. 1983. С. 470], необходимо установить собственные частоты упомянутых колебаний, т.е. собственные частоты реальной динамической системы. Условно назовем реальную аквариумную систему, не содержащую биологических компонентов, системой, флуктуирующей с собственными частотами f_0 , или фоновыми колебаниями. В данной экспериментальной работе собственным фоновым колебаниям системы $\Delta\phi_0$ (потенциал среды обитания) придавалось исключительное внимание, поэтому любое измерение начиналось с оценки $\Delta\phi_0$ фона.

1. Установление структурного поля собственных частот реальной динамической системы или фоновых ЭМ характеристик среды обитания рыб

Электрокинетические фоновые поля колеблются в пределах $2,5 \div 3$ с ($f \approx 0,35 \div 0,4$ Гц) с амплитудой ≈ 10 мкВ, а естественные магнитные поля в спокойные дни (за исключением импульсных всплесков) — в пределах $2 \div 3$ с ($f \approx 0,5 \div 0,3$ Гц) с амплитудой $\approx 20 \div 100$ нТл. При этом спектральные функции распределения энергии флуктуаций электромагнитных характеристик имеют единый первый энергетический максимум на частоте 0,39 Гц, а первый минимум на частоте $\approx 0,2 \div 0,27$ Гц (при уровне значимости 95 %). При внешнем возбуждении системы (появление ЭМ низкочастотных помех, частотных аномалий геомагнитного поля, импульсных помех в электросети) существенным оказывается также и

*В дальнейшем целесообразно внедрение новой компьютерной техники.

пространственное распределение воздействия, поскольку максимальный эффект достигается при соблюдении не только временного, но и “пространственного синхронизма”.

При выбранной методике измерений, когда ограничено количество информационных точек наблюдений, полную оценку воздействия внешнего ЭМ фактора осуществить весьма трудно. Примером могут служить результаты, полученные нами ранее при двухэлектродной регистрации фоновых колебаний $\Delta\phi$ в аквариуме (1995 г.), когда максимум энергии $G(f)$ находился примерно в области частот $f \approx 0,1$ Гц. В настоящее время при увеличении числа информационных точек до 6 максимум сместился в область 0,4 Гц. В таких ситуациях есть вероятность получить неадекватную информацию о состоянии активности рыб, тем более, что каждая особь — индивидум, и совершенно не обязательно должен проявиться стайный эффект поведения. Это и подтвердилось впоследствии при видеосъемке, *показавшей различные поведенческие реакции при одинаковом воздействии магнитного поля.*

При действии искусственного МП на фоновую структуру флуктуаций $\Delta\phi_0$ в соленоиде индукцией $\Delta B = 200$ нТл и частотой $f = 4$ Гц, т.е. полем, соответствующим среднему уровню возмущенности ГМП при наиболее биоактивной частоте колебаний [Александров, 1999], электрокинетические поля флуктуируют в пределах $1,2 \div 1,4$ с ($f \approx 0,7 \div 0,8$ Гц) и с амплитудой ≈ 5 мкВ, а магнитное поле в лаборатории в пределах $2,5 \div 1,4$ с ($0,4 \div 0,8$ Гц) с амплитудой $20 \div 100$ нТл. При этом спектральные функции распределения энергии флуктуаций электромагнитных характеристик имеют единый энергетический максимум на частоте 0,78 Гц, первый минимум на частоте примерно 0,59 Гц (при уровне значимости 95 %). По сравнению с данными при естественной оценке фона (рис. 3.17, цв.) в данном случае присутствует зона не с основным, а с промежуточным максимумом энергии на частоте примерно 0,39 Гц. Так, например, фоновая характеристика аквариумной среды на протяжении наблюдений в 1999 г. в полосе частот $0,01 \div 1,0$ Гц практически может оцениваться как квазиоднородная (максимумы и минимумы $G(f)$ выделяются на одних и тех же частотах), а уровень колебаний $\Delta\phi$ не выходит за пределы 10 мкВ, что превышает естественный уровень, например в Ладожском озере, лишь в 2 раза.

2. Структура электрокинетических полей, генерируемых рыбами (30 особей, возраст 7 мес)

Изменилась амплитуда флуктуаций $\Delta\phi$ от $5 \div 10$ до $100 \div 200$ мкВ, т.е. потенциал системы возрос по модулю на порядок, но система

приобрела значительный отрицательный заряд. Эффект отрицательного потенциала электрокинетического поля биологической популяции согласуется с данными В.В. Александра по измерениям концентрации микрозоопланктона в озерах и море [Александров, 1980; 1985].

Несмотря на то, что распределение спектральной плотности энергии флуктуаций Δf в области низких частот характеризуется определенным сходством в обеих ситуациях, т.е. аппроксимируется степенным законом $G(f) \sim f^n$, значение n существенно различно:

до впуска рыб $n \approx 8/5 \div 11/5$,

после впуска рыб $n \approx 1/2$.

Спектр $G(f)$ при наличии рыб модулирован за счет электрической активности животных, налицо четкий сдвиг максимума энергии в более низкочастотную область от 0,39 до 0,2 ÷ 0,27 Гц и сглажена расщепленность спектра. В первом случае мы имеем практически полное сходство с распределением энергии для чисто турбулентных флуктуаций Δf , измерявшихся в Ладожском и Красном озерах, во втором — значительное изменение закономерности.

Следует обратить внимание на то, что в лабораторных условиях можно проследить наличие квазигармонических устойчивых микропульсаций ΔB , зафиксированных магнитометром:

$$\left. \begin{array}{l} 0,2 \div 5 \text{ Гц} \\ 0,01 \div 1 \text{ нТл} \end{array} \right\} \text{pc1} \quad \text{и} \quad \left. \begin{array}{l} 0,1 \div 0,196 \text{ Гц} \\ 0,1 \div 10 \text{ нТл} \end{array} \right\} \text{pc2}$$

Это явление не исключает вероятность резонансных ответов живых объектов и усложняет интерпретацию сигналов (см. 2.1.4., табл. 2.6).

3. Ответные реакции рыб на воздействие

В результате проведения измерений в течение кратковременного воздействия и при высокой скорости регистрации (дискретность измерений 10^{-3} с) установлены спектральные характеристики активности при свободном движении и поведении, при индукционных воздействиях и последующем отдыхе животных, что позволило инструментально выявить начало и конец ответной физиологической реакции на воздействие, **показать подавляющее и угнетающее действие излучения слабых электромагнитных полей** (рис. 3.18, цв.).

При фиксированном уровне индукции 200 нТл и различных частотах измерения от 1 до 10 Гц отмечено подавление активности с резким падением энергии спектра $G(f)$.

- Возникновение “провалов” в распределении энергии по частотам в пределах 0 ÷ 0,59 Гц, расщепление спектра.

- Снижение уровня энергии флуктуаций Δf в полосе частот более 1 Гц.

• Низкочастотная часть спектра до воздействия и после воздействия характеризуются показателем степени $n \approx 1/2$.

Отличительные особенности спектральной структуры при воздействии различных частот даны в табл. 3.3.

Таблица 3.3

**Спектральная структура электрокинетических колебаний,
зависящая от активности рыб при действии различных частот МП**

3 Гц	4 Гц	7 Гц	10 Гц
Минимумы $G(f)$ на частотах $0,1 \div 0,2$ Гц, “плато” на частотах $0,39 \div 0,59$ Гц сохраняются и после отключения генератора. На частотах $2,8 \div 4,3$ Гц видно резкое снижение уровня $G(f)$, которое начинает восстанавливаться лишь через $10 \div 15$ с после отключения индукции.	Минимумы $G(f)$ на частотах $0,05 \div 0,1$ Гц и $0,2 \div 0,59$ Гц. Однако в течение $20-25$ с после включения генератора отмечен некоторый рост энергии $G(f)$, который сохраняется и после выключения генератора. Общее снижение уровня $G(f)$ сохраняется в пределах $0,6 \div 3$ Гц.	Явное подавление активности. Отмечается резкое смещение максимума $G(f)$ в область $0,01 \div 0,1$ Гц после включения генератора, и слабое восстановление энергии флуктуаций наблюдается лишь через 15 с после его выключения. Общее замечание: рыбы подавлены еще за счет предыдущих воздействий (3 и 4 Гц)	Вялая реакция рыб на воздействие, что констатируется однородным спектром $G(f)$ в полосе $0 \div 0,2$ Гц. Слабый минимум $G(f)$ при включении генератора отмечен в полосе частот $0,1 \div 0,2$ Гц в течение $65 \div 90$ с; ярко выражен II максимум в области $0,39$ Гц.

При общем показателе подавления активности рыб выделяется слабо активизирующая частота 1 Гц, при которой сохраняется наибольший уровень энергии спектра $G(f)$; а на частотах 3, 4, 7 и 10 Гц уровень снижается на порядок и более, соответственно.

После воздействия магнитным полем частотой 1 Гц максимум энергии активности рыб сосредоточен практически в тех же пределах, что и до воздействия ($0,01 \div 0,2$ Гц), а после действия 3, 4, 7 и 10 Гц сместился к более низкому диапазону ($0,01 \div 0,1$ Гц).

Для воздействия $f = 1$ Гц характерна высокая неоднородность спектральной плотности, которая снижается лишь в области высоких частот ($3,5 \div 5,0$ Гц); при воздействии 3, 4, 7 и 10 Гц отмечается значительная сглаженность спектра, и наоборот, в области

высоких частот ($2,9 \div 5,0$ Гц) наблюдается рост неоднородности $G(f)$ при низкой активности рыб.

Ответная реакция рыб при включении генератора практически проявляется на всех активизирующих частотах резким сдвигом уровня флуктуаций Δf в отрицательную область, при этом для частоты 1 Гц явление длится 25 с, а для частот 3, 4, 7 и 10 Гц — примерно 10 с.

Низкочастотная часть спектра до и после воздействия отличается иным показателем степени n , а именно $n \approx \frac{1}{6} \div \frac{1}{4}$, а в период воздействия спектр не имеет четко выраженной степенной закономерности.

При фиксированной частоте измерения 4 Гц и переменных значениях индукции (200, 500 и 1000 нТл) отмечено, что эффекты могут быть не обязательно пропорциональны мощности поля, а зависят от суперпозиции полей и частот. Существенна вариабельность в значении $G(f)$ для индукции 200 нТл на протяжении измерений и весьма сходна для индукций 500 и 1000 нТл, хотя подавление активности во втором случае примерно в 2 раза выше в пределах $0,2 \div 0,5$ Гц, а на частотах выше 0,5 Гц колебания Δf — на уровне шума.

Общим для этого периода наблюдений можно считать

Электрокинетические поля Δf до воздействия практически не различаются по размаху амплитуд, и их энергетические спектры $G(f)$ сходны.

Период воздействия характеризуется резким падением уровня энергии для $\Delta B = 200$ нТл уже в пределах $0,01 \div 0,2$ Гц, а для $\Delta B = 500$ нТл и $\Delta B = 1000$ нТл растягивается до частоты 0,4 Гц.

После индукционного воздействия рыбы (на период наблюдения) не возвращаются в первоначальное состояние, особенно в пределах первых 0,5 Гц, а далее различие в спектрах $G(f)$ сглаживается.

Флуктуации магнитного поля в помещении (по магнитометру) за период наблюдений (13:00 ÷ 14:20) однородны и имеют характерные энергетические максимумы на частотах 0,2 и 0,39 Гц.

Степенная функция спектра $G(f)$ при воздействиях на низких частотах характеризуется показателем $n \approx 1$ для диапазона $0,01 \div 0,3$ Гц (200 нТл), $n \approx 1/2$ для диапазона $0,01 \div 0,5$ Гц (500 нТл) и $n \approx \frac{2}{5}$ для диапазона $0,01 \div 0,6$ Гц (1000 нТл).

Общие замечания по характеру спектров Фурье

При индукции МП в общем снижается средний уровень мощности спектра, т.е. налицо уменьшение флуктуации Δf ЛА животных.

После выключения установки в течение последующих наблюдений ($1 \div 1,5$ ч) уровень мощности спектра не восстанавливался, хотя визуальные наблюдения не отмечали особых отклонений в поведении. Исключение составил период восстановления двигательного поведения (4 ч).

Флуктуации ЭП, соответствующие частотам примерно $5 \cdot 10^{-4}$, $0,2 \div 0,25$ и $0,7$ Гц, отмечены глубокими минимумами уровня мощности спектра.

Микровихревая структура ЭП локомоторной активности рыб, исследуемая в наших опытах как результат действия магнитным полем, напоминает типичную спектральную характеристику естественных турбулентных или вихревых движений жидкости, изучавшихся другими физическими методами (термоанемометрическими, гидроакустическими и др.) Так же, как и при турбулентности, здесь образуются зоны с максимумами энергии, которые характеризуют инертное состояние среды, застойные области. Зоны с минимумами энергии характеризуют активное состояние гидробионтов, они имеют длительность примерно $12 \div 20$ с со значением n в пределах от 3 до 5, как и при турбулентности. Однако крутизна спада спектра не достигает значений $n = -(5/3 \div 11/5)$ или $-(1,67 \div 2,20)$, как при естественной турбулентности в озерах (см. ч. 2). Этот результат позволяет при соответствующей статистической обработке наблюдений с применением специальных сглаживающих параметрических фильтров выделять сигналы чисто биологической природы на фоне естественных гидродинамических флуктуаций поля.

4. Оценка биоритмов (БР) активности по электрокинетическим полям

В контрольном блоке провели изучение поведенческих реакций всевозможных видов движения рыб в устойчивом состоянии. Соответствующие электрограммы послужили фоном при дальнейшей оценке ЛА после воздействия ЭП [В.В. Александров // Биофизика. 1995. Т. 40, вып. 4]. Аналогичные исследования были проведены одновременно в экспериментальном блоке, где создавалось переменное ЭП с напряженностью до $0,3$ В/см, соответствующее предлетальному состоянию. Затем в течение 4 сут после воздействия полем регистрировали упомянутую выше разность потенциалов. Шаг дискретизации электрограмм составлял 40 или 2 с в зависимости от задачи дальнейшего анализа. Таким образом, была получена характеристика активности рыб в состоянии, далеком от естественного и устойчивого.

Оценка ЛА, полученная с помощью Фурье-спектра, убедительно показала, что поведение рыб в экспериментальной группе существенно

отличается от их поведения в контрольной группе. Спектральная плотность электрических сигналов, обусловленных движением рыб, носит так называемый красношумовой характер, т.е. происходит ее уменьшение с ростом частоты. Вид спектральной плотности свидетельствует о том, что движение является сложным полициклическим процессом.

Проведенный анализ позволил обнаружить два типа совокупностей БР в диапазоне УНЧ-колебаний — долгопериодные и короткопериодные. Длительность первых находится в интервале от минут до часов, вторые длятся секунды.

I тип совокупности биоритмов включает значения $1,2 \div 16,0$ мин со следующими особенностями:

1) в пределах $1,2 \div 16$ мин выявлен весь набор биоритмов с шагом в $0,1$ мин, за исключением $3,6 \div 3,7$; $4,2 \div 4,5$; $4,7 \div 4,9$; $5,1 \div 5,3$; $5,5 \div 6,9$; $7,1 \div 14,9$ мин;

2) в пределах $1 \div 2$ ч выявлены лишь отдельные характерные БР, а именно $15,0$ и $16,0$ мин;

3) общими биоритмами для обоих состояний рыб (до и после воздействия) являются значения $1,5$; $1,8$; $2,1$; $3,0$ мин, их можно назвать фундаментальными, характеризующими способность животных противостоять внешним воздействиям;

4) в состоянии после воздействия наблюдалось исчезновение некоторых ритмов активности ($1,2 \div 2,0$; $2,8$; $4,6$; $5,4$; $7,0$ мин) и появление новых ритмов ($2,5 \div 2,6$; $3,3$; $4,4$; $7,8$ и $10,0$ мин). Исчезновение или появление определенных биоритмов можно трактовать как результат внешнего воздействия или потери устойчивости.

II тип совокупности биоритмов включает значения секундного поддиапазона в пределах временного интервала регистрации $1 \div 2$ ч.

Для структуры электрического сигнала фона характерны пульсирующие колебания, где выделены следующие БР, приуроченные к моментам с высокой ЛА утром и вечером: $60 \div 62,5$; $49,1$; $24,5$; $16,9$; $14,6 \div 14,7$; $12 \div 12,1$; $9,4 \div 9,6$ и $6,0 \div 6,5$ секунды. Аналогичные по частоте ЭМ пульсации известны в геомагнитном поле и магнитосфере Земли. Подобие спектральной структуры изменчивости электрического сигнала наблюдается и в процессах естественной турбулентности воды, где спектральная плотность в зависимости от частот колебаний описывается законом “ $-5/3$ ”. Поэтому можно говорить о неслучайном характере установленных ритмов. Однако надо отметить, что рассмотренный процесс является существенно нестационарным во времени.

В результате действия ЭП промышленной частоты наблюдаются рост амплитуды колебаний электрических сигналов и значительное

снижение их частоты. Например, для группы особей, подвергавшихся опасно высокому для жизни напряжению 9 В (напряженность поля 0,32 В/м), выявлено, что максимум энергии практически смещен в область ниже 0,01 Гц, или более 100 с. При этом уменьшение высокочастотной компоненты иногда вплоть до ее полного исчезновения свидетельствует о большей организованности группового поведения по сравнению с рыбами контрольной группы.

Из библиографических источников известно, что частотный диапазон электрограмм активности для большинства костистых рыб лежит в пределах $0,2 \div 12$ Гц [Lissman et al., 1963; Szabo, 1974; Протасов и др., 1982; Bullock et al., 1983; Броун, Ильинский, 1984; Григорян, Бойко, 1985; Муравейко, Степанюк, 1985; Солуха, 1985; Шпарковский, 1987; Извеков, 1987]. Поэтому выбранный нами диапазон воздействующих частот $0,3 \div 10$ Гц в результате длительных экспериментальных работ оказывается биоактивным, поскольку соответствует промежутку собственных частот ряда физиологических функций. По всей вероятности, такие функции, как дыхание ($0,5 \div 1,2$ Гц), мышечные сокращения ($5 \div 7$ Гц), α -ритмы мозга ($3 \div 5$ Гц) и другие, при воздействии аналогичных внешних частот МП включаются в явление биорезонанса в электролитной системе организма. Это приводит к подавлению собственных эндогенных биоритмов в живых системах и к снижению ЛА организмов. Необходимо отметить следующий парадоксальный факт: например, при индукции поля 200 нТл и $f = 0,3$ Гц сначала наблюдали резкое усиление “размаха плавательных движений” и спиралевидные траектории перемещений; затем — угнетенное состояние и лежание рыб на дне, далее после 6-минутного воздействия наблюдали рост ЛА при слабых флуктуациях $\Delta\phi$ на ленте самописца; не исключено возможное снижение собственной электрической активности животных, т.е. изменение потенциального диполя $\Delta\phi$ самой рыбы. Кроме того, равновероятно рассогласование эндогенных ритмов за счет внешних воздействий, на что указывает не наблюдаемая нами адаптация к первоначальному сигналу, как было от индуцируемого МП.

Полученные данные требуют дальнейшей тщательной проработки с учетом синхронной регистрации хода геомагнитного поля региона (лучше непосредственно в экспериментальной лаборатории, что осуществлено в СПбГПУ в 1996–2001 гг.).

Затронутая проблема имеет общебиологическое эколого-физиологическое значение, и от ее решения зависит в немалой степени сохранение элементов здоровья человека. Наример, лабораторное моделирование восприятия животными действия электромагнитного поля УНЧ-диапазона, изучение их поведенческих

реакций с последующим спектральным анализом Фурье флуктуаций электрических сигналов, генерируемых локомоторной активностью, позволяет количественно описать и оценить эколого-физиологическую значимость экспериментальных ситуаций, сопровождающих геомагнитные и техногенные возмущения.

Не противоречат рассмотренным выше данным [Александров, 1992; 1995] результаты длительных наблюдений за поведенческими реакциями рыб в аквариумных условиях, проведенных в Московской области и на геофизическом полигоне в Гарме (5 и 15 с) [Саблин-Яварский, Сидорин // Биофизика. 1995. Т. 40, вып. 5]. Геофизические агенты — наличие грозового состояния атмосферы, импульсы постоянного тока и землетрясения. Авторы показывают, что наиболее высока корреляция двигательной активности с электротеллурическим полем и электрической проводимостью воды в одном из водоемов в районе полигона, несмотря на то, что связь активности с энергетическими параметрами землетрясения неоднозначна и требует дальнейших дополнительных исследований. Следует отметить, что авторы, видимо, не учли при обработке данных, что рост активности рыб в утренние и вечерние часы связан со стимулирующей ролью Солнца, и эти наблюдения целесообразно исключать из общего массива, если необходимо выделить роль тектонических явлений.

Интересное подтверждение найденных автором длительных биоритмов ЛА рыб, в частности $3,5 \div 4$ ч для магнитоспокойных дней, было опубликовано в работах [Вестник медицины. 1995; Дубовой, 2001]. Авторы показали влияние слабых переменных МП (8 Гц, 30 мкТл) на изменение концентрации лейкоцитов в крови, величины скорости липидного и тиол-дисульфидного обмена, а также процессов перекисного окисления липидов в головном мозге, печени и сердце белых беспородных мышей в лабораторных условиях.

В заключение хотелось бы отметить, что в результате анализа видеоматериалов и собственных наблюдений можно сделать вывод о том, что слабые электромагнитные поля оказывают угнетающее действие на рыб. Было обнаружено, что при включении генератора (индукция поля в пределах $200 \div 1000$ нТл, частота в пределах $1 \div 10$ Гц) рыбы стремятся покинуть область действия ЭМП, реагируя постепенно в течение $10 \div 25$ с, иногда это отмечается как групповая реакция, чаще как индивидуальное поведение. Визуальные оценки показывают, что рыбы довольно быстро адаптируются к слабым воздействиям и уже в течение первых $10 \div 20$ с возвращаются в область поля зрения видеокамеры. Однако это не означает, что их физиологическое состояние не оказывается угнетенным. Инструментальные данные по электрокинетическим флуктуациям

свидетельствуют о том, что электрическая активность рыб не восстанавливается так быстро, и мы сохраняем точку зрения, что сроки адаптации значительно больше. Необходимы дальнейшие углубленные исследования.

3.3. ДЕТЕРМИНИРУЮЩАЯ РОЛЬ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ И РАЗВИТИИ НОВЫХ БИОТЕХНОЛОГИЙ

3.3.1. Регуляция физиологических функций животных и человека

3.3.2. Электромагнитное излучение в проблемах медицины

3.3.3. Адаптивные изменения в организме при действии электромагнитного излучения

3.3.1. Регуляция физиологических функций животных и человека

Для фокусирования проблемы необходимо ограничить объем рассматриваемого материала именно в области направленного действия ЭМИ в экологической физиологии. Тем не менее здесь переплетаются вопросы и магнитобиологии, и биоэлектромагнитной совместимости организмов со средой, и, наконец, вопросы нормирования направленной регуляции в медицине.

Регуляция, или регулирование (от латинск. *регуло* — устраиваю, привожу в порядок) в данном контексте приблизительно соответствует кибернетическому термину “управление”. Управляющаяся система, согласно кибернетическим законам, всегда бывает сложнее, т.е. состоит из большего числа элементов, имеет большее число связей, чем управляемые совокупности. Упрощение многих природных процессов и систем при вмешательстве человека может разрушить управляемую систему или достаточно разнонаправленно подействовать на нее, в результате чего ожидаемые положительные эффекты будут сопровождаться побочными отрицательными. В качестве одного из новых видов регулятора физиологических функций (стимуляторов или ингибиторов) роста, размножения и других процессов выступают магнитные и электромагнитные поля различных частот, напряженности, длительности действия, вызывающие определенные сдвиги в обмене веществ, в скорости химических реакций, гормональные изменения и т.д. Необходимо помнить о двойственности воздействия и не допустить отрицательных эффектов.

В этих условиях возникла и четко обозначилась проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств и биологических объектов. Термин “электромагнитная совместимость” перешел в научную общественную лексику от английского “*electromagnetic compatibility*” (EMC), что не вполне отвечает вкладываемому в него смыслу, расширенному особенно в течение последнего десятилетия.

В проблеме ЭМС, или EMC, первая часть сопряжена с учетом и рентабельностью функционирования технических средств, и этот вопрос тщательно изучается многие годы и не подлежит в монографии детальному рассмотрению. Другая часть — именно электромагнитная совместимость в биосфере (или **БиоЭМС**) — должна находиться под нашим пристальным вниманием как специалистов по экологической защите окружающей среды от опасных воздействий. Применительно к биосфере Земли главный вопрос сводится к следующему: совместима ли нормальная деятельность организма с электромагнитной средой в занимаемом им геометрическом пространстве? Если не совместима, то каковы отклонения в органах и тканях, каков механизм этих отклонений? [Суббота, 1996].

По мнению В.О. Самойлова [Самойлов, 1996], БиоЭМС занимает область на пересечении проблем ЭМС и электромагнитобиологии, границу между БиоЭМС и электромагнитобиологией провести трудно. Критерий для определения границы заложен, скорее всего, в самом определении ЭМС.

Электромагнитная совместимость — это способность систем функционировать в заданной среде так, чтобы не вызывать нарушения функций других систем вследствие недопустимого электромагнитного воздействия на среду. Из этого определения следует, что БиоЭМС подразумевает взаимодействие биологического объекта и его электромагнитной среды, которое позволяет нормально (стабильно и долго) функционировать организму (биообъекту) и техническим устройствам или природным источникам ЭМИ.

Состояние БиоЭМС характеризуется: 1) параметрами ЭМП, существующими в системе биообъект—технический агрегат, 2) временем, в течение которого это состояние может поддерживаться в отношении конкретных приборов и биообъектов, 3) показателями их жизнеспособности и функционирования, которые находятся в пределах физиологической нормы и 4) допустимыми значениями характеристик электрооборудования и аппаратуры. В проблеме БиоЭМС целесообразно обратить внимание на три варианта взаимодействия ЭМП [Самойлов, 1996]:

влияние техногенных ЭМП на биосферу;

влияние биогенных ЭМП на техносферу;
влияние биогенных ЭМП на биосферу.

По затронутой проблеме за последние 20 лет получен исключительно большой объем различной информации, обзор которой не может составлять предмет нашего исследования. Нам придется остановиться лишь на некоторых сведениях, которые должны нацелить будущих специалистов на конкретные вопросы БиоЭМС.

Экранирование и компенсация геомагнитного поля

Ранее мы рассмотрели вопросы экологической уязвимости и адаптации живых организмов к действиям ЭМ факторов в условиях открытой системы, независимой от экспериментатора.

Доказательства зависимости от ЭМП КНЧ- и УНЧ-диапазонов были достоверными, причем активное воздействие на биообъекты проводилось при напряженности H , близкой к значениям фонового ЭМПЗ.

Реально ли ожидать каких-то изменений в биосистемах, если их экранировать от внешних фоновых ЭМП? Рассмотрим ряд примеров из многочисленных публикаций по этой проблеме.

Здесь необходимо сразу отметить разницу в методике экспериментов:

- экранирование биообъекта от внешних ЭМП;
- помещение биообъекта в гипмагнитную среду.

В первом случае в экранированном объеме отсутствуют ЭМП определенного значения частот, но все другие экологически значимые факторы присутствуют (ионизирующая радиация, статические магнитные и электрические поля — условное дипольное ЭМПЗ, концентрация аэроионов, акустические шумы и др.); подопытный объект, таким образом, оказывается лишенным лишь влияния ЭМП какого-то частотного диапазона по сравнению с контролем. Однако корректно такие опыты выполнить очень трудно (берут различные экранирующие материалы, которые обуславливают и различные результаты затухания ЭМП в КНЧ- или УНЧ-диапазонах).

Во втором случае компенсация ГМП, пусть даже на достаточно высоком уровне (95 %), не обеспечивает экранирования от внешних ЭМ колебаний различных частот, и это должно быть учтено в параллельной контрольной установке по регистрации внешнего поля, поскольку вариации ЭМПЗ свободно проникают в камеру, где компенсируется главное дипольное поле Земли.

Тем не менее, результаты исследования роли экранирования или компенсации ГМП в электрофизиологическом регулировании роста и развития живых организмов зафиксированы.

Экранирование:

Показано, что в экранированной камере из латуни в течение 16-часовой экспозиции жизнедеятельность всех видов бактерий угнетается; однако в дни с естественными ЭМ возмущениями (магнитные бури, ионосферные возмущения, солнечные вспышки) интенсивность разномощения в контрольном опыте оказывалась ниже, чем в латунном экране; ЭМ возмущения приводили к подавлению жизнедеятельности бактерий в контроле в большей степени, чем в латунном боксе; отмечали, что в магнитостатическом трехслойном пермалоевом экране бактерии размножаются быстрее, чем в контроле, а ведь в латунном размножение подавлялось. Эти результаты типичны для опытов с бактериями, но ЭМ экранирование при различных коэффициентах затухания поля может дать результаты с изменениями разного знака [Темурьянц, Владимирский, Тишкин, 1992].

Экранирование обычно приводит к ухудшению показателей жизнедеятельности **клеток** (высокоэффективный магнитостатический многослойный экран). В.П. Казначеев и Л.П. Михайлова (1985 г.) показали, что биоэффект существенно зависит от типа клеток, наиболее чувствительна к экранированию оказалась культура *фибробластов** эмбриона человека, наименее уязвимы клетки **Нер-2** карциномы гортани; экран также нарушает ритмику клеточного деления.

Экранирование **физико-химических** сред (тест Пиккарди) приводит к увеличению скорости реакций почти в 2 раза, т.е. фоновые ЭМП (как естественные, так и промышленные) тормозят осаждение реагента (оксихлорида висмута); показано, что экранирование увеличивает время свертывания человеческой крови, уменьшает скорость оседания эритроцитов (унитиоловый тест Соколовского).

Экранирование ЭМПЗ (точнее — постоянной компоненты главного дипольного момента ГМП) в $10^5 \div 10^6$ раз приводило преимущественно к торможению прорастания **семян растений** и к последующему росту рассады культур гороха, чечевицы и льна, к дальнейшему снижению пролиферативной** активности клеток корней этих растений и влияло на хронологию клеточного цикла на $68 \div 75$ % по

*Фибробласты — клеточная форма соединительной ткани животных организмов, синтезируют и секретируют основные компоненты межклеточного вещества соединительной ткани; участвуют в закрытии ран, развитии рубцовых тканей [Биологический энциклопедический словарь (БЭС). 1989. С. 670].

**Пролiferация растений — это прорастание цветка или плода с образованием вегетативного побега или нового цветка над ними [БЭС. 1989. С. 511].

сравнению с контролем ($90 \div 96 \%$) [Белявская, Фомичева, Говорун, Данилов, 1992]. Эти же авторы показали, что в таких условиях у этих растений обнаружено снижение функциональной активности генома во всех исследованных РНК* и белках.

Экранирование ЭМПЗ (постоянная главного дипольного момента ГМП) примерно в 10^5 раз приводило к снижению плодовитости *насекомых* (дрозофилы), к снижению длительности их жизни; у группы, содержащейся длительное время в экранированной камере во 2-м и 3-м поколениях наблюдался сдвиг в соотношении полов в сторону преобладания мужских особей. В опытных боксах насекомые избирают направление север—юг и запад—восток. Заметно, что в условиях скомпенсированного ГМП до 5 % его естественной величины ориентация мух относительно напряженности H_x отсутствовала [Воронин, Подвигни, Куликов // Информационные взаимодействия в биологии, 1990].

С другой стороны, экранирование лишь в 10 раз приводило к ускорению развития мух к 9-му $\div$ 10-му поколению, и достоверно отмечено увеличение их смертности по сравнению с контролем [Афоница, 1973].

Экранирование **высокоорганизованных биообъектов** (млекопитающих) приводит к развитию разнообразных и глубоких функциональных нарушений; например, в опытах Н. Гальперна и Х. Ван-Дейка (1966 г.) было показано, что в результате экранирования белых мышей в течение нескольких месяцев у молодых особей наблюдались пониженная активность и аномалия поведения, чаще развиваются опухоли, патология печени, почек, половых желез и в результате отмечается повышенная смертность.

В опытах В.И. Копанева и А.В. Шакулы (1985 г.) над крольчатами в экранированных условиях выявлено увеличение смертности, нарушение роста, дистрофия печени и миокарда, дисфункции эндокринной системы, нарушения синтеза белка и т.д.

В опытах В.П. Казначеева и Л.П. Михайловой (1985 г.), наблюдавших за развитием куриных эмбрионов в магнитостатических экранах при обеспечении термостатирования, постоянства влажности и почасового вращения яиц, обнаружены аномалии развития: у $25 \div 60 \%$ вылупившихся цыплят наблюдался выраженный парез крыльев и ног.

*РНК — рибонуклеиновая кислота, обязательный компонент всех живых клеток, участвует в реализации генетической информации. Геном содержит от 50 до 10^3 идентичных копий генов, кодирующих РНК (клетки рибосомального класса) [БЭС. 1989. С. 541].

Известно, что при продолжительном пребывании человека в автомобиле или самолете наблюдаются чувство вялости, сонливости, потеря аппетита и работоспособности. Выяснили, что металлическая обшивка кабин — экран от окружающего ЭМП. Если искусственно увеличить напряженность поля до нормального уровня ($500 \div 800$ В/м), то подвижность, тонус, работоспособность значительно возрастают.

Таким образом, ЭМ экранирование, несомненно, влияет на высокоорганизованные биообъекты, но опыты не всегда однозначны и воспроизводимы, что связано с методическими трудностями при исключении той или иной частотной полосы излучения из общего уровня фоновой ЭМ поля. Для нормального развития эмбриона или сформировавшегося организма необходим, видимо, некоторый оптимальный уровень напряженности ЭМП, отклонение от которого увеличивает риск возникновения аномалий развития.

В проблеме экранирования следует рассматривать новые методы защиты людей от ЭМИ, в частности создание лечебных помещений в стационарах и поликлиниках (см. разд. 3.3.2).

Гипомагнитная среда

Еще в 1969 г. на II Всесоюзном совещании по изучению влияния МП на биообъекты отмечалось, что ослабление ГМП в 10^4 раз вызывает реакции растений и микробов, очень похожие на реакции... как при действии сильных полей, т.е. при гипомагнитной среде на уровне всего 5 нТл вместо 50000 нТл в нормальных условиях. Это уровень обычных флуктуаций ГМП.

Следует подчеркнуть, что многие экспериментаторы нечетко проводят грань между понятиями “экранирование от внешнего ЭМП” и “действие гипомагнитной среды”. Отсюда опыты, проведенные в экранированных камерах, где казалось бы, внешнее поле бывало ослабленным на несколько порядков от реального, давали совершенно иные результаты, чем в условиях компенсации главного дипольного ГМП в кольцах Гельмгольца (где присутствует флуктуирующая часть ЭМПЗ, обусловленная действием индукции в системе магнитосфера—ионосфера—теллурическое поле).

В ГМП, скомпенсированном за счет колец Гельмгольца до $10^3 \div 10^5$ Э (т.е. $\sim 5 \cdot 10^2 \div 1 \cdot 10$ нТл), выявили высокую магниточувствительность микробов. Например, после четырехнедельного выращивания микробов в условиях компенсации ГМП в их культуре содержалось большое количество гигантских бескапсульных клеток и выявлено формирование мелких сухих колоний; отмечено

нарушение обмена веществ и видовых признаков и свойств; однако на $18 \div 34$ пассажах выявлено, что наследственной изменчивости не наблюдается и реорганизации генома бактерий нет. На геном влиял лишь результат действия на 56-й пассаж.

Тем не менее однозначных результатов в исследованиях по бактериям не получено, так как методы экспериментов бывали несопоставимы.

Собственные опыты автора по изучению двигательной активности рыб в скомпенсированном до 95 % ГМП показали, что рыбы довольно быстро адаптируются к таким условиям, и визуально отличить поведение от контроля не удастся. Однако через $1 \div 1,5$ месяца содержания подопытные молодые особи погибли, а в контроле остались живы (рис. 3.19).

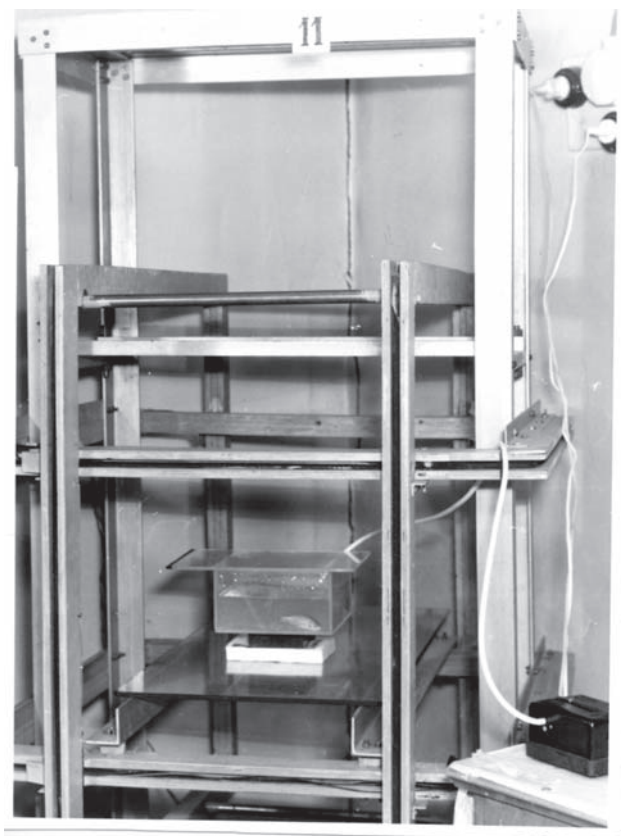


Рис. 3.19. Особь вида *Carpio* в гипомангнитной среде в кольцах Гельмгольца

Среда, насыщенная флуктуирующим магнитным полем низкой частоты

Воздействие переменным магнитным полем $f = 8$ Гц индукцией $B \sim 5$ мкТл изменяет инфранидную ритмику физиологических показателей, проявляющуюся в сдвигах интегральных ритмов, а также в амплитудно-фазовых отклонениях и в развитии десинхроноза. Физиологические системы при таком воздействии могут перестраивать свою хроноорганизацию [Темурьянц, Шехоткин, Камышина // Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 783–788].

Комбинированное действие постоянного магнитного поля ($B_0 \sim 40 \pm 0,1$ мкТл) и слабого переменного магнитного поля $B_1 \sim 40$ нТл и $f = 3,5 \div 5$ Гц, настроенных на циклотронные частоты ионов аминокислот, оказывает значимое онкотоксическое действие на сформировавшуюся у мышей карциному (опухоль Эрлиха). При этом степень выраженности онкотоксического эффекта не менее, чем у известных химиопрепаратов [Новикова, Новиков, Кураковская // Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 772–775].

Сверхнизкочастотное магнитное поле $0,001 \div 100$ Гц с амплитудой $1 \div 400$ мкТл вызывает нелинейный характер ответа изолированного механорецепторного нейрона речного рака, обнаруживая так называемые амплитудно-частотные “окна” в сплошном спектре: 0,001; 0,3; 3 и 60 Гц и 5; 20; 50 и 300 мкТл [Узденский, Кутько // Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 797–802].

Многократное применение слабого переменного МП СНЧ-диапазона в течение длительного времени (8 Гц, 20 мкТл; 16, 20 и 24 сут) приводит к обратимым морфофункциональным изменениям в системе красной крови мышей, что выражалось в значительном уменьшении количества эритроцитов в циркулирующей крови, цитопении* элементов красной крови костного мозга и в увеличении объема депо крови (печени и селезенки). Эти изменения свидетельствуют о развитии умеренной обратимой анемии и возможной минимизации газотранспортной функции крови [Сташков, Горохов // Биофизика. 1998. Т. 44, вып. 1. С. 141–144].

Возможно управление эмоциями животных с помощью электромагнитного излучения: сначала лабораторных крыс облучали ЭМП (915 МГц), а затем модулировали эту высокую частоту полем с $f = 4, 6, 16$ и 20 Гц и обнаружили либо повышение, либо понижение уровня тревожности животных по сравнению с контролем; так, модуляция 20 Гц усиливает тревогу и страх в 2 раза, но в

*Цитопения — уменьшение количества клеток крови.

2 раза снижает уровень их исследовательской деятельности; модуляция 4 и 6 Гц достоверно уменьшает тревогу и страх и увеличивает их исследовательскую активность [Химия и жизнь. 2001. № 5. С. 6].

Таким образом, и квазистационарные и слабофлуктуирующие магнитные и электромагнитные поля в низкочастотном диапазоне колебаний влияют на живой организм. Но каков механизм этого влияния? Вопрос остается еще открытым, но предпосылки к объяснению уже появляются. Так, В.М. Сидоренко [Биофизика. 2001. Т. 46, вып. 3. С. 500–504] полагает, что в биологическом объекте при действии слабых ЭМП в низкочастотной области спектра на клеточном и субклеточном уровнях может происходить усиление напряженности электрической компоненты внешнего ЭМП. Величина усиления определяется соотношением вкладов в суммарный эффект объемной поляризации среды и деполяризующего фактора, зависящего от формы тела. Результатом этого усиления может являться формирование под действием слабых ЭМП на мембранах нервных клеток потенциала, сравнимого с биологически действующими значениями, что должно приводить к ответным нейрофизиологическим реакциям организма. О биологических эффектах опосредованного действия НЧ переменного МП на модельные биосистемы см. в публикации: Лахтлаан-Тыннисон Н.П., Цыганков А.И. и др. [Литература во введении, п.7, том. IV. 2006, с. 58]. Об использовании нового биофизического метода доставки лекарственных средств в клетки-мишени и органы человека с помощью “магнитоуправляемых наночастиц” [В.С. Улащик. О новых направлениях использования лечебных физических факторов. Физиотерапевт, № 10, 2009, с. 59–69].

3.3.2. Электромагнитное излучение в проблемах медицины

Теоретические основы использования различных видов электромагнитного излучения в медицинской практике целесообразно изыскивать в специализированных публикациях и изданиях, и мы не в состоянии выполнить даже беглый обзор соответствующей литературы в настоящем издании. Поэтому в данном разделе акцентируется внимание на некоторых аспектах реального воздействия ЭМИ при устранении патологии различных органов и систем человека.

Постоянное и переменное магнитное поле используют при лечении канцерогенных поражений организма, лучевой болезни, гипертонии, язвенных болезней, периферического кровообращения, опорно-двигательного аппарата и т.д.

Современные лечебные аппараты и методы их применения:

Маг-30-3 (МАГ) — лечение остеохондрозов, переломов, ушибов, заболеваний суставов, гинекологических заболеваний.

АЛМАГ-01 — лечение заболеваний, при которых показан аппарат МАГ, а также заболеваний дыхательной системы, желудочно-кишечного тракта и т.д. Обладает более высоким терапевтическим эффектом по сравнению с устройствами лечения переменным магнитным полем за счет большей биологической активности. **МП** прибора глубже проникает в тело пациента и охватывает большую площадь воздействия.

Аппарат **АЛИМП-1** воздействует переменным импульсным “бегущим” магнитным полем.

Аппарат **АМПЛИПУЛЬС-5** предназначен для лечебного воздействия на организм человека модулированными синусоидальными токами звуковой частоты.

Аппарат **ВОЛНА-2М** предназначен для дозированного излучения электромагнитной энергии, воздействующей на пациента (дециметровая лучевая терапия).

Аппарат **ИКВ-4** предназначен для прогревания с помощью электромагнитного поля (индуктотермия).

Аппарат **ДТ-50-3 “Тонус-1”** предназначен для терапии различных нервно-мышечных заболеваний и болевых состояний со спазмами мышц (лечение диадинамическими токами).

Аппарат **СМВ-20-4 Луч-4** воздействует электромагнитным полем частотой 2,45 ГГц.

Магнито- и лазеротерапия

в офтальмологии:

Аппарат **“Амос”** реализует наиболее эффективную методику воздействия бегущим магнитным полем при глаукоме [см. Вестник офтальмологии. 1996. № 1. С. 6], внутриглазных кровоизлияниях [Офтальмологический журнал. 1991. № 6. С. 271], спазме аккомодации, атрофии зрительного нерва и др.

Приспособление **“Амблио-1”** осуществляет фотостимуляцию специальным набором стимулов (патент России №2044528 от 27.09.95) на фоне бегущего магнитного поля с целью эффективного лечения амблиопии.

Аппарат **“Ласт-1”** для лазеростимуляции и терапии красным свечением лазера на фоне бегущего поля или после магнитотерапии для закрепления противовоспалительного и рассасывающего лечения.

в урологии:

Аппарат **“Интрамаг”** реализует методику местной лекарственной терапии за счет магнитоэлектрофореза при эндоуретральном и ректальном воздействии (результаты лечения см. в журн. “Вестник дерматовенерологии”. 1994. № 3.).

Приставка “Интра term” позволяет прогреть слизистую уретры и железу от 39 до 45 °С. Дополняет антибактериальную терапию аппарата “Интрамаг” при хламидийной, трихомонадной и другой инфекции.

Аппарат “Ласт-2” предназначен для лезеротерапии красным свечением, распределенным по длине уретры, обеспечивает рассасывающую, противовоспалительную терапию после проведения антибактериальной.

в общей терапии:

Аппарат “Аксон-02” предназначен для воздействия малыми токами на биологически активные участки кожи с одновременной оценкой их состояния. Уникальность аппарата в том, что он сам находит “активную точку” и сам определяет длительность воздействия на нее. Пользователю остается лишь следить за индикаторами и переставлять электрод с точки на точку. Для сеанса достаточно обработать 5 ÷ 7 точек. “Аксон” способен обнаружить “отклонения” в организме, с его помощью можно лечить различные заболевания.

Аппарат ЭМС-30-3 СТИМУЛ-У для электростимуляции мышц.

Аппарат ДМВ-20 “РАНЕТ” предназначен для лечения различных заболеваний воспалительного, травматического и другого характера путем воздействия дециметровым электромагнитным полем по контактной методике.

Аппарат ИСКРА-1 для местной дарсонвализации, действующей высокочастотным импульсным полем, высоковольтными искровыми разрядами.

Аппарат “Алаит-1” локальной аэроионотерапии предназначен для воздействия в лечебных целях потоком отрицательно заряженных аэроионов высокой удельной плотности.

Аппарат АМЛТ-01 магнитно-лазерной терапии предназначен для физиотерапевтического воздействия лазерным излучением в сочетании с постоянным магнитным полем для лечения ран, воспалительных процессов.

Аппарат магнитотерапии “Магнитеp” предназначен для воздействия в лечебных целях низкочастотным магнитным полем.

Аппарат ПОЛЮС-101 предназначен для лечебного воздействия на конечности больного магнитным полем повышенной частоты.

Аппарат ПОЛЮС-2 предназначен для лечебного воздействия на конечности больного низкочастотным магнитным полем.

Аппарат СМВ-15 01-ЛУЧ-11 предназначен для воздействия сверхвысокочастотным электромагнитным полем при лечении центральной и периферической нервных систем, воспалительных заболеваний.

Аппарат УВЧ-30 предназначен для местного лечебного воздействия электрическим или магнитным полем ультравысокой частоты.

Используется в терапии, неврологии, хирургии, психиатрии, гинекологии и педиатрии.

Аппарат УВЧ-70-01 предназначен для местного лечебного воздействия электрическим или магнитным полем ультравысокой частоты. Используется в терапии, неврологии, хирургии, психиатрии, гинекологии и педиатрии.

Аппарат УВЧ-80 предназначен для местного лечебного воздействия электрическим или магнитным полем ультравысокой частоты.

Аппарат ЭЛЕКТРОСОН ЭС-10-5 предназначен для дозированного воздействия на кору головного мозга импульсным током прямоугольной формы. Применяется при лечении нервно-психических заболеваний, в педиатрии, в терапии, в хирургической практике, в дерматологии.

Витязь (Рикта-01) аппарат квантовой терапии (магнитное и инфракрасное излучение) предназначен для безлекарственного безболезненного неинвазивного экологически чистого лечения широкого спектра заболеваний.

Гальванизатор ПОТОК-1 предназначен для воздействия постоянным током на организм человека с лечебными и профилактическими целями и для проведения лекарственного электрофореза.

Физиотерапевтический аппарат “Элфор” — портативный энергонезависимый аппарат для электрофореза и гальванотерапии в полной мере заменяет классические аппараты для лекарственного электрофореза, используемые в физиотерапевтических кабинетах. При работе с *Элфор* применяют любые стандартные физиотерапевтические электроды для электрофореза и гальванизации.

Рекомендован к применению при заболеваниях: сердечно-сосудистой системы, органов дыхания, органов пищеварения, опорно-двигательного аппарата, а также для лечения: периферической нервной системы, мочеполовой системы, уха, горла, носа.

Источником питания в приборе является батарея типа “Крона” или заряжаемый аккумулятор. Автономное питание гарантирует пациенту полную электробезопасность и позволяет проводить процедуры в помещениях без защитного заземления. Используя *Элфор*, можно начинать процедуру с минимальных значений тока и плавно увеличивать его до 20 мА, он прост в использовании, снабжен подробной инструкцией и сопровождается серией брошюр “Лекарственный электрофорез”, а также имеет разрешение Минздрава России для использования в лечебной практике.

• *Аппликатор кристаллический электромагнитный КРИТОН* — миниатюрное рефлексотерапевтическое устройство, предназначено для лечения целого ряда заболеваний сердечно-сосудистой и нервной систем, заболеваний опорно-двигательного аппарата.

Основные действующие факторы — постоянное магнитное поле и импульсный микроток (слабые электрические импульсы).

Показания к применению:

1) остеохондроз, радикулит, невралгия, боли в суставах (артриты, полиартриты, артрозы, бурситы), ушибы, переломы, послеоперационные швы;

2) ишемическая болезнь сердца, реабилитация после инфаркта, гипертоническая болезнь I и II стадии, головная боль, заболевания уха, горла, носа;

3) нарушения деятельности желудочно-кишечного тракта, аденома предстательной железы, бронхиальная астма.

Разработан и выпускается с использованием новейших технологий. Аппарат **КРИТОН** прост и удобен в использовании, им может пользоваться вся семья в течение нескольких лет.

Аппликатор кристаллический электромагнитный **КРИТОН-К** предназначен для лечения гипертонии I и II стадий методом электромагнитной рефлексотерапии. Прибор является специализированной модификацией кристаллического электромагнитного аппликатора **КРИТОН**. Основное назначение аппликатора — снижение артериального давления, сокращение потребления лекарственных препаратов, применяемых для лечения гипертонии. Основные действующие факторы — постоянное магнитное поле и импульсный микроток.

Прибор может применяться в любых условиях и рассчитан на длительную работу.

Показания к применению: гипертоническая болезнь I и II стадии; головные боли; головокружение; шум в голове; нарушение сна.

Аппликатор игольчатый магнитный “**МАГНИТНЫЙ ЕЖ**” — устройство для безлекарственного лечения и профилактики остеохондроза, радикулита, гастрита и многих других заболеваний. В отличие от существующих аппликаторов лечебные качества “Магнитного ежа” более эффективны за счет использования металлических игл П-образной конструкции и лечебного эластичного магнита. Расстояние между иглами подобрано таким образом, что лечебная процедура становится практически безболезненной.

В аппликаторе соединены два известных лечебных метода: рефлекс- и магнитотерапия.

Показания к применению: остеохондроз, радикулит, неврозы, боли в мышцах, суставах, позвоночнике, нарушения деятельности желудочно-кишечного тракта, бронхит, бронхиальная астма. Терапевтический магнитолазерный аппарат **АЗОР-2К-02** предназначен для усиления микроциркуляции крови и лимфы в несколько раз в ауторезонансном режиме и применяется в хирургии, урологии, дерматологии, ожоговой терапии, кардиологии, гинекологии,

неврологии, физиотерапии и др. (Производ. ООО “АЗОР” 125480, М. а/я 54). [Источники информации официальные издания МЗ России — научные журналы, “медицинская газета”, инструкции по применению аппаратуры]. Однако автор не склонен к рекламированию приборов и лишь информирует читателя!

Методы защиты пациентов с ишемической болезнью сердца от воздействия геомагнитных возмущений

Во многих клинических наблюдениях отмечалось существенное влияние гелиогеофизических явлений на течение ишемической болезни сердца, на нарушения мозгового кровообращения и ряд сосудистых проявлений у пациентов, находящихся на реабилитации. Инфаркты миокарда (**ИМ**), возникающие в дни геомагнитных возмущений, отличаются более тяжелым течением, чаще сопровождаются осложнениями и повышенной летальностью, а количество скоропостижно умерших от инфаркта миокарда увеличивается до 1,5 раза в дни, когда магнитное поле Земли возмущено. Было также обнаружено, что максимальное количество скоропостижных смертей от инфаркта миокарда в среднем за все годы приходится на вторые сутки после геомагнитных возмущений. Все это делает актуальной задачу поиска эффективной защиты пациентов с ишемической болезнью сердца во время геомагнитных возмущений. Впервые идея создания экранированной палаты была высказана А.Л. Чижевским: “Такая палата должна быть со всех шести сторон покрыта слоем металла соответствующей толщины и соответствующей непроницаемости. Вход и выход из нее должны обеспечить непроникновение вредных радиаций внутрь, что легко достигается хорошо бронированной передней с двумя дверями... Обыкновенная вентиляция заменяется подачей кондиционированного воздуха с зоной максимального комфорта... Больница, имеющая подобные палаты, должна быть связана с астрономической обсерваторией” [Чижевский, 1976. С. 323–329].

В работе Ю.И. Гурфинкеля и В.В. Любимова [Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 827–832] описывается такая палата, созданная в 1991 г. на базе Отделения интенсивной терапии и реанимации Центральной клинической больницы № 3 МПС (Москва). Применение двухслойных экранов позволило ослабить естественное магнитное поле Земли внутри палаты примерно в 4,5–5 раз. На примере группы пациентов, страдающих ишемической болезнью сердца (под наблюдением находилось 27 больных: 19 мужчин и 8 женщин в возрасте от 47 до 73 лет), показана эффективность их защиты от воздействия геомагнитных возмущений. Использование экранированной палаты

в качестве укрытия на время геомагнитных возмущений сказывается положительно на самочувствии пациентов, уменьшает или прекращает приступы стенокардии, способствует нормализации артериального давления и частоты сердечных сокращений, а также показателей микроциркуляции.

Рассмотрим основные конструктивные особенности и вопросы технологии построения экранированной палаты.

На рис. 3.20 дан план экранированной палаты (ЭП), для которой была выбрана комната, максимально удаленная от лифтовых шахт и источников техногенных и импульсных электромагнитных помех.

Палата состоит из двух основных отделений: изолированной камеры (ИК) и вспомогательной комнаты — тамбурного туннеля (ТТ), ограниченного двумя входными дверями. План конструкции ЭП (вид сверху) имеет прямоугольную форму (с размерами стен и потолка $2,9 \times 2,5 \times 2,7$ м). В ЭП установлены деревянная кровать для пациента, расположенная у северной стены и ориентированная в направлении запад—восток; две тумбочки, на которых есть телефон для связи с персоналом отделения и с выходом в город; кнопка экстренного вызова персонала и переговорное устройство, а также устройство для мониторингирования электрокардиограммы *Cardiorespiromonitor RMN-201*, сигнал с которого поступает на центральный пост. В помещении вспомогательной комнаты расположены

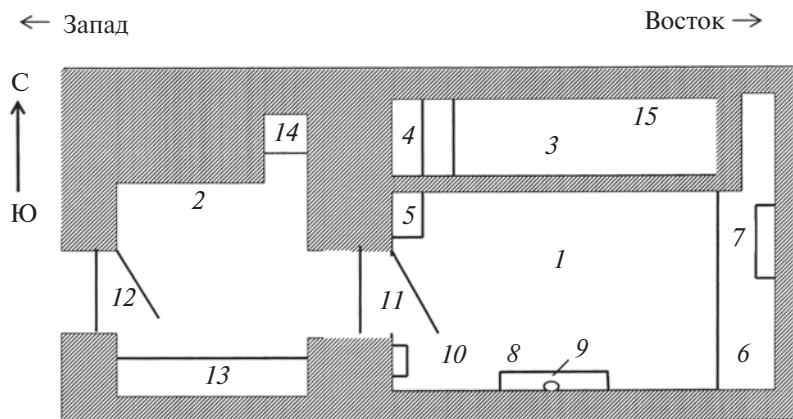


Рис. 3.20. План экранированной палаты:

1 — ИК; 2 — ТТ; 3 — кровать для пациента; 4 и 5 — тумбочки; 6 — шкафы и полки; 7 — светильник; 8 — складной стол; 9 — электророзетка; 10 — воздуховод; 11 и 12 — двери; 13 — полки; 14 — умывальник; 15 — ориентация кровати на чертеже в направлении запад—восток (меридиональное)

сантехническое керамическое оборудование (водопровод) и деревянные полки для установки оборудования. Размеры внутренних стен и потолка ТТ: 1,4×1,7×2,7 м. Обе комнаты независимо экранированы прямоугольными двухслойными железными экранами толщиной 1 мм с двусторонним покрытием цинком.

Для уменьшения физических неоднородностей при сборке экрана из листов была применена методика неразъемных соединений при помощи обжимаемого шва, который не требует сварки или пайки, но перед его обжатием необходимо хорошо зачищать поверхности соединяемых деталей.

Существенное влияние на экранирующие свойства ЭП оказывают наличие и конструкция двери. Это довольно большой по размеру проем стандартных размеров (как у жилого помещения) в стене. Наличие двери, как правило, в десятки раз уменьшает коэффициент экранировки от максимально возможного. Для устранения этого эффекта в конструкции применен ТТ с двумя дверями, которые плотно прилегают своими ферромагнитными слоями с уплотнителями к соответствующим слоям дверной рамы и стенки. Это достигается при помощи механических прижимных устройств. Магнитный экран был установлен на бетонный пол через деревянные и пенопластовые прокладки. Внутри ЭП был сделан деревянный фальш-пол оригинальной конструкции, на который были постелены линолеум и ковровое покрытие.

Для исключения проникновения электрических наводок на коммуникационные электрические, осветительные и информационные линии в конструкции ЭП используется двухступенчатая система электрической защиты, выполненная на основе радиочастотных проходных фильтров типа ФП-10, позволяющих получить затухание порядка 80 ÷ 100 дБ. Экранные оболочки кабелей и внешний экран ЭП подсоединены к специально сделанному контуру заземления. Для подключения специального оборудования и проведения исследований внутри ЭП установлены электрические розетки; линии связи мониторингового оборудования через специальные проходные фильтры подключены к центральному пульту и к компьютеру.

Были проведены магнитометрические исследования по определению пространственного градиента постоянного магнитного поля и областей его неоднородности внутри ЭП, в месте расположения пациента. Для проведения работ использовался феррозондовый диагностический магнитометр типа *MAGIC МФ-ОЗ-М*. Анализ построенных магнитных карт и моделей распределения аномального магнитного поля внутри ЭП показал, что оно является достаточно неоднородным и реальная его структура далека от идеальной при общем ослаблении составляющих естественного

магнитного поля Земли в $4,5 \div 5$ раз по сравнению с внешним полем. Ослабление вариаций и естественного магнитного поля Земли в помещении ТТ в $1,5 \div 2$ раза меньше, чем в ИК.

Прогноз о вероятном геомагнитном возмущении поступал из ИЗМИР РАН, однако непосредственным сигналом для помещения пациента в ЭП служили показания диагностического магнитометра, находящегося в отделении.

Исследования проводили в три этапа. На первом этапе определяли чувствительность пациента к геомагнитным возмущениям. Для этого обследуемым предлагалось вести ежедневный дневник, куда вписывались субъективная оценка по пятибалльной шкале физического, эмоционального и интеллектуального состояния, наличие расстройств сна и приступов стенокардии по трехбалльной шкале. Пульс, артериальное давление измеряли три раза в день: утром перед завтраком, днем перед обедом и вечером перед сном. Данные наблюдения сопоставляли с индексами геомагнитной активности.

В ЭП пациенты находились от 1 до 4 суток в зависимости от длительности геомагнитного возмущения. Среднее время пребывания в ЭП для пациентов с ИМ составило 2,2 суток, для пациентов со стенокардией — 2,6 суток.

В процессе наблюдения у двух пациентов в первые часы после помещения в ЭП отмечено появление психологического дискомфорта, боязнь замкнутого пространства, в связи с чем они были переведены в обычную палату отделения интенсивной терапии и из дальнейших исследований исключены.

Оценка субъективных данных. *Расстройства сна* в дни геомагнитных возмущений: бессонница, немотивированное пробуждение среди ночи, поверхностный сон. Один из этих признаков или сочетание их было отмечено у 23 пациентов — 85,2 %. Более выраженные расстройства сна отмечены в группе пациентов с ИМ. На вторые сутки пребывания в ЭП на расстройства сна жаловалась лишь одна пациентка — 3,7 %.

Приступы стенокардии: ощущение сердечного дискомфорта, потребность в дополнительном приеме антиангинальных средств в дни геомагнитных возмущений отмечены также у 85,2 % пациентов и были более выражены в группе больных со стенокардией. К исходу первых суток пребывания в ЭП в дни повышенной геомагнитной активности этот же индекс составлял 3,9. К концу первых суток пребывания в экранированной палате жалобы на ощущение сердечного дискомфорта и приступы стенокардии, потребовавшие приема антиангинальных средств, отмечены у двух пациентов (5,8 %).

На вторые сутки пребывания в ЭП приступы стенокардии прекратились у всех обследованных пациентов.

При сопоставлении данных *физического, эмоционального и интеллектуального статуса*, оцененных самими исследуемыми, в дни повышенной геомагнитной активности отмечено снижение всех трех показателей. Среднее значение индекса физической активности, оцененной по пятибалльной шкале, составило для всех пациентов 1,9 в дни повышенной геомагнитной активности. Основные жалобы были на головную боль, головокружение, ощущение разбитости, вялость, снижение работоспособности, повышенную утомляемость, сонливость днем. К исходу первых суток пребывания в ЭП в дни повышенной геомагнитной активности этот же индекс составил 3,6.

Результаты исследования частоты сердечных сокращений, артериального давления. Систолическое и диастолическое артериальное давление (АД), а также частота сердечных сокращений (ЧСС) достоверно менялись при переходе геомагнитной обстановки от спокойной к условиям магнитной бури.

На следующий день после начала геомагнитного возмущения у 26 пациентов, имеющих в анамнезе указания на гипертензию, АД повышалось.

Полученные данные позволяют сделать вывод о негативном влиянии геомагнитных возмущений как на субъективные, так и на объективные показатели у больных с ИБС, выражающиеся в ухудшении психофизиологического статуса, в нарушениях в системе микроциркуляции, в увеличении количества нарушений сердечного ритма.

Использование ЭП в качестве укрытия во время геомагнитных возмущений сказывается положительно на самочувствии пациентов, уменьшает или прекращает приступы стенокардии, способствует нормализации артериального давления и частоты сердечных сокращений, а также показателей микроциркуляции. В то же время метод не может быть применен для пациентов, страдающих клаустрофобией*.

Создание ЭП в условиях клиники можно считать первым шагом на пути разработки и усовершенствования методов и аппаратуры для защиты магниточувствительных больных от биотропного влияния окружающих их естественных электромагнитных полей.

Используя в дальнейшем методы активного экранирования, авторы предполагают добиться внутри экранированной палаты большей степени однородности поля, что позволит проводить

*Клаустрофобия, или домофобия (*claustrophobia*) — патологическая боязнь замкнутого пространства.

магнитобиологические эксперименты на более высоком уровне, искусственно создавать и моделировать электромагнитные поля различной частоты и амплитуды, изучать их влияние на живые организмы и человека.

3.3.3. Адаптивные изменения в организме при действии ЭМИ: нейрокибернетика, биологическая обратная связь, крайне высокочастотное излучение в терапевтической практике

Можно ли “силой мысли” двигать предметы? Можно, если ввести в кору головного мозга микроэлектроды и передавать информацию в компьютер, который ее расшифрует и выдаст управляющие сигналы роботу. В настоящее время американские нейрокибернетики работают с обезьянами-дурукули, но их цель вполне конкретна — создать для людей-инвалидов такие протезы конечностей, которыми бы они управляли непосредственно своим мозгом.

Ранее уже были изобретены специальные микроэлектроды, в которые прорастали отростки нейронов, обеспечивая электрическое сопряжение. Теперь разработаны алгоритмы и программы, по которым компьютер в реальном времени обрабатывает данные о частотных характеристиках определенных групп нейронов в течение секунды. По ним он рассчитывает положение искусственной конечности в следующую секунду и так последовательно определяет всю траекторию ее движения. Оказалось, что хорошие результаты дают даже простые линейные модели, когда сигналы от отдельных нейронов суммируют с весовыми коэффициентами, значения которых подстраивают в ходе опытов (подобный метод применяют и в нейрокомпьютерах). Робот уже воспроизводит несложные движения руки подопытной обезьяны, — значит, найдены именно те нейроны, которые руководят этим процессом, и их сигналы правильно расшифрованы.

Этот подход многое проясняет и в работе мозга. Так, уже удалось научить обезьяну (через поощрения и наказания) выполнять нужное движение искусственной руки; при этом ее собственная конечность переставала двигаться. Следовательно, нейромышечные связи достаточно пластичны и *с помощью обратной связи способны перестраиваться*.

Но ведь управляющие сигналы могут идти не только от мозга к компьютеру, но и в обратную сторону (еще в 60-е годы Х. Дельгадо в США вживлял в мозг животных электроды и радиосигналами вызывал у них различные поведенческие реакции). [Первые шаги нейророботов. J. Wessberg et al. // Nature. 2000. Vol. 408. P. 361; Химия и жизнь. 2001. № 3. С. 7].

Следует обратить особое внимание на локализацию воздействия ЭМИ и преимущества использования зон проекции эндокринных желез и регуляторных центров центральной нервной системы (ЦНС). В этих условиях ЭМИ выступает в роли триггера, запускающего естественные процессы гомеостатического регулирования функциональных систем организма. Показано, что курс адаптации к ЭМИ в широком диапазоне частот вплоть до лазерного излучения (инфракрасного и красного) приводит к развитию адаптивных сдвигов со стороны регуляторных систем организма, биоэнергетических и пластических процессов в тканях миокарда, печени, мозга, тимуса, мышц и других, связанных с активацией генетического аппарата, что и обеспечивает мощностные системы адаптации. Эффекты перекрестной адаптации лежат в основе лечебного действия ЭМИ [Зубкова // Биофизика. 1996. Т. 41, вып. 4. С. 906–911].

Но мы знаем, что благодаря гомеостазу (постоянство внутренней среды организма) достигаются автономия организма, его дискретность, автоматическая саморегуляция. Саморегуляция обуславливает динамическое равновесное состояние с колебаниями параметров внешней среды. Таким образом, если воздействия внешней среды выведут внутренние константы организма из нормы, регуляторные механизмы, выработанные организмами в ходе эволюции и естественного отбора, восстановят постоянство внутренней среды. Ведущая роль в этой саморегуляции принадлежит так называемой обратной связи. Теория обратной связи разработана в нашем отечестве академиком П.К. Анохиным.

П.К. Анохин ввел понятие обратной связи (обратная афферентация), т. е. самое главное с точки зрения выживаемости организма — сигнализация центру о результатах выполненного действия в ответ на какой-то внешний или внутренний раздражитель. Это напоминает нам теорию информации, но разница лишь в том, что обратная связь выступает как механизм сугубо приспособительный, возникший на заре развития органической жизни и закрепленный в ходе эволюции.

Методологические основы использования лечебного эффекта биологической обратной связи (БОС)

Принцип метода БОС основан на фундаментальном законе о том, что эффективное функционирование любой биологической системы зависит от возврата информации о работе этой системы.

Это положение справедливо как на молекулярном уровне (например, поступление в кровь инсулина зависит от поступления на клеточные рецепторы информации об уровне глюкозы в крови), так и на макроуровне. Все известные медицине гомеостатические механизмы организма основаны на механизме обратной связи. В конечном счете метод БОС (BIOFEEDBACK) — произвольное волевое управление функциями организма с целью их совершенствования в норме и коррекции при патологии посредством электронных приборов: зарегистрированная информация о состоянии органов и систем человека преобразуется в доступные сознанию зрительные и слуховые системы [Биологическая обратная связь. 2000. № 1]. Здесь очень важно обучить пациента почувствовать то состояние, которое в обычной ситуации не контролируется. В процессе лечения пациент обучается управлять процессами мозга, т.е. функциональными (психоэмоциональными) состояниями своего организма, которые в обычных условиях являются автономными. За рубежом метод интенсивно развит и широко используется, в России же практически применяется лишь в нескольких научных центрах. И в первую очередь это относится к электрофизиологическому методу регистрации электрической активности головного мозга — электроэнцефалограмме (ЭЭГ) в сочетании с БОС. Как становится ясным, метод БОС предусматривает активное участие человека в процессе коррекции своих физиологических функций и двигательных навыков. Сигналы обратной связи помогают человеку увидеть и услышать внутренние, скрытые до этого времени функциональные резервы и создают условия для самостоятельного их использования на основе механизмов саморегуляции для совершенствования нормальных, а также для коррекции нарушенных функций организма. Схематично этот процесс представлен на рис. 3.21.

В качестве примера рассмотрим моделирование процедуры обезболивания с помощью транскутанной электростимуляции, параметры которой контролировались сигналами обратной связи от ритма дыхания пациента. Именно в научной статье показано, что модуляция параметров стимуляции эндогенным ритмом дыхания приводит к существенной активации низкочастотных ($8 \div 10$ Гц) компонентов альфа-ритма электроэнцефалограммы, к появлению релаксационных реакций ЦНС (углублению дыхания, снижению напряжения мышц и выраженности кожно-гальванических реакций), а также к эффективному обезболиванию в сочетании с ростом оценок самочувствия и настроения [Федотов // Биофизика. 1996. Т. 41, вып. 3. С. 718–722].

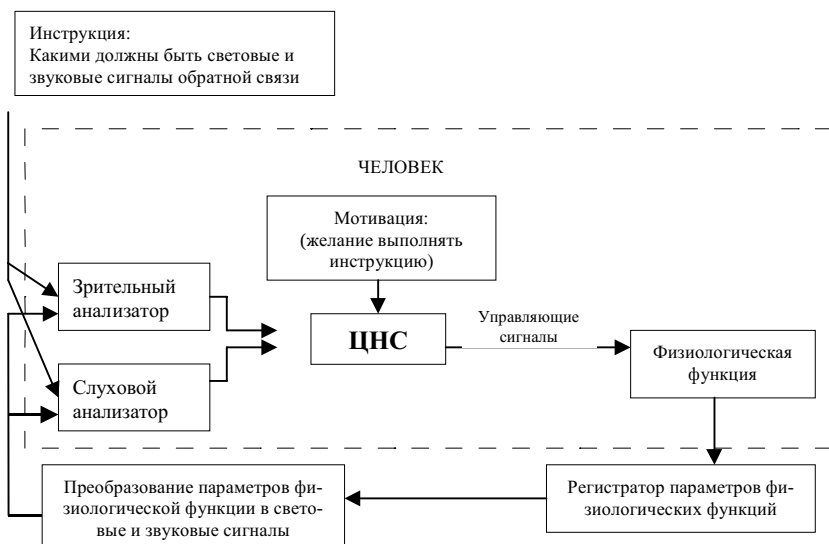


Рис. 3.21. Общая схема коррекции функций организма методом биологической обратной связи

В настоящее время БОС-оборудование крайне разнообразно и имеет практически неограниченные возможности для визуального отображения состояния обучаемого. Значительное повышение эффективности БОС-тренинга произошло с появлением компьютерных технологий, так как они способствовали более наглядной и доходчивой обратной связи с пациентом.

В значительной степени успешное внедрение эффективных технологий БОС в России связано с деятельностью фирмы “Биосвязь” (Санкт-Петербург), основанной в 1988 г.

Крайне высокочастотное и сверхвысокочастотное излучение; практика использования в современной медицине. Известно, что электромагнитные волны миллиметрового диапазона (ЭМВ-ММ) используются в лечебной практике различного профиля, поскольку выявлена физиологичность их воздействия на человеческий организм, генерирующий собственные ЭМП в данном диапазоне [Электронная промышленность. 1991. № 3. С. 76–79].

Миллиметровое и субмиллиметровое излучение занимает промежуточное положение между радиочастотным и оптическим диапазонами, длина этих волн в свободном (воздушном) пространстве находится в пределах $1 \div 10$ мм, или $30 \div 300$ ГГц ($1 \text{ ГГц} = 10^9 \text{ Гц}$).

В терминах частоты этот диапазон называется крайне высокочастотным (**КВЧ**). Сверхвысокочастотное излучение (**СВЧ**) колеблется в пределах $0,1 \text{ мм} \div 1 \text{ м}$.

Авторы ряда современных научных публикаций [Миллиметровые волны в науке и медицине. 2000. № 2 (18). С. 8] подчеркивают возможность передачи **ММ**-волн от поверхностных покровов в глубинные ткани организма и не исключают вероятности и прямого действия излучения на внутренние органы и клетки. Электромагнитное излучение **ММ**-диапазона не разрушает меж- и внутримолекулярные сильные связи, однако молекулы поглощают энергию этого излучения. Эта энергия вызывает нагревание тканей, связанное с так называемой “пляской молекул” — колебаниями ионов и дипольных молекул воды. Локализация и степень нагревания зависят от частоты колебаний. Между 1000 и 3000 МГц поглощаемая энергия излучения приближается к 100 % (в зависимости от толщины кожи и подкожной жировой клетчатки).

Вполне вероятно, что **ММ**-волны могут влиять на слабые электростатические связи (водородные, полярные, гидрофобные), которым принадлежит ведущая роль в поддержании пространственной структуры (конформации) биологических молекул и надмолекулярных структур. Через модификацию слабых взаимодействий волны могут изменять физико-химические свойства белков, липидов, каталитические свойства ферментов, прочность (стабильность) липопротеиновых и других комплексов.

Наиболее чувствительны к воздействию **СВЧ** глаза и семенные железы. Облучение большой мощности ведет к помутнению глазного хрусталика (катаракта). Обсуждается проблема временной стерильности при воздействии радиолокационных установок, но вопрос остается дискуссионным. При частотах примерно $5 \div 40 \text{ МГц}$ отмечена ориентация бактерий и простейших относительно силовых линий ЭМП; муравьи при действии в диапазоне **СВЧ**-колебаний теряют способность к обмену информацией, при $f = 6 \text{ МГц}$ одноклеточные организмы (например, эвглены) плывут с востока на запад, а при 15 МГц — с севера на юг. Мутационные эффекты у растений и насекомых, подобные тем, что возникают при ионизирующей радиации, отмечены при облучении радиоволнами, а частоты $\approx 27 \text{ МГц}$ вызывают мутации в клетках человека.

В работах Ю.А. Холодова [Холодов, Лебедева и др., 1992] показано, что мозг непосредственно реагирует на **УВЧ**-**СВЧ**-компоненту, и это по сути сходно с физиологическим действием постоянного **МП** и ионизирующей радиации. Таким образом, ЭМП различных параметров влияет на мозг, причем в наибольшей степени на кору и промежуточный мозг.

Следует обратить внимание на специфичность действия диапазона УВЧ-СВЧ радиоволн, которые “прицельно” влияют на функционирование сердца, сосудов, желез внутренней секреции, на обмен веществ. Так, работающая антенна РЛС на $f = 225 \div 339$ МГц с мощностью 100 Вт через 5 мин убивает обезьян рода *Macac* (резус), но при этом гистологические анализы не показывают изменений в мозге.

Поскольку у человека высока чувствительность мембран нервных элементов, то добровольцы в экспериментальных работах отмечали звон в ушах, пульсации в голове, желание кусать экспериментатора, применяющего воздействие ЭМП частотой $380 \div 500$ МГц ($\lambda \approx 0,6$ м) и мощностью 1 мВт.

Слабые импульсные ЭМП ($f = 2 \cdot 10^8 \div 3 \cdot 10^9$ Гц, интенсивность $0,4$ мВт·см⁻²) воспринимались испытуемыми как покалывание, а СВЧ-колебания (сотни МГц) вызывали галлюцинации, фосфены и также покалывание.

В последние годы в биологической науке и медицине широкое распространение получили радиофизические методы воздействия на биологические объекты и системы с целью физиологической, иммунной, психомоторной коррекции процессов функционирования организма [Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2000. № 2 (18). С. 21]. Особенно интенсивно проводятся исследования медико-биологических эффектов, связанных с воздействием электромагнитного излучения (ЭМИ) КВЧ-диапазона ($30 \div 300$ ГГц). Этот метод получил название КВЧ-терапии.

Огромный вклад в становление и обоснование метода КВЧ-терапии внес академик Н.Д. Девятков с коллегами. На основе результатов последующих исследований взаимодействия биологических объектов с ЭМИ КВЧ-диапазона были установлены следующие закономерности. Поглощение ЭМИ КВЧ-диапазона живыми организмами имеет резонансный характер, резонансные частотные полосы достаточно узкие, и коэффициент поглощения резко снижается в нерезонансной области. Область низкоинтенсивного нетеплового воздействия КВЧ на биообъекты ограничивается сверху уровнем мощности 10 мВт/см² Гц, а снизу — порядка 10^{-18} / см²·Гц.

При взаимодействии организма человека и животных с ЭМИ КВЧ-диапазона частоты резонансного поглощения соответствуют частотам максимальной терапевтической интенсивности и могут изменяться во времени в зависимости от состояния биообъекта и характера внешнего воздействия.

Максимальное поглощение ЭМИ на резонансных частотах обеспечивает предельно возможную для каждого организма величину

терапевтической эффективности метода и наиболее успешно реализуется в аппаратах КВЧ-терапии с широкополосным шумовым спектром и нетепловым уровнем мощности 10^{-18} Вт/см²·Гц на резонансных частотах. Особенно эффективно влияет ЭМИ КВЧ низкой интенсивности на организм человека при воздействии на зоны или точки акупунктуры, что открывает практически неограниченные возможности применения КВЧ для регуляции жизнедеятельности организма и лечения различных заболеваний. Из опубликованных материалов известно, что чем сложнее уровень организации, тем более многообразны проявления биологических эффектов [Азов, Азова и др. // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2000. № 2 (18). С. 21].

Привлекательность КВЧ-терапии для практического врача заключается в ее неинвазивности, отсутствии аллергических реакций, побочных эффектов и неблагоприятных отдаленных последствий. Перечисленные качества, наряду с доступностью и относительно дешевой лечебной аппаратурой, позволяют применять КВЧ-облучение не только для лечения, но и для профилактики ряда заболеваний [Бриль, Панина, Невская // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2000. № 1 (17). С. 3]. Вместе с тем известно, что проведение КВЧ-терапии не всегда сопровождается позитивной, клинически значимой динамикой в течении заболевания. Причина этого соотносится с неадекватным выбором терапевтической КВЧ из реестра резонансных. Тем самым допускается предположение о возможности биологического резонанса не для всех потенциально резонансных КВЧ и актуализируется определение к каждой из них индивидуальной восприимчивости организма. Имеются экспериментальные подтверждения реактивности электроэнцефалограммы (ЭЭГ) человека к потенциально резонансным ($\lambda = 5,6$ мм и $\lambda = 7,1$ мм) и индифферентности — к нерезонансным ЭМИ ММ-диапазона ($\lambda = 8$ мм). Следуя логике перечисленного выше, очевидно, что одновременное воздействие на биообъект совокупности различных КВЧ-волн при наличии среди них индивидуально резонансной частоты должно быть функционально значимым, причем именно под влиянием последней [Ковалев, Пресняков, Якунин // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2000. № 3 (19). С. 12].

Исследования показали, что возможности КВЧ-терапии на сегодняшний день используются не в полной мере. Пока нет уверенности, что традиционно применяемый для лечения диапазон частот, ограниченный 53,57 ГГц (длина волны 5,6 мм) и 42,25 ГГц (длина волны 7,1 мм), является оптимальным для получения

наиболее отчетливого биологического эффекта [Бриль, Панина, Невская // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2000. № 1 (17). С. 3]. Авторы этой публикации утверждают, что при изучении влияния ММ-волн на электрокинетические свойства ядер живых клеток было показано, что наибольший эффект активации наблюдается на частоте 49,0 ГГц. Более того, оказалось, что, изменяя диапазон частот КВЧ-воздействия, можно получить не только эффект биостимуляции, но и противоположный ингибирующий эффект.

Заканчивая обзор о роли КВЧ- и СВЧ-излучения в терапевтической практике, необходимо отметить рациональные возможности применения влияния такого излучения на клеточные структуры, в частности, на микроорганизмы. Этот принцип положен в основу биологической очистки сточных вод (промстоков) промышленных предприятий. Разработан метод по активации ила (т. е. клеточных структур, или активного ила) при помощи воздействия СВЧ-излучения. Активированный СВЧ-излучением ил используется как разрушитель химических веществ в сточной воде [Колесников, Архангельский и др. Результаты исследований по Программе “Конверсия и высокие технологии 1997–2000 гг.” Саратовский ГТУ].

Таким образом, мы еще раз подчеркнем необходимость системного подхода к пониманию функционирования живых систем: живые организмы — это саморегулирующиеся, адаптивные, способные к самовоспроизведению системы; это химические машины, реализующие необратимые процессы при извлечении энергии извне.

**АНТРОПОСФЕРА И НЕИОНИЗИРУЮЩЕЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ**

В части 4 представлен *опыт выявления экосистемных показателей действия техногенных источников электромагнитных полей неионизирующего излучения.*

В этом разделе обобщен авторский опыт практического использования новых методов в различных аспектах защиты природной среды от технических источников загрязнения, что связано как с подготовкой научных основ контроля и рационального потребления водных ресурсов, так и с разработками промышленного и оборонного назначения, использующими электрофизические характеристики среды. Это определяется новыми принципами и методическими возможностями при внедрении экологического мониторинга акваторий, который может осуществляться как в научно-поисковых, так и охранительно-контрольных целях, используя основное свое преимущество — оперативность измерения и оценки состояния объекта. Такой мониторинг в озерах, подверженных загрязнению, позволил дать оценку их экологического состояния и показать роль электрокинетических явлений в снижении самоочищающей способности водной среды.

Эти результаты учтены при подготовке регламентирующих документов по улучшению экологической обстановки на озерах.

Данная часть монографии призвана нацеливать студента-эколога на выбор будущей практической направленности в той или иной области контроля природной и техногенной среды — вода и водные ресурсы, охрана биогенной части экосистем, совместимость источников естественной и техногенной генерации электромагнитных полей в биосфере, разработка новых параметров по учету электромагнитных факторов в практике создания новых энергосистем и т.д.

4.1. СОВРЕМЕННОЕ ОСОЗНАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РОЛИ ТЕХНОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

- 4.1.1. О проблеме биологической опасности неионизирующего электромагнитного излучения**
- 4.1.2. Живые системы в условиях неизбежного притока электромагнитной энергии от промышленных источников**
- 4.1.3. Комбинированное действие экранирования биологических объектов и вариаций геомагнитного поля при скоростном движении**
- 4.1.4. Новая проблема экологической роли сильных техногенных ЭМП, обусловленная “незаявленной деятельностью по обогащению урана электромагнитным методом”**

4.1.1. О проблеме биологической опасности неионизирующего электромагнитного излучения

Современная насыщенность среды обитания неионизирующим электромагнитным излучением представляет определенную биологическую опасность для существования и выживания органического мира на всех уровнях его организации.

Многолетнюю работу по выявлению негативной роли источников электрических, магнитных и электромагнитных полей под контролем Всемирной Организации Здравоохранения проводят научные и производственные структуры ведущих развитых стран Земли. Энергия и частотный спектр упомянутых полей учитываются и регламентируются в специальных правовых, нормативно-технических и санитарно-гигиенических документах, справочниках и пособиях, широко публикуемых в течение последних 20 лет. Результаты исследований по электромагнитной экологии и электромагнитной совместимости технических средств и биологических объектов регулярно обсуждаются и оцениваются теперь уже на международном уровне.

Тем не менее, научно обоснованная регламентация и стандартизация при внедрении необходимых норм (данных) “доза-эффект” в промышленность или медицинское обеспечение населения (физиотерапия) далеки от совершенства: научные исследования отстают от потребностей рынка и не полностью выявляют критерии опасности, использование которых либо дает четкие рекомендации, либо завершается разработкой технических устройств защиты от излучения.

Учитывая изложенное и руководствуясь этическими проблемами медицины при исследовании биологической роли электромагнитного неионизирующего излучения, ранее в Институте озера-ведения РАН (1972–1986 гг.), в Институте эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН (1986–1995 гг.) и ныне в СПбГПУ (1995–2006 гг.), автором исследовались и оценивались особенности поведения биообъектов на примере водных организмов (планктон, моллюски, рыбы).

В результате этих фундаментальных работ накоплен 35-летний опыт по изучению поведения и реакций организмов на действие естественных и искусственных электромагнитных полей в ультранизкочастотном диапазоне колебаний: биоритмы и их нарушение, стресс и адаптивное поведение, спектральная структура двигательной активности как функция пространства и времени, визуализация поведения современными методами, угнетающая роль слабых электромагнитных полей и т.д.

К настоящему времени автор склонен разрабатывать проблему влияния магнитных полей на водные организмы, в частности на рыб и членистоногих, сосредоточившись именно на исследовании трех классов явлений: 1) влияние слабых ультранизкочастотных магнитных полей на физиологические процессы, включая развитие и размножение; 2) влияние флуктуаций геомагнитного поля на биоритмы активности животных; 3) влияние вектора индукции магнитного поля на ориентационное поведение гидробионтов. В этом плане показательны материалы последних лет (1998–2006 гг.), полученные в модельных условиях в учебно-научной лаборатории **электрофизики естественных экосистем** СПбГПУ (см. разд. 3.2 и 4.3.3).

Однако следует подчеркнуть, что несмотря на четко очерченные выше научные интересы автора, необходимым условием существования, развития и сохранения современной значимости лаборатории **электрофизики естественных экосистем** в стенах СПбГПУ является обеспечение учебно-образовательных программ (лекционный курс и практические занятия), а также проведение мониторинговых исследований динамики ЭМ характеристик среды обитания, насыщенной техническими средствами, аппаратурой и новыми источниками антропоферных энергосистем и средств связи. Наиболее показательные результаты таких исследований рассмотрены далее (см. разд. 4.3.1).

4.1.2. Живые системы в условиях неизбежного притока электромагнитной энергии от промышленных источников

Искусственное электромагнитное излучение (ЭМИ) — спутник развития цивилизации. Человечество сознательно мирится с

увеличением и искажением электромагнитного поля Земли, получая взамен такие выгоды, как радио и телевидение, связь и бытовое благополучие. За последние десятилетия суммарная напряженность электромагнитных полей искусственного происхождения возросла на $2 + 3$ порядка. Биологические последствия такого энергетического всплеска излучения пока туманны.

Не претендуя на всесторонность информации для будущих специалистов, кратко коснемся проблемы техносферных воздействий ЭМИ на биоту, используя данные *in vitro*.

Со времени организации в Европе Первой Международной школы по биоэлектромагнетизму (Болгария) прошло 15 лет. За этот период возникли новые ассоциации, общества и целенаправленные исследовательские группы, целью которых стало систематическое изучение проблем энергетического и информационного действия естественных и антропоферных электрических, магнитных и электромагнитных полей на биосистемы, прошли крупные совещания, симпозиумы, конференции и конгрессы по данной проблеме в Европе, США, Японии.

Были опубликованы материалы по результатам работы этих международных мероприятий, в частности, "Current Concepts in Bioelectromagnetics" (Ed. M. Hinsenkamp, M. Rooze), Brussels, 1992. 345 p.; "Orientation and navigation birds, human and other animals". London, 1993. (41 papers); "Charge and Field Effects in Biosystems-4" (Ed. M.J. Allen, S.F. Cleary, A.E. Sowers) World Scientific Publishing Co. Ptc. Ltd. 1994. 527 p.; "Международный Симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии ЭМС и ЭМЭ-95" (сб. научных докл., русск., англ.), Санкт-Петербург, 1995. 264 с.; "Book of Abstracts International Conference", "Problems of Geocosmos", St. Petersburg. 1996, 172 p.; тезисы докл. 1-й российской научно-технич. конф. "Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов" ЭМС-96, Санкт-Петербург, 1996. 593 с.; Доклады 8-й российской научно-технич. конф. "Электромагнитная совместимость технических средств и электромагнитная безопасность" ЭМС-2004. СПб., 2004. 554 с. Определенное теоретическое обобщение результатов по докладам на международных конгрессах "Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине" представлено в новой монографии Л.Н. Галль "В мире сверхслабых. Нелинейная квантовая биоэнергетика: Новый взгляд на природу жизни", СПб., 2009. 317 с.

Со времени публикации монографии В. Александрова (2006) в мировом научном сообществе крайне возрос интерес к обсуждаемой проблеме и озабоченность грядущей опасностью воздействия

ЭМИ на здоровье всей человеческой популяции, что выразилось в ежегодной организации международных симпозиумов, конгрессов, семинаров в разных странах.

Некоторые публикации соответствуют теме нашего обзора и рассматриваются отдельно.

1. Электромагнитному воздействию подвергались клеточные и внутриклеточные структуры, митохондрии, мембраны, ферментативные бесклеточные препараты с целью выяснения кинетики формирования митохондриальной морфологии и активности, мутагенных эффектов в ДНК, цикличности АМФ в здоровых и канцерогенных культурах млекопитающих. В таких опытах применялись слабые, постоянные и переменные магнитные поля, но все же значительно превышающие уровень земных флуктуаций ($B \approx 10^{-6} \div 10^{-3}$ Тл и $f \approx 15 \div 50$ Гц) [Markov et al., 1993; Johann et al., 1993; Nafziger et al., 1993; Schimmelpfeng et al., 1993]. Анализ результатов исследований показал:

влияние МП на процессы фосфорилирования существенно ускоряются на $(30 \div 100 \%)$ с вероятностью $p < 0,01$ [Markov et al., 1993]. После действия пульсирующего МП ($B = 5,3$ мТл, $f = 20$ Гц) в течение 6 дней по 12 ч в день наблюдались значительное увеличение митохондриальной активности, волны возбуждения в мембранах канцерогенных клеток молочной железы хомячковых и ярко выраженный рост микроворсинок по сравнению с контрольными клетками; напротив, при действии же более слабых полей ($B \approx 10^{-6} \div 10^{-5}$ Тл = $1 \div 10$ мкТл и $f = 50$ Гц) никаких мутагенных эффектов на ДНК по двум кратковременным тестам (Ames test, HGPRT test) не было обнаружено, тем не менее, при длительном действии канцерогенный эффект может иметь место;

выявлено различие в действии постоянного МП ($B = 2$ мТл) и электрического поля ($C.D. \approx 0,25$ мА/см² и $E \approx 70$ мВ/см); магнитное поле вызывает слабое, но статистически достоверное уменьшение среднего содержания ДНК в клеточной популяции, тогда как электрическое поле приводит к противоположному эффекту;

анализ клеточного цикла (*proliferation*) выявил, что клетки, находившиеся под действием МП и ЭП, были изменены на 90 % по сравнению с контролем; количество АМФ увеличилось на 120 %, на основе этих данных авторы [Schimmelpfeng et al., 1993] предполагают, что действие низкочастотных электромагнитных полей поддерживает вторичные процессы-предвестники, индуцирующие процессы на уровне клеточной мембраны.

2. Как показано в п.1, работ по действию слабых МП (индукция порядка $10^{-6} \div 10^{-5}$ Тл, т.е. на уровне микротесл) весьма мало, и они не выявили мутагенных эффектов в ДНК при кратковременном

воздействию [Nafziger et al., 1993]. Тем не менее, в публикациях Международного симпозиума “Charge and Field Effects in Biosystems—4” (1994 г.) эта проблема снова рассматривается, сообщается, что известны результаты действия полей такого уровня на другие клеточные структуры [Belyaev et al., 1994; Hannan et al., 1994; Kwa, Reskmark, 1994; Markov et al., 1994; Smith et al., 1994]. Например, в работах [Hannan et al., 1994; Kwa, Reskmark, 1994; Smith et al., 1994] рассматривается действие полей в диапазоне индукции $40 \div 800$ мкТл и частотой $(50 \div 60) \div 600$ Гц. Особняком стоит работа российских исследователей, применявших установку с пульсирующими полями (30 мкТл, $f = 9$ Гц) и статическими полями ($0 \div 147$ мТл) [Hannan et al., 1994]. Суммируя результаты, можно отметить следующее.

- Применение установки [Новиков и др., 1999] с комбинированным действием статических и синусоидальных полей ($B = 40$ мТл, $f = 60$ Гц), настроенной как биологическая ионциклотронная резонансная модельная система, позволило в течение 21 сут оценить движение катионов Ca^{+2} , K^{+} и Mg^{+2} вдоль проростков семени редиса; движение Ca^{+2} было замедлено, K^{+} — ускорено, Mg^{+2} — скорее всего, без изменения; параметры электромагнитного поля (так называемые “гармоники роста”, различные для разных токов) способствовали росту образцов при стимуляции движения кальция и магния и блокировали рост при стимулирующем параметре для калия, контрольные образцы ($0,0$ мкТл) остались без изменения.

- Применяли установку инкубаторного типа с вмонтированными в нее кольцами Гельмгольца для воздействия крайне низкочастотного магнитного поля на рост клеток человека (*AMA cells*) и клеток кожных фибробластов (*K14 skin cells*), растущих в монослойной культуре [Kwa, Reskmark, 1994]. На клетки действовало синусоидальное ЭМП ($B = 0 \div 200$ мкТл, $f = 50$ Гц). Экспозиция длилась от 15 до 90 мин с 15-минутными интервалами, и после 24-часового перерыва в действии определяли степень размножения клеток. Было установлено, что 30-минутная экспозиция приводит к значительному увеличению (более 200 %) пролиферации для *AMA* клеток по сравнению с контролем ($B = 0$) и по сравнению с клетками, на которые ЭМП действовало более короткий или более долгий период. Наиболее эффективна индукция ≈ 80 мкТл.

- Для оценки действия переменного ЭМП на эффективность применяющихся химиотерапевтических препаратов использовали: цитотоксичный сульфородамин В для окрашивания клеточного препарата *HT-29 cell* (карцинома толстой кишки человека), 96-ячеечную подложку для экспозиции клеточной культуры в системе взаимно перпендикулярных колец Гельмгольца, генерирующих МП, *Daunorubicinum* (антибиотик, обладающий антибактериальной и

противоопухолевой активностью) в концентрации $p = 0,0064$, ANOVA [Hannan et al., 1994]. При экспозиции действия МП ($B = 400$ мкТл, $f = 60$ Гц) рост раковых клеток снизился практически на 50 % (с 63 ± 9 до 39 ± 2 мг/мл). Сходный результат был получен при действии 1,0 мТл, но эффекта не получили, когда индукция снизилась до 0,1 мТл. Увеличение времени экспозиции с 2 до 4 часов не привело к усилению цитотоксичности антибиотика, и она оставалась такой же, как и при экспозиции 1 ч. Таким образом, терапевтический эффект даунорубицина (цитотоксичность препарата *in vitro*) усиливается с применением МП.

- Для оценки терапевтической роли сигналов пульсирующего ЭМП в радиочастотном диапазоне (PRF) для лечения болевых ощущений и отека тканей проведено исследование реакции ферментной системы на действие кратковременного импульсного излучения ($B = 0 \div 800$ мкТл, $f = 27,12$ МГц), которое было продублировано действием синусоидального поля с частотой 80 и 600 Гц [Markov et al., 1994]. Максимальное действие оказало МП индукцией 250 и 800 мкТл, что проявилось в увеличении скорости фосфорилирования на 14 ± 3 и 98 ± 3 %, соответственно, по сравнению с контролем ($B = 0$ мкТл), т.е. сигналы радиочастотного диапазона также могут действовать на бесклеточную энзимную систему, модулируя ион-протонное взаимодействие.

- Для оценки влияния крайне низкочастотного переменного и постоянного МП на конформационное состояние генома бактериальных клеток *E.coli* K12 AB1157 был применен метод аномальной вязкости как функция времени [Belyaev et al., 1994]. Была установлена коллинеарность векторов статического и переменного полей и показано, что величина резонансного эффекта слабого КНЧ ЭМП ($B = 30$ мкТл, $f = 9$ Гц) существенно не зависит от магнитной индукции перпендикулярного вектора статического поля в пределах от 0 до 147 мкТл. Тем не менее, было доказано, что амплитуда коллинеарного поля имеет значение для возникновения резонансного эффекта. Физическая модель описанного явления была применена к живым клеткам и рассмотрены высокочастотные колебания заряженных нуклонов с позиций классических представлений, получено основное решение модели. Из этого решения следует, что магнитное поле оказывается модулированным в фазе высокочастотных естественных колебаний. Поэтому статические МП были проанализированы более детально, в результате выявились условия для получения максимального или минимального биологического эффекта. Модель предсказала волноподобную зависимость изменений в конформационном состоянии генома при

действии статического поля. При действии слабого статического поля изменения в геноме *E.coli* были обнаружены, и максимальный эффект проявился в клетках спустя $60 \div 80$ мин после воздействия в диапазоне $0 \div 80$ мкТл; далее наступила адаптация к действию новой величины МП. Экспериментальный результат соответствует разработанной авторами численной модели.

3. Из целого ряда работ, посвященных реакции тканей, органов и организмов на действие слабых МП, можно выделить исследования сотрудников Брюссельского университета [Debouck et al., 1993], отличающиеся тщательностью экспериментальных исследований и четкой практической направленностью. Авторы показали, что и в предварительной работе с применением колец Гельмгольца, и в последующих контрольных экспериментах в специальных соленоидах результаты практически оказались идентичными. Суть этих результатов: куриные эмбрионы подвергались действию МП в диапазоне $0 \div 4,3$ мТл, 5 кГц (несущая частота) и 15 Гц (опорная частота) в течение 100 часов в специальном инкубаторе. Авторы не обнаружили никаких статистически достоверных различий в тканях эмбрионов, подвергавшихся действию, и контрольных для диапазона индукции $0 \div 2,2$ мТл. Микрография скелета обнаружила лишь разницу в длине берцовых костей эмбрионов, находящихся в соленоиде с индукцией 4,3 мТл (отличие от контроля $p < 0,05$), и это соответствовало результатам, полученным ранее в кольцах Гельмгольца.

Таким образом, предварительное заключение состоит в том, что установлен нижний предел диапазона магнитного действия ($4,3 \div 10,6$ мТл) в воздухе, при котором можно ожидать существенного прироста костной ткани подопытных эмбрионов животных. Следует подчеркнуть, что слабое МП, применяемое в клинике ортопедии и травматологии Брюссельского университета, существенно превосходит (на два порядка) уровень постоянного ГМП, хотя, как было отмечено ранее, биосистемы откликаются на действие МП в диапазоне нанотесл, что наблюдается наиболее отчетливо по мере увеличения возраста животных.

Довольно близко по задачам исследований к изложенной выше работе примыкает обзорное сообщение «Отдела по биологическому действию неионизирующей радиации» (Варшава, Польша) [Szmigielski, 1993]. В центре внимания исследователей — риск возникновения опухолевых новообразований (*neoplasms*) в результате действия фоновое магнитного излучения ($0,3$ мТл, $50/60$ Гц), обусловленного либо проживанием людей вблизи линий электропередач, либо связанного с производством. Рассматривая гипотетические теории, претендующие на возможность объяснить механизм канцеропровоцирующего активного эффекта крайне низкочастотных

ЭМП, авторы указывают, что только опытные данные *in vitro* могут дать соответствующие доказательства о непереносимости животными этого действия, сопоставимого, например, с химическими источниками возникновения *neoplasms*. Однако таких данных пока нет. Необходимы широкомасштабные эксперименты на живых объектах и хорошо поставленные наблюдения за эпидемиологической обстановкой в окружающей среде (мониторинг), где сосредоточены источники электромагнитного излучения.

До 1990-х годов в большинстве лабораторий экспериментально исследовалось в основном действие постоянных или импульсных электрических полей на физиологию рыб; обуславливались такие эксперименты прикладными задачами рыболовства или рыборазведения. При этом время действия фактора, как правило, было кратковременным.

В Лаборатории сравнительной физиологии мозжечка Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН исследовались центральные механизмы поведенческих реакций животных в онтогенезе при действии внешних раздражителей. Автором в последние годы проведено изучение электрических полей, генерируемых промысловыми и аквариумными рыбами, с целью познания их роли в функции мозжечка и использования этих данных для экологического мониторинга и возможного управления объектами в процессе промысла или рыборазведения. Теоретической основой для проведения работы является потенциал знаний, накопленный к настоящему времени в различных областях науки — ихтиологии, электрофизиологии, геофизике [Доронин, 1978; Протасов, Бондарчук, Олышанский, 1982; Броун, Ильинский, 1984; Александров, 1985; Басов, 1985; Сигнализация и поведение рыб, 1985; Kalmijn Ad., 1887]. Обзор работ этих исследователей показал, что природное электромагнитное неионизирующее излучение относительно слабо по сравнению с антропоферным возмущением, и это не может не сказаться на росте, развитии и поведении гидробионтов, в частности на молоди рыб. Например, по данным литовских исследователей [Данюлите, 1977], воздействие на рыб переменным током приводит к повышению обмена веществ на 40 %, а возвращение к норме наступает лишь через 2 ч. Имеются сведения об опасных дозах воздействия постоянного, импульсного и переменного электрического тока на пресноводных и морских рыб, полученные в специальных опытах Института зоологии и паразитологии АН Литвы [Данюлите и др., 1977]. Исходя из имеющихся материалов, следует отметить, что воздействию электрического тока рыбы подвергались в основном кратковременно (напряженность в пределах $0,5 \div 0,6$ В/см, длительность $5 \div 60$ с), с учетом задач и целей, возникающих при электролове,

поэтому полученные ранее результаты не могут служить показателями непосредственно для оценки последствий воздействия электрического тока на физиологию животных в онтогенезе; они могут быть использованы лишь в качестве ориентировочных данных при постановке и проведении новых по замыслу экспериментов.

Урбанизированные территории — источник притока энергии

Основные источники ЭМИ — воздушные и кабельные линии электропередач, трансформаторные подстанции, теплоэлектроцентрали, телерадиоцентры, базовые центры сотовой телефонной связи и другое электрооборудование всевозможного назначения. Интенсивность переменных электрических и магнитных полей убывает по мере удаления от их мощных источников, длительное нахождение рядом с которыми нежелательно для человека.

Квазистационарные магнитные поля возникают также в зоне движения городского электротранспорта. Их уровни повышены в местах соединения электрических кабелей с контактными проводами трамвайных и троллейбусных сетей, вблизи рельсовых путей и переводных стрелок.

Например, в Петербурге электромагнитная обстановка весьма неоднородна. Уровни полей в городе можно условно разделить на три категории: близкие к фоновому значению электромагнитного поля Земли (большая часть); превышающие его уровень примерно в 1000 раз — районы экологического загрязнения; превышающие этот уровень более, чем в 1000 раз — районы экологической опасности.

Безусловно, разделить квазистатические и переменные ЭМП, как правило, весьма трудно, сложно поэтому четко обозначить биологические последствия их воздействия. Тем не менее, научные разработки в познании механизмов таких действий активно ведутся.

Установлено, например, что активность внешних электростатических полей на различных уровнях биологической организации выражается в разнообразии эффектов, зависящих от интенсивности, длительности, характера действия, присутствия дополнительных сопутствующих факторов.

Электростатические поля (ЭСП) к настоящему моменту все-сторонне оцениваются. Их наличие обусловлено возросшим применением технологических процессов, которые основаны на использовании сильных ЭП, развитием линий электропередач ультра- и сверхвысокого напряжения постоянного тока (ЛЭП ПТ), применением электризующихся полимерных материалов в быту и т.д.

Экранирование от внешних ЭМП приводит, наоборот, к электрическому голоданию. Актуально применение ЭСП в качестве

гигиенического средства и как регулятора метаболических процессов в организме. Существует мнение о взаимодействии экзо- и эндогенных ЭП, при котором наложение внешнего ЭСП может модифицировать (модулировать) собственное ЭП организма и его функциональных частей.

Актуальность изучения и учета роли ЭСП в повседневной жизни требует проведения своеобразной просветительской работы. Так, сотрудники ИЗМИР РАН (М.В. Рагульская, В.В. Копейкин, В.В. Любимов) показали, что характерная напряженность на поверхности тела человека изменяется от 20 до 200 В/м, достигая величины 1000 В/м в теменной области головы. Одежда из натуральных тканей не влияет на эти показания. Применение синтетических материалов нежелательно: при движении и в процессе одевания значение $\bar{E}$ достигает 14000 В/м; ношение синтетических тканей способствует проявлению сердечной аритмии; обувь на синтетической подошве, соприкасаясь с асфальтом, обуславливает рост потенциала поля до $10 \div 20$ кВ. Современное жилое помещение при незначительных габаритах, обилии электропроводящих линий вдоль стен и под полом, сосредоточении мебели из синтетических материалов вместо привычной деревянной превращается в накопитель статических зарядов, достигающих многих киловольт.

Таким образом, **повсеместное распространение новых материалов и технологий кардинально изменило саму среду обитания человека**, причем с точки зрения электромагнитной безопасности проживания — далеко не в лучшую сторону.

Следует отметить противоречивость в результатах изучения влияния статических полей на сходные объекты. Одной из причин этого является то, что в самой основе жизни заключена асимметрия, обусловленная наличием *L*- и *D*- изомеров молекул, присутствующих не в одинаковой пропорции в каждом объекте.

Краткий обзор биологической активности квазистатических ЭМП убедительно показывает:

значительно влияние их на сердечно-сосудистую систему: неустойчиво артериальное давление (**АД**), растет количество гипертонических заболеваний (**ГБ**) и случаев брадикардии, на электрокардиограмме отмечается снижение потенциала действия сердечной мышцы (**ЭКГ**);

страдают иммунная и вегетативная системы;

не исключается потенциальная генетическая опасность для половых клеток теплокровных животных;

опасна “отрицательная полярность ЭСП”, при которой снижается *митотическая активность*, вероятен *мутagenез*.

Сложность в оценке ЭСП обусловлена многосторонностью проявления их биоактивности. Так, отмечают усиление метаболических процессов, что ведет к приросту биомассы в с/х производстве, к повышению урожайности. С другой стороны, биохимические исследования *in vitro* показывают, что ЭСП влияет на функциональное состояние клетки, вызывая поляризацию макромолекул, увеличение проницаемости клеточных мембран, изменение метаболических процессов и другие эффекты.

Одна из особенностей ЭСП заключается в том, что долговременный эффект их воздействия может быть замаскирован. Например, поле $E = 70$ кВ/м вызывает в семенных железах экспериментальных животных повреждение мейотических хромосом в стадии диакинез-метафаза I и резкое увеличение числа клеток с транслокациями. И это тем более неприятно, что под ЛЭП реально существуют значения ЭСП, равные 20, 30, 60 и 90 кВ/м, и остается открытым вопрос о научно обоснованном нормировании и пороге вредного биологического действия ЭСП.

Несмотря на некоторую противоречивость результатов и разнонаправленность исследований *in vitro*, полученные данные свидетельствуют об активности ЭСП по отношению к биологическим молекулам и надмолекулярным структурам, которая приводит к изменению кинетики электрохимических реакций и активности ферментов, к дезорганизации клеточных мембран. Большое значение имеет определенная локализация заряженных групп на поверхности фермента. Очевидно, что переориентация этих групп может повлечь за собой нарушение клеточной функции ферментов. На эту функцию влияет и нарушение *конформации*, приводящее к изменению степени спирализации белковой молекулы.

Авторы работы* [Портнов Ф.Г., Воробьева Л.Ф., Ларский Э.Г., Иерусалимский А.П. Биологические действия электростатических полей // Успехи современной биологии. 1985. Т. 100, вып. 3(6). С. 433–471] выделяют следующие характерные моменты действия ЭСП:

значительна роль кожного покрова в пусковом механизме развития эффектов ЭСП;

при действии ЭСП усиливается снабжение тканей кислородом и в то же время угнетается дыхательная цепь митохондрий.

Очевидное противоречие, видимо, связано с различными путями утилизации O_2 клетками, так как потребление O_2 в дыхательной цепи — далеко не единственный способ его усвоения. Известны три

*Авторы работают в Отделении медико-биологических проблем электротехники ВНИИ кабельной промышленности, г. Юрмала.

основные системы, связанные с поглощением O_2 : электронно-транспортная система в микросомах, митохондриальная дыхательная цепь и перекисное окисление липидов (величины потребления O_2 примерно одного порядка для всех трех систем).

Переменные ЭМП и ЭМИ, теперь образно именуемые “электромагнитный смог”, по результатам многолетних экологических и гигиенических исследований, действуя в пределах практически всех частотных диапазонов (см. разд. 4.1; табл. 4.1), оказывают также влияние на физиологическое состояние человека — самочувствие и работоспособность. При этом весьма неопределенными остаются последствия этого воздействия на здоровье в целом (см. разд. 3.1.3). Как правило, неблагоприятное воздействие искусственного ЭМИ оценивается по излучению от технических устройств (бытовая аппаратура, сетевая нагрузка, транспортные перемещения, прямое воздействие высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) и т.д.).

Таблица 4.1

Спектральная структура электромагнитного излучения

Частота $\nu = f$, Гц	Длина волны λ , м	Название диапазона	Физико-химическая и физико-биологическая значимость диапазона излучения
10^3 10^{12}	$3 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^{-4}$	Радиоволны	Переменные токи в проводящих средах и электронных потоках (генераторы радиочастот, генераторы СВЧ)
$3,75 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^{-7}$	ИК-излучение; видимый свет	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях
$7,5 \cdot 10^{14}$ $3 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{-7}$ 10^{-9}	УФ-излучение; мягкое рентгеновское излучение; рентгеновское и γ -излучение;	Излучение атомов при воздействиях ускоренных электронов
$3 \cdot 10^{20}$ $3 \cdot 10^{23}$	10^{-12} $3 \cdot 10^{-15}$	γ -излучение	Атомные процессы при воздействии ускоренных заряженных частиц Ядерные процессы, радиоактивный распад, космические процессы

В отличие от естественных ЭМП и ЭМИ техносферные излучение и поля структурно оформлены просто с точки зрения

гармонического частотного спектра и импульсации, они также обладают высокой интенсивностью (мощностью излучения) и неравномерностью локализации на заселенной территории. Поэтому при острой необходимости выявленную опасность излучения можно избежать или существенно уменьшить, изменив место и время пребывания человека в неблагоприятной зоне*.

Принимая во внимание результаты массового обследования специалистов и рабочих, занятых в радио-, телевизионной и электронной промышленности и в широковещательной деятельности средств массовой информации, а также людей, проживающих вблизи источников ЭМИ, которые выявили рост канцерогенных заболеваний, рассмотрим ряд сведений, полученных отечественными и зарубежными исследователями в последнее время.

Чувствительность эпифиза к действию переменных магнитных полей. Эпифиз, или шишковидная железа, представляет собой структуру, расположенную глубоко между полушариями мозга. Кровоснабжение эпифиза осуществляется из ветвей передней, средней и задней мозговых артерий. Секреторные клетки эпифиза выделяют в кровь и спинную жидкость гормон **мелатонин**. Мелатонин меняет окраску кожи и чешуи у земноводных и рыб, а у человека на пигментацию не влияет. Гормональная функция эпифиза обеспечивает регуляцию биоритмов эндокринных функций и метаболизма для приспособления организма к разным условиям освещенности. Основная регуляторная информация поступает в эпифиз из верхнего шейного узла пограничного ствола по симпатическим волокнам, которые формируют шишковидный нерв [Основы физиологии человека: Учебник для вузов. СПб., 1994. Т. 1. 567 с.]. Выделение эпифизом гормона мелатонина подчинено четкому суточному ритму (так называемый циркадианный ритм) и определяет ритмичность функции половых желез, в том числе и продолжительность менструального цикла у женщин. Деятельность эпифиза называют “биологическими часами организма”, так как железа обеспечивает процессы временной адаптации, и, кроме того, шишковидное тело является ответственным за ритмическую регуляцию водно-солевого обмена. И поскольку концентрация мелатонина — ингибитора свободнорадикальных процессов в организме — минимальна в дневные часы и максимальна в ночные, появилась

*Например, попытки улучшить качество жизнеобеспечения путем экранирования помещения и рабочих мест нельзя считать эффективным и безопасным: при коэффициенте ослабления внешнего естественного ГМП (попутно с ослаблением техносферного) более чем в 2 раза происходит ухудшение самочувствия человека (вспомните метрополитен, подземные бункеры, подводные корабли и т.д.).

вспышка публикаций о результатах исследований, обнаруживших угнетающее действие ЭМП на синтез и секрецию шишковидной железой гормона мелатонина. Так, "...снижение ночной экскреции метаболитов мелатонина обнаружено у некоторых лиц после 8-недельного использования электроодеял, а также в дневное время — у водителей электровозов, рабочих электрослужб и даже при однократном использовании радиотелефона". Есть объективные данные о способности МП нивелировать ночное накопление гормона в железе, что сопровождается снижением активности ферментов, катализирующих биосинтез мелатонина [Темурьянц Н.А., Шехоткин А.В., Насилевич В.А. Магниточувствительность эпифиза // Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 761—765]. Выявили стимулирующую роль круглосуточного освещения и ПеМП с частотой 50 Гц в канцерогенезе молочных желез у самок крыс [Анисимов В.Н., Жукова О.В. и др. Влияние светового режима и электромагнитных полей на канцерогенез молочных желез у самок крыс // Биофизика. 1996. Т. 41, вып. 4. С. 807—814].

Безусловно, анализируя описанное выше явление реакции организма на ПеМП *in vitro*, автор более внимательно воспринимает собственные исследования по учету действия НЧ ПеМП с частотой 50 Гц на поведение водных животных *in vivo* [Александров В.В., Александров Д.В., Федоров М.П., Шилов И.О. Оценка устойчивости водных организмов к действию переменных электрических полей промышленной частоты // Тр. IV Российской научно-технич. конф. "Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов" ЭМС-96. СПб., 1996. С. 541—543]. **В этом автор усматривает новизну исследований.**

Начиная работу над этой проблемой, автор полагал, что живые компоненты биосферы Земли вряд ли генетически подготовлены к той мощной дозе ЭМИ, которое в настоящее время обусловлено всем комплексом планетарных инженерно-технических средств и промышленных объектов. Тем не менее, оценка роли ЭМП этого излучения трактуется неоднозначно (от полного отрицания эколого-физиологического влияния их на живое вещество до явного преувеличения прогнозируемой опасности нарушения естественного эволюционного процесса.

Изучение данной проблемы в наших исследованиях было направлено на выявление силового и энергетического действия промышленных источников генерирования ЭМП на экологическую физиологию рыб.

Методика. Выяснение механизма передачи внешней информации в рецепторную систему живых организмов — задача весьма трудная, и следует обратить внимание на то, что изучение поведения

животных особенно в условиях сложной изменчивости ЭМП в открытых экосистемах практически не реализуемо. Поэтому на данном этапе выбран путь физического моделирования в лабораторных примитивных экосистемах, а в качестве физиологического теста были использованы двигательная активность (ДА) и биоритмы (БР) поведенческих реакций карповых рыб, помещаемых в закрытую аквариальную систему, подвергающуюся действию переменного ЭП промышленной частоты ($f = 50$ Гц) различной напряженности.

Регистрация ДА проводилась непрерывно бесконтактным многоэлектродным зондом, измеряющим естественную разность потенциалов ЭП ($\Delta\phi$), генерируемую целостным организмом (группой особей) при свободном движении в воде. Гармонические составляющие ЭП обработаны с помощью стандартных статистических программ. Критерием ДА принята энергия спектра Фурье $G(f)$, являющегося мерой интенсивности ДА, оценкой ее БР и характеризующего степень восприятия животными внешних ЭМ воздействий (см. разд. 3.2).

Экспериментальная установка состояла из двух блоков — контрольного и энергетического. Рыбы одного помета (1 ÷ 3 года) семейства карповых (*Cyprinidae*, *carassius auratus*) в равных количествах (1 ÷ 5) помещались в аквариумы обоих блоков, и после наблюдений в течение от нескольких часов до двух недель проводили сравнительную оценку изменчивости ДА за период воздействия.

Результаты. При устойчивом состоянии рыб в условиях имитации естественной примитивной экосистемы (без растений) в контрольной установке провели изучение поведенческих реакций всевозможных видов движения, электрограммы которого послужили фоновой характеристикой ДА [Александров В.В. // Биофизика. 1995. Т. 40, вып. 4]. Аналогичную работу одновременно провели в установке, где создавалось ЭП переменного тока ($\bar{E} = 0,3$ В/см, предельный уровень), а затем в течение четырех суток после воздействия регистрировали $\Delta\phi$ ДА, получив, таким образом, характеристику активности рыб при состоянии, которое уже нельзя отнести к естественному и устойчивому. Спектральная оценка ДА показала, что поведение животных существенно меняется при стимуляции переменным током по сравнению с контролем.

Функции спектральной плотности энергии электрических сигналов, обусловленных движением, показывают, что оно является сложным полициклическим процессом, а спектр носит красношумовой характер (уменьшение $G(f)$ с ростом частоты). Выявление устойчивости и достоверности максимумов энергии на фоне красношумового ее спада проведено с помощью вычисления доверительных пределов с вероятностью 95 %. Дискретность оцифровки

электрограмм была 40 и 2 с в зависимости от задачи анализа. В результате из рядов $\Delta\phi$ выделили два типа иерархии БР в диапазоне УНЧ-колебаний — долгопериодные (“волновые пакеты”) и короткопериодные (пульсирующие). Первые длятся в пределах минут-часов, вторые в пределах секунд.

1 тип иерархии биоритмов включает значения $1,2 \div 16,0$ мин со следующими особенностями:

1) в пределах $1,2 \div 16,0$ мин выявлен весь набор биоритмов с шагом в 0,1 мин, за исключением $3,6 \div 3,7$; $4,2 \div 4,5$; $4,7 \div 4,9$; $5,1 \div 5,3$; $5,5 \div 6,9$; $7,1 \div 14,9$ мин;

2) в пределах $1 \div 2$ ч выявлены лишь отдельные характерные БР, а именно 15,0 и 16,0 мин;

3) общими биоритмами для обоих состояний рыб (до и после воздействия) являются значения 1,5; 1,8; 2,1; 3,0 мин. Мы их оцениваем как фундаментальные биоритмы, наличие которых характеризует способность рыб противостоять внешним воздействиям по показаниям их ДА;

4) в состоянии после воздействия наблюдали исчезновение некоторых ритмов активности — $1,2 \div 2,0$; 2,8; 4,6; 5,4; 7,0 мин и появление новых ритмов — $2,5 \div 2,6$; 3,3; 4,4; 7,8 и 10,0 мин. Исчезновение или появление из всего набора биоритмов определенного их значения можно трактовать как результат внешнего воздействия или потери устойчивости.

II тип иерархии биоритмов включает значения секундного поддиапазона в пределах временного интервала записи $1 \div 2$ ч.

Для фоновой структуры $\Delta\phi$ характерны пульсирующие колебания, сконцентрированные в более крупные волновые пакеты, где выделены следующие БР, приуроченные к моментам с высокой ДА утром и вечером: $60 \div 62,5$; 49,1; 24,5; 16,9; $14,6 \div 14,7$; $12,0 \div 12,1$; $9,4 \div 9,6$ и $6,0 \div 6,5$ секунды также с уровнем значимости 95 %. Аналогичные по частоте ЭМ пульсации известны в геомагнитном поле и магнитосфере Земли. Подобие спектральной структуры изменчивости $\Delta\phi$ наблюдается и в процессах естественной турбулентности воды, где распределение $G(f)$ по частотам колебаний описывается законом “ $-5/3$ ”. Поэтому можно говорить о не случайном характере установленных ритмов. Тем не менее рассмотренный процесс является существенно нестационарным во времени.

В результате действия тока 50 Гц наблюдаются рост амплитуды колебания $\Delta\phi$ и значительное снижение их частоты. На рис. 4.1 представлен график спектральной плотности $G(f)$ для группы особей, подвергавшихся опасно высокому для жизни напряжению 9 В (напряженность поля $\bar{E} = 0,32$ В/см). Максимум энергии практически

смещен в область ниже 0,01 Гц, или более 100 с. При этом уменьшение высокочастотной компоненты, иногда вплоть до ее полного исчезновения, свидетельствует о большей организованности группового поведения, чем для рыб из контрольной группы.

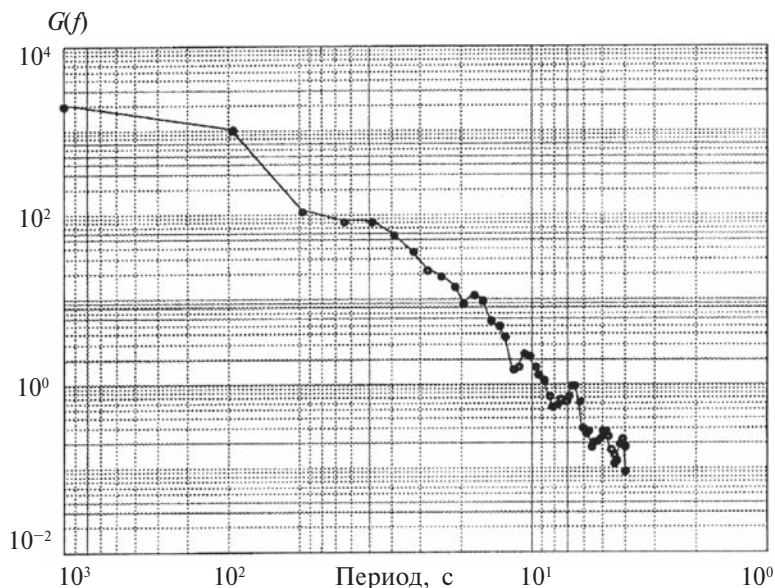


Рис. 4.1. Энергетический спектр ДА группового поведения $G(f)$ для второго типа иерархии биоритмов карповых рыб

Выявлена стимулирующая роль слабого переменного тока ($\bar{E} \approx 0,12 \div 0,16$ В/см, $\delta \approx 200$ мкА/м²), при котором формируется новый тип ориентационного поведения и ДА молоди *Carassius auratus* — сокращение периода съедания корма, увеличение энергии импульсов $G(f)$, сопряженной с ростом активности. Кроме того, стимулирующая роль $\bar{E}$ проявляется в увеличении длительности повышенной возбудимости рыб и свидетельствует об отсутствии адаптационного синдрома*.

*Автор глубоко признателен студентам СПбГУ В.С. Морозову и Е.О. Измайлову за помощь в статистической обработке большого массива данных (период обучения 1993–1997 гг.).

Попробуем соотнести работы по изучению поведенческого характера с биохимическими оценками роли ПемП в формировании механизма ответной реакции на гормональном уровне.

Так, мы видим, что исчезновение короткопериодных ритмов активности у рыб и появление новых, более длительных, должно свидетельствовать об определенной угнетающей роли ПемП и переходе животных к сноподобному состоянию. Можно предполагать, что такие явления также коррелируют и со снижением активности ферментов, катализирующих биосинтез мелатонина. К сожалению, большая разобщенность российских ученых, отсутствие кооперативного финансирования научных групп, нацеленных на решение весьма фундаментальных проблем общей биологии и физиологии человека, не позволили своевременно получить полноценный ответ о механизме действия ПемП на ЦНС рыб. Вспомните, что рассматриваемые результаты появились в 1996 г.

Безусловно, целесообразно в будущем провести комплексные работы по тщательному исследованию реакции эпифиза (и концентрации мелатонина у рыб) на действие ЭМИ 50 Гц в режиме длительного контроля. Это должно быть учтено. Следует также убедиться в “абсолютной безвредности воздействия переменного магнитного поля, меняющегося с частотой 50 Гц в пределах индукции $\vec{B} = 0 \div 5$ мкТл” [Дубовой Л.В. Влияние переменного магнитного поля на кинетику выживания мышей, больных раком молочной железы // Информ. журнал “Современные технологии”. 2001. № 7. С. 32–34]. Заканчивая обсуждение проблемы о роли НЧ ЭМП в активации гормонального статуса эпифиза, укажем на существование гипотезы антиканцерогенной роли этой важной железы в судьбе человечества [Анисимов В.Н., Жукова О.В. и др. Влияние светового режима и электромагнитных полей на канцерогенез молочных желез у самок крыс // Биофизика. 1996. Т. 41, вып. 4. С. 807–814].

4.1.3. Комбинированное действие экранирования биологических объектов и вариаций геомагнитного поля при скоростном движении

Отдельным вопросом техногенного влияния переменного магнитного поля на человека является проблема сохранения физиологической работоспособности и здоровья всей популяции Земного шара, подвергающейся скоростному перемещению в современном транспорте (авто, железнодорожный, авиа).

При движении в геомагнитном поле возникают электрические и магнитные поля индукционного происхождения. Например, летный экипаж и пассажиры всех классов летательных аппаратов во время

полета испытывают на себе колебания магнитного поля, которые сопоставимы или превосходят вариации геомагнитного поля во время самых сильных магнитных бурь. Аналогичное воздействие отмечено и на других видах транспорта, причем скоростному действию перемены геомагнитного поля подвергаются миллионы людей, да еще в условиях, когда по технологическим нормативам допускается широкое применение ферромагнитных материалов, усугубляющих ситуацию — перемещение в неоднородном магнитном поле вблизи ферромагнетиков.

Кроме отмеченной опасной роли ГМП и его аномалий при скоростном перемещении, последние научные публикации констатируют заметное воздействие СА, как определяющего, исходного межплатентного фактора опасности для здоровья авиаперсонала [Г.А. Усенко. Функциональные и резервные возможности организма высоко- и низкотревожных летчиков Западной Сибири и их связь с динамикой солнечной активности. Автореферат дисс. на соискание учен. степени д-ра физ.-мат. наук. Томск 1995 г].

Как ведут себя вариации магнитного поля на борту движущихся объектов? Поскольку металлические материалы, используемые при конструировании и изготовлении корпусов транспортных средств, как правило, не экранируют геомагнитное поле (Al, Ti, некоторые сплавы стали), оно проникает внутрь корпусов (за исключением специальной бронированной техники), а различные механические нагрузки приводят к так называемому “равновесию” с внешним магнитным полем и ведут к дальнейшему уменьшению экранировки летательных и других аппаратов. Поэтому, пренебрегая поправкой на экранирование, магнитное поле внутри транспортного объекта можно принять равным $\approx B_0$. Отсюда рассматривают лишь вклад B_0 — дипольного поля (главного геоцентрического диполя) и поля мировых аномалий, а также аномальные вклады МП, связанного с намагниченностью пород земной коры*.

Приближенные оценки вариаций МП на борту вводят, принимая во внимание, что для средних широт при перемещении к экватору ΔH увеличивается примерно на 4 нТл/км, а ΔZ уменьшается примерно на 7 нТл/км и при подъеме ΔH уменьшается примерно на 11 нТл/км и ΔZ примерно на 22 нТл/км [Яновский, 1978]. Аномальное поле, связанное с намагниченностью пород земной коры, является быстро меняющейся функцией координат; поэтому ее условно принимают независимой от времени как стационарную случайную функцию координат, независимую от времени, и характеризуют спектральной плотностью, дающей усредненное распределение энергии

*Об аномалиях ГМП см. [La Recherche, 2007, № 411, p. 13 и карту, рис.....цв., а также текст в настоящ. издании, разд. 4.3.2]

по частоте f . Для каждого региона $S(f)$ обладает своими характеристиками. Так, для европейской территории России на высотах ≈ 300 м среднеквадратичная величина ГМП, вызванная вышеупомянутыми аномалиями, составляет ≈ 180 нТл, т.е. порядка существенной магнитной бури. Для наземного транспорта при скорости движения $30 \div 90$ км/ч скорость изменения МП может достигать десятых долей нТл/с, а для воздушного — при $V = 1000$ км/ч скорость изменения МП достигает уже единиц нТл/с. Особенно велики градиенты МП в районах магнитных аномалий, где они могут достигать десятков-сотен нТл на 1 км. При полете над такой аномалией со скоростью ≈ 1000 км/ч скорость изменения МП на борту может достигать $10 \div 20$ нТл/с.

Поэтому вклад аномальных полей для наземного, водного и воздушного транспорта с небольшой и средней высотой полета — существенен. В итоге можно констатировать, что изменения МП, обусловленные аномалиями ГМП и пространственной неоднородностью самого нормального поля (главного геоцентрического диполя), напоминают магнитные бури и бухтообразные возмущения ГМП. Это сходство особенно проявляется в тех случаях, когда имеют место резкие изменения высоты, скорости и направления полета. Для справки можно указать, что на борту космического корабля максимальная величина вариаций МП может достигать десятков тысяч нТл, т.е. средняя скорость изменения МП заключена в пределах от 1,5 до 22 нТл/с*.

Таким образом, параметры ЭМП, возникающих вследствие движения в ГМП, могут быть биологически значимы, а масштабы их воздействия сравнимы с воздействием естественных МП и антропогенных ЭМ полей. И эта особенность в условиях технологического прогресса может модифицировать естественный ход и механизм солнечно-земных связей так, что можно столкнуться со слабой выраженностью этих связей, особенно применительно к человеку. Отсюда не исключено появление перенапряжения компенсаторных способностей на самом глубоком уровне, несмотря на внешнее кажущееся благополучие (т.е. отсутствие нежелательных реакций на те или иные естественные воздействия).

Определенным сигналом об этом является распространенность в развитых странах заболеваний, связанных с нарушением наиболее тонких процессов обмена и регуляции.

*Для сравнения вспомните годовые и вековые изменения ГМП (дрейф по широте), обусловленные нестабильностью планетарного саморегулирующего динамо (разд. 1.2).

4.1.4. Новая проблема экологической роли сильных техногенных ЭМП, обусловленная “незаявленной деятельностью по обогащению урана электромагнитным методом”

Эта проблема тревожит мировое сообщество ввиду того, что в настоящее время существует опасность использования устаревшей технологии электромагнитного разделения изотопов с помощью *калутронов* для обогащения урана*. Калютроны были разработаны в США во время второй мировой войны, и угроза, которую они представляют даже при режиме нераспространения, была недооценена. Сложность задачи состоит в том, что требуется комплексное рассмотрение функций ионизирующего и неионизирующего излучения: выявление “незаявленной деятельности по обогащению урана электромагнитным методом”.

“Назначение электромагнитного метода обогащения. Калютрон представляет собой масс-спектрограф, в котором ионы урана, ускоренные потенциалом в несколько десятков киловольт, движутся в однородном магнитном поле по круговым траекториям, совпадающим для частиц с одинаковым отношением массы к заряду. Пучки ионов $^{235}\text{U}^+$ и $^{238}\text{U}^+$ расходятся на максимальное расстояние на другом конце диаметра по отношению к ионному источнику, там и располагаются ловушки. При разделении изотопов на электромагнитных установках коэффициент обогащения исключительно высок”*. Именно на калютронах был наработан оружейный уран для бомбы, сброшенной на Хиросиму. Поскольку в основе традиционного методологического подхода к обнаружению незаявленной ядерной деятельности лежит поиск частиц с максимальным содержанием ^{235}U , которое связано с отходами производства, то именно информация об этой связи подтверждает использование калютронов. Эта трудоемкая задача под силу только мировому сообществу, которое может наладить действенный контроль над тайным производством ядерного оружия.

Резюмируя изложенное, отметим, что проблема взаимодействия биосистем с абиотическими факторами среды обитания неизбежно затрагивает вопрос об энтропийности этих компонентов биосферы Земли, ее отдельных экосистем. Биологические объекты как саморазвивающиеся и самоорганизующиеся системы характеризуются необратимыми (неравновесными) процессами с рассеянием энергии при функционировании. Следствием

*Русская транскрипция английского слова *calutron* — аббревиатура от словосочетания “*California University Cyclotron*”. В калютронах использован электромагнит, которым оснащен один из циклотронов этого университета [Вениаминов Н.Н. Обнаружение незаявленной деятельности по обогащению урана электромагнитным методом // Вестник РАН. 2004. Т. 74, № 1. С. 37–41].

этого является возрастание энтропии адиабатически изолированных систем. При этом не обязательно, чтобы возрастала энтропия каждого из компонентов, участвующих в процессе. Известно, что в статистической физике энтропия системы связывается с вероятностью осуществления некоторого макроскопического ее состояния. При наличии флуктуирующих процессов, которые характерны для макросистем Космос—Земля, биосфера—организм и для большого промежутка времени, системы переходят из более вероятного состояния в менее вероятное, и их энтропия уменьшается. Энтропия системы (по законам статистической физики) тесно связана с информационной энтропией, которая служит мерой неопределенности сообщений. Информационная энтропия, как мы полагаем, отражает информационную роль взаимодействия ЭМП с биологическими системами [Волькенштейн, 1986]. Флуктуации в системах заряженных частиц (например, в низкочастотных импульсных сложномодулированных ЭМП) проявляются как хаотические изменения потенциалов, токов или зарядов; они обусловлены как дискретностью электрического заряда, так и тепловым движением носителей заряда [ФЭС. 1983. С. 812—819, 903—905]. В этом случае реально возникает возможность передачи информации от источника поля к живому организму [Szmigielski, 1993]. Теория “информационного” взаимодействия ЭМП и биологических объектов (включая человека) находится в настоящее время в стадии становления. В научном сообществе она не получила всеобщего признания, хотя отрицание как сигнальной роли, так и регулирующего действия низкочастотных ЭМП, как мы показали в данном обзоре, вряд ли целесообразно.

Дальнейшие наукоемкие и тонкие эксперименты должны дать если не исчерпывающие, то, по крайней мере, пригодные для практического использования ответы на поставленные вопросы.

Например, о роли гипермагнитного поля свидетельствует эксперимент в лаборатории реактивного движения NASA (США), где давно занимаются исследованием воздействия невесомости на астронавтов. Последнее достижение — охлаждаемый жидким гелием сверхпроводящий магнит, создающий МП до примерно 17 Тл и способный “подвесить” небольшое животное (мышь) за счет взаимодействия сильного МП с частицами природного магнетита в теле объекта. Мышь массой примерно 10 г помещают в цилиндр $\varnothing 70$ мм, где поддерживается комнатная T° . По мнению экспериментаторов, в течение 4 ч свободного подвешенного нового состояния животное к нему адаптируется. Пологают, что результаты таких опытов помогут в будущем бороться с ослаблением костного скелета, которое возникает у человека в ходе длительного пребывания в условиях невесомости [Популярная механика, № 1, 2010. С. 12].

4.2. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ УЯЗВИМОСТЬ ВОДОЕМОВ И ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ ВОДНЫХ ОРГАНИЗМОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

- 4.2.1. О проблеме чистой воды**
- 4.2.2. Электрическое поле гетерогенных водных масс,
содержащих искусственные примеси**
- 4.2.3. Способ контроля качества воды по ее
электрофизическим показателям**
- 4.2.4. Экологическое состояние озер Северо-Западного региона
России по результатам электрометрического контроля**
- 4.2.5. О внедрении результатов исследования техногенных
стационарных и флуктуирующих электрических полей
на акваториях для решения навигационных и
народнохозяйственных задач**
- 4.2.6. Перспектива развития электрофизических методов
исследования водоемов и разработки новой аппаратуры**

В первых двух разделах книги было показано удивительное многообразие факторов и причин — источников, обуславливающих электрическую неоднородность водной среды. Очевидна также неравноценность, неравномерность изученности электрических явлений, вызванных тем или иным фактором или их совокупностью. Это закономерно и зависит от той практической значимости явления, которая придается ему в тот или иной период развития науки. Примером могут служить электрические явления гидродинамической природы и биоэлектрические поля. Первые изучались достаточно обстоятельно на протяжении 150 лет и получили дополнительное стимулирование ввиду конкретных требований практики: геоэлектрические методы обнаружения полезных ископаемых на шельфе и в абиссальных частях океана могут быть эффективны лишь при учете помехозащищенности аппаратуры от внешних электрических полей гидродинамической природы. Вторые испытали длительный этап становления — признание и отрицания в науке, в результате чего надолго задержались развитие биоэлектрических методов и их применение в различных разделах биологии и биофизики. И только в самые последние годы электрическим и магнитным полям живых систем и объектов стали уделять достаточно серьезное внимание и создавать аппаратуру и методы их изучения и применения в практических задачах (медицина,

растениеводство, цитология, молекулярная биология и т. д.). Методы электрометрии в гидрофизике и гидрологии также еще не нашли повсеместного и широкого применения, и в этом повинны определенный научный консерватизм и недостаточная информация о возможностях ее как для полевых, так и для лабораторных исследований дисперсных систем.

4.2.1. О проблеме чистой воды

Пресная вода в общем объеме водных ресурсов Земли составляет менее 2,5 %, почти 6 % всей пресной воды потребляется человечеством на разные нужды. К 2000 г. эта цифра достигла почти 14 % (более точных данных у автора нет). При том, что был введен экологический регламент на водопользование, на обеспечение только промышленности был израсходован чуть ли не весь годовой сток рек мира. В той или иной степени экологическое нормирование для водопотребления введено в большинстве развитых стран, и тем не менее губительное влияние промышленного и сельскохозяйственного производства констатируется повсеместно. Так, например, только в штате Нью-Джерси (США) 212 озер полностью лишены признаков животной и растительной жизни, 256 водоемов этого района находятся под угрозой. Все это является результатом высокой концентрации кислот в воде.

Экологический подход к регулированию качества окружающей среды и в первую очередь воды в нашей стране был положен в 1937 г. введением первого ГОСТа “Вода питьевая” — основного документа водно-санитарного законодательства СССР*. Ранее Европа такого стандарта не знала. Впервые неопределенное понятие “чистая вода” обрело строго научное качественное выражение. ГОСТ неоднократно пересматривался и совершенствовался, и в настоящее время в это законодательство по рекомендации института общей и коммунальной гигиены им. А.Н. Сысина АМН СССР включено более 800 регламентов (ПДК) загрязнителей химической этиологии для воды водоемов, свыше 400 — для атмосферного воздуха, около 30 — для почвы. Обоснованы и допустимые уровни воздействия факторов физической и биологической природы. Однако уже в конце 60-х годов наступает новый этап в экологической

*До 2004 г. действовал ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая». С 1 июля 2004 г. в России вступил в действие новый ГОСТ 52109-2003 “Вода питьевая, расфасованная в емкости. Общие технические условия”.

регламентации, обусловленный бурным развитием всех отраслей промышленности и сельского хозяйства, энергетики и транспорта, растущей урбанизацией. Резко возросло число новых загрязнителей среды, интенсивность действия различных их концентраций стала более многообразной и трудно учитываемой.

Гигиеническая регламентация факторов окружающей среды с жесткой необходимостью должна в настоящее время уступить место экологическому нормированию допустимого содержания загрязняющих веществ в естественных условиях, соответствующему экологически допустимым ответным реакциям биоты на воздействие загрязняющего фактора [Богуславский, Ягужинский, 1975]. Таким образом, ставится задача фундаментального изучения общих закономерностей биологического действия различных факторов окружающей среды на основе зависимости “доза—время—эффект”. В конечном счете должна быть обоснована методология единого гигиенического нормирования и установления максимально допустимых нагрузок на биоту. В первую очередь ставится задача разработки ускоренных методов гигиенической регламентации химических загрязнителей. В воде это ионы солей тяжелых металлов, анионоактивные компоненты полимеров, растворенные ПАВ, ВМС и т. д. — источники электрического поля электрохимического потенциала. Эти поля устойчивы во времени и пространстве, изменяют естественный фон электрического поля акваторий, оказывают экологическое воздействие на биосферу (см. ч. 2 и 3). Это нетрадиционный абиотический фактор, существовавший всегда, но не учитываемый ранее и не изучавшийся, но способствующий изменению экологических условий, а следовательно, изменению лимнических экосистем, биотопа и т. д. Однако вопрос о физико-химическом (электрофизическом) критерии чистой воды, видимо, не может считаться решенным до конца.

Проблема чистой воды возникает там, где, казалось бы, ее не должно быть — в физической лаборатории. Эта проблема связана с фундаментальным свойством воды — ее высокой растворяющей способностью. Это ее свойство приводит к тому, что в лабораторном эксперименте участвует не чистая вода, а некоторый ее раствор, концентрация которого зависит от степени очистки и может быть весьма низкой. Физические характеристики такого раствора практически не отличаются от таковых в чистой воде. Тем не менее, некоторые из них, и в первую очередь электрические, могут значительно отличаться от характеристик воды более высокой степени очистки [Наука о коллоидах, 1955, с. 3—10].

Поскольку примеси, как правило, случайны, то свойства исследуемой воды могут неконтролируемо меняться. Это часто приводит к недоразумениям, “открытиям различных эффектов” и бесплодным спорам. Целая серия работ, в которых рассматриваются якобы изменяющиеся свойства воды после внешних физических воздействий, не учитывает возможного фактора загрязнения экспериментального образца воды и его химической реакции на воздействие. Например, после воздействия на воду ионизирующего излучения получается уже не чистая вода, а раствор продуктов радиолиза. Таким образом, в эксперименте следует учитывать время оседлой жизни для воды, в течение которого могут совершаться процессы структурной перестройки ее ($\sim 10^{-11}$ с), и если период физического воздействия, после которого система возвращается в первоначальное состояние, больше 10^{-8} с, можно ожидать изменения свойств воды против исходных за счет появления образца нового химического состава.

Тем более непростым оказывается вопрос об электрофизических свойствах воды в открытой экосистеме, когда время воздействия на ее компоненты факторов различной физической и химической этиологии исчисляется практически всем диапазоном частот техногенного и естественного электромагнитного излучения и взаимодействия полей. Именно поэтому нормативы ПДК должны учитывать комплексный экологический подход, причем регламентация должна вестись не по водоему в расчете на процессы самоочищения (мы покажем позже, что такая точка зрения научно не обоснована), а непосредственно в сточных водах. Экологические условия должны быть чисты для продуцентов, которые находятся в начале биогеохимических циклов и пищевых (трофических) связей, а они-то несопоставимо чувствительнее по восприятию внешних воздействий, чем человек и высшие животные. Поэтому качество среды, ПДК и другие критерии состояния биосферы должны устанавливаться для нее в целом по наиболее чувствительным автотрофным организмам (продуцентам) и по наиболее чувствительным у них процессам (например, по фотосинтезу) [Николаевский, 1981]. Но поскольку в условиях развития цивилизации нельзя исходить из критерия об “абсолютном качестве среды”, необходимо признать такое ее качество (состав, свойства, чистота и другие характеристики), которое не вызывает ощутимых нарушений в функционировании организмов, экосистем, биохимических циклов биосферы, а обеспечивает ее устойчивость и бесконечное существование и развитие.

Электромагнитная нагрузка на биосферу может быть оценена с точки зрения “возмущающего” воздействия, которое должно вызвать такое искажение природного фона (уровня) электрического и магнитного полей, в результате которого биологические объекты (на всех уровнях) по своей ответной реакции на него могут быть расценены как в состоянии патологии. Однако этот вопрос весьма сложен, и, по всей вероятности, в настоящее время дать готовые рекомендации не представляется возможным, поскольку влияние следует оценить по линии генетических мутаций, адаптации, рецепторной перестройки и т. д. Помимо этого, неясным остается вопрос о критерии “нормального поля” (см. разд. 2.4.1), так как с учетом понятия “вторичной природы” или отсутствия “норм чистой природы” критерий этот остается расплывчатым. По крайней мере, потребуется введение вероятностной оценки состояния “нормального уровня электромагнитного поля”*. Но ставить этот вопрос нужно уже теперь с полным основанием, поскольку данные по реакции живых объектов на воздействие электромагнитных полей различных частот и напряженностей имеются.

Вопросы воспроизводства биоресурсов, прогноза состояния озер и рек, подверженных антропоферному воздействию, не могут полноценно решаться без учета предельно допустимых уровней электромагнитных, электрохимических и других электрофизических показателей воздействий на экосистему в целом.

Внедрение электрометрических методов в практику гидрофизических работ осуществлялось автором в 1965 г. на акватории залива Рыбный Ладожского озера. По времени эти работы совпали с завершением прокладки новой трассы трубопровода и с выпуском сточных вод Приозерского целлюлозно-бумажного завода (ПЦЗ) в Ладожское озеро через оз. Дроздово, бухту Щучью и залив Рыбный. С этого момента началось последовательное загрязнение акватории, куда ежесуточно поступало около 160 тыс. кубометров сточных вод, содержащих более 400 т инородных веществ (около 100 компонентов ядовитых загрязнителей).

В 1966–1967 годах нами были обнаружены существенные изменения качества ладожской воды. Выявлены резкое повышение удельной электрической проводимости воды и формирование локального электрического поля в зоне загрязнения. Эти результаты

*По всей вероятности, следует ставить вопрос и об определении понятия “нормальное поле” с учетом главных компонентов внешних и внутренних источников генерации поля.

обусловили необходимость осуществления контроля крупных акваторий, подвергающихся загрязнению сточными водами целлюлозно-бумажных предприятий.

В этом разделе ставится задача показать исключительную ранимость природных водных экосистем на примере крупных озер Северо-Западного региона России, подвергавшихся антропогенному воздействию, показать, что слабопроточные водоемы не могут быстро восстанавливать свою жизнедеятельность и качество воды за счет естественного самоочищения.

4.2.2. Электрическое поле гетерогенных водных масс, содержащих искусственные примеси

Электрокинетические явления в гетерогенных водных массах

Электрокинетические явления в жидкости открыты в XIX столетии. Электроосмос и электрофорез в 1808 г. экспериментально обнаружил Ф.Ф. Рейсс. В 1859 г. Георг-Герман Квинке открыл явление, обратное эффекту электроосмоса, — фильтрационно-электрическую разность потенциалов, возникающую при течении жидкости через пористую диафрагму или соответственно под влиянием создаваемого извне перепада давления (потенциал течения). В 1880 г. Е. Дорн обнаружил эффект, обратный электрофорезу, — возникновение разности потенциалов под влиянием механического движения твердых частиц в жидкости (потенциал оседания). Эта группа электрических явлений в жидкостях объединяется общим названием — электрокинетические явления. Теория их была разработана Гельмгольцем (1879 г.) и Смолуховским (1921 г.).

В гидрологических задачах, связанных с электрокинетическими явлениями, очевидно, основной интерес представляют эффекты Дорна и Квинке, поскольку уже с 70-х годов прошлого столетия стало ясно, что соответственно обнаруженным явлениям существуют поверхностные заряды на межфазных границах, и это является, скорее, правилом, нежели исключением. Эффект Квинке линейно зависит от объемной скорости фильтрации, т. е. его характеристика обусловлена отношением измеряемой разности потенциалов к объемной скорости фильтрации. Количественное описание седиментационного потенциала (или потенциала оседания) Дорн впервые продемонстрировал в опыте с трубкой, заполненной дистиллированной водой, при центрифугировании суспензии кварца, а позже показал, что контакт практически каждого неорганического или органического вещества с жидкостью, особенно

с дистиллированной водой, сопровождался возникновением поверхностного заряда на частицах [Духин, 1975]. Квинке ввел последовательное представление об электрическом строении межфазной границы. В результате контакта двух фаз электрические заряды не возникают и не исчезают, а только перераспределяются между фазами, поэтому граничащие фазы обладают равными, но противоположными по знаку зарядами. Образовавшаяся система зарядов получила наименование двойного электрического слоя (ДЭС). Возникшая разность потенциалов между твердой поверхностью и жидкостью (с соответствующим зарядом и его знаком) зависит от структуры поверхности твердой фазы и свойств жидкости.

В природных условиях двойной электрический слой обнаруживается при контакте воды с различными органическими и минеральными веществами, как находящимися в диспергированном состоянии, так и включенными в состав горных пород, слагающих береговую зону и донные отложения. В этих условиях мы наблюдаем смещение жидкой фазы относительно твердой или наоборот, что сопровождается переносом зарядов, связанных с фазой, возникает электрический ток — перераспределение зарядов в тангенциальном направлении, возникает разность потенциалов. Если происходит перемещение жидкости относительно неподвижной твердой поверхности — наблюдается потенциал течения, если передвигаются твердые частицы в воде — наблюдается эффект Дорна. Следует отметить, что эффект Дорна может проявляться не только при осаждении взвесей, но и при их всплывании в зависимости от разности плотностей движущихся частиц и окружающей жидкости (воды). Это может наблюдаться также и при естественной флокуляции — при адсорбировании пузырьков газов на поверхности взвесей.

Гетерогенные водные массы. Для гетерогенных систем, образующихся в природных водоемах за счет либо естественных, либо искусственных источников притока вещества, характерна ярко выраженная физико-химическая неоднородность по сравнению с водой озера. Следует отметить, что такие природные системы занимают своеобразное промежуточное положение между сугубо гетерогенными и гомогенными системами, поскольку молекулярные растворы могут быть частично диссоциированы (слабые электролиты, диссоциация $\approx 3\%$), а при ассоциации частиц они приближаются к коллоидным растворам. Промежуточное положение между коллоидными и молекулярными растворами занимают и высокомолекулярные соединения, которые при наличии ионогенных групп способны при определенных условиях обмениваться

подвижными ионами с окружающим раствором. Гетерогенные и гомогенные системы могут поэтому характеризоваться электрическими явлениями.

В соответствии с принятой классификацией гетерогенных систем [Равич-Шербо, Новиков, 1975] в группу взвесей с размером диспергированных частиц более 10^{-5} см входят суспензии, эмульсии, планктон, микроорганизмы, мало растворимые гидроокиси металлов, взвеси органических веществ и другие нерастворимые вещества (с размерами частиц до 10^{-2} см).

Гетерогенные водные массы в озерах, формирующиеся за счет поступления инородных примесей, не свойственных водоему и связанных со сточными водами промышленного или сельскохозяйственного производства, как правило, токсичны. При взаимодействии с чистой озерной водой они плохо трансформируются и долго сохраняют свои свойства. В значительной мере эти свойства могут быть охарактеризованы электрокинетическими явлениями, а сами водные массы обнаружены электрополюметрическим методом непосредственно в полевых условиях. Так образуются электрические поля градиента концентрации в зоне вторжения гетерогенных водных масс в чистую озерную воду.

Сточные воды целлюлозного производства обычно подвергают биологической или более сложной многоступенчатой очистке (химической, фильтрованию через песчаные фильтры и т.д.). Однако даже при многоступенчатой очистке сточные воды сульфатцеллюлозного производства имеют цветность в пределах $55 \div 70$ градусов по бихромат-кобальтовой шкале, а величину химического потребления кислорода (**ХПК**) немногим ниже $60 \div 75$ мг O_2 /л [Справочник химика-энергетика, 1972]. Фильтрационно-адсорбционные установки из зернистых активных углей также плохо поглощают содержащиеся в них высокомолекулярные органические вещества. Так, сточную воду байкальского ЦБК удалось с помощью активированных углей довести до $30 \div 35$ мг O_2 /л по ХПК [Сокольников, Семенов, 1981]. Независимо от способа производства (сульфитный, сульфатный) в сточной воде находятся ионные, коллоидные и взвешенные органические и минеральные компоненты. К ним относятся: высокодисперсная целлюлоза и минеральные наполнители (каолин, бентонит, мел, асбест и др.), сахара, дрожжи, лигнин, фенол, шламы-коагулянты, состоящие из целлюлозы и гидроксидов металлов, поверхностно-активные вещества (**ПАВ**), красители, меркаптаны и другие органические вещества, трудно поддающиеся биологической деструкции [Медведев, 1981]. Таким образом, с поступлением в озера сточных вод создаются предпосылки для

возникновения новых, несвойственных природному объекту, водных масс. В гидрофизических исследованиях проблемой загрязнения воды стали заниматься сравнительно недавно, поэтому предложенный в 1969 г. метод электрометрического контроля качества воды в озерах, подверженных воздействию сточных вод, конкретно осуществлен пока в рамках научно-исследовательской разработки.

Многокомпонентная дисперсная жидкая масса, поступающая в озеро, обладает собственными электрокинетическими характеристиками, которые обуславливают ее резкое отличие от чистой озерной воды. В зоне соприкосновения загрязненных и условно чистых вод и их перемешивания во всем объеме акватории создается своеобразная локальная область, формируются новые водные массы. Возникают устойчивые искусственные водные образования, исчисляемые тысячами кубометров. По их электрическим свойствам имеется возможность приближенно обнаружить загрязненные участки воды, проследить динамику их на акватории, качественно оценить степень разбавления, а практически показать с учетом, по крайней мере, физических критериев границу их распространения в озерах.

При внедрении потока загрязненной сточной воды в озеро одновременно начинают протекать различные физико-химические процессы, связанные с взаимодействием загрязняющих веществ и воды. В этой зоне основную роль играют такие явления, как изменение концентрации сточной воды при разбавлении, взаимная диффузия сточных и озерных вод, адсорбция ионов на твердых частицах и коллоидных взвешях, коагуляция и др. Все они сопровождаются электрокинетическими явлениями, процессами перераспределения зарядов в ионизированных слоях. В конечном счете эти процессы сопряжены с образованием разности потенциалов между зоной загрязнения и зоной с условно чистой водой, которая тем больше, чем ярче выражены перечисленные электрохимические явления в области загрязнения, и которая может быть зарегистрирована простым двухэлектродным зондом. При внедрении в озеро потока с примесями сразу же возникает разница в концентрации растворенных и взвешенных веществ во всем объеме раствора. Одновременно наблюдается взаимодействие частиц растворенных веществ друг с другом и взаимодействие их с растворителем. При растворении и разбавлении сточных вод образуются сильные электролиты в разбавленном растворе. Вследствие разности концентрации создается диффузионный поток ионов в растворитель. Неодинаковая скорость движения катионов и анионов приводит к нарушению электрической нейтральности раствора и к возникновению поля напряженностью dE/dx :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{(v_o - u_o)}{(u_o + v_o)} \frac{RT}{zFC} \left(-\frac{dC}{dx} \right), \quad (4.1)$$

где u_o и v_o — подвижности катионов и анионов при напряженности поля 1 В/см; dC/dx — градиент концентрации в направлении диффузии; z — заряд ионов; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура и F — число Фарадея. Разность потенциалов между двумя находящимися в контакте ионными растворами разной концентрации возникает в результате диффузии ионов из более концентрированного раствора в менее концентрированный. Как только ионные силы обоих растворов становятся равными, эта разность потенциалов исчезает. Поскольку скорость диффузии катионов и анионов различна, то нарушается электрическая нейтральность в растворе. Появляется слой, обогащенный катионами, расположенный непосредственно рядом со слоем, обогащенным анионами. Очевидно, что это обогащение ионами одного знака должно вызвать скачок потенциала, препятствующий дальнейшему изменению концентрации ионов. Этот скачок потенциала на границе получил название *диффузионного потенциала*. Теория дает уравнение для ЭДС диффузии, аналогичное концентрационному потенциалу с той лишь разницей, что отношение концентрации берется под знаком логарифма. При равенстве подвижностей аниона и катиона нет диффузионного скачка потенциала. Знак диффузионного поля определяется соотношением подвижностей анионов и катионов. Ею также определяются заряд пограничного слоя и объемный заряд каждого из соприкасающихся растворов. Как правило, знак заряда менее концентрированного раствора совпадает со знаком заряда более подвижного иона, например водородного. Таким образом, сточные промышленные воды будут характеризоваться более отрицательным потенциалом, а условно чистая вода — более положительным. Следует отметить, что диффузионный потенциал возникает и при соприкосновении растворов одинаковой концентрации, но различного состава.

Коллоидные примеси, находящиеся в сточных водах целлюлозного производства, позволяют рассматривать их как гетерофазную систему, в которой вода является дисперсионной средой, а масса распределенных в ней коллоидных частиц — дисперсной фазой. Большая удельная поверхность коллоидных частиц обуславливает значительную поверхностную энергию, а следовательно, высокую адсорбционную емкость. Твердая частица адсорбирует из раствора потенциалобразующие ионы, ее поверхность приобретает заряд. В совокупности с противоионами раствора возникает ДЭС,

потенциал которого соответствует границе скольжения, разделяющей перемещающиеся друг относительно друга частицы. При движении коллоидной частицы окружающий ее диффузный слой противоионов отрывается, частица становится отрицательно заряженной, а внешний раствор заряжается положительно. При этом возникает скачок потенциала между областью жидкости, увлекаемой коллоидной частицей, и остальным раствором. Это — электрокинетический, или дзета-потенциал, вычисляемый по уравнениям Гельмгольца—Смолуховского или Генри.

Отходы целлюлозного производства содержат в большом количестве поверхностно-активные вещества, образующие со сточной водой, а впоследствии и с водой озера гетерогенную систему. П.А. Ребиндер считал, что с поверхностными свойствами ПАВ тесно связаны их объемные свойства, по которым все эти вещества делятся на две большие неравноценные по практической значимости группы — истинно растворимые в воде и коллоидные (мылоподобные). Как и в коллоидных растворах, в растворах ПАВ наблюдается мицеллообразование [Ребиндер, 1978; Кульский, 1980]. Мицеллы ионогенных ПАВ электрически заряжены вследствие диссоциации полярных групп. Благодаря сильному электростатическому притяжению часть противоионов (около $60 \div 70$ %) удерживается у поверхности мицеллы, остальные располагаются в прилегающем слое жидкости, образуя диффузный электрический слой. В целом мицелла может рассматриваться как своеобразный крупный многозарядный ион (обычно он имеет $20 \div 30$ электрических зарядов). Такие заряженные мицеллы участвуют в переносе электрического тока, хотя их подвижность и меньше, чем подвижность неагрегированных ионов. Сточные воды целлюлозного производства содержат в основном анионоактивные ПАВ, которые в воде образуют отрицательно заряженные поверхностно-активные ионы (анионы). К ним относятся алкилсульфаты (соли алкилсерных кислот), алкилсульфонаты (соли алкилсульфоновых кислот), соли тиосульфокислот и др.

Устойчивость и трансформация вод, содержащих примеси

Важнейшим вопросом поведения загрязненных водных масс (сточных вод) является устойчивость и трансформация их в ходе физико-химического взаимодействия с дисперсионной средой (условно чистой водой).

Потоки загрязненной воды обладают устойчивостью. Кратко механизм устойчивости можно представить следующим образом.

В процессе разбавления и понижения концентрации ионов электролитов и ионогенных групп ПАВ следует ожидать усиления процесса гидратации ионов, в результате чего повышается гидрофильность системы. Это будет препятствовать слипанию частиц при электролитной коагуляции, коллоидные частицы не смогут сближаться на расстояния, при которых энергия их взаимного притяжения превышает энергию теплового (броуновского) движения и энергию электростатического отталкивания. В этом случае толщина двойного диффузного слоя на частицах увеличивается, дзета-потенциал возрастает, коагуляция не наступает. Устойчивость системы возрастает. Значение гидратных слоев объяснено Б.В. Дерягиным [Дерягин, 1967], который установил, что для сближения коллоидных частиц необходимо затратить работу на преодоление сил электростатической составляющей так называемого “расклинивающего давления” в ДЭС.

Помимо этого, гидрофильность увеличивается за счет разбавления, а также за счет влияния ПАВ. Полярные группы адсорбированных молекул ПАВ обращены в сторону дисперсионной среды. Работами академика П.А. Ребиндера с сотрудниками установлено, что ориентация приобретает особое значение при образовании молекулами ПАВ в адсорбционных слоях двухмерных гелеобразных структур, обладающих повышенными структурно-механическими свойствами [Ребиндер, 1978].

Коллоидные частицы гидрофильных органических коллоидов представляют собой агрегаты длинных цепных молекул, связанных в рыхлый клубок, в котором промежутки заполнены водой. Устойчивость гидрофильных коллоидов объясняется развитой гидратной оболочкой. Гидратная оболочка образует граничную фазу, состоящую из молекул дисперсионной среды. У полярных групп молекул, образующих коллоидные гидрофильные частицы, например, у групп OH^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- и других, молекулы воды, представляющие собой диполи, ориентируются и притягиваются в результате электростатического взаимодействия. По мере удаления от поверхности полярных молекул ориентация молекул воды ослабевает. В этом заключается так называемый сольватационный фактор устойчивости.

Возникновение адсорбционного слоя постороннего электролита приводит к тому, что между коллоидными частицами кроме сил молекулярного притяжения начинают одновременно действовать электростатические силы отталкивания. На поверхности коллоидных частиц образуется двойной электрический слой, и при достаточном сближении одноименно заряженных частиц возникают

электростатические силы отталкивания. Это так называемый электростатический фактор агрегативной устойчивости [Воюцкий, Панич, 1974].

Устойчивость искусственно загрязненных водных образований поддерживается гидрофильными свойствами коллоидов природных вод. Кроме того, если в макромолекулах постороннего раствора имеются ионогенные группы, то адсорбция таких молекул может привести к повышению заряда коллоидных частиц и отсюда к усилению их электростатического отталкивания, т.е. к повышению агрегативной устойчивости. Растворы, содержащие ПАВ, в молекуле которых имеется сульфогруппа, устойчивы и в щелочной, и в кислой среде, поскольку сульфокислоты являются сильными электролитами [Воюцкий, Панич, 1974].

Устойчивость ионогенных ПАВ зависит от противоионов постороннего электролита, наличие которого обуславливает явление *трансформации сточных вод* (именно физико-химический аспект без учета окисления и влияния гидрометеорологических факторов). Наблюдаются два различных эффекта, проявляющихся в снижении устойчивости гетерогенной системы [Нейман и др., 1972]. Во-первых, посторонний электролит частично дегидратирует полярные группы ионов ПАВ, так как он связывает воду за счет гидратации своих ионов. Уменьшение гидратации ионов ПАВ повышает их склонность к ассоциации. Во-вторых, посторонний электролит уменьшает эффективную степень ионизации поверхностно-активного (первоначального) электролита как в истинном растворе, так и в мицеллярном состоянии.

При биохимическом окислении анионоактивные ПАВ подвергаются деструкции в природных водах в течение длительного периода (например, алкилбензолсульфонаты — до $30 \div 90$ суток) [Процессы..., 1978]. При достаточно высоких концентрациях детергентов (примерно 0,5 мг/л и выше) скорость реакции распада снижается в основном за счет образования мицелл пластинчатого типа, построенных из слоев ориентированных молекул, причем гидрофильные группы образуют одну поверхность слоя, а углеводородные группы — другую. В мицеллах слои расположены так, что полярные группы обращены одна к другой, а расстояние между слоями соизмеримо с расстоянием между углеводородными цепями в твердой фазе, это, естественно, затрудняет биохимическое разрушение молекул.

Коллоидные частицы (особенно органические) в естественных условиях оказываются окруженными пленкой ориентированных молекул воды, которые поддерживают их стабильность.

Большинство коллоидов природных вод заряжено отрицательно.

Вопрос о знаке заряда водных масс, содержащих примеси отходов целлюлозного производства, сложен, поскольку экспериментальные данные противоречивы, а реальные дисперсные системы являются системами смешанного типа, состоящими из частиц различной химической природы [Электроповерхностные явления..., 1972]. Основным составом сточных вод являются отрицательно заряженные органические смеси [Равич, Шербо, 1975]. При искусственной коагуляции суспензий в процессе промышленной очистки, например, сульфатом аммония, сточные воды содержат положительно заряженные окрашенные частицы загрязняющих веществ [Сокольников, Семенов, 1981]. С другой стороны, при дополнительной очистке этих же вод от веществ, обуславливающих остаточное химическое потребление кислорода (ХПК), применяли контактный анионообменный фильтр, заполненный анионом АВ-17 в ОН⁻-форме; нулевое значение ХПК фильтра при окончании процесса очистки является косвенным показателем того, что трудноудаляемые, истинно растворенные органические примеси, попадающие в озера, обусловлены анионами. Поэтому смешанную дисперсную систему, компоненты которой заряжены противоположно, следует рассматривать в отношении заряда поверхности как систему с мозаичной структурой, в которой присутствуют заряды обоих знаков. Наличие зарядов обоих знаков должно определенным образом влиять на строение двойных электрических слоев, окружающих частицы смешанной системы [Электроповерхностные..., 1972].

Следующим важным моментом в вопросе о знаке электрического поля загрязненной воды является учет влияния рН среды. Сточные воды целлюлозного производства на выходе имеют кислые свойства (рН = 6,5 и менее). В работе Ю.М. Чернобережского и Л.Н. Кулешиной [Электроповерхностные..., 1972, с.31] сказано, что «суспензии, содержащие частицы, дзета-потенциал которых отрицателен, являются более кислыми, чем равновесный раствор ($\Delta \text{pH} < 0$); если же дзета-потенциал частиц положителен, то наблюдается щелочной суспензионный эффект ($\Delta \text{pH} > 0$)». По официальным данным, дзета-потенциал по отношению к воде при рН среды 6,0 ÷ 6,2 равен -7,3 мВ для сульфатной целлюлозы и -4,1 мВ — для сульфитной [Справочник химика, 1967].

Анализируя библиографические данные о свойствах систем смешанного типа и сопоставляя наши непосредственные измерения электрического потенциала загрязненной водной массы по отношению к условно чистой воде, можно сделать вывод о том, что

участки загрязненной воды, содержащие примеси отходов производства целлюлозных предприятий, заряжены отрицательно по отношению к условно чистой воде. Это водная загрязненная масса по сути дела не однородна, а переслоена участками с более чистой водой, в пространстве на акватории она проявляется как аномальная гетерогенная система. Локальное электрическое поле этой системы отрицательно по отношению к полю условно чистой воды и обнаруживается типовой электроизмерительной аппаратурой.

Вопрос об устойчивости и трансформации гетерогенных систем, возникших в процессе поступления сточных вод в озера, тесно связан с взаимодействием молекул целлюлозы и ее производных с природными растворителями. Остатки целлюлозы и ее производных, находящиеся в сточной воде, подвергаются деструкции в озерной воде. Растворимость и конформация производных целлюлозы наблюдаются только в полярных растворителях (в воде, так как по своей природе они полярны [Справочник химика, 1967]). Поэтому устойчивость гетерогенной системы, содержащей примеси целлюлозы и ее производных, определяется водорастворимостью и способностью к конформации молекул этих примесей.

Заканчивая рассмотрение вопроса об агрегативной устойчивости новых водных масс озер, сформировавшихся в результате воздействия сточных вод целлюлозного производства, необходимо заметить, что эта устойчивость возрастает в процессе пептизации (явление, обратное коагуляции). Пептизация (переход сточного осадка в коллоидное состояние) при наличии ПАВ “вызывает появление свободных частиц, у которых исчезающе малы силы сцепления; в результате теплового движения они равномерно распределяются в объеме сточной жидкости”, межфазное поверхностное натяжение становится близким к 10^{-4} Дж/м², происходит самопроизвольное диспергирование [Пушкарев, Трофимов, 1975]. При такой высокой агрегативной устойчивости сточных вод и трансформированных ими вод озера, самоочищение практически исключается.

4.2.3. Способ контроля качества воды по ее электрофизическим показателям

Методом исследования формирования и трансформации в озерах устойчивых гетерогенных водных масс, содержащих искусственные примеси, можно считать непосредственную электрометрию акваторий, подвергающихся антропогенному воздействию. Этот метод был впервые применен автором в Институте озераведения АН СССР (1968–1975 гг.) для обнаружения в пространстве слоев воды и зон, разделяющих условно чистые и загрязненные воды.

Теоретическая основа метода разработана в наземной электроразведке для решения геологических задач. Для гидрологических и гидрофизических работ были применены современные модификации метода естественного поля с учетом специфики водной среды и широких возможностей беспрепятственно зондировать водоем во всех направлениях и в любой точке и дополнительно контролировать измерения гидрохимическим анализом проб воды. Физико-химический аспект теоретической основы метода рассмотрен в работе [Александров, Зайцев, 1978] и в разделе 4.2.2. Электрические поля электрохимического потенциала в зоне вторжения гетерогенных водных масс в чистую озерную воду свойственны только областям загрязнения и отличаются высокой устойчивостью в пространстве и во времени. Измерение электрического поля в одной точке поверхности акватории не дает однозначного ответа о причине аномального его значения [Александров, Зайцев, 1978]. Исследование в пространстве поля определенных источников сопряжено с отсутствием критерия нормального поля окружающей среды в целом (см. разд. 2.4). В этом своеобразная сложность работы по методу естественного электрического поля, поскольку первоначальные его характеристики неизвестны, а задать их, как в других, активных методах электроразведки, невозможно.

Как было показано ранее (см. разд. 2.4), естественный фон, или “нормальное электрическое поле”, в озере образуется благодаря целой цепи факторов, действие которых суммируется и как бы выравнивается общим гидродинамическим фактором. Последний перераспределяет естественную электроэнергию озера, которая в измерении и выступает как постоянная составляющая поля.

Кроме характеристики нормального поля объекта в целом, в геофизике на первом этапе исследования желательно иметь сведения о нормальном поле различных конкретных источников. Далее (второй этап исследования) в наземной геофизике вычисляют или исследуют на модели типичные аномалии разных источников, поскольку прямые методы расчета и определения конкретного источника по виду его аномалий отсутствуют. Водная среда существенно усложняет использование разработанных схем анализа и расчетов. В наземной геофизике упрощение моделирования и интерпретации аномалий обусловлено допущением постоянства удельной электрической проводимости среды. Такое допущение по отношению к водной среде может быть лишь условно принятым, например, в радиофизических работах, где подстилающая водная оболочка Земли принимается однородной. Последние работы на океанских и морских акваториях показывают ошибочность такой

точки зрения [Проблемы морских..., 1980]. Принятие допущения об однородности воды в гидрофизике лишено смысла, поскольку нас интересуют именно неоднородности воды и все обусловленные этим физические явления. Влияние геологических источников также нежелательно, поскольку оно может замаскировать физико-химические неоднородности воды, вызывая аномальное распределение электрического поля. На последнее положение следует особо обратить внимание, так как от глубины объекта зависит возмущение нормального поля (разд. 2.4.3, 2.4.4).

В глубоких озерах существенно сказывается экранирующее влияние воды (см. разд. 2.4); при глубинах свыше 30 м и при отсутствии резких перепадов рельефа дна электрическое поле на поверхности озера определяется неоднородностью водных масс. Поэтому применение геолого-геофизической интерпретации к анализу аномалий поля нецелесообразно; нам неизвестны источник возмущения, его мощность, стабильность во времени и т. д. В воде, где отсутствуют постоянно и стабильно действующие факторы, аномалии поля аperiодичны и относительно. Например, при изменении химического состава и взвесей речного стока приустьевая аномальная зона может измениться. Сложна интерпретация аномалий и в открытом озере, если не ведутся синхронные гидрологические наблюдения или аппаратура не имеет канала фильтрации гидродинамических сигналов, ибо контуры самих аномалий бывают размыты, амплитуды невелики, так что иногда затруднена регистрация их значений.

Структура электрического поля в крупных озерах с неоднородным рельефом дна обусловлена локальными зонами и с учетом расположения источников загрязнения характеризуется комплексом физико-химических и биологических условий в каждой отдельной зоне. Условно водоем может быть разделен на четыре зоны: 1) прибрежная зона; 2) придонный слой в глубоководной части озера; 3) поверхностный слой; 4) промежуточная область между придонной и поверхностной в глубоководной части озера. И в каждой из них могут превалировать те или иные источники неоднородности поля (см. разд. 2.4).

Такое условное деление предлагается на первом этапе исследования крупных озер. Всякого рода уточнения и коррективы вносятся по мере изучения явления. В частности, смена времен года, по-видимому, внесет заметные изменения в динамику электрического поля, поскольку поверхностный и придонный слои (зоны 2 и 3) как своеобразные “обкладки макроконденсатора” могут существенно измениться. При образовании ледяного покрова

исчезнет волновой фактор, течения ослабнут, и промежуточный слой (зона 4) как связующий фактор между “обкладками” замедлит перенос заряженных частиц и выравнивание плотности тока по всей массе воды. При замерзании воды значительно уменьшается диффузия загрязняющих веществ в воду, возникает градиент концентрации, и примеси захватываются растущими кристаллами льда (донорно-акцепторный механизм адсорбции). Эту способность льда адсорбировать органические и неорганические вещества констатировал Бейкер в 1965 г.; в последующих работах справедливость этих выводов была подтверждена [Стадник, Дедков, 1981]. Одновременно с уменьшением количества свободной воды, способной растворять примеси, концентрация электролита в незамерзшей воде возрастает; это приводит к росту осмотического давления, сдвигу ионообменного равновесия в системе раствор — твердая фаза в сторону поглощения дисперсной фазой ионов электролита. В итоге происходит нейтрализация заряда частиц (снижается дзета-потенциал), возрастает коагуляция. В результате замерзания воды наблюдается потеря устойчивости гетерогенных водных масс [Думанский, 1960]. Идет своеобразное самоочищение воды — захват примесей льдом и интенсивная коагуляция взвесей. Однако это не приводит к улучшению биотических условий, поскольку примеси оседают в донных отложениях, а в процессе таяния, с усилением роли динамических факторов перемешивания, снова возрастает скорость диффузии ионов из частиц в воду (дисперсионная среда), система вновь приобретает свойства исходных устойчивых структур. Такие водные массы с агрегативно устойчивыми примесями существуют в виде плохо смешивающихся потоков и своеобразных включений типа линз. Благоприятные гидрометеорологические условия (слабая ветровая циркуляция и незначительный динамический обмен) способствуют длительной жизни этих образований на акватории, увеличивая и без того их изначальную устойчивость как гетерогенной системы.

Электрическая неоднородность водоема изучалась путем перемещения зондирующих электродных устройств либо в поверхностном слое при движении судна, либо при их вертикальном погружении на стоянке. Методические приемы способа обнаружения полей загрязненной воды рассмотрены автором ранее в работах 1973–1978 гг. и в данной книге (см. разд. 2.2.5).

Поскольку неоднородность водных масс по электрическим показателям проявляется макроскопически и поддается измерению в естественных условиях, нами было введено понятие о разграничении загрязненных и условно чистых водных масс с учетом

геофизической обстановке на акватории. Водная масса как гетерогенный, “долгоживущий” объект, имеет свои контуры, протяженность, глубину залегания и поэтому при определенных условиях может быть визуализирована на осциллографе или самописце по разрезам (профилям) в районах зондирования и в последующем картирована. Очевидно, что граница между чистой и загрязненной водой меняется сообразно гидрометеорологической обстановке. Однако при отсутствии сильных течений (скорость менее 0,5 м/с) и небольшом волнении (менее 3 баллов) в первом приближении для довольно короткого периода измерения (примерно $5 \div 10$ мин) условия эксперимента можно считать постоянными, что дает право указывать положение границы на данный момент.

Анализ материалов показал, что при наших измерениях воспроизводимость результатов достигает $70 \div 80$ % даже если повторные циклы наблюдений в заданной точке продолжались в течение получаса. Сообразно гидрометеорологической обстановке или условиям расположения источника загрязнения можно использовать методику градиент-зондирования или потенциал-зондирования [Александров, 1973; 1985].

Требования разработки экспресс-методики обследования больших площадей и глубин крупных озер и специфика работ на воде обусловили применение для решения задачи градиент-зондирования, тем более что в этом случае обеспечивается свобода маневрирования судна и отсутствует проводная связь с берегом. Известная связь кривых потенциала и градиента позволяет применять тот или иной способ, а данные о градиенте ($\text{grad } \varphi$) всегда можно использовать для построения кривых потенциального поля (φ). При градиент-зондировании мгновенно в точке фиксируется разность по-

тенциалов на единицу длины пути $\frac{d\varphi}{dL}$ (или $\frac{d\varphi}{dZ}$ при вертикальном обследовании), т. е. первая производная; с перемещением зонда в каком-либо направлении фиксируется изменение градиента — вто-

рая производная $\left(\frac{d^2\varphi}{dL^2} \right)$. По записи второй производной на ленте самописца и осуществляется интерпретация полученных сигналов.

Полезный электрический сигнал, вызываемый ионной диффузией и адсорбционными процессами на гидрозолях, как правило, при измерениях фиксируется одновременно с другими эффектами (магнитогидродинамическим — в движущейся среде, морфологическим — на мелководье и др.), поэтому при несоблюдении некоторых методических ограничений можно получить ложное

представление об амплитудно-частотной характеристике ожидаемого результата. В конкретной задаче поиска границ раздела все эффекты, не связанные с электрохимической природой локального возмущения, являются мешающими. Поэтому были проведены специальные методические работы для изучения и визуального анализа суммарного сигнала в различных условиях измерения — в чистой воде (вода без примесей промышленного производства) и в загрязненной (с примесями), вблизи берегов и на различных глубинах, при разнообразной морфологии дна, в различное время суток, в устьях рек, при различной гидрометеорологической обстановке и т. д. В записи градиента потенциала отличительная особенность загрязненных участков воды проявляется внезапным изменением амплитудно-частотной характеристики сигнала при переходе зонда из области условно чистых вод в загрязненную и наоборот. Одновременно запись градиента потенциала смещается скачкообразно в область отрицательных значений. На первых порах производились классификация сигналов от различных источников и объектов в воде и обучение оператора непосредственно в момент измерения исключать все сигналы, не связанные с загрязнением воды.

Характерный пример записи типового сигнала представлен на

рис. 4.2, где a — непосредственная запись на ленте самописца $\frac{d^2\varphi}{dz^2}$, b — распределение концентрации примесей сточных вод целлюлозного предприятия (лигносульфонаты кальция), C , мг/л. На глубине примерно 20 м запись градиента фиксирует отрицательную аномалию величиной до $1 \cdot 10^{-3}$ В, которой, как видно по рисунку, соответствует резкое возрастание концентрации примесей.

Числовые критерии для проведения условной границы между

чистыми и загрязненными водами по величине $\frac{d^2\varphi}{dL^2}$ в области перехода от озерной воды к воде, содержащей примеси, определяются тем, что амплитуда сигнала обычно на порядок и более превышает естественный электрический фон объекта. Числовые характеристики полезного сигнала могут применяться в качестве критериев лишь при следующих методических ограничениях:

- 1) измерения электрического поля для разграничения водных масс целесообразно производить при волнении не более 3 баллов;
- 2) съемку акватории буксируемым градиент-зондом производить на глубинах более 10 м, либо одновременно вести запись глубин эхолотом для введения поправок за счет морфологических искажений “нормального поля” (при котором градиент близок к нулю);

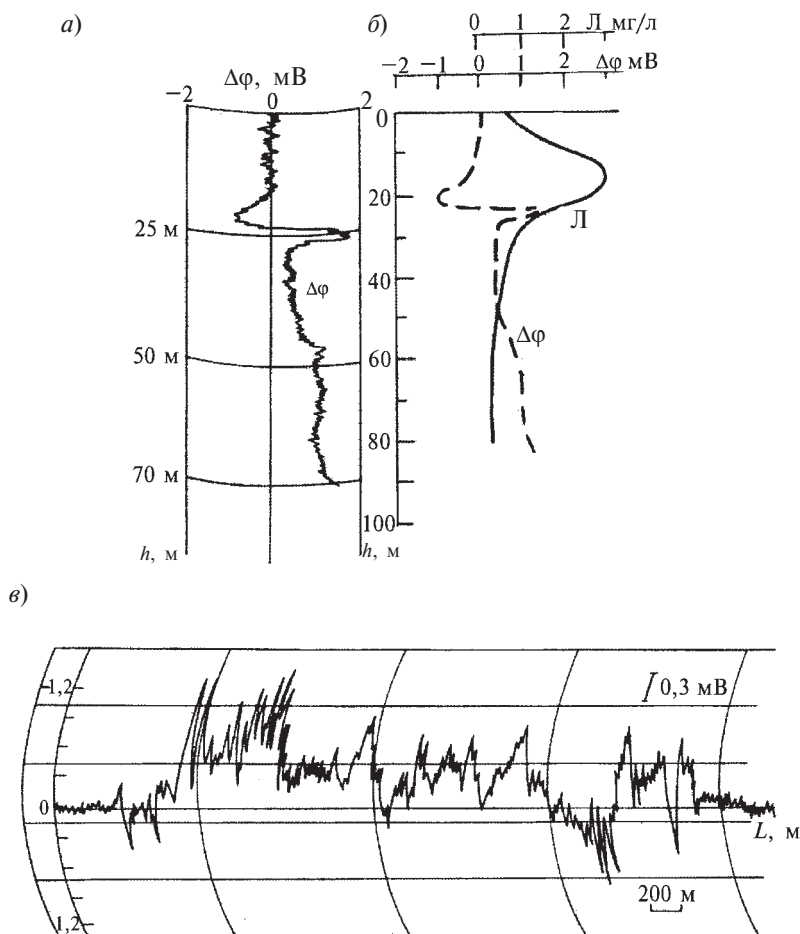


Рис. 4.2. Электрополюметрия загрязненной акватории:
 а — типовой сигнал при обнаружении загрязненного слоя воды; б — распределение градиента потенциала (пунктирная линия) и концентрации лигносульфонатов кальция (сплошная линия); в — обнаружение “пятна загрязненной воды” при буксировании зонда

3) измерения не производить в грозовой или предгрозовой периоды, поскольку атмосферические индуцируют колебания, соизмеримые по амплитуде с диффузионными эффектами. Для разграничения водных масс в зоне загрязнения опытным путем установлено значение градиента электрического поля, равное (по модулю) $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ В/м}$;

4) градиент потенциала изменяется скачком при условии соприкосновения однородных по составу, но различных по концентрации смежных водных масс. При достаточно высокой однородности среды (условно чистая вода или однородно загрязненная) градиент потенциала колеблется в пределах нулевых значений. Только наличие слоев с неравномерной концентрацией по вертикали или горизонтали обуславливает изменение градиента потенциала и возможность разграничить водные массы. Расчеты абсолютных значений $\frac{d^2\phi}{dL^2}$, соответствующих общему абсолютному количеству примесей, не производилось ввиду особенностей методики.

Задача эта переходит в область непосредственного потенциометрирования с помощью специализированных ионоселективных электродов и здесь не рассматривается. Статистические методы обработки результатов должны применяться с соответствующей фильтрацией сигналов и в настоящее время корректироваться данными по химическому анализу отдельных проб воды;

5) для оперативного контроля градиент-зондирование целесообразно применять в тех участках акватории, где значение $\frac{d^2\phi}{dL^2}$ на границе достигает $(0,2 \div 0,5)10^{-3}$ В/м, тем более что в открытом озере таких градиентов от источников электрохимического потенциала не наблюдается, они, как правило, характерны для областей загрязнения. При меньших значениях градиента погрешности могут сгладить полезный сигнал.

На рис. 4.3 сопоставляется комплекс гидрофизических и химических характеристик воды в зоне смешения чистой и загрязненной водных масс. Резкие отрицательные аномалии градиента потенциала коррелируют с повышенной концентрацией лигносульфонатов кальция и ионов кальция (основные химические показатели присутствия сточных вод целлюлозного производства в данном районе), с ростом удельной электрической проводимости воды (фон ~ 70 мкСм) и с ростом мутности воды (снижение прозрачности и коэффициента ослабления белого света θ_6). Электрометрический зонд, датчик проводимости и прозрачномер буксировались в приповерхностном слое воды судном, контрольные пробы воды отбирались по ходу судна*.

*Дополнительные характеристики для интерпретации электрометрических сигналов измерялись сотрудниками комплексной экспедиции Института озераведения РАН А.М. Крючковым, В.Б. Румянцевым, С.П. Агарковой, Т.М. Трегубовой. Расчёты на ЭВМ выполнял М.А. Стучевский.

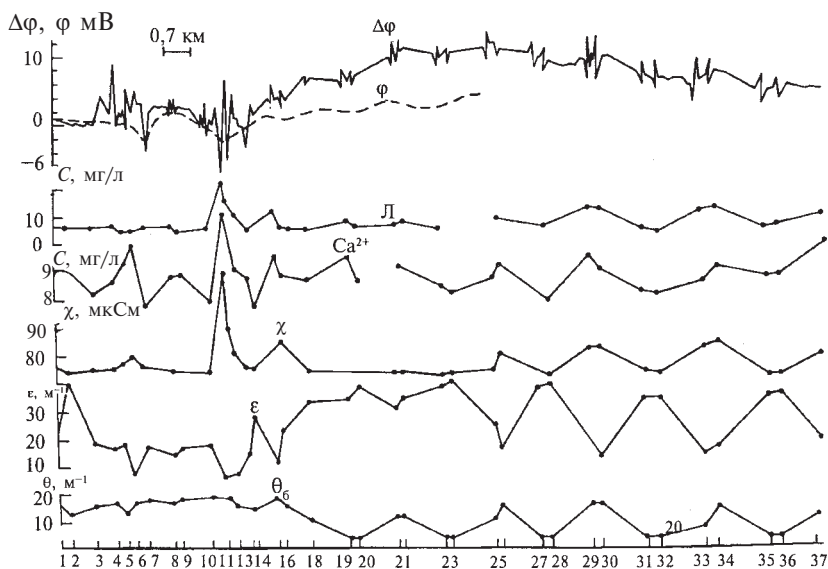


Рис. 4.3. Результаты электрометрического профилирования области перехода от условно чистой воды к загрязненной в Ладожском озере 23.06.74 г.

φ и $\Delta\varphi$ — запись поля и его градиента на поверхности воды; L и Ca^{2+} — концентрация лигносульфатов кальция и ионов кальция; χ — удельная электрическая проводимость воды; ε и θ_6 — прозрачность и коэффициент ослабления белого света

Интерпретация электрометрических данных в задаче контроля качества воды, как это явствует из рассмотренной в предыдущих разделах многофакторности измеренного сигнала, не проста. Тем не менее, при разработке основ методики обнаружения загрязнений были использованы показания химических аналогов (концентрация водородных ионов, растворенного кислорода, лигносульфонатов кальция, ионов кальция, окисляемость и др.).

Химические индикаторы загрязнения и некоторые физические характеристики (χ , θ_6 , t) были подвергнуты статистической классификации на основе теории распознавания образов в Институте озероведения АН СССР в 1975 г. (табл. 4.2) [Александров, Зайцев, 1978; Александров, 1985].

**Классификация вод с примесями методом теории распознавания образцов
(конкретная съемка 26 июня 1974 г.)**

Индикаторы загрязнения	Классы				
	I	II	III	IV	V
Концентрация лигносульфонатов кальция, мг/л	157,5	8,1	7,8	3,8	3,5
Концентрация кислорода, %	20,0	72,2	77,9	90,9	100,8
Электрическая проводимость $\cdot 10^2$, См/м	2,50	0,77	0,84	0,77	0,75

Результаты использования такой классификации применительно к одному из разрезов Ладожского озера показаны на рис. 4.4. Как видно, разграничение водных масс методом естественного электрического поля (рис. 4.4, *a*) (“нулевая” изолиния поля ограничивает зону с отрицательными аномалиями $\Delta\varphi$) практически совпадает с границей интенсивно загрязненных водных масс, классифицированных по количественным характеристикам на ЭВМ. Электрополюметрическое вертикальное зондирование проводилось здесь с глубины 10 м, поэтому поверхностный слой не иллюстрируется. Зона интенсивного загрязнения находится во впадине на станции 2, здесь градиент потенциала достигает $-3,2 \cdot 10^{-3}$ В/м, что вызвано высокой концентрацией лигносульфонатов кальция (до $80 \div 150$ мг/л), ионов кальция (до $20 \div 30$ мг/л), ионов водорода (до $\text{pH} = 6,4$). Процентное содержание кислорода низкое (до 20 %), положительные значения градиента на станциях 6 и 2 на глубинах более 10 м, например, соответствуют условно чистой воде (незаштрихованная область рис. 4.4 или штриховка по классу V).

Другой способ интерпретации электрополюметрических данных был осуществлен также с применением чисто формальных математических методов — аппарата теории случайных функций. Полагали, что объект математического исследования — флуктуации $\text{grad } \varphi$ — носит вероятностный характер. Поскольку задача распознавания локального источника загрязнения в виде многомерной случайной функции достаточно трудоемка и не всегда доступна современным ЭВМ, объект исследования в качестве примера был рассмотрен как некая случайная функция от одной пространственной координаты $y(x)$. Далее было достаточно отыскать такую статистическую характеристику для случайной функции $y(x)$, которая коррелирует со структурой исследуемого объекта (локальным источником, содержащим примеси). В качестве такой характеристики был использован структурный параметр ρ , предложенный для количественной оценки нестационарности случайного процесса и названный авторами радиусом нестационарности [Сергеев, Янтуш, 1973].

Этот параметр, например, был успешно использован для исследования случайных полей яркости природных ландшафтов при телефотометрировании и др.

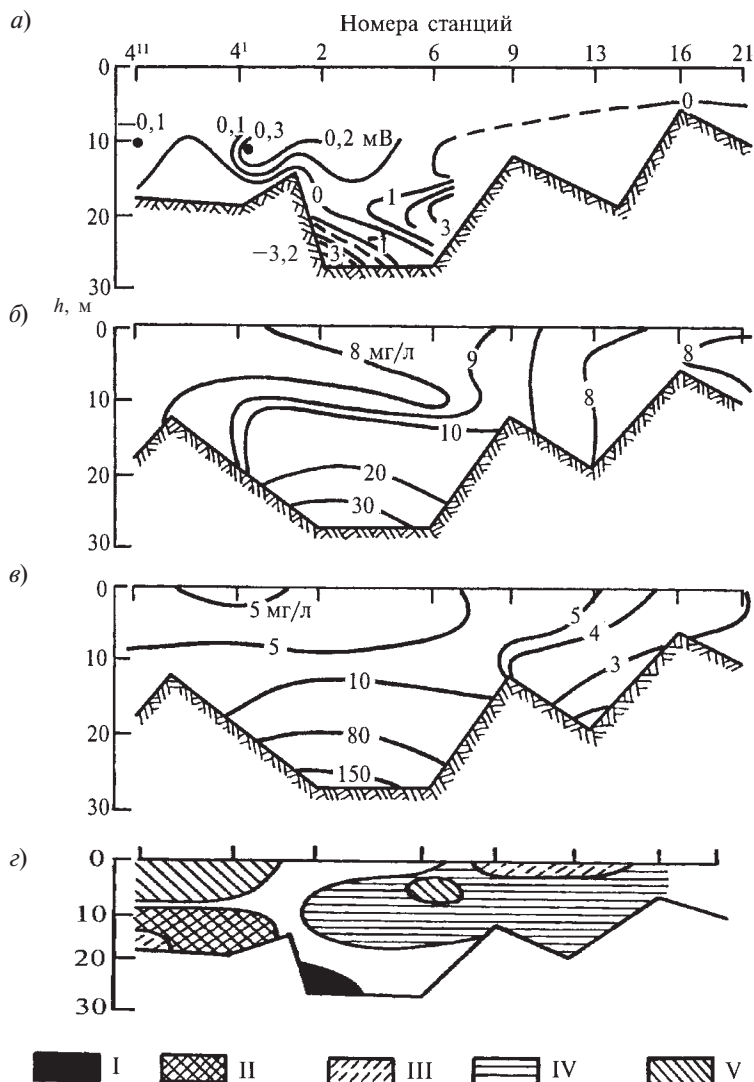


Рис. 4.4. Вертикальное зондирование по профилю в заливе Рыбный (зона загрязнения, станции 4''–21), июнь 1974 г.:

a — распределение электрического поля $\Delta\varphi$; *b* — концентрация ионов кальция; *v* — концентрация лигносульфонатов кальция; *z* — водные массы, классифицированные по методу теории распознавания образов (пояснения в тексте)

Структурный параметр, или радиус нестационарности, определяется по формуле

$$\rho = \Phi \left(\sum_k^{\infty} \tau_k \right), \quad (4.2)$$

где $\tau_k = \int_0^{\infty} |R_N(\tau)|^k d\tau$ — интервал корреляции k -го порядка;

$R_N(\tau)$ — нормированная автокорреляционная функция.

Исходя из предположения, что $\tau_k = \tau_1 [\tau_3 / \tau_2]^{k-1}$, величину ρ можно выразить через первые три интервала корреляции, аппроксимируя выражение (4.2), следующим образом:

$$\rho = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_2 \tau_3 - \tau_3}. \quad (4.3)$$

В итоге параметр ρ оценивает величину $\Phi \left(\int_0^{\infty} \tau(k) d\tau \right)$, где

$\tau_k = \int_0^{\infty} |R_N(\tau)|^k d\tau$ и является обобщенным показателем скорости убывания корреляционной функции с учетом нелинейных свойств процесса. При возрастании параметра ρ повышается удельный вес статистических моментов высших порядков, влияющих на нарушение гипотезы квазистационарности исследуемой функции.

Для оценки нестационарности случайных функций могут быть использованы и другие обобщенные статистические параметры, например ψ , предложенный в работе [Сергеев, Павлова, Романенко, 1968]:

$$\psi = \frac{\tau_1}{\tau_2}, \quad (4.4)$$

где τ_1 и τ_2 — интервалы корреляции 1-го и 2-го порядка, соответственно.

Предварительная оценка идентификации разнородных водных масс была получена расчетом параметров ρ и ψ для восьми реализаций случайной функции $y(x)$, принятой в качестве математической модели исследуемого явления: изменение градиента потенциала электрического поля в направлении буксирования зондирующего устройства. При этом запись четырех реализаций (1–4) проводилась в заведомо чистой воде, а других четырех (5–8) в загрязненной.

В табл. 4.3 приведены результаты расчета показателей ρ и ψ .

Значения структурных параметров ρ и ψ

Объект измерения	Номер записи	ψ	ρ
Чистая вода	1	2,66	49,3
	2	2,56	46,9
	3	2,65	46,1
	4	2,66	47,6
Загрязненная вода	5	2,75	41,2
	6	2,68	41,0
	7	2,62	40,5
	8	2,70	41,8

Из данных таблицы видно, что значения параметра существенно различаются для чистой и загрязненной воды. Чистая вода характеризуется пределами параметра $46,1 \div 49,3$, а загрязненная — пределами $40,5 \div 41,8$. Оба интервала не перекрывают друг друга, что указывает на принципиальную возможность использовать параметр ρ для распознавания чистой и загрязненной воды после обработки значительного числа реализаций, которое обеспечит достоверность в определении пороговых значений для ρ . Показатель ψ не дает видимой корреляции со структурой исследуемого объекта и принципиально не может быть использован для решения поставленной задачи. Значение ρ , возможно, окажется различным для водоемов различного типа (олиготрофные, эфтрофные), а также для различных типов инородных примесей. Рассмотренный пример является первым опытом такого расчета и не может претендовать на безусловную применимость метода к решению задач такого типа. Статистическую оценку выполнил В.Г. Ивашинцев (Агрофизический институт ВАСХНИЛ).

4.2.4. Экологическое состояние озер Северо-Западного региона России по результатам электрометрического контроля

Электрокинетические явления как показатель трансформации химических соединений в загрязняемых водоемах

Химические и органические вещества, попавшие в водоем, взаимодействуют с водой, экосистемами и включаются в трофические цепи, т.е. трансформируются.

Трансформация веществ в современной экологической науке трактуется как “превращение химических соединений в окружающей

среде под воздействием химических, физических и биологических факторов” [Безопасность деятельности, 2003, 502 с.]. И, как явствует из предыдущего (см. разд. 4.2.2, 4.2.3), явления трансформации сопровождаются электрокинетическими процессами на межфазовых границах. Геофизическая интерпретация электрических аномалий, вызванных полями электрохимического потенциала загрязненной воды, использовалась для построения карт-схем положения границ между условно чистыми и загрязненными водами.

На примере электрополюметрического профиля, выполненного методом вертикальных станций через залив Онежского озера, можно проследить по изменчивости поля, какие эффекты преобладают в той или иной зоне в зависимости от удаленности источника загрязнения (рис. 4.5).

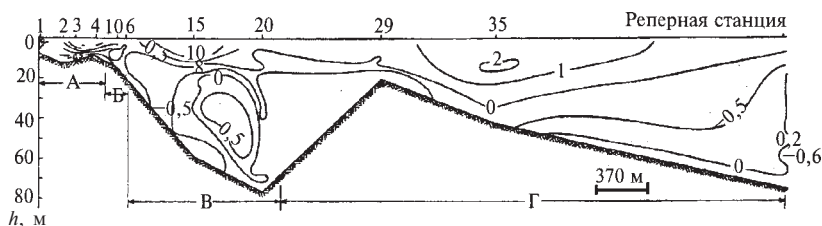


Рис. 4.5. Электрическое поле водоема как показатель трансформации водных масс, содержащих примеси отходов целлюлозного производства: А — участок залива, заполненный гетерогенными водными массами; Б — зона интенсивного перемешивания загрязненного потока с озерной водой (переходная зона); В — участок залива, характеризующийся в основном изменением концентрационного потенциала; Г — участок залива и открытого озера, заполненный в основном гомогенными водными массами — показатель медленного изменения диффузионного потенциала и значения φ_z , близкого к естественному фону

На расстоянии от источника примерно 1,5 км отмечаются резкое изменение градиента потенциала и смена его знака. В этой зоне А существует еще направленный поток, не смешавшийся с чистой озерной водой и интенсивно насыщенный взвесями, коллоидными и ионными примесями (грубодисперсная среда). Концентрация примесей лигносульфонатов кальция здесь максимальная, а наличие ПАВ обуславливает процесс пептизации — переход твердых примесей в диспергированное состояние [Пушкарев, Трофимов, 1975]. В этом случае повышается агрегативная устойчивость дисперсной системы, которая зависит от электрических зарядов

и адсорбционных слоев ПАВ. В результате пептизации появляются свободные частицы, у которых исчезающе малы силы сцепления, поэтому они равномерно распределяются в объеме сточной жидкости. Градиент потенциала электрического поля здесь меняется только по вертикали, а по горизонтальной оси залива практически неизменен, средний уровень сравнительно низок (до $-2 \cdot 10^{-3}$ В/м) за счет избытка анионоактивных компонентов.

По мере уменьшения скоростного напора потока с примесями значение потенциала уменьшается (по модулю). Зона Б может служить примером переходной части, где идет резкое разбавление, изолинии приобретают вертикальную ориентацию, знак градиента смещается в более положительную область. За внешней частью рассмотренной зоны А–Б начинается зона, где на градиент потенциала наибольшее влияние оказывают постепенное изменение концентрации и диффузионные процессы. Поскольку воды с примесями распространяются в виде струй, линз, сохраняя свою устойчивость, изменение градиента носит скачкообразный, не равномерный характер (см. рис. 4.5, зона В). Здесь видны и смена знака градиента и падение его до нуля. По характеру эквипотенциальных линий можно судить о протекающих интенсивно седиментационных процессах и возможной солюбилизации (растворении органических веществ поверхностно-активными электролитами). Здесь начинается и зона резкого перепада глубин, для которой характерно усиление горизонтального перемешивания, благоприятствующего трансформации примесей. Следует отметить, что в области А–Б, где электролитов больше, солюбилизация понижена, что характерно для полярных веществ, и это является дополнительным фактором стабилизации и устойчивости сточных вод данного производства. Этот так называемый эффект высаливания при наличии электролитов не связан однозначно с зарядом иона, а определяется дегидратирующей функцией. С уменьшением концентрации электролита ПАВ снова приобретают способность к растворению [Фридрихсберг, 1984]. Кроме того, наличие стойких эмульсий в таких водах, как правило, способствует сохранению электрокинетических явлений во всей зоне.

Зона В сменяется новой характерной зоной с постепенным снижением модуля градиента потенциала, которое обусловлено в основном диффузионными процессами, снижением концентрации коллоидных и ионных примесей, снижением интенсивности электрокинетических процессов в воде. Гетерогенная система

сменяется гомогенной. У реперной станции изменение градиента практически прекращается, и поле становится однородным (фоновые значения градиента). Загрязнения в этой зоне (В–Г) расположены лишь в придонной части.

Экологические ситуации в локально-загрязненных районах крупных озер

Электрометрический контроль качества воды на загрязнявшихся акваториях проводился регулярно в течение 1967–1985 годов в Ладожском и Онежском озерах. По его результатам оконтуривались зоны с загрязненной водой не только на поверхности, но и в глубинах озер, в придонных слоях и впадинах. Границы между чистыми и загрязненными водами, найденные методом естественного поля, как правило, были подтверждены другими физическими и химическими методами поиска и анализа качества воды. Многократно повторявшиеся съемки акваторий преследовали конкретные прикладные цели — картирование поверхностных и глубинных локальных электрических полей, обусловленных только загрязнением. Использовалось основное преимущество метода — скорость обследования больших площадей, получение экспресс-данных о траектории движения загрязненных потоков и об ориентировочной степени разбавления их вдали от источника поступления в озеро.

В данном разделе приводятся конкретные результаты съемок, при этом не ставится задача статистического анализа многолетнего материала и тем более рассмотрения режимных ситуаций в озерах, хотя такие сведения имеются в отчетах и публикациях автора [Александров, 1973; 1978; 1985].

Локальное загрязнение первоначально исследовалось на естественной миниатюрной модели — бухте Щучья, — куда поступали сточные воды Приозерского целлюлозного завода. Примеры изменчивости физико-химических характеристик воды в зоне перемешивания представлены на рис. 4.6, 4.7 и 4.8. На этом мелководном участке было выполнено многократное профилирование бухты методами градиента и потенциала, и приводимые графики показывают детальную тонкую структуру электрического поля на поверхности воды и наличие струйных потоков с переменной концентрацией примесей (рН, Si, Fe, еН и т.д.). Пульсирующая характеристика концентрации примесей в зоне “границы” была зарегистрирована в течение 7 ч кондуктометрическим датчиком,

закрепленным жестко на глубине 1 м (см. рис. 4.8,а). Среднее значение проводимости загрязненной воды составляло примерно $17 \cdot 10^{-3}$ См/м, максимальное — примерно от $98 \cdot 10^{-3}$ См/м до $300 \cdot 10^{-3}$ См/м (а в чистой воде $\approx 7 \cdot 10^{-3}$). Однако эти данные относятся к первым пяти годам регулярного стока загрязненной воды в бухту Щучья и далее — в открытое озеро. Спустя 10 лет и более эти цифры возросли (см. рис. 4.8,б).

Теперь остановимся на отдельных примерах зонального распределения поля в зависимости от батиметрических условий и близости точки измерения к источнику примесей (Ладожское озеро).

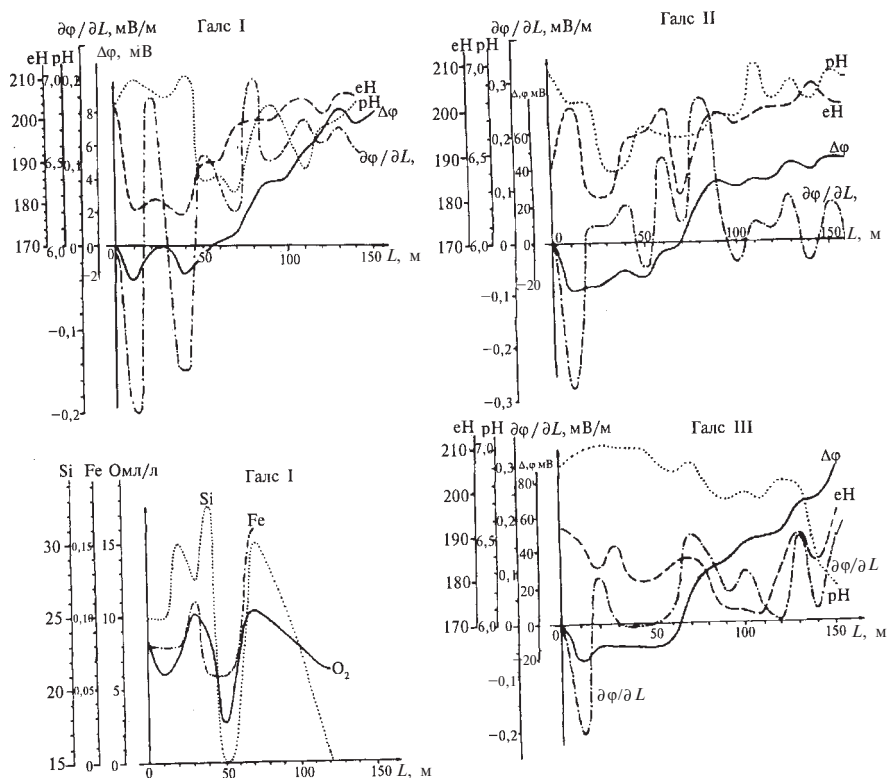


Рис. 4.6. Результаты электрометрии и гидрохимического контроля качества воды в зал. Рыбный (бухта Щучья) 19–20.07.71 г. Галсы I–III соответствуют схеме на рис. 4.8,а

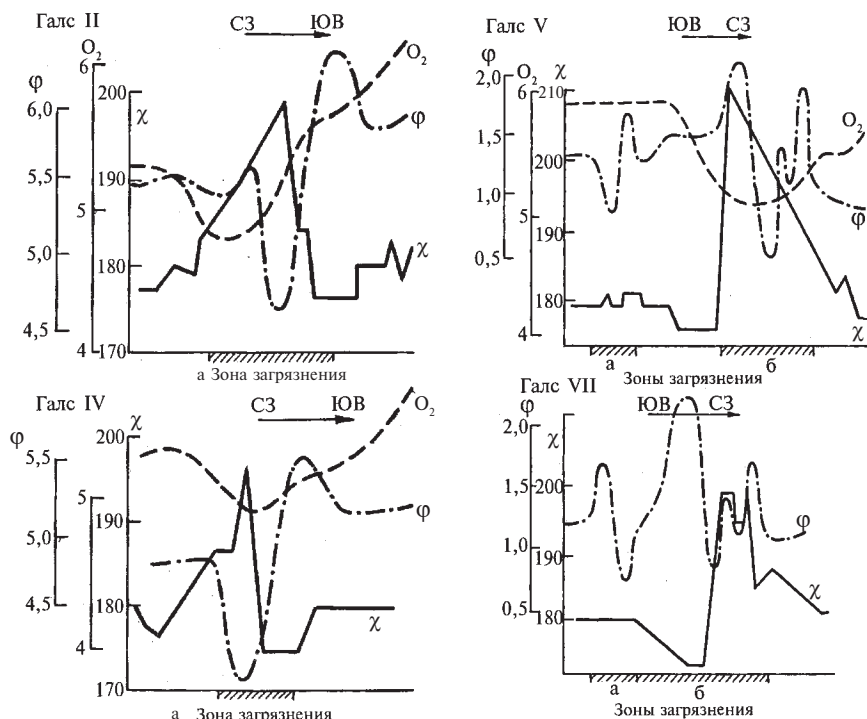


Рис. 4.7. Характер распределения электрического поля ϕ , электропроводности воды χ и концентрации кислорода в момент пересечения зоны загрязнения в различных направлениях (галсы II, IV, V, VII)

На рис. 4.9 приводится характерная ситуация распределения гетерогенных водных масс по профилю, находящемуся в зал. Рыбном на расстоянии около 3 км от источника примесей. Батиметрический профиль, пересекающий зону загрязнения, имеет V-образную форму. Все показатели качества воды (физические и химические) свидетельствуют о концентрации примесей во впадине, что исключительно опасно с экологической точки зрения. Показатель загрязнения — градиент электрического поля — достигает в придонном горизонте $-3 \cdot 10^{-3}$ В/м. Этому значению поля соответствуют высокая концентрация лигносульфонатов кальция (≈ 160 мг/л), низкое $pH = 6,5$, низкая концентрация растворенного кислорода (20 %), высокая удельная электрическая проводимость ($25 \cdot 10^{-3}$ См/м) и низкий коэффициент пропускания белого света ($\epsilon \approx 25$ усл. ед.). Следует отметить, что в поверхностных слоях

общая концентрация кислорода и рН близки к фоновым значениям, что может ввести в заблуждение исследователя. Такое явление вполне реально: развитие фитопланктона ведет к росту концентрации кислорода, а сброс щелочей приводит к нейтрализации кислот и повышению рН до нормы. На самом же деле — вода загрязнена ($\Delta\phi$ в слое 0 ÷ 5 м достигает $-0,5 \cdot 10^{-3}$ В/м, а $\epsilon = 20$ усл.ед., что свидетельствует о высокой концентрации органических примесей). Концентрация растворенного кислорода не является надежным критерием химического экологического равновесия в системе. За счет абиотических и биотических факторов возможно даже перенасыщение загрязненной воды кислородом по сравнению с чистой [Касымов, 1971].

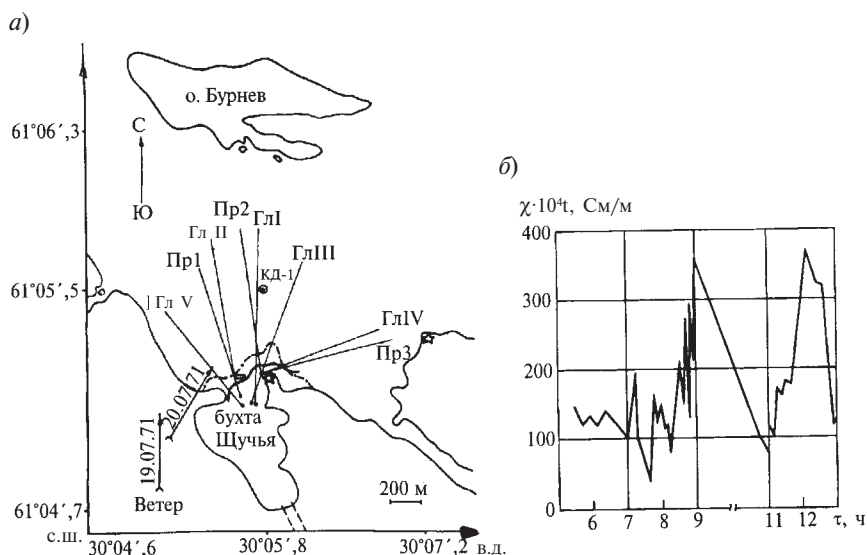


Рис. 4.8. Электрометрия и кондуктометрия зоны загрязнения бухты Щучья в заливе Рыбный. Период наблюдений июнь—июль 1971 г.: а — первоначальное обнаружение границы между условно чистыми и загрязненными водными массами. Критерии: градиент $\Delta\phi = -2 \cdot 10^{-4}$ В/м, сплошная линия; проводимость воды $\chi = 5,5 \cdot 10^{-3}$ См/м — пунктирная линия, отделяет условно чистую воду с севера (без поправки на температуру); б — флуктуации χ в зоне загрязнения по данным высокоточной кондуктометрии (см. ч. 2). Гл I—Гл V — галсы буксирования градиент-зонда и отбора проб; Пр 1—Пр 2 — профилирование потенциал-зондом

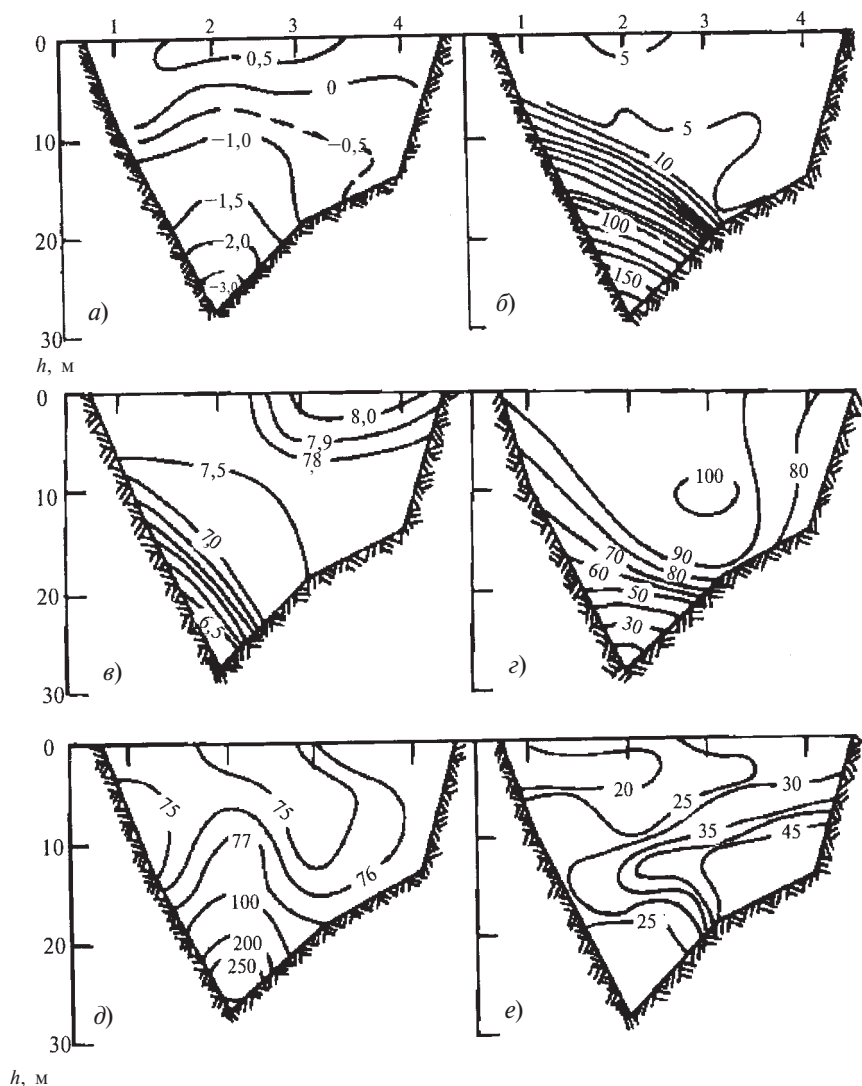


Рис. 4.9. Вертикальное распределение показателей качества воды во впадине зал. Рыбный:

a — градиент потенциала электрического поля $\Delta\phi$, В/м; $б$ — концентрация лигносульфонатов кальция, мг/л; $в$ — концентрация ионов водорода, рН; $г$ — концентрация растворенного кислорода O_2 %; $д$ — удельная электрическая проводимость воды, $\chi \cdot 10^{-4}$ См/м; $е$ — коэффициент пропускания белого света ϵ , усл. ед.; 1–4 — станции измерений

На рис. 4.10, цв., показан профиль, построенный в 1 км от источника вдоль залива Рыбный так, что стрежень потока сточных вод ориентирован примерно ортогонально к линии профиля, выполненного над глубинами $20 \div 90$ м, поэтому мелководье остается вне точек измерения. Поток сточных вод еще не трансформирован, не разделен мелководьем, и центральная часть его с высокими отрицательными аномалиями поля до $-3 \cdot 10^{-3}$ В/м имеет ширину около 3 км. Профиль продлен в открытое озеро (от точки 3 до точки 7) вне основного потока с примесями, что прослеживается по положительным аномалиям градиента и нулевым значениям у дна.

Вертикальные зондирования, проведенные более чем в 150 точках только в районе выпуска сточных вод Приозерским целлюлозным заводом с неоднократным повторным контролем в различные синоптические периоды, показывают, что слой загрязненной воды распространялся в озере сначала по поверхности, а далее на глубине свыше 5 м (рис. 4.11, а). Это обусловлено повышением плотности воды за счет тяжелых фракций. Регистрация удельной электрической проводимости с чувствительностью 0,2 % (см. ч. 2) также показала, что загрязненная вода накапливалась и застаивалась во впадинах рельефа дна на расстоянии нескольких километров от источника и находилась там длительное время. Контрольные измерения 23 июля 1976 г. (через 5 лет после первых зондирований аппаратурой КД-1) в точке с координатами $\varphi^{\circ} = 61^{\circ}05',5$ с.ш., $\lambda^{\circ} = 30^{\circ}05',6$ в.д. дали результат $\chi \approx 12 \cdot 10^{-3}$ См/м на глубине 25 м, что превышало уровень фона на 70 % (рис. 4.11, б).

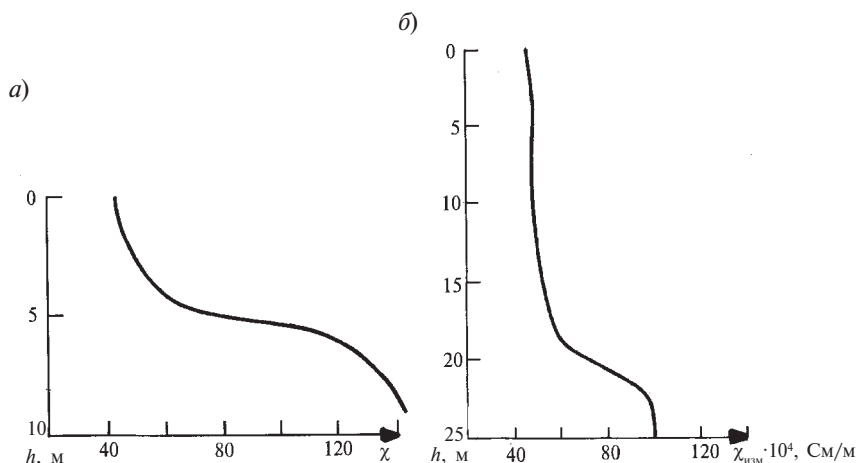


Рис. 4.11. Кондуктометрический контроль загрязняемой акватории высокоточной аппаратурой: а — обнаружение слоя загрязненной воды при плавном понижении рельефа в заливе Рыбный 20.07.71 г., б — обнаружение 23.07.76 г. скопления загрязненной воды в “яме” на расстоянии 2 км от источника

Кратко рассмотрим влияние неоднородных батиметрических условий на распределение и распространение сточных вод по площади в районе полигона залив Рыбный — десятикилометровая зона вдоль побережья от м. Рогатый до устья р. Вуоксы ($\varphi^{\circ} = 61^{\circ}07' - 61^{\circ}02'$ с.ш. и $\lambda^{\circ} = 30^{\circ}04' - 30^{\circ}13'$ в.д.). После выхода из бухты Щучьей на пути движения сточных вод попадают значительные углубления, ямы и резкие возвышения дна от 20 до 10 м (рис. 4.12, а, цв.). Градиент потенциала в углублениях достигает значений $-(3 \div 4)10^{-3}$ В/м, а удельная проводимость $(8 \div 10)10^{-3}$ См/м, превышая фоновые значения ее примерно на $10 \div 40$ %. Такие показатели характерны только для зоны, загрязненной сточными водами. Подводные возвышения (банки) оказываются даже несколько чище, о чем можно судить, анализируя качество придонной воды. Например, 11 августа 1973 г. данная акватория была быстро и удачно обследована — проведена съемка буксируемыми приборами и вертикальными зондированиями на 44 станциях. Были построены карты показателей качества воды на глубине 10 м — распределение сульфолигнина и градиента потенциала электрического поля (рис. 4.12, б, цв.).

Несмотря на то, что отбор проб и геофизическое зондирование выполняются с различной скоростью (т.е. синхронность весьма относительна, возможны фазовые сдвиги при замерах), карты распределения этих характеристик достаточно удовлетворительно отражают общую ситуацию загрязняемой акватории. Основные “пятна” загрязненных участков на глубине 10 м в плановом положении совпадают, что еще раз подтверждает целесообразность внедрения экспресс-электрополюметрии для решения задач контроля среды. Над возвышениями дна (глубины 10 м и менее) обнаружены водные массы с концентрацией сульфолигнина менее 5 мг/л (это нижний критерий загрязненности, установленный в наших работах как основной показатель качества воды) и с нулевым или незначительным градиентом потенциала с плюсовым знаком. На мелководье акватория больше промывается, отходы производства стекают в углубления и там сохраняются ввиду слабого водообмена. Возникают застойные зоны вторичного загрязнения — скопление токсичных минеральных и органических компонентов в донных отложениях.

Остановимся на рассмотрении кинематики загрязненных водных масс на поверхности и в глубинных слоях озер.

Новые водные массы на протяжении рассматриваемого периода (1965–1981 гг.) видоизменили, вытеснили естественную озерную воду и постепенно заполнили углубления котловины сначала вблизи источника, а затем и на значительном удалении. Так, в

1968 г. на акватории зал. Рыбный наблюдалось присутствие сточных вод в основном на поверхности (рис. 4.13), их граница не продвигалась от источника далее чем на $1 \div 1,5$ км. В 1973 г. эти водные массы надежно регистрировались электрометрическими и химическими индикаторами уже на глубинах 10 м и более и на значительном удалении от источника. В 1975 г. “пятна” этих водных масс размером до $2 \div 4$ км в поперечнике встречались на поверхности на расстоянии $15 \div 20$ км от источника.

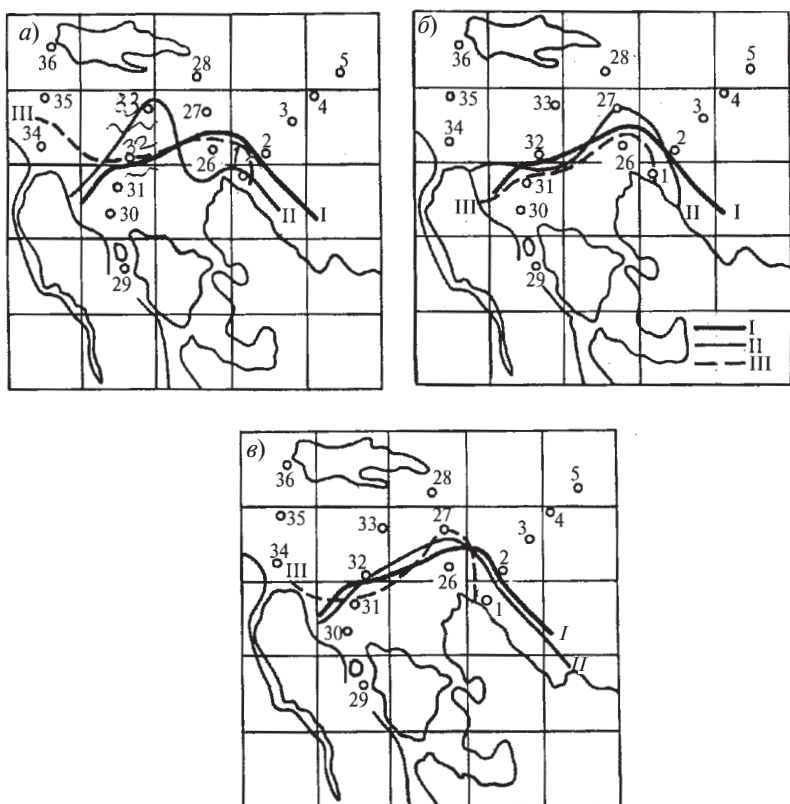


Рис. 4.13. Условная граница между загрязненными и чистыми водными массами в зал. Рыбный, 1968 г. Линия I соответствует данным о градиенте потенциала от 19 июня:

a — линии II и III соответствуют распределению кислорода от 4–8 июля и от 5–8 октября; *б* — линии II и III соответствуют распределению общего железа от 25–29 июля и 14–17 сентября; *в* — линии II и III соответствуют распределению кремния от 4–8 июля и 25–29 июля. Критерии: 90 % насыщения вод O_2 ; 0,10 мг/л содержания общего Fe (в 2 раза более среднего значения для чистой воды); 0,90 мг/л содержания Si (в 1,5 раза более среднего значения для чистой воды); градиент $\Delta\phi = |2 \cdot 10^{-4}|$ В/м

В июне 1974 г. пришлось констатировать, что граница загрязнения в зал. Рыбный уже продвинулась на $2 \div 2,5$ км к северу от источника, и вся эта зона находилась в статистически устойчивом состоянии загрязненности. По многолетним данным установлено, что основной грязевый поток из зал. Рыбный, огибая м. Рогатый, устремлялся к югу вдоль побережья, и струи его в 5 км от источника характеризовались отрицательными значениями градиента электрического поля ($-(4 \div 6)10^{-4}$ В/м) на глубинах $25 \div 30$ м в толще воды, а на удалении примерно 10 км от зал. Рыбный такие струи встречались в самых придонных горизонтах. Так, на траверзе м. Ладожский ($\varphi^\circ = 61^\circ 3',5$ с.ш. и $\lambda^\circ = 30^\circ 14'2$ в.д.) придонный поток, плотный, с отрицательными значениями градиента ($-1,5 \cdot 10^{-3}$ В/м), продвигался к югу в желобе на глубине $100 \div 110$ м, а над ним в слое $10 \div 80$ м вода была близкой к норме, и величина градиента поля колебалась вблизи нулевых значений.

В 1973 г. уточнялась и проверялась методика гидрофизического комплексного оконтуривания зон загрязнения в Кондопожском заливе Онежского озера, вода которого практически вдвое менее минерализована, чем ладожская. Кроме того, на целлюлозном заводе в г. Кондопоге действовали очистные сооружения. Однако сточная вода до очистки здесь содержала повышенную концентрацию катионов Fe^{2+} , Al^{3+} , Ca^{2+} и низкомолекулярных фракций лигносульфонатов, что весьма затрудняло удаление устойчивых и хорошо растворимых комплексов с помощью гидроксида магния по сравнению с другими заводами [Медведев, Шкваро и др., 1984]. Поэтому даже очищенная вода содержала более 20 % остаточного лигносульфоната кальция, что превышало стандартные нормативы технологии очистки и наряду с другими токсическими примесями создавало дополнительные предпосылки для реальной идентификации зон загрязнения в заливе. Гидрофизический комплекс измерений качества воды в 1973 г. дополнялся тщательным гидрохимическим контролем, что позволило в 1974 г. провести оперативную съемку акватории залива, минуя учащенный отбор проб воды и сократив этим время эксплуатации судов и срок обследования. В качестве примера приводим результаты профилирования залива от г. Кондопоги до о. Суйсари, от Кондопоги до о. Соколий и обратно (рис. 4.14–4.16), а также карту-схему электрического поля Кондопожского залива (рис. 4.17).

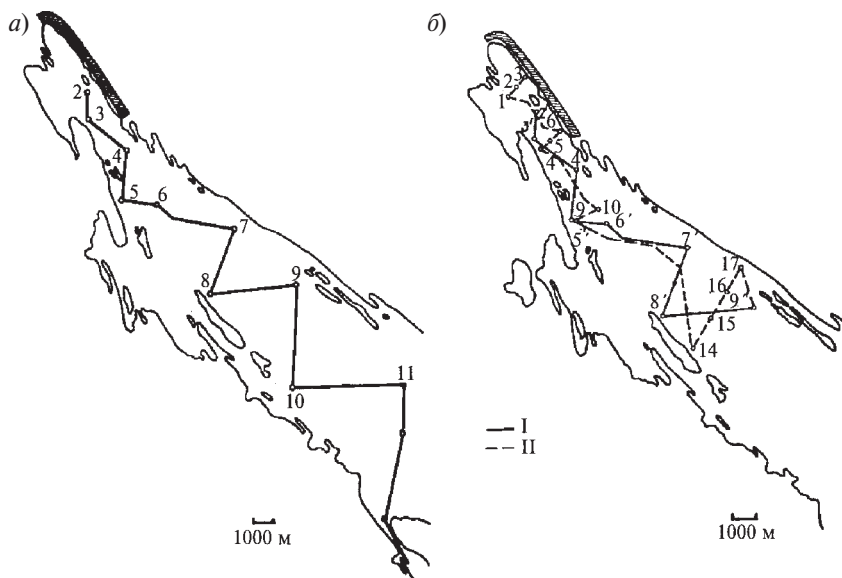


Рис. 4.14. Электрополюметрия Кондопожского залива в 1974 г.:
a — схема галсов от г. Кондопоги до о. Суйсарь; *б* — схема галсов от г. Кондопоги до о. Соколий; *I* и *II* — прямой и обратный ходы

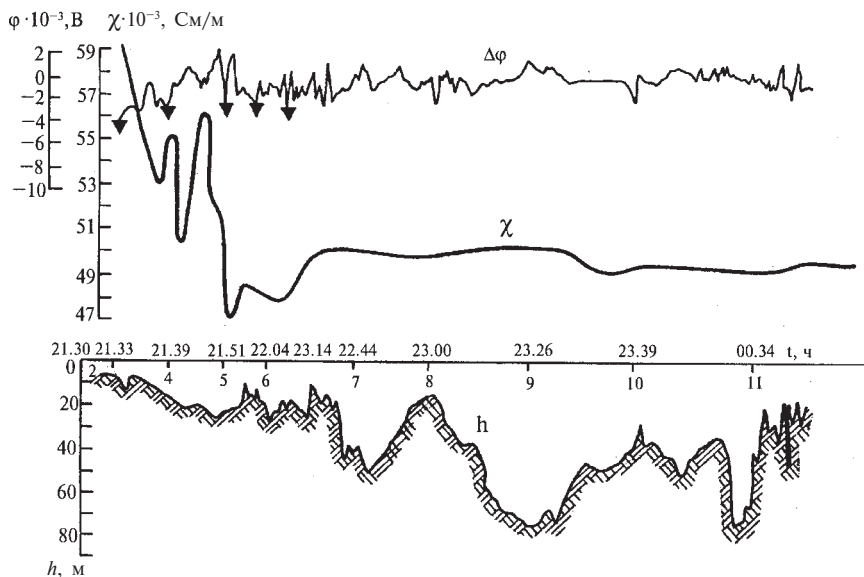


Рис. 4.15. Электрометрические показатели качества воды ($\Delta\phi$ и χ) по результатам профилирования Кондопожского залива. Профиль соответствует рис. 4.14, *a*

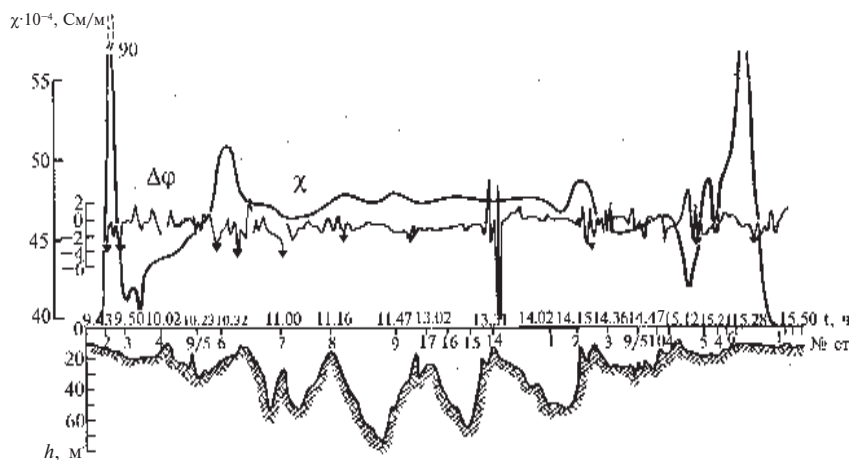


Рис. 4.16. Электрометрические показатели качества воды ($\Delta\phi$ и χ) по результатам профилирования Кондопожского залива. По схеме рис. 4.14, б

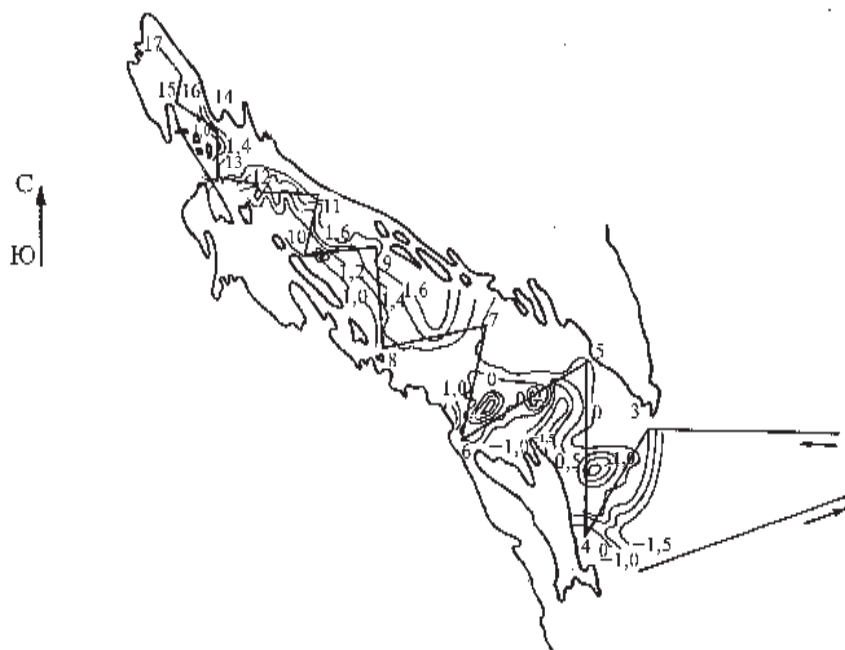


Рис. 4.17. Карта-схема электрического поля Кондопожского залива

Направление галсов, особенно в верхней мелководной части залива, предопределяется навигационной обстановкой (наличие опасностей), и это вносит определенные осложнения не столько в измерения градиента, сколько в интерпретацию полезного сигнала. В масштабе карты, особенно на мелководье (до 10 м) и на участках с резким перепадом глубин, изменение градиента, обусловленное геологическими свойствами подводных участков литосферы, видоизменяет, искажает полезный сигнал. Кроме того, наши измерения совпали с такой гидрометеорологической обстановкой, когда предыдущий период и момент наблюдений характеризовались сгоном. Естественно, концентрация загрязняющих веществ была невысокой. Полученная нами карта распределения градиента дает лишь весьма общее представление о поверхностном загрязнении залива. Выделяются три зоны (это соответствует и химическим индикаторам):

- северная мелководная зона с интенсивным загрязнением;
- южная глубоководная зона на выходе в открытое озеро;
- средняя зона — над глубоководной впадиной.

Две первые зоны характеризуются значительной неоднородностью поля и, естественно, высокими значениями градиента; средняя зона отличается незначительными колебаниями градиента в результате завершения процесса перемешивания (см. участки по галсам $11 \div 12$, $6 \div 5$, $3 \div 4$ — четко выраженная неоднородность поля, сгущение изолиний градиента; $7 \div 11$ — однородность поля). На схеме прослеживаются крупные вихревые образования в потоке — “ринги”, свойственные зонам перемешивания чистых и загрязненных вод.

Вопрос о кинематике загрязненных водных масс следует дополнить рассмотрением внутрисуточной изменчивости градиента потенциала.

Так, 23–24 июля 1974 г. в Кондопожском заливе в районе интенсивного загрязнения производились суточные наблюдения над пульсациями течения с водными массами, содержащими примеси отходов целлюлозного производства. В штилевую погоду химическая диффузия примесей в чистую воду происходит медленно. Турбулентный обмен способствует быстрому переносу потоков и вихрей с примесями. Запись флуктуаций электрического поля показывает интенсивное взаимодействие различных водных масс на границе перемешивания условно чистых и загрязненных вод в виде своеобразного частотного спектра этих флуктуаций и знакопеременности поля. Наблюдения велись с двух судов, стоящих на якоре. Первое — на мелководье (10 м), второе — на глубине 24 м. Результаты по мелководной станции представлены на рис. 4.18. С 24:00 до 6:00 ч наблюдалось относительно плавное колебание градиента поля с аномалиями в $-0,3 \cdot 10^{-3}$ В/м на поверхности. Утренний и дневной периоды характерны нестабильностью градиента,

что связано с периодическими притоками воды различного состава. Прослеживаются три слоя: поверхностный ($0 \div 2$ м), промежуточный ($3 \div 4$ м) и придонный ($5 \div 9$ м). На поверхности и у дна отмечаются значительные изменения градиента во времени, достигающие амплитуд $|(1 \div 1,5)10^{-3}|$ В/м. В среднем слое амплитуды в 3–4 раза меньше. В период с 11:00 до 22:00 ч в поверхностном слое наблюдаются пульсирующие потоки — струи воды, явно содержащие примеси сточных вод со значением градиента $-3 \cdot 10^{-3}$ В/м; в $12 \div 13$ ч и $16 \div 17$ ч загрязненный поток идет в слое $0 \div 2$ м, а в 22 ч он прослеживается уже в слое $0 \div 5$ м с устойчивыми отрицательными значениями градиента. Придонный слой ($7 \div 9$ м) в $11 \div 16$ ч отмечен отрицательными значениями градиента примерно $-0,9 \cdot 10^{-3}$ В/м, а с 16 ч до 01 ч его толщина постепенно растет и достигает 5 м, словно смыкаясь с промежуточным, но градиент поля становится положительным, что свойственно водам без примесей. В утренние часы загрязненный поток в слое $5 \div 9$ м отмечен максимальными значениями градиента $|-1 \cdot 10^{-3}|$ В/м; а в поверхностном слое $0 \div 3$ м загрязненные слои воды ($-0,5 \cdot 10^{-3}$ В/м) появлялись в 7:00, 9:00 и 10:00 ч. Вода, содержащая мало примесей, в эти часы встречается на горизонтах $0 \div 5$ м, опускаясь в $8 \div 9$ ч почти до дна.

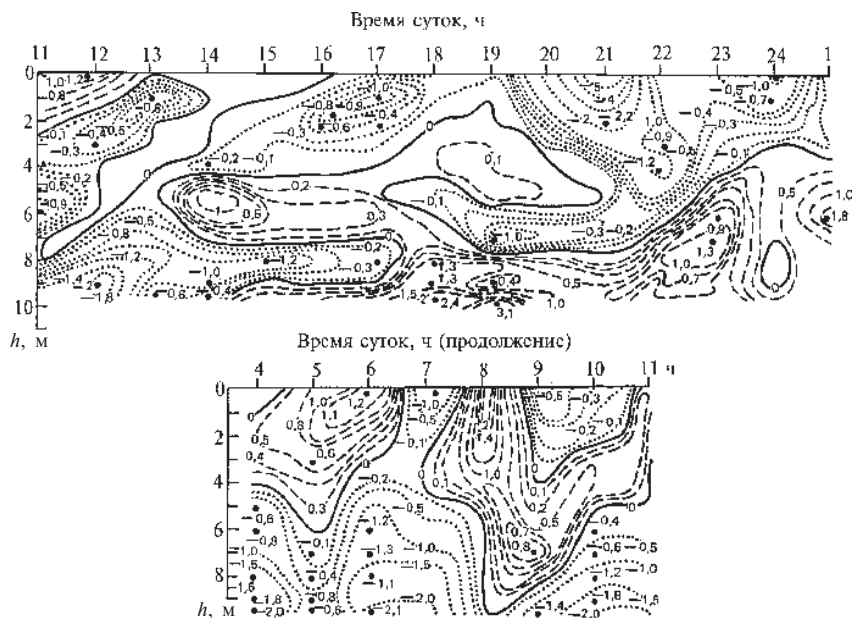


Рис. 4.18. Суточные флуктуации электрического поля на различных глубинах в зоне перехода от условно чистых вод к загрязненным. Конодопожский залив. 23–24 июля 1974 г.

Таким образом, даже за такой короткий период наблюдений, как сутки, можно проследить пульсирующую характеристику потока воды с промышленными примесями, а учитывая картированные данные (см. рис. 4.18), констатировать сложную структуру поля загрязненной воды, флуктуирующего как в плоскости горизонта, так и по глубинам. Это позволяет сделать практический вывод: **для экологического мониторинга важен тщательный выбор точки наблюдения или полигона точек наблюдения, которые бы обеспечили надежный пространственно-временной контроль качества воды.**

Завершением работ по изучению динамики электрического поля в пульсирующих потоках загрязненной воды явилась методическая оценка возможного влияния флуктуаций электромагнитного поля Земли на локальные диффузионно-адсорбционные поля в зоне перемешивания условно чистых и загрязненных вод. Наблюдения выполнены синхронно в пунктах: пос. Сорола ($\varphi = 61^{\circ}29'$ с.ш., $\lambda^{\circ} = 30^{\circ}14',2$ в.д., Якимварский залив), “Магнитная обсерватория оз. Красное” и зона загрязнения воды в заливе Рыбный в период гидрофизических съемок за 14–15 августа 1974 г. Совместное рассмотрение суточных вариаций магнитных элементов (H , Z , D°) компоненты E_{3-B} на глубине 1 м и записей $\text{grad } \varphi$ при поверхностном картировании загрязненной акватории позволило сделать следующие выводы:

видимой четкой связи между флуктуациями горизонтальной компоненты электрического поля по данному азимутальному направлению и изменением во времени и пространстве величины градиента потенциала естественного поля в синхронизированные сроки не наблюдается;

максимальные амплитуды напряженности поля E региона на порядок ниже минимальной амплитуды градиента локального диффузионно-адсорбционного поля загрязненной акватории, которая принята в качестве критерия для разграничения условно чистых и загрязненных вод;

локальное поле в зоне загрязнения обладает достаточно сильным сигналом, который не может быть искажен флуктуациями регионального поля, по крайней мере, в период отсутствия магнитных бурь или сильных бухтообразных возмущений магнитного поля Земли процессами в магнитосфере;

изменение градиента потенциала в зоне загрязнения вызвано в основном взаимодействием сред с различными физико-химическими свойствами, и погрешности в полезный сигнал вносит в основном геохимическая обстановка подводных участков литосферы на мелководье ($5 \div 10$ м). На глубинах 20 м и более эти погрешности сводятся до минимума и могут не учитываться;

отмеченная пульсирующая характеристика электрического поля и его знакопеременность в данном случае никак не связаны с планетарными геофизическими ритмами, что наблюдалось на примере биоэлектрических полей планктонных сообществ (ч. 2). Это обстоятельство следует расценивать как облегчающее интерпретацию сигнала.

Таким образом, методическая работа по учету влияния флуктуаций ЭМП Земли на полезный сигнал, измеряемый нами в зоне загрязнения, показала, что это влияние ничтожно, а минимальный сигнал локального диффузионно-адсорбционного поля, принятый нами в качестве критерия для разделения чистых и загрязненных вод ($-2 \cdot 10^{-4}$ В/м), на порядок выше максимального сигнала, связанного с вариациями регионального электрического поля.

Рассмотренные особенности кинематики водных масс, содержащих примеси, мало зависят от принадлежности к тому или иному озеру. Зависимость обусловлена типом озера. В данных примерах рассматривались олиготрофные озера северо-западной части России, принципиальных отличий для них не отмечено. Однако с течением времени эти озера подвергаются процессу эвтрофирования. Изменение состава и качества воды может сказаться и на характере изменчивости электрометрических показателей.

Микрофауна и донные отложения водоемов — экологические индикаторы загрязнения

Наблюдения 1965–1981 годов за изменчивостью электрического поля в зонах загрязнения показали многогранное влияние нового экологического фактора — сточных вод предприятий (токсиканты и ПАВ) — на экосистему озера, которая видоизменяется в процессе непрерывно действующего источника нарушения природного равновесия.

В процессе деструкции загрязняющих веществ идут дополняющие друг друга процессы — потребление бактериями органических и минеральных компонентов, уничтожение бактерий простейшими, простейшие становятся жертвами гидробионтов более высокого ранга (*Copepoda*, *Cladocera*, *Rotatoria*). Появляются новые виды популяций, не свойственные олиготрофным озерам. Например, если концентрация пестицидов в воде составляет примерно $1 \cdot 10^{-3}$ мг/л, то в гидробионтах она прогрессирует: в фитопланктоне она в $40 \div 80$ раз больше, в зоопланктоне — в $200 \div 300$ раз, в моллюсках и растительноядных рыбах — в $300 \div 400$ раз и, наконец, в хищных рыбах — в $1000 \div 1300$ раз больше. Индикаторами деградации водных экосистем являются уродства и генетические изменения у

гидробионтов, обнаруженные в районе действия сточных вод целлюлозных предприятий. Специальными работами было показано, что биологически очищенные сточные воды сульфат-целлюлозного производства токсичны для икры и личинок рыб. В неразбавленной воде погибли почти все эмбрионы пеляди и ряпушки, при разбавлении 1:10 погибло 100 % эмбрионов пеляди и 82,5 % ряпушки, при разбавлении 1:25 токсичность воды для икры пеляди сохраняется. Для раннего онтогенеза (эмбриональный, личиночный) безопасна вода лишь при разбавлении 1:10 (щука), 1:25 (сиг), 1:50 (ряпушка, пелядь). Для молоди (личинки-мальки) прошедшая полную биологическую очистку вода не токсична при разбавлении 1:2 (щука), 1:10 (семга).

В итоге установлено, что устранить отрицательное влияние на рыб может лишь разбавление биологически очищенных сульфат-целлюлозных сточных вод в отношении 1:50 перед их выпуском в водоем [Рыжкова, Моисеева, 1986]. Под влиянием токсикантов многоклеточные гидробионты погибают, так как они могут приспособиться лишь к относительно медленным изменениям внешней среды. В противоположность этому низшие одноклеточные организмы обладают самыми широкими адаптационными возможностями и способностью к длительному переживанию при неблагоприятных условиях.

Такие компоненты сточных вод, как сульфонол, алкилсульфонат, капролактан, виниловые полимеры и другие разрушаются бактериями родов *Comamonas*, *Pseudomonas* и др., штаммы которых испытаны в бывшем СССР и за рубежом [Трунова, 1977; Кривец, 1984]. Взаимодействие живых компонентов экосистемы с загрязняющими веществами неизбежно должно иметь проявления в электрофизических показателях. Поэтому было весьма целесообразно установить, какие виды гидробионтов могут служить не только индикаторами загрязнения воды, но способствовать формированию новых водных масс, которые отличаются от собственно озерных по электрическим показателям.

Для биологической и электрополюметрической индикации качества воды по инициативе автора была проведена специальная поисковая методическая работа. Начальный этап ее был связан с наблюдениями С.В. Креновой над видовым составом и численностью планктонных организмов в зоне загрязнения Ладожского озера в 1972 г. Эти наблюдения были проведены одновременно с регистрацией $\Delta\phi$ при буксировании зонда через зал. Рыбный. После лабораторного анализа были построены схемы распределения микробоопланктона; при сопоставлении их со схемой распределения

градиента потенциала был получен высокий коэффициент корреляции. Поэтому в 1974–1975 годах электрополюметрические съемки в зал. Рыбный и в районе о. Пусунсари (Питкярантский целлюлозный завод) проводились одновременно с отбором проб воды для индикации загрязненности и по планктону.

На рис. 4.19–4.21, цв. представлены карты-схемы результатов комплексной съемки акватории зал. Рыбный и вдоль береговой зоны от мыса Рогатый до устья р. Вуоксы, выполненной 23 июня 1974 г.

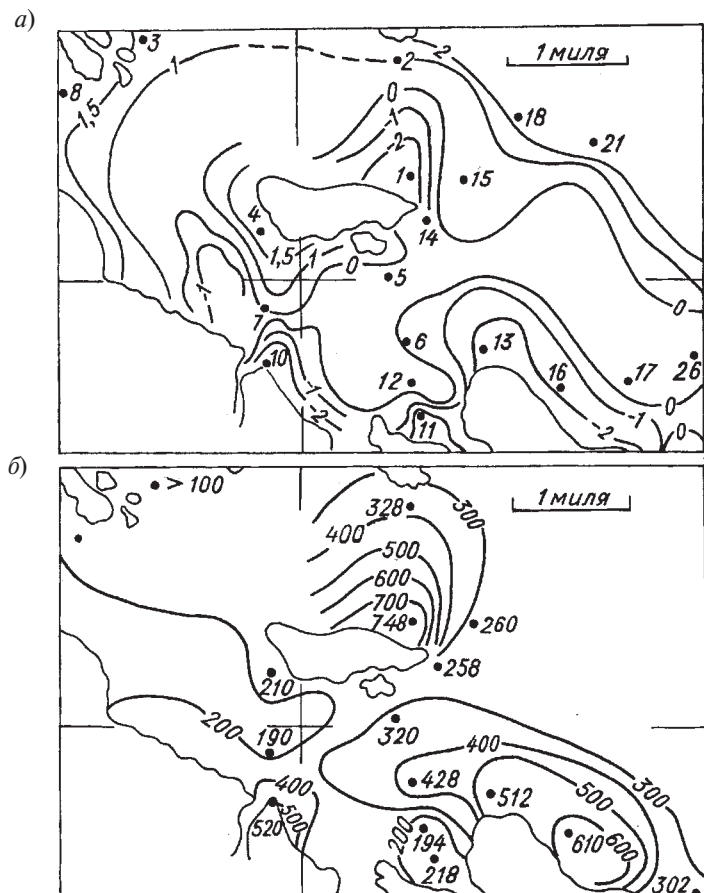
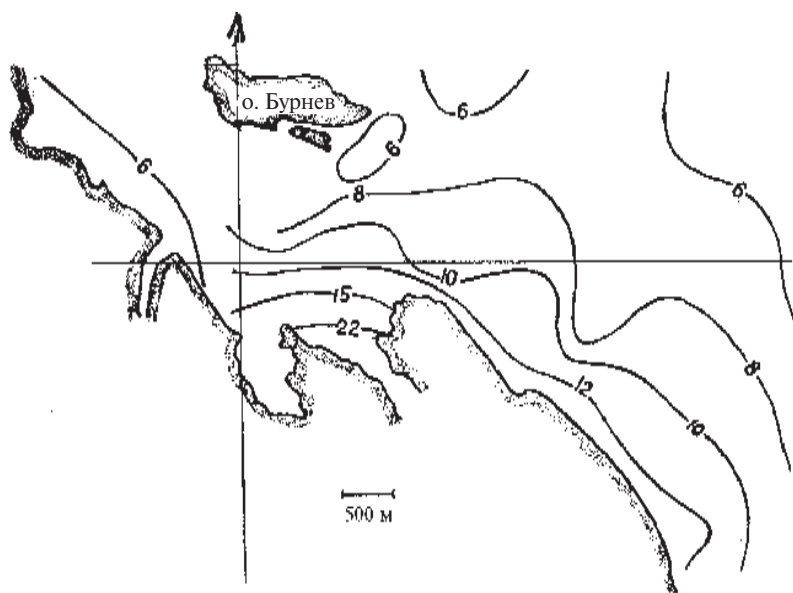


Рис. 4.19. Комплексные физико-биологические исследования акватории, загрязненной Приозерским ЦБЗ, выполненные 23.06.74 г.:

- а — карта-схема электрического поля; значения градиента потенциала $\Delta\varphi \leq 0$ соответствуют загрязненной воде на поверхности;
 б — карта-схема распределения микрозоопланктона в том же районе; концентрация планктеров ≤ 200 экз/л — фоновые условия

а)



б)

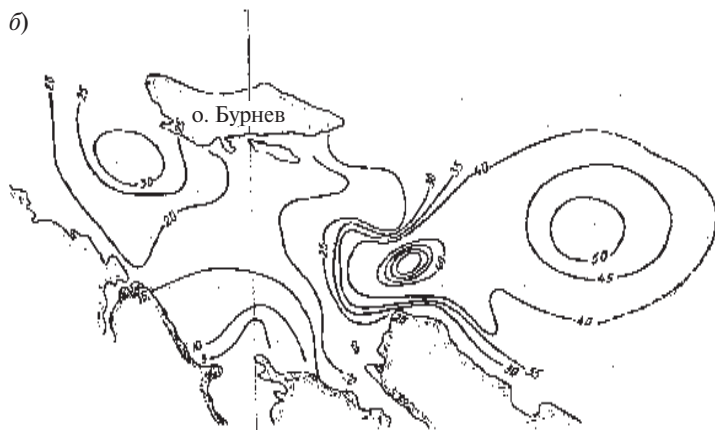


Рис. 4.20. Комплексные физико-биологические исследования акватории, загрязненной Приозерским ЦБЗ, выполненные 23.06.74 г.:
 а — распределение концентрации лигносульфонатов кальция; фоновые условия при $C \leq 6$ мг/л; б — распределение показателя ослабления белого света в зависимости от концентрации примесей; $\epsilon_1^1 \geq 40$ усл. ед. — фоновые условия

Рассмотрим представленные результаты подробнее. С учетом синоптической обстановки и сжатых сроков измерений процесс изменчивости физико-химических характеристик можно считать

квазистационарным. Поэтому значения $\frac{d^2\varphi}{dL^2}$, например, полученные за время буксирования зонда, будем считать функцией расстояния, так как за 2 ч 47 мин пройдено по галсам приблизительно 17 миль. На рис. 4.19,*а* — распределение градиента потенциала на поверхности; на рис. 4.19,*б* — распределение численности микрзоопланктона на поверхности. Разграничение между загрязненными и условно чистыми водами проведено в соответствии с указаниями раздела 4.2.3 (нулевое значение градиента потенциала и изолиния концентрации планктона ≈ 200 экз/л, фон). Сопоставление этих схем показывает, что разграничение водных масс, проведенное двумя независимыми методами (электрополюметрия и гидробиологическая индикация), практически совпадают. Несмотря на то, что способы индикации, казалось бы, несовместимы, — электрополюметрия ведется непрерывно с движущегося судна, а пробы дискретно отбираются по галсу в отдельных точках (даны на схеме) на ходу примерно через 1 км, — результаты получены удовлетворительные.

Во время съемки 23 июня 1974 г. фоновые относительные значения градиента потенциала колебались в пределах $(5 \div 10)10^{-5}$ В/м (средний уровень “нормального поля”), а резкие отрицательные аномалии его совпали с увеличением количества гидробионтов и достигали $(-1 \div -1,2)10^{-4}$ В/м при соответствующей концентрации общего количества планктона 748 экз/л (инфузорий — 618 экз/л и коловраток — 130 экз/л). Следует отметить, что в данном конкретном примере инфузории, среди которых преобладали *Tintinnopsis*, *Cratera*, *Hoda*, являются наиболее показательными для установления количественных связей между $\text{grad } \varphi$ и планктоном, чем коловратки (преимущественно *Keratella cochlearis* Grosse). Объяснение этого факта пока дать трудно, так как коловратки вообще малочисленны. Кроме того, следует учитывать также особенности строения данных видов (инфузории — одноклеточные, коловратки — многоклеточные), специфику их питания, адаптации к новым экологическим условиям в зоне загрязнения и другие факторы. Аналогичные примеры съемок, проведенных во время весеннего и осеннего периодов наблюдений, имеются и по другим прибрежным участкам, где существуют источники загрязнения. Однако в осенний период, особенно при достаточно сильном динамическом перемешивании, когда градиенты поля невелики, количественные связи выражены менее ярко.

Анализ данных материалов убеждает в том, что резкое увеличение концентрации гидробионтов наблюдается именно в пограничной области, где регистрируется изменение градиента потенциала по профилю, на границе между загрязненными и условно чистыми водами. Следует отметить, что в специальных работах по зоопланктону олиготрофных озер обращалось внимание на то, что наиболее высокие значения биомассы зоопланктона (коловратки и ракообразные) регистрировались в зоне смешения различных водных масс [Смирнова, 1972]. В нашем примере в области повышенной концентрации примесей количество планктона невелико (зона токсична). В районах с условно чистой водой оно колеблется в пределах фоновых значений, характерных для олиготрофных озер Северо-Западного региона России. В чистой воде в период съемки не наблюдалось значительного изменения градиента (при условии, что отсутствовали другие, в частности химические, динамические и геологические источники возмущения поля). Однородному, фоновому значению электрического поля ($\approx (5 \div 10)10^{-5}$ В/м) соответствуют и фоновые значения численности гидробионтов (≈ 200 экз/л). Как было показано в разд. 4.2.2, 4.2.3, различные водные массы обладают собственными электрическими свойствами, которые, резко изменяясь в области контакта, обуславливают высокие градиенты поля.

Механизмы взаимодействия внешней среды с живыми объектами в открытой экосистеме (море, озеро) далеко не изучены (ч. 2, 3). Поэтому на данном этапе, рассматривая факты макроскопического проявления этих взаимодействий, приходится пользоваться методами статистического анализа. Был, например, проведен расчет коэффициента корреляции между аномальным изменением поля и концентрацией микрозоопланктона и установлена его достоверность с вероятностью 0,99. Коэффициент корреляции между градиентом поля и количеством инфузорий равен $-0,788$, между градиентом поля и суммарным количеством планктона он равен $-0,833$ и, наконец, между градиентом поля и количеством коловраток равен $-0,646$ (не достоверен при заданном уровне значимости). Коэффициент множественной корреляции между рассматриваемыми величинами равен $0,848$. Фактический результат сосредоточения планктона в области между гетерогенными водными массами искусственного происхождения и чистыми озерными водами подтверждается также и другими физико-химическими индикаторами загрязнения. На рис. 4.20 и 4.21, цв., представлены схемы распределения на поверхности воды: удельной электрической проводимости воды, концентрации лигносульфонатов кальция, прозрачности воды в усл. ед., индекса сапробности и классифицированных по методу

теории распознавания образов водных масс, насыщенных примесью сточных вод Приозерского ЦБЗ. В расчеты по классификации степени загрязнения вошли данные и по концентрации микрзоопланктона. Эта дополнительная информация, безусловно, показывает достоверность сведений, полученных электрополюметрическим методом. В то же время на данном этапе исследования такая комплексность позволяет экспериментатору обрести уверенность в результатах и обосновать необходимость внедрения комплексного инструментального обследования акваторий Российской Федерации, подверженных непосредственному воздействию сточных вод промышленных предприятий.

Таким образом, рассмотренные выше методы оценки санитарного состояния акватории показывают специфичность и четкую локализованность загрязненных водных масс и их природообразующее действие. Последствием загрязнения в таком случае является резкое изменение фоновых экологических условий района — ухудшение качества воды, усиление процесса эвтрофирования, доминирование новых видов планктонных организмов. Наличие связи между значениями градиента электрического поля в поверхностном слое воды и численностью планктона можно было бы объяснить двояко. Привычным объяснением можно считать то, что на озерах Северо-Западного региона России в районах выпуска сточных вод целлюлозных заводов начавшиеся процессы эвтрофирования водоемов приводят к увеличению численности сапрофитных бактерий (более 1000 экз/л) [Горленко и др., 1977]. Это в свою очередь обуславливает бурное развитие зоопланктона, использующего сапрофиты для питания. Биомасса растет, создается локальное возмущение ЭП биоэлектрически активными клетками живых организмов. Изменяется видовой состав фауны. С другой стороны, можно предположить, что в зоне электрически неоднородных (гетерогенных) водных масс концентрируются анионоактивные компоненты примесей — источники отрицательных зарядов, что приведет к притяжению положительно заряженных частиц. Возникает пространственный диполь с “жидкими границами”. В конечном счете взаимодействие движущегося “диполя” с условно чистой водой и ее обитателями проявится в виде притяжения и начнет происходить приток отрицательных частиц извне, планктонные организмы приблизятся к условной границе между водными массами.

Вопросы эти требуют дальнейшей проверки и уточнения, тем более, что в естественных условиях живая масса бактерио-фито- и зоопланктона находится в сложных биологических взаимоотношениях, многообразие и глубина которых изучены далеко не полно.

Считают, что максимумы концентрации фито- и бактериопланктона, как правило, совпадают и что причиной этого являются питательные вещества, накопившиеся в процессе посмертного аутолиза клеток водорослей и усвоенные бактериями. Но наблюдают и противоположные явления: максимальному развитию фитопланктона соответствует минимум концентрации бактерий, и наоборот. Причины гибели микрофлоры пока не изучены достоверно, возможно, это связано с ростом рН (подщелачивание среды) и выделением в воду бактерицидных веществ типа антибиотиков и фитонцидов [Трунова, 1977]. Отмеченные в наших наблюдениях избыточные концентрации инфузорий в области максимальных отрицательных градиентов потенциала ϕ свидетельствуют и о перестройке экосистемы озера и о своеобразном очищении воды, которому способствуют простейшие, осуществляя коагуляцию и адсорбцию коллоидных примесей и потребляя водоросли. Простейшие, уничтожая массу микроорганизмов, также участвуют непосредственно в трансформации органических веществ в сточной воде, так как обладают мощным ферментным аппаратом (например, в процессе пищеварения реакция вакуоли в заднем конце тела инфузории приобретает исключительно кислую реакцию — $\text{pH} \approx 1,4 \div 3,4$) [Догель, 1951]. Изучение электрического поля гидробионтов в зоне загрязнения может прояснить вопросы и о функциональных взаимосвязях между популяциями.

Донные отложения отличаются локальными геохимическими и биологическими свойствами, что обуславливает и разнообразие в электрических полях, генерируемых в сопредельной переходной зоне грунт—вода. Как показали наши наблюдения, придонные участки акваторий, заполняемые сточными водами, можно отличить и по характерному потенциалу электрического поля. Рассмотрим донные отложения как потенциальный источник вторичного загрязнения воды в глубоководных частях озер.

В глубоководных впадинах и ямах скапливаются тяжелые фракции труднорастворимых инородных примесей, практически не подвергающиеся гидродинамическому воздействию, иловые отложения содержат максимальное количество бактериальной флоры по сравнению с песчаными грунтами. Микрофлора донных отложений разрушает органическое вещество, коагулировавшее из сточных вод. Аэробная деструкция в таких отложениях сопровождается суточным потреблением кислорода до 1 г/м^2 , а химическое потребление кислорода может достигать 35 % от общего [Дзюбан, 1978]. Электрическое поле донных отложений, содержащих примеси отходов целлюлозного производства, существенно отличается от такового на грунтах, лишенных примесей. Многочисленные

вертикальные зондирования, а также небольшой объем специальных измерений в районе зал. Рыбный в 1980 г. показывают, что потенциал таких отложений, как правило, положителен (по отношению к вышележащим слоям воды), амплитуда сигнала при касании зондом дна достигает $5 \cdot 10^{-3}$ В/м. По данным специалистов [Филимонова, 1976], в донных отложениях, содержащих осадок примесей целлюлозного производства, протекают процессы сульфитредукции, денитрификации, анаэробного разложения целлюлозы; обилие сульфатредуцирующих бактерий свидетельствует о восстановлении оседающих сернокислых соединений до H_2S (Кондопожский залив). В районе выпуска сточных вод Байкальским целлюлозным заводом на дне возникла зона, где сейчас наблюдается исчезновение некоторых видов планктона и бентоса, изменились группировки микроорганизмов: возросла численность сульфатредуцирующих, тионовых, метанообразующих и гнилостных бактерий, содержание кислорода доходит до аналитического нуля. И все эти изменения произошли под влиянием сточных вод БЦЗ, в которых содержание минеральных солей не превышало требований, предъявляемых правилами ГОСТа к нормативам для питьевой воды [Галазий, Вотинцев, 1973]. Поэтому вопрос об электрогенезе донных отложений районов спуска сточных вод в пресные озера не должен оставаться вне внимания специалистов, поскольку здесь может быть почерпнута полезная информация о состоянии зоны, модифицирующей качество воды в течение очень долгого периода и даже после прекращения действия источника притока примесей.

С точки зрения устойчивости гетерогенных водных масс, содержащих примеси ПАВ и ВМС целлюлозного производства, следует подчеркнуть и своеобразную устойчивость электрического поля вод с примесями сульфатов. Чем устойчивее во времени и пространстве электрическое возмущение озерной экосистемы, вызванное загрязнением, тем опаснее оно для выживаемости биогеноценоза как целостного природного комплекса. Таким образом, можно подойти к вопросу о стабильности водной экосистемы, обладающей собственным электрическим полем (“нормальный электрический фон озерной экосистемы”). Если этот “нормальный фон” претерпевает устойчивые электрические возмущения, стабильность экосистемы нарушится, неизбежна ее экологическая гибель. В этом мы видим немаловажную экологическую роль динамики электрического поля акваторий, изучать которое не просто целесообразно, но также необходимо, как все другие, хорошо известные и традиционные абиотические факторы окружающей среды.

Борьба за экологическую чистоту водоема, загрязненного отходами целлюлозного производства, несмотря на технологические сложности, может быть и успешной.

Жизнедеятельность анаэробных бактерий, восстанавливающих содержащийся в этих отходах сульфатный ион, приводит к образованию сероводородной зоны в придонных горизонтах. Сульфатный ион — наиболее доступный отрицательно заряженный ион, концентрация которого в сточной воде высока ($700 \div 1000$ мг/л) и который может быть использован как источник для окисления органических веществ (или газообразного водорода). В частности, при потреблении его бактериями вида *Desulfovibrio*, *Thiobacillus thioparus*, *Thiobacillus denitrificans* и другими образуется энергия для клеточного метаболизма. Результатом реакции восстановления сульфатных ионов бактериями является сероводород, выделяющийся в водную среду и донные отложения. Сероводород — источник сульфида, который снова окисляется и может быть донором свободных электронов. Далее характер остальных процессов становится уже электрохимическим, и для их осуществления не требуется никаких биологических катализаторов.

Комбинация биологических и электрохимических процессов в зоне интенсивного загрязнения является своеобразным естественным накопителем электроэнергии. То есть в качестве источников постоянного тока возможно применение отходов промышленности. Такую схему «биотопливного элемента» на базе отходов производства, способствующую и очищению водоема и накоплению дешевой энергии, мы предлагаем, используя идеи, выдвинутые в 1964 г. Ф.Д. Сислером (США). Он рекомендовал использовать биоэлектрохимические процессы в океане для практических целей. Сислером была показана возможность использовать естественный «биотопливный элемент» — океан — для создания дешевых источников электроэнергии, в которых сырьем является сульфатный ион морской воды, подверженный переработке бактериями. В пресной воде биохимические процессы, подобные морским, выражены менее ярко, и продуктивность континентального водоема с точки зрения электроэнергии незначительна. ***Однако именно зоны интенсивного загрязнения являются длительно существующим поставщиком топлива и биокатализаторов (бактерий) для катодной реакции в электродных системах, которые могут быть установлены вблизи зоны выпуска сточных вод и с успехом накапливать электроэнергию. Особенно ценной в таких системах будет возможность избежать накопления на катоде газообразного водорода, которая достигается применением катода в соединении с бактериями, восстанавливающими сульфатные ионы до сульфидных.***

Резюмируя это новое “завоевание” метода элетрополюметрии на пути экспрессного контроля жизненно важных источников водоснабжения и учитывая перспективы их сохранения для будущих поколений, автору хотелось бы отметить, что впервые реализованы и научные разработки, и практическое воплощение замыслов, что случается весьма редко:

- Рассмотрены реально протекающие электрокинетические явления в полидисперсных системах, образующихся при взаимодействии озерной воды с гетерофазными компонентами сточных вод целлюлозно-бумажного производства. Показан процесс формирования новых токсичных водных масс, не свойственных водоемам, которые плохо трансформируются, образуя локальные электрические поля. На примере таких полей показаны высокая агрегативная устойчивость загрязненных водных масс по отношению к биохимической и физико-химической деструкции, способность существовать долгое время независимо от действия гидрометеорологических факторов.

- Разработаны принцип и способы электрополюметрического и кондуктометрического экспресс-контроля качества воды с учетом установленных методических ограничений. Введено новое понятие — *“граница раздела между условно чистыми озерными водами и водными массами, содержащими искусственные гетерофазные компоненты”*. Экспериментально установлен критерий разграничения — *модуль градиента потенциала электрического поля, равный $0,5 \cdot 10^{-3}$ В/м, при смещении уровня полезного сигнала в отрицательную область*. Электрополюметрический контроль качества воды достоверно подтвержден статистической обработкой материала на основе теории распознавания образов и с применением аппарата теории случайных функций.

- В результате многолетнего электрометрического контроля акваторий озер Северо-Западного региона России показана зональность распределения загрязняющих веществ в зависимости от морфологической особенности района, гидрометеорологических условий и дальности от источника загрязнения. Выявлены неуклонное ухудшение качества воды на протяжении 1966–1980 годов в Ладожском озере за счет выпуска сточных вод Приозерским целлюлозным заводом, захоронение токсичных отходов в углублениях рельефа дна и образование вторичной зоны загрязнения в донных отложениях. Даны конкретные рекомендации для проведения экологического контроля в режиме пространственно-временного мониторинга за динамикой загрязняющих веществ.

- Показана корреляционная связь локальных электрических полей загрязненной зоны с концентрацией микрозоопланктона определенных видов, что является объективным аргументом в пользу внедрения электрометрии для индикации качества воды и оценки санитарного состояния акваторий. Высокая устойчивость во времени и пространстве электрического возмущения озерной экосистемы, обусловленного загрязнением, исключительно опасна для выживаемости биогеоценоза как целостного природного комплекса. Если ***“нормальный электрический фон озерной экосистемы” претерпевает устойчивые электрические возмущения, стабильность экосистемы нарушается, неизбежна ее экологическая гибель.***

- Предлагается путь самоочищения загрязняемых акваторий на основе создания естественного “биотопливного элемента”, в котором сырьем служит сульфатный ион, поскольку концентрация его в сточной воде очень высока. Биокатализатором в процессе окисления органического вещества являются сульфатредуцирующие бактерии. Сырье и катализаторы для катодной реакции в электродных системах, установленных вблизи зоны выпуска сточных вод, представляются регулярно, идет накопление электроэнергии.

4.2.5. О внедрении результатов исследования техногенных стационарных и флуктуирующих электрических полей на акваториях для решения навигационных и народнохозяйственных задач

В предыдущих разделах показано многообразное воздействие на водные экосистемы электрических полей не только естественной, но и антропоферной природы. Поэтому полученные результаты исследований могут быть использованы в народном хозяйстве. Например, экспериментальные данные, характеризующие электрические поля статически и динамически локализованных источников, представляют конкретный интерес для решения оперативно-тактических задач, для контроля состояния гидротехнических сооружений и для многого другого. Полученные именно в реальных условиях количественные оценки воздействия различных объектов на естественные поля водоемов отличаются достоверностью.

В процессе проведения электрополюметрических работ по изучению истинных характеристик слабых сигналов гидродинамической или биологической природы необходима компенсация полей внешних источников. Для этого должна быть оценена степень искажения естественного фона посторонними предметами с тем, чтобы выбрать оптимальные условия измерения или подготовить карту поправок.

Эта работа также имеет большое практическое значение. Она была выполнена автором на конкретных объектах: плавсредствах, гидротехнических сооружениях, остатках затонувших технических устройств, пловцах — в статических условиях и при движении предметов.

Результаты изучения электропроводящих свойств воды поверхностных и глубинных слоев водоемов представляют интерес для гидрографической службы флота при решении навигационных задач. Поэтому в части 2 было обращено особое внимание на методы расчета и картирования этих характеристик для морских и пресноводных акваторий.

Завершается данный раздел рекомендациями перспективного использования электрофизических методов для исследования водных ресурсов страны, а также внедрения полученных результатов в нормативно-регламентирующие требования по экологическому нормированию электромагнитной нагрузки на водные экосистемы.

Обнаружение в озерах неподвижных крупных проводящих тел по их электрическим полям

Теоретические основы формирования аномального электрического поля тел и предметов, поляризующих внешнюю среду, рассмотрены в работах [Альпин, 1966; Краев, 1971]. Однако общие рекомендации использования теоретических расчетов не всегда применимы к реальным объектам, например, к плавсредствам, поскольку причины неоднородности поля вблизи них многочисленны и трудно учитываемы [Иоссель, 1967; Александров В.В., Александров Д.В., 1973; Александров, Зайцев, 1978; Александров, 1985].

Возле судна, стоящего на трех якорях или жестко закрепленного за береговые предметы, характерно интенсивное затухание поля в поверхностном слое в пределах первых 10 м от корпуса. Фоновые значения естественного поля могут быть измерены лишь на расстоянии от корпуса, примерно равном его длине (в направлении по миделю) и примерно половине его длины (в направлении диаметральной плоскости). Характерный пример локального электрического поля вблизи э/с “Лимнея” показан на рис. 4.22, цв. По ориентировочным расчетам площадь, на которую распространяется существенное влияние поля судна на поверхности, может исчисляться примерно квадратом со стороной, равной длине корпуса. Эти данные характерны для судов с металлическим корпусом; для судов с деревянным корпусом они могут несколько отличаться, особенно в пределах расстояния, равного половине длины корпуса (или удвоенной ширине корпуса), где поляризация среды идет значительно интенсивнее, и можно ожидать более высокого значения

градиента потенциала (потенциала поля). На расстоянии двух длин корпуса поле практически достигает фоновых значений, составляя $0,2 \div 0,3$ % от величин, измеренных у корпуса [Александров В.В., Александров Д.В., 1973, с.107; Александров, Зайцев, 1978].

Учитывая пространственную структуру поля возле исследовательского судна, необходимо грамотно использовать буксируемые зондирующие устройства (ч. 2). По данным 1970—1975 годов, отмечалось, что за кормой поле судна достигает нулевых значений, или нормального фона, на расстоянии несколько меньшем, чем длина корпуса. Поэтому первый электрод зонда мы располагали не ближе чем на длину корпуса, даже с запасом, т.е. в 30 м от кормы. На рис. 4.22, цв. показано, что уже примерно в 15 м от кормы поле судна достигает нулевых значений. Бортовой зонд буксировался вдоль левого борта, в 5 м от него, первый по ходу электрод располагался в районе миделя, а задний — на 8 м за кормой и под углом к диаметральной плоскости. С учетом реальных расстояний электродов от левого борта и картины распределения поля возле него влияние поля судна на показания зонда может быть существенным. Амплитуда помехи может достичь -3 мВ при условии, что электрод закреплен не жестко, а пересекает силовые линии поля при буксировании. Эту поправку необходимо было учитывать при расчетах от уровня “нормального поля”. Следует отметить, что неоднородность дипольной структуры поля судна объясняется наличием входных сильно коррозированных отверстий системы охлаждения двигателя, проточных систем водоснабжения и канализации и т.д., которые даже в нерабочем состоянии обуславливают скачки потенциала. Поэтому детальное распределение поля для различных судов будет индивидуальным, и это обязывает исследователя выполнить контрольные измерения перед началом полевого сезона.

Значительный практический интерес представляет исследование изменения структуры поля под корпусом судна, поскольку большинство вертикальных зондирований поля и всевозможные гидрологические работы ведутся непосредственно с борта судна. Измерения выполнены для судов типа “Малый Ярославец”, малый рыболовный траулер, средний рыболовный траулер, гидрографический промерный бот и др.

Характерные примеры изменчивости поля судна под его корпусом показаны на рис. 4.23 и 4.24. Как видно на рисунках, характер изменения поля типичен для судов различного класса. Под корпусом судна “Лимнея” проведено градиент-зондирование от поверхности до глубины 15 м (см рис. 4.23), а под судном “Гидролог” — потенциал-зондирование от уровня поля на глубине 15 м до поля на уровне ватерлинии у корпуса (см. рис. 4.24,а). Использована высокоточная аппаратура МО-67.

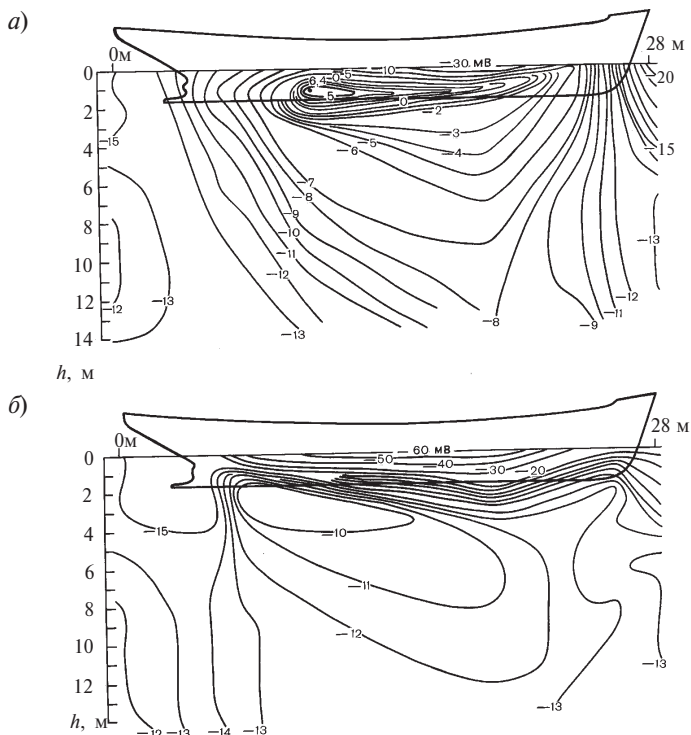


Рис. 4.23. Электрическое поле $\Delta\phi$ под судном с металлическим корпусом “Лимня”: *a* — вертикальный разрез у правого борта; *b* — вертикальный разрез у левого борта

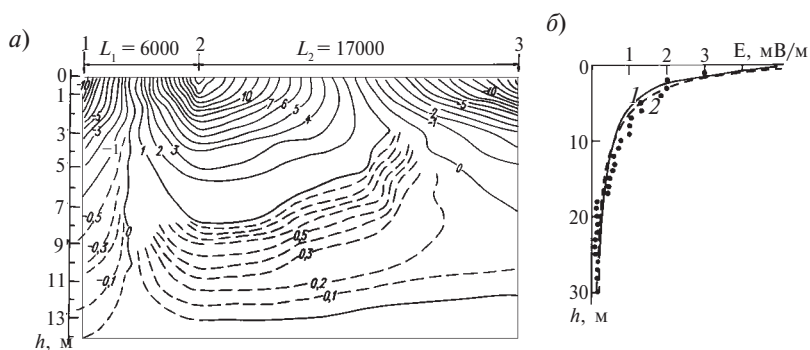


Рис. 4.24. Электрическое поле под корпусом судна типа “Малый Ярославец”: *a* — экспериментальные данные, полученные высокоточной аппаратурой завода “Эталон”, э/с “Гидролог”, о. Сиверское, 23.08.81 г.; *b* — функция затухания поля: 1 — аппроксимированная кривая по уравнению (4.5); 2 — то же по уравнению (4.6)

При высокоточных электрополюметрических работах вертикальное зондирование не должно ограничиваться опусканием зонда только у самого борта. Зондирования следует выполнять по сетке профилей, показанных на рис. 4.22, цв. Целесообразность таких работ вызвана также и тем, что поле судна (корабля) вносит ощутимые погрешности в измерения векторов скоростей течений типовыми гидрологическими приборами (АЦИТ, БПВ и др.). Если электрод сравнения удалить на расстояние, соизмеримое с длиной корпуса (“условная бесконечность”), точность зависимости $E = f(h)$ будет выше. Например, был использован 30-метровый градиент-зонд, который опускался таким образом, что электроды одновременно находились в одном горизонте. Многочисленные результаты измерений были обработаны методом наименьших квадратов. В качестве аппроксимирующих функций использовались полином второй степени, экспонента, степенная функция и функция типа Хидека Юкавы, применяемая в ядерной физике [Маляров, 1967].

На рис. 4.24,б представлено изменение электрического поля судна типа “Малый Ярославец” от поверхности до глубины 30 м (соизмерима с длиной корпуса). Точки — экспериментальные данные, кривые 1 и 2 — аппроксимированные кривые для расчета напряженности как функции глубины по уравнениям

$$\bar{E} = 7,727 \cdot h^{-1,088}; \quad (4.5)$$

$$\bar{E} = \frac{9,432e^{-0,03(h+1)}}{(h+1)}, \quad (4.6)$$

где h — координата глубины погружения зонда, на которой зарегистрировано менее 5 % от значения напряженности поля вблизи корпуса судна.

Наилучшая аппроксимация изменения напряженности поля в среде в зависимости от расстояния до источника (судна) дается по уравнению (4.6) или функцией типа потенциала Х. Юкавы.

Решение уравнения (4.6), полученное с помощью аппарата функций Грина, и свойства дельта-функции [Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 5-е изд. М., 1977; БЭС, Математика. 3-е изд. М., 1998, с. 166, 176] позволяют оценить радиус заметного влияния поля судна на естественный фон:

$$h = 1/0,03 \approx 33,5.$$

Этот пример показывает, что поле судна существенно видоизменяет естественный фон до глубины примерно 20 м, т.е. не менее длины корпуса. Следовательно, точные измерения естественного поля и всевозможных слабых электроэффектов (биологического, коагуляционного, придонных потенциалов и т.д.) с исследовательского судна чувствительными приборами нецелесообразны в диапазоне глубин, меньших чем полторы длины корпуса. На глубине, равной примерно

одной длине корпуса, регистрируется менее 10 % напряженности поля судна на поверхности, т.е. затухание практически достигает максимума. Полученные аппроксимированные уравнения позволяют рассчитать напряженность поля объекта на заданной глубине.

Следует подчеркнуть, что распределение поля в пределах радиуса действия судна не всегда идентично. Оно зависит от проводимости среды, ориентации судна относительно магнитного поля Земли, глубины места, близости береговой зоны, динамического состояния среды и т.д. Поэтому рассмотренные результаты и расчеты следует принимать как ориентировочные и корректировать их сообразно конкретной обстановке [Александров, Зайцев, 1978]. Так, например, в Ладожском озере фоновые значения поля вблизи судна типа “Малый Ярославец” регистрировались на глубине около $20 \div 23$ м (длина корпуса), а в Сиверском озере — на глубине около $14 \div 15$ м (примерно $0,6 \div 0,65$ длины корпуса). Для исследования фоновых характеристик поля необходимо градиент-зонд размещать на расстоянии от корпуса не менее одной его длины, а потенциал-зонд — не менее $1,5 \div 2$ длин корпуса. На мелководье, где длина корпуса превышает глубину, работа чувствительным зондом и точной аппаратурой без учета поправок к измерениям, бессмысленна. Сведения о реальной глубине, на которой практически не сказывается влияние поля судна, даны в табл. 4.4. где сопоставляются типы судов и их метрические характеристики.

Таким образом, удалось показать конкретные величины возможных погрешностей, которые следует учитывать при измерении естественных электрических полей непосредственно с судна или на акватории вблизи него.

Таблица 4.4

Радиус заметного влияния электрического поля судна (корабля) на естественный фон под корпусом (по экспериментальным данным для $\Delta\varphi_z$ -компонента)*

Тип корабля (судна), материал корпуса	Габариты (длина, ширина, осадка), м	Глубина, практически исключая заметное действие поля судна на фоновые значения $\Delta\varphi$ в пресной воде, м
Гидрографический бот э/с “Гидролог” (ИБВВ). Корпус стальной, тип “Малый Ярославец”	$L=21$ $B=2,95$ $\Delta h=1,2$	$4 \div 5$
Э/с “Дерюгин”(бывшее судно Института озераведения). Корпус деревянный, тип МРТ	$L=23$ $B=5$ $\Delta h=2,8$	$12 \div 14$

Тип корабля (судна), материал корпуса	Габариты (длина, ширина, осадка), м	Глубина, практически исключая заметное действие поля судна на фоновые значения $\Delta\phi$ в пресной воде, м
Э/с “Верещагин” (Байкальский лимнологический институт СО АН России). Корпус стальной, проект № 395 ЦКБ завода “Ленинская кузница”, тип СРТ	$L=39$ $B=7,6$ $\Delta h=3,0$	$19 \div 20$
Э/с “Лимнея” (Институт озераведения). Корпус стальной, тип ПГС	$L=28$ $B=5,4$ $\Delta h=1,5 \div 1,8$	$5 \div 8$

*Цифры в крайней 3-й колонке ориентировочные, получены в различных озерах при несходных гидрометеорологических условиях: чувствительность регистрирующей аппаратуры для судов “Гидролог” и “Лимнея” соответствовала современным требованиям. Применение зонда для измерения $\Delta\phi_z$ -компонента дает более точные результаты.

Учет искусственных сигналов от различных подводных сооружений, затонувших металлических предметов и т.д., находящихся на глубинах, позволяющих проводить их регистрацию и обнаружение прямым электрополюметрическим методом, практически важен как в задачах контроля состояния объекта, так и при оценке возможности рекреационного использования прибрежной зоны озер.

Электрическое поле металлического объекта (поляризованное тело, магнитный диполь) в условиях неоднородности естественного поля воды, близлежащих участков дна, внешних электромагнитных воздействий не остается постоянным. Поэтому характеристики его не могут быть точно рассчитаны, необходимы измерения в натуре.

Рассмотрим два примера регистрации подводных источников поля: 1) положение источника известно лишь приблизительно, и требуется оценить его состояние после сильного шторма; 2) положение источника известно точно и требуется оценить радиус его действия на естественный фон.

Пример первый (рис. 4.25–4.28). Измерения выполнялись дважды — весной 1967 г. со льда и летом 1968 г. со шлюпки методом потенциала по радиусам от центрального электрода сравнения в поверхностном слое воды. Фоновые значения градиента потенциала колебались в пределах $(3 \div 6)10^{-5} \div 5,4 \cdot 10^{-4}$ В/м.

Весенняя электрополюметрическая съемка со льда проводилась совместно с магнитометрией. Магнитные измерения магнитометром М-2 не обнаружили железных предметов или природных аномалий в

данном районе*. Напряженность геомагнитного поля (ΔZ) от начального пункта (ПК1) до конца профилей в направлении открытого озера в пределах 2 км изменялась от -350 до -60 нТл (см. рис. 4.26).

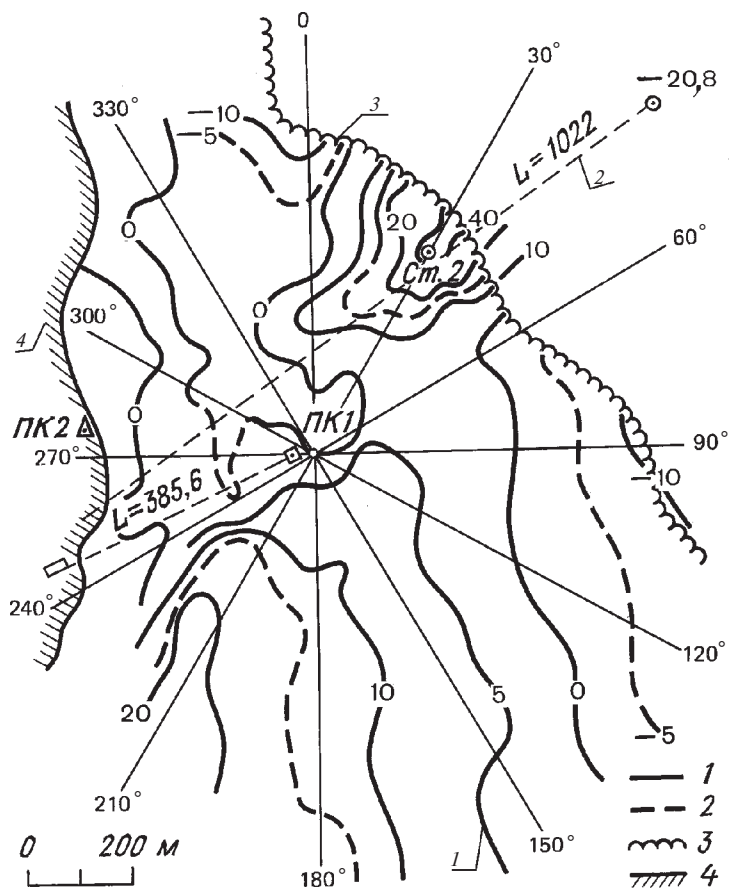


Рис. 4.25. Распределение потенциала электрического поля в районе разрушенного водозаборного сооружения Приозерского целлюлозного завода. 25–26 марта 1967 г.:

- 1 — линии равного потенциала; 2 — трассы водоводов;
3 — кромка припайного льда; 4 — береговая черта

*Современные магнитометры более чувствительны.

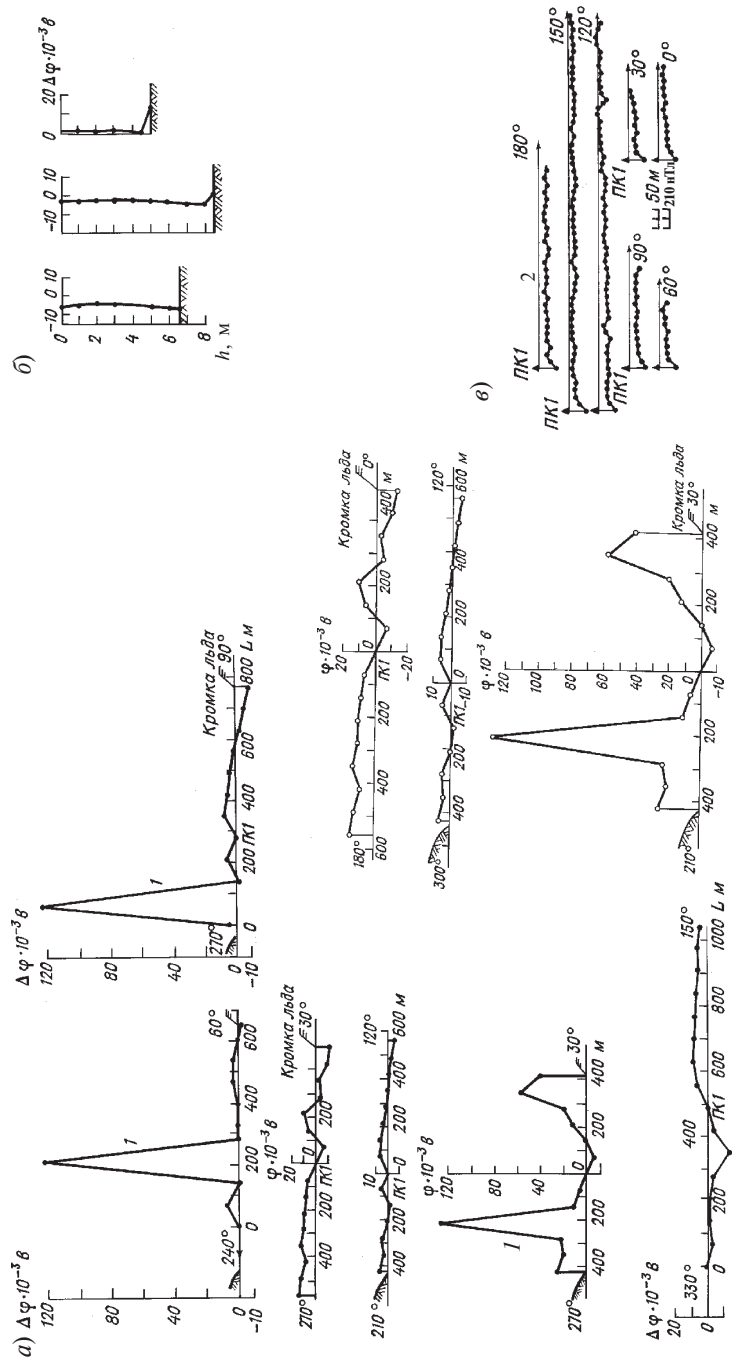


Рис. 4.26. Электрополюметрия и магнитометрия акватории Приозерского ЦЗ со льда 26–28.03.67 г.:
 а — профилирование от центрального электрода; б — вертикальное зондирование; в — магнитометрия по радиусу от ПК1;
 1 — аномалия $\Delta \varphi$ у оголовка водовода; 2 — аномалии ΔZ , нТл, в районе оголовка водовода

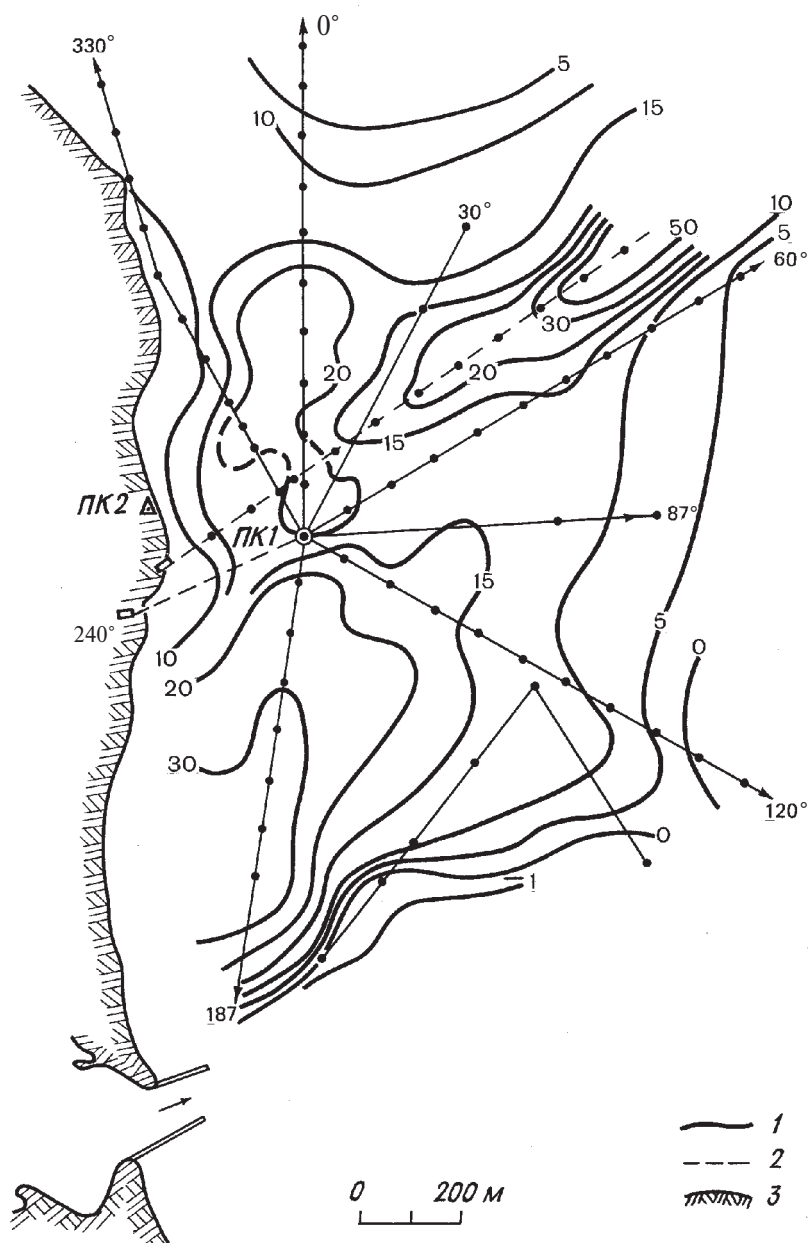


Рис. 4.27. Распределение потенциала Φ в районе разрушенного водозаборного сооружения Приозерского ЦЗ 6.08.68 г.
 Линии 1, 2, 3 — см. рис. 4.25

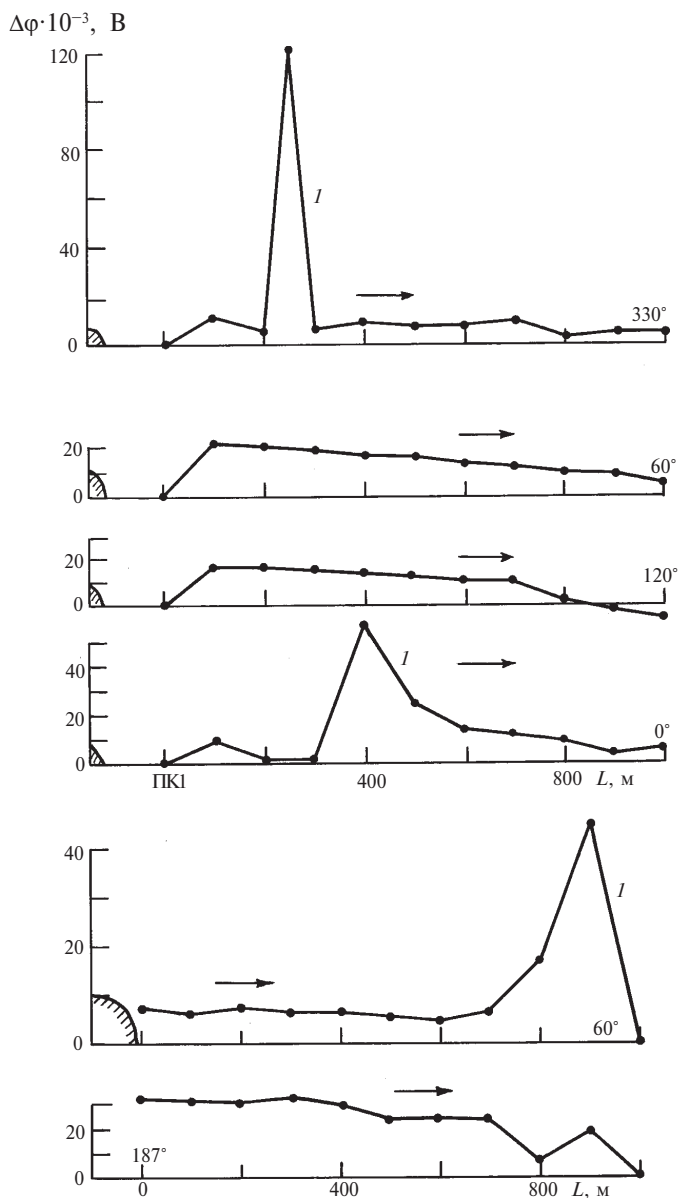


Рис. 4.28. Электрополюметрия акватории в районе Приозерского ЦЗ с катера 06.08.68 г.:

I — аномалия поля в районе оголовка водовода; стрелки указывают направление профилирования с катера в соответствии с картой на рис. 4.27

Электрополюметрия позволила конкретно оценить состояние акватории. На фоне однородного и постепенно уменьшающегося от берега в сторону открытой части озера поля были обнаружены значительные аномалии потенциала от 50 до 120 мВ ($E \approx (50 \div 120)10^{-5}$ В/м). Эти аномалии оказались связанными с разрозненными частями металлического водовода, разрушенного во время шторма, а также с линией силового кабеля, подведенного к оголовку водовода.

Аномалии, обусловленные какими-то искусственными источниками поля (например, кабелем) и достигающие $120 \cdot 10^{-3}$ В при однородном поле ($\varphi \approx 10 \cdot 10^{-3} \div 20 \cdot 10^{-3}$), не приняты во внимание при построении карты, так как они не являлись предметом изучения. Аномалии, обусловленные водоводом, отмечены изолиниями на карте по профилю $30 \div 210^\circ$; характерно, что здесь поле приобретает своеобразную структуру. Изолинии равного потенциала простираются, в основном совпадая по направлению с направлением береговой линии, и только в районе ПК1 наблюдается возмущение его, обусловленное искусственными сооружениями. Градиент поля по выбранным экспериментатором азимутальным направлениям ($\Delta\varphi_L$) варьирует примерно от $2 \cdot 10^{-5}$ до $5,4 \cdot 10^{-4}$ В/м. Незначительная величина его на исследуемом участке, в основном от $3 \cdot 10^{-5}$ до $6 \cdot 10^{-5}$ В/м, а также небольшие колебания градиента потенциала по вертикали подтверждают однородность структуры поля и свидетельствуют об отсутствии динамических и интенсивных диффузионных процессов подо льдом. Скачок градиента потенциала, обусловленный полем донных отложений, наблюдался лишь в придонном горизонте ($\approx -14 \cdot 10^{-3}$ В/м).

Год спустя, летом 1968 г., были произведены повторные измерения поля этой же акватории таким же способом — со шлюпки. Интересно было получить сведения об участках акватории, куда не удалось попасть весной, а также сопоставить данные в местах первоначальных и повторных измерений поля. Было выполнено 6 основных профилей (см. рис. 4.27, 4.28) длиной по 1000 м от ПК1 вдоль берегов и в сторону открытого озера и 8 дополнительных — в районе устья р. Вуоксы. Сопоставление графиков потенциала (см. рис. 4.25–4.28) и карты поля с данными за 1967 г. показывает аналогичную структуру ЭП в районе расположения водозаборных сооружений: в однородное, плавно убывающее в сторону открытого озера поле вносится значительное возмущение, обусловленное силовым кабелем, трубами водоводов и различного рода металлическими сооружениями, расположенными в местах водозабора.

В районе профилей 0° и 330° на расстоянии примерно 150 м от стационарной точки (ПК1) зарегистрирован источник аномалии поля, обусловленный кусками труб металлической перемычки, соединявшей ранее новый и старый водоводы и разрушенной в 1967 г. во время шторма. Кроме того, по профилю 330° на расстоянии 200 м от ПК1 отмечен источник поля в $120 \cdot 10^{-3}$ В, природа которого была точно не установлена. Следует отметить, что место аномалии поля располагалось к северу от головного участка старого водозаборного сооружения, которым в то время пользовался целлюлозный завод. Учитывая, что вдольбереговые течения имеют в основном южную компоненту и транспортируют воду к оголовку водозаборного сооружения через участки с аномальным ЭП, было предположено, что существовал вероятный путь поступления соединений железа в водовод. Источником могли быть скопление массы обломков металлоконструкций, подвергавшихся коррозии и размыванию течениями и волнением в период штормов, а также высокая концентрация ионов железа в сточной воде. В этом случае не исключалась вероятность повышения концентрации общего железа в воде, использованной заводом для выпуска целлюлозы, что приводило к браку продукции. Это предположение было проверено в последующие годы и подтвердилось [Александров, 1973; Александров, Зайцев, 1978].

Пример второй. Обследовался участок, где находился новый металлический водовод, снабжающий приозерские промышленные предприятия водой. Плановое положение трубы водовода, ее размеры, глубина от поверхности до трубы — известны. Поэтому имелась возможность проанализировать сигнал конкретного объекта, измеренный буксируемым зондом по поверхности воды, и оценить реальный сигнал, который такой объект (источник) может внести в суммарный потенциал естественного поля.

Водовод представляет собой трубу из кислотоупорной стали диаметром 1,4 м, уложенную от насосной станции до оголовка на опорах. Длина его 1022 м, глубина положения оголовка — 16 м. Измерения градиент-зондом в целях обнаружения трубы выполнялись следующим образом. В районе трубы в соответствии с ее плановым положением был намечен полигон 1200×1200 м с сеткой галсов в направлении север—юг и обратно. Расстояние между галсами выдерживалось судоводителями по возможности точно и равнялось 180 м. При картировании полигона электрическое поле над трубой регистрировалось буксируемым за кормой 10-метровым зондом, причем судно пересекало линию водовода то с севера на юг, то с юга на север. При этом скачок градиента потенциала

над трубой водовода всегда имел положительное значение (первая ветвь кривой в “+”). Следовательно, водовод представляет собой положительную аномалию. Размах амплитуды градиента превышал, безусловно, любые природные аномальные отклонения поля и достигал 150 мВ ($15 \cdot 10^{-3}$ В/м), т.е. на порядок выше измерявшихся нами максимальных значений градиента (рис. 4.29).

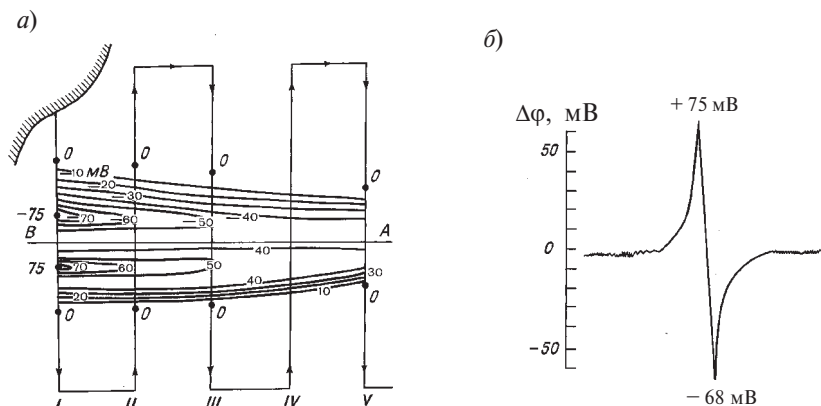


Рис. 4.29. Электрополюметрия полигона над трубой водовода Приозерского целлюлозного завода (новый объект, 1968 г.):

a — схема галсов на полигоне и карта распределения $\Delta\phi$ над трубой водовода в поверхностном слое воды; *б* — скачок $\Delta\phi$ над трубой водовода

Как видно из схемы работ, изменения градиента потенциала над трубой представлены четкими знакопеременными аномалиями, нулевые значения градиента проходят по центральной продольной оси объекта А—В. Соединив нулевые значения градиента поля, получаем азимутальное направление оси объекта (это важно, если нет сведений). Глубина погружения объекта отмечается падением градиента потенциала (в нашем примере 75 мВ над глубиной 5 м и 40 мВ над глубиной 12 м). Если предположить, что труба водовода имеет неизменный заряд на всем протяжении, то, взяв последовательные значения градиента потенциала над ней в точках с известными глубинами, можно получить скорость уменьшения потенциала с заглублением объекта. В данном случае для прибрежного участка это изменение составляет около 5 мВ при уменьшении глубины на 1 м. Подробные сведения представлены в работе [Александров, Зайцев, 1978].

Обнаружение в озерах электрических полей, индуцированных движущимися объектами

Перемещение источника искусственного поля относительно зондирующего устройства или устройства относительно источника обуславливает изменение фоновых значений естественного поля.

Возмущение естественного электрического поля при перемещении различных технических средств необходимо учитывать во время точных электрополюметрических работ, например:

при опускании в воду вблизи электродной установки (зонда) гидрологическая аппаратура (батометры, измерители течений, дночерпатели, различные современные оптические приборы, турбулиметры и т.д.) может быть причиной искажения естественного фона в 3–15 раз в зависимости от расстояния ее до электродов;

при буксировании зонда в районе установки гидрографических средств обеспечения безопасности плавания (буи, вехи, заграждения и др.) искажение естественного фона может быть зарегистрировано на расстоянии, равном 5-кратному размеру объекта;

при движении плавсредств (шлюпки, катера, суда) относительно электродной установки в ней индуцируется сигнал $\Delta\phi$, если траектория движения проходит на расстоянии двух длин корпуса от ближайшего датчика.

Сигнал от движущегося объекта или сигнал при движении зонда относительно неподвижного объекта регистрируется в виде четкого

импульса на кривой записи градиента потенциала $\frac{d^2\phi}{dx^2}$ (разд. 2.2.5).

При изменении направления движения знак первой ветви импульса меняется на противоположный. Пример такого импульса показан на рис. 4.30. Достоверность этих результатов проверялась многократно на Онежском полигоне ($\varphi^\circ = 62^\circ 10' \div 62^\circ 12'$ с.ш., $\lambda^\circ = 34^\circ 18' \div 34^\circ 20'$ в.д.), где в районе методических работ приходилось буксировать зонд длиной 10 м вблизи стоящей на якоре баржи с металлическим корпусом.

Движение поляризованного объекта в воде сопровождается гидродинамическим эффектом, обусловленным попутным перемещением воды. Поэтому на расстоянии от объекта до зондирующего устройства, когда чувствительность установки минимальна, импульсный одиночный сигнал маскируется учащенной флуктуацией поля. Частотный спектр флуктуаций определяется скоростью движения.

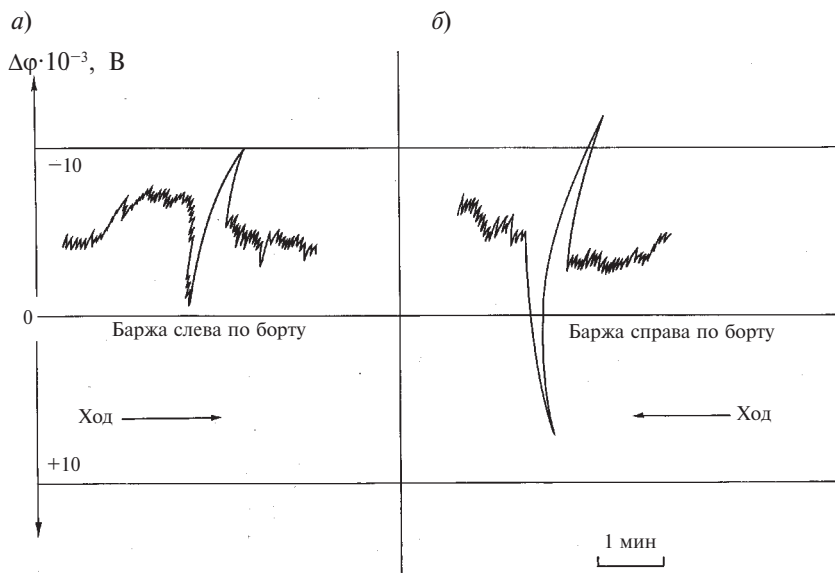


Рис. 4.30. Регистрация сигнала $\Delta\varphi$ при движении зонда относительно объекта, стоящего на якоре. Кондопожский залив, 1973 г.

Большой объем статистического материала по исследованию изменения естественного поля движущимися кораблями различного класса, при различных скоростях и размерах измерительной линии получен автором в Якимварском заливе. В зал. Рыбном ($\varphi^\circ = 61^\circ 04',8$ с.ш.; $\lambda^\circ = 30^\circ 07',2$ в.д.) были проведены направленные эксперименты 8–9 августа 1972 г., которые позволили сформулировать идеи прикладного использования электрической импульсации, возникающей в пресной воде при движении объектов в надводном и подводном положении [Авторское свидетельство № 64302, 1972].

Результатом этих работ явились различные схемы установок, предложенные автором для использования их в узкостях и проливах при обнаружении движущихся объектов, для разработок следящих систем многоцелевого назначения. Полезным качеством таких установок являются скрытность, простота и экономичность (разд. 2.2.5).

Гидродинамические неоднородности водной среды, связанные с движением различных объектов, сопровождаются индуцированием флуктуирующего электрического поля. Изучение такого поля

представляет самостоятельную экспериментальную задачу, которая выполнялась с помощью установки “Вихремер” (ч. 2, 3). При определенных состояниях водной поверхности динамические пульсации достигали чувствительных элементов прибора, несмотря на то, что он находился на значительной глубине (4 м). В качестве примеров рассмотрены изменчивость дивергенции поля, обусловленная корабельными волнами в Якимварском заливе, и движение вихрей воды во фронтальной зоне (“циркуляция Ленгмюра”) (см. разд. 2.4.4 рис. 2.62) и далее по тексту.

На фоне естественных вихревых пульсаций, характерных для штилевой погоды или состояния поверхности воды до 1 балла (амплитуда до 20 мкВ) (рис. 4.31), были четко зарегистрированы вихри, обусловленные прохождением судов и кораблей по фарватеру залива. Эти записи позволяют изучить в деталях динамику передачи энергии поверхностных волн на глубины, а также реально представить особенности структуры «искусственных» вихрей в отличие от естественных фоновых (см. рис. 4.31). Поскольку залив имеет ориентацию с северо-запада на юго-восток, суда следуют соответствующими курсами. При курсах с юго-востока на северо-запад, как правило, знак первой по ходу записи ветви импульса дивергенции поля был отрицательным, вторая ветвь отклонялась в положительном направлении. Затем следовал пакет из $7 \div 8$ импульсов с преобладающими периодами 15; 13; 12 и 9 с и преобладающими амплитудами импульсов в пакете от $80 \div 100$ до 150 мкВ. Интервалы между импульсами располагались так же в убывающем порядке, как и периоды импульсов, а именно: 19,7, 12,6, 7,6 и 6,1 с. При курсах с северо-запада на юго-восток знак первой по ходу записи ветви импульса был положительным, вторая ветвь отклонялась в отрицательное направление. Далее все повторялось.

Интерес представляет также картина регистрации системы отраженных от берега корабельных волн и сопутствующих им вихревых пульсаций (см. рис. 4.31, в; разд. 2.4.4). Поскольку записи произведены не быстродействующими приборами, выполнить высокоточный количественный анализ между амплитудами и частотами вихревых пульсаций, вызванных искусственными волнами, не представилось возможным, да это и не является самоцелью. При необходимости такую работу можно провести. Наша задача сводится к тому, чтобы показать, что искусственный гидродинамический источник вносит существенный вклад в общую фоновую картину изменчивости дивергенции поля, и это следует учитывать в дальнейшем

при интерпретации результатов. Например, на рис. 2.62 (см. разд. 2.4.5) дана запись дивергенции поля при прохождении ветровой полосы циркуляции Ленгмюра над прибором “Вихремер”; импульс во фронтальной зоне — участок 1 — достаточно ярко отличается от системы импульсов, сосредоточенных в корабельной волне.

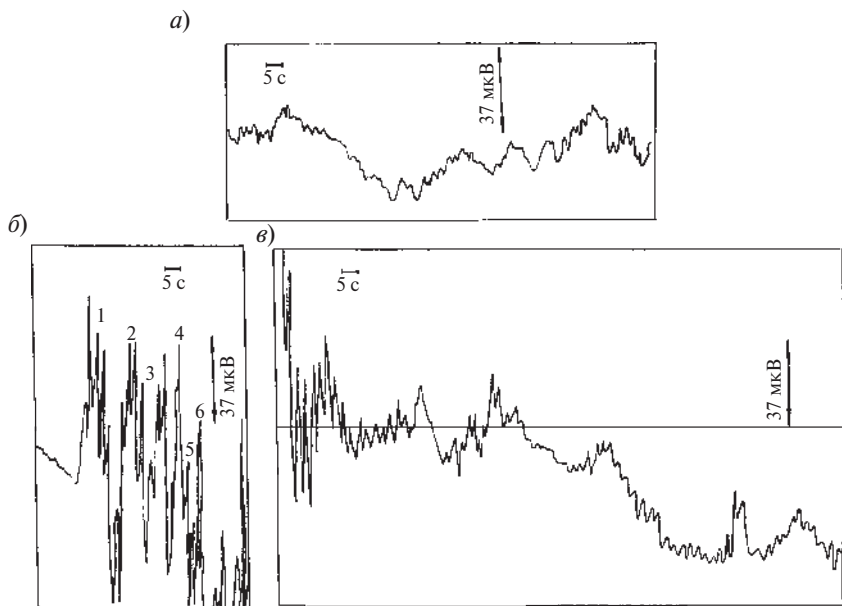


Рис. 4.31. Электрокинетические пульсации, генерируемые волнами искусственного происхождения. Ладожское озеро. Якимваарский залив. 1977 г.:

a — естественный фон; *б* — искажение фона корабельными волнами; *в* — пакет пульсаций внутренних волн, отраженных от скалы берега. Калибровка сигналов — 37 мкВ; глубина измерений 4 м

Еще до изготовления Московским ИЗМИР РАН чувствительной аппаратуры модификации “Вихремер” (1977 г., разд. 2.2.6) автором разрабатывалась и внедрялась методика электрополюметрического обнаружения движущихся объектов в пресной воде, отличающаяся простотой и рядом технических особенностей, которые позволили официально оценить ее как новый способ, применяемый в прикладных целях. На рис. 4.32 представлена статистическая выборка, иллюстрирующая движение одиночного объекта *a* и сдвоенного объекта *б*, *в*, *г*, проходящих через контрольный пост —

электродную установку — в двух взаимно обратных направлениях ($132^\circ,3$ и $312^\circ,3$). Как видно, одиночный объект регистрируется одиноким знакопеременным импульсом $\Delta\phi$ в зависимости от направления движения; сдвоенный объект, состоящий из буксира и модели, имитирующей “преследователя” или “спасаемую цель”, регистрируется своеобразной группой импульсов, которые также хорошо могут быть интерпретированы оператором.

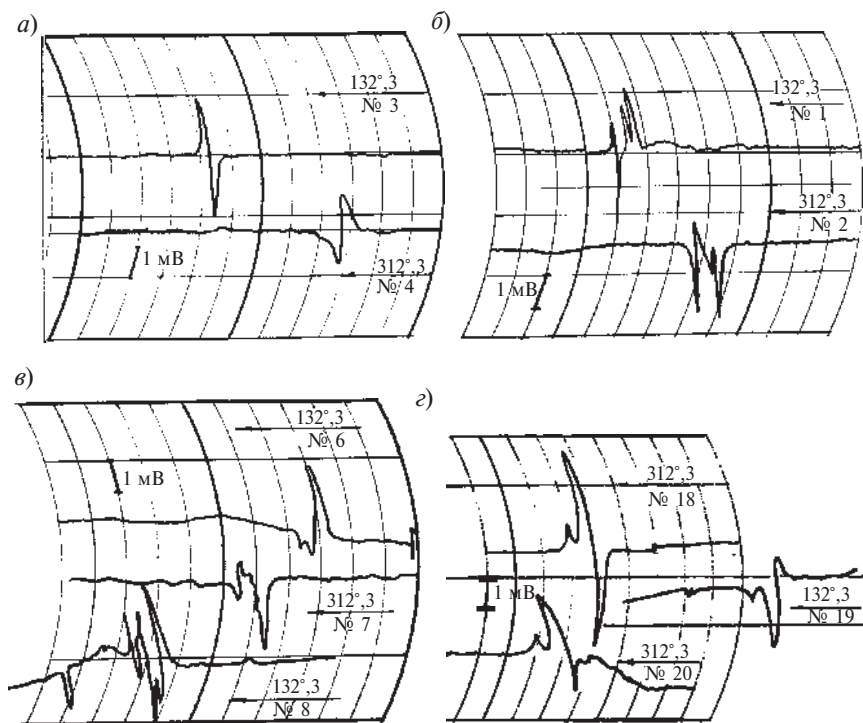


Рис. 4.32. Экспериментальное доказательство обнаружения движущегося объекта на взаимно обратных курсах на специальном ладожском полигоне

Таким образом, внедрение различных идей прикладного использования электродинамической импульсации, возникающей в пресной воде при движении объектов, довольно перспективно. Однако в настоящее время (насколько известно автору) существует пока лишь скромный вклад в проблему — изобретение *“Способ обнаружения движущихся подводных объектов”*.

Формула изобретения:

Способ обнаружения движущихся подводных объектов, основанный на измерении возмущений естественного электрического поля в воде, отличающийся тем, что с целью надежного обнаружения факта прохождения любым (металлическим или неметаллическим) подводным объектом пространственной базы визирования между каждой парой погруженных в воду электродов и определения параметров движения регистрируют сигнал, возникший на электродах от перемещения подводного объекта, и по амплитуде и длительности этого сигнала оценивают скорость движения объекта, а по знаку определяют направление его движения [Александров и др. Авторское свид. № 64302, 1972 г.].

Кроме сопутствующей волны, при движении объектов источником локального гидродинамического поля является кильватерная струя. Известно, что исследование кильватерного демаскирующего следа корабля проводилось различными методами — термоанемометрическими и квантовыми оптическими турбулиметрами, тепловизорами, термогирляндами и т.д. Все эти устройства, особенно на базе ОКГ, требуют значительных материальных затрат. Электрометрия и здесь может быть рекомендована для изучения тонкой структуры таких динамических явлений как в стационарных условиях (зарождение, развитие и затухание вихря во времени), так и для поиска и обнаружения их по собственному амплитудно-частотному спектру. Характерный случай обнаружения кильватерного следа от морского буксира по скачку градиента потенциала зафиксирован 13 июля 1973 г. в Кондопожском заливе [Александров, Зайцев, 1978]. Кильватерный след судна был пересечен зондом через 2 мин после того, как оно прошло ортогональным курсом по отношению к движению зонда. Зонд перемещали (моторным катером) через кильватерную струю ортогонально ее протяженности в течение 30 с, и регистратор записал скачок градиента потенциала амплитудой $1,2 \cdot 10^{-3}$ В. Общий уровень поля при этом был однороден. Вихреобразование и наличие пузырьков воздуха с высоким электрическим зарядом в зоне кильватерной струи создают локальное, достаточно интенсивное электрическое поле, гидродинамические характеристики которого при детальном изучении могут послужить своеобразным демаскирующим признаком для движущихся объектов.

К проблеме изучения структурных особенностей кильватерного следа примыкает задача учета вклада скорости хода судна, ведущего поиск подводных объектов, след которых так или иначе оказывается на поверхности акватории. Пример экспериментальной оценки вклада изменения скорости хода поискового судна в генерацию импульсных сигналов $\Delta\phi$, которые могут исказить истинный сигнал от пересекаемого кильватерного следа, представлен на рис. 4.33.

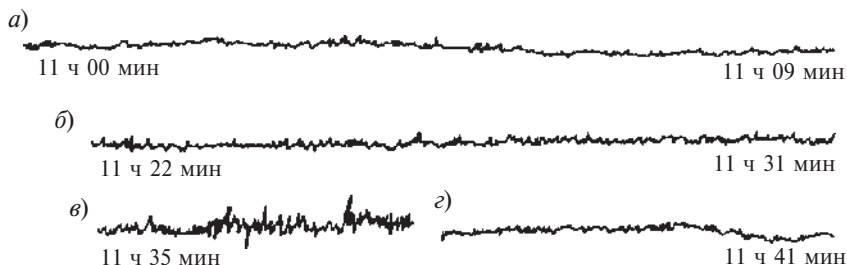


Рис. 4.33. Влияние скорости хода судна на показания буксируемой электродной установки:

Скорость хода: а — малая (5 узлов); б — средняя (7 узлов); в — полная (8,5 ÷ 9 узлов); г — запись при изменении длины буксируемого троса [Александров, Зайцев, 1978]

Возникновение электрокинетического импульса в тракте измерительной установки типа “ворота” можно наблюдать также и при движении пловущего человека. В 1980 г. 2–4 августа в Куркийокских шхерах Ладожского озера ($\varphi^\circ = 61^\circ 14', 4$ с.ш., $\lambda^\circ = 30^\circ 01', 2$ в.д.) проводились опыты с целью обнаружения таких сигналов. Задача интересная и представляющая собой определенную значимость, учитывая широко развитую практику плавания с аквалангами или без них.

Импульсный электрический эффект сопутствует движению пловца: нарушается и модулируется квазистационарная естественная спектральная структура иерархии вихрей, при этом дипольная установка регистрирует серию импульсных сигналов, четко выделяемых на естественном фоне. Дипольная установка ($L = 1$ м) жестко ориентировалась или горизонтально с севера на юг на глубине 1 м или вертикально так, чтобы верхний электрод был на глубине 1 м, погодные условия — штиль.

Рассмотрим два примера экспериментальных данных:

а) *горизонтальный диполь*. Фоновые значения поля: амплитуды $100 \div 200$ мкВ, частота $0,5 \div 1$ Гц. Движущийся по поверхности пловец создает импульсное изменение фоновых колебаний с амплитудами $1,25 \div 3,8$ мВ (среднее 2,5 мВ). Момент проплыва

обнаруживается “пакетом импульсов” из 4–5 штук с продолжительностью его $5 \div 7,5$ с. Пловец со спортивной подготовкой практически не модулировал частоту колебаний фона (5 импульсов в течение 5 с). Линия движения была ортогональна оси диполя, при этом первый импульс в “пакете” отклонялся в отрицательную часть шкалы, если движение было с запада на восток и в положительную — при движении с востока на запад;

б) *вертикальный диполь*. Фоновые значения поля: амплитуды $50 \div 350$ мкВ, частота $0,5 \div 1$ Гц. Пловцы двигались по поверхности над верхним электродом. “Пакет импульсов”, возбуждаемых пловцами, состоит из $7 \div 8$ всплесков с продолжительностью около 8 с и амплитудами $0,35 \div 1,2$ мВ (среднее 0,8 мВ). Первый импульс в “пакете” отклоняется в положительном направлении при движении пловцов с востока на запад и в отрицательном направлении — при движении с запада на восток.

Примерно аналогичные результаты были получены при вертикальном погружении, всплытии и нырянии спортсмена возле диполя (расстояние ≈ 1 м). Всего было проведено 24 опыта, из которых менее показательными были два опыта, когда пловцы двигались под диполем ортогонально базе визирования и практически не изменяли фоновых флуктуаций поля по амплитуде.

Таким образом, плывущий человек создает электрические потенциалы, отличающиеся по своим амплитудно-частотным характеристикам от фоновых значений. Скорость движения, частота гребков и толчков пловца, расстояние до чувствительных элементов зонда существенно сказываются на результатах при прочих равных внешних условиях. При движении ортогонально к линии визирования зонда амплитуда сигнала в 2–3 раза более, чем при параллельном движении. При смене направления движения меняется полярность первого импульса в группе. Минимальный достоверный сигнал при указанных выше фоновых условиях получен при проплывании человека на расстоянии в 6 м от установки. Устойчивый сигнал, превышающий амплитуду фоновых колебаний поля в 3–5 раз, получен на расстоянии в 3 м от установки. Оптимальные размеры базы визирования зонда для измерений подобного рода в электробиологических работах не должны превышать двух-трех длин исследуемого объекта. Получены первые результаты, которые могут быть существенно откорректированы при дальнейших исследованиях. Электрополюметрия может быть использована при спортивной подготовке пловцов, при изучении характеристики движения крупных водных организмов и т.д. При этом следует обязательно учитывать возможные источники существенных помех при исследовании водной среды и ее обитателей (ч. 2–4).

Рассмотрим весьма актуальный и нерешенный до настоящего времени *вопрос о влиянии физических полей движущихся судов на пространственное распределение промысловых рыб и их поведение* [Протасов, Бондарчук, 1982]. Показано, что основная масса и пресноводных, и морских косяков рыб концентрируется на значительных расстояниях от судоходных трасс, где в воде образуются характерные низкочастотные электрические и гидромеханические поля. Поскольку органы чувств большинства промысловых рыб в этом частотном диапазоне обладают высокой чувствительностью (ч. 1, 3), их реакция на ухудшение экологических условий по линии движения судов выражается в отходе от фарватеров на 200 ÷ 400 м (крупные придонные рыбы промысловых размеров). Ставится вопрос о разработке способов экранирования создаваемых судами электрических и акустических полей.

Гидробиологические исследования на судах (низшие формы — планктонные сообщества) также необходимо корректировать, поскольку электромагнитное поле исследовательских судов является абиотическим фактором, способствующим изменению концентрации, а возможно, и видового состава фауны в поверхностном слое воды. Работы в этом направлении еще только начинаются, поэтому конкретные рекомендации пока трудно предложить. Тем не менее, во избежание получения недостоверных данных по количеству и качеству проб целесообразно орудия лова (батометры, сети и др.) удалять от судна в зону с минимальным искажением фоновых характеристик поля.

Короткопериодные пульсации электрокинетических эффектов в воде, инициированные подводным взрывом

Практическое значение имеет исследование короткопериодных колебаний электрического поля водной среды, инициированных подводным взрывом. Автор предложил специалистам в области подводной взрывной техники провести методическую работу по обнаружению гидроакустических сигналов методом естественного поля. В период испытаний этой техники 8 августа 1972 г. с помощью двухэлектродной установки был зарегистрирован специально имитированный сейсмический сигнал. База визирования ориентировалась с запада на восток горизонтально, длина ее — 12 м. Глубина постановки электродов — 2 м, глубина участка испытаний — 14 м. Эпицентр взрыва находился примерно в 50 м от установки на глубине 3 м. Заряд шнуровой, конический, масса его — 32,5 кг, время действия ≈ 2 мс, давление фронта ударной волны

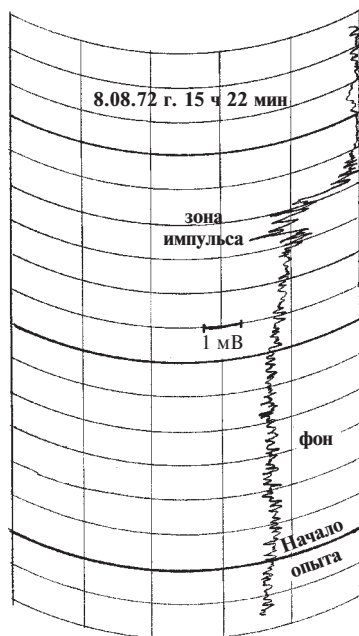


Рис. 4.34. Регистрация возмущения естественного поля акватории подводным взрывом. 08.08.72 г.

$p \approx 40$ кг в радиусе нахождения установки. Скорость регистрации сигнала невысока (1800 мм/ч), это не позволило детально изучить тонкую структуру импульсной волны, тем не менее она была зарегистрирована четко. Отмечается резкое смещение уровня среднего фона естественного поля ($\pm 3 \cdot 10^{-4}$ В/м) сначала в положительном, затем в отрицательном направлении и далее — при затухании импульса — снова в положительном. Амплитуда импульса ≈ 3 мВ (рис. 4.34).

Учет подобных антропоферных факторов возмущения среды, безусловно, необходим, особенно это стало ясно, когда значительно позже появились работы, связанные с изучением возмущений ЭМП Земли при промышленных взрывах [Анисимов, Гохберг, Иванов и др. / Д АН СССР. 1985. Т. 281, № 3]. К сожалению, в 1972 г., когда проводились опытные эксперименты, в нашем распоряжении не было бы-

стродействующей регистрирующей аппаратуры, а постановка целенаправленных работ была крайне затруднена. Зарегистрированные автором импульсы $\Delta\phi$, обусловленные взрывной волной, сходны с электросейсмическими явлениями естественной природы. Теорию таких явлений предсказал Я.И. Френкель и ввел в качестве объяснения электроакустических эффектов в кристаллах [Вопросы истории естествознания и техники. 1995. № 3. С. 155–156, 46–49].

О современных технических приложениях использования генерируемых импульсов ЭП в воде

Проблема охраны подводных пловцов, эффективное проведение современных соревнований на морских акваториях и другие задачи обуславливают необходимость создания технических устройств, способствующих успешной телекоммуникации между пловцами, водолазами и их безопасности от морских хищников (акулы, касатки, мурены и др.).

Появились публикации [<http://www.membrana.ru/articles/global/2002/03/28/223100.html>] о разработке австралийской компанией *Sea Change Technology* индивидуального портативного устройства, отпугивающего акул (р. 4.35). Прибор *Shark Shield* генерирует ЭМ импульс под водой с радиусом действия $15 \div 20$ м и крепится на теле пловца (рис. 4.36).

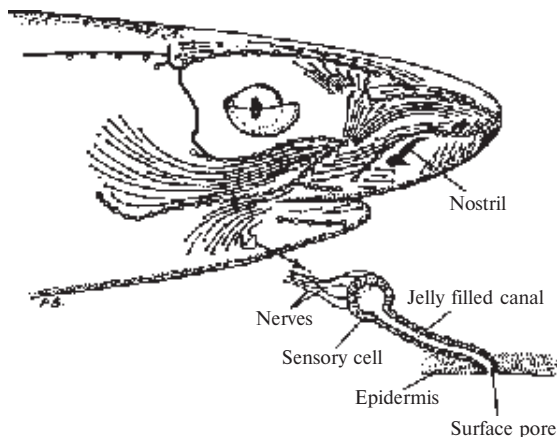


Рис. 4.35. Схема сенсорного восприятия сигналов от генератора ЭМП центральной нервной системой животного* с помощью ампул Лоренцини (*Ampullae of Lorenzini*)

Акула, попадающая в поле импульса, вначале испытывает дискомфорт, вызванный воздействием электричества на рецепторы, называемые *Ampullae of Lorenzini*, расположенные вокруг её пасти. Таким образом, электрические импульсы оказывают воздействие на нервную систему хищника.

В зависимости от используемой модели определён и радиус действия: если акула пытается



Рис. 4.36. Прибор “Shark Shield”

*Современное физиологическое описание органов электрических рыб — ампул Лоренцини — изложено Г.Р. Броуном и О.Б. Ильинским в велико-лепной монографии “Физиология электрорецепторов” (Л.: Наука, 1984. 247 с.).

напасть на сёрфера, спазмы у неё начнутся на расстоянии $2 \div 3$ метров от него, если на дайвера — зона увеличивается до $4 \div 5$ метров (цв. рис. 4.37, 4.38).

По словам производителей, на разработку “*Shark Shield*” ушло шесть лет, в течение которых проводились испытания в южноавстралийских и южноамериканских прибрежных водах, где зафиксировано больше всего жертв нападения акул.

Прибор пока не вызвал протестов со стороны природоохранных организаций. С одной стороны, нынешние способы борьбы с акулами — сети, крюки и всевозможные ловушки — калечат дельфинов, китов и черепах. С другой стороны, прибор “*Shark Shield*” (“акулий щит”) опасен только для акул, поскольку рецепторная система, реагирующая на импульсацию генератора, может быть повреждена, и хищник лишится своих лощманских качеств. Известно, что зрение у акул слабое, а рецепторы дают информацию о температуре воды и ЭМ полях, излучаемых потенциальными жертвами.

Презентация прибора пришлось очень кстати, так как совсем недавно из-за нашествия 50 акул был отложен национальный чемпионат Австралии по сёрфингу — семь с половиной тысяч участников томились на берегу, пока организаторы безуспешно разгоняли стаю при помощи моторных лодок.

Стало также известно о нападении акулы в мутной воде на гавайского сёрфера.

Любопытно, что, собственно, к изобретению “*Shark Shield*” компания Sea Change Technology не имеет никакого отношения: патент на изобретение “шокера” для акул принадлежит Natal Shark Board, которая разработала предшествующую версию — “*Shark POD*” (“Protective Oceanic Device”).

Во время летней Олимпиады-2000 в Сиднее для защиты триатлонистов использовались именно “*Shark POD*”. Компании Sea Change и Natal Shark Board (крупнейшую международную корпорацию по борьбе с акулами) связывают своеобразные отношения.

Именно специалисты Natal Shark Board начали использовать для защиты электричество, однако предприимчивые Sea Change сумели привлечь к своему проекту Playford Capital (филиал Microsoft), корпорацию EDS и правительство Австралии, выкупили лицензию на производство и теперь, надо полагать, за очень короткое время они вытеснят с рынка конкурентов.

Natal Sharks Board — правительственная южноафриканская корпорация была создана в 1964 г. Сейчас она включает в себя 200 исследовательских групп, в которые входят биофизики, морские биологи, инженеры-электрики и профессиональные ныряльщики. В 1995 г. Natal Sharks Board представила первый прибор.

В 1997 г. владелец Dive Shop (магазина для ныряльщиков) стал первым дистрибьютором прибора “Shark POD” на территории Австралии и Новой Зеландии. Годом позже Shark Protection Pty. Ltd начала продавать и обслуживать “Shark PODs”.

Когда Natal Sharks Board (NSB) вычислили появление “пиратских версий”, они приняли соломоново решение. С конца 90-х все “шокаеры” для акул должны проходить аттестацию комиссии NSB. Каждый прибор испытывается в течение трёх лет во всех морях и океанах. Так что, новый “*Shark Shield*” не является строго новинкой.

Sea Change Technology выпускает на рынок два вида “*Shark Shield*”. “Облегчённая” версия весит около 450 г, и её батареи хватает на два часа. Профессиональный и более тяжелый вариант весит 600 г, и его хватает на четыре часа. На первый взгляд, прибор тяжеловат, но ведь в воде он будет полегче...

За 15 минут до разрядки загорается индикатор, сигнализирующий о необходимости возвращаться на сушу.

Использование “*Shark Shield*” противопоказано людям с больным сердцем, эпилептикам, беременным и детям до 12 лет. Производители предупреждают, что крайне опасно касаться одного из двух электродов, когда прибор включен, и надевать его, когда оба электрода не погружены в воду.

Рекомендуется включать устройство не в момент, когда увидели акулу, а только войдя в воду: оказывается более 50 % выживших после нападения акулы даже не чувствовали её приближения.

Чтобы проверить, работает ли “*Shark Shield*”, надо поднести в воде руку к антенне на расстояние 30 см — не ближе: мышцы начнут сокращаться и вибрировать. “Шокер” для акулы можно использовать только в морской воде, так как у пресной воды электропроводимость ниже на три порядка (разд. 2.1, 2.2).

Но тут, кажется, производители упустили из виду пресноводную акулу из озера Никарагуа (*Carcharhinus nicaraguensis* Gill et Bransford), которая достигает 3 м в длину, и очень агрессивную акулу из реки Замбези (*Carcharhinus zambezensis*) в Южной Африке, достигающую в длину 2,5 м.

Кроме того, в пресные воды мигрируют мадагаскаро-индонезийская акула *C. amboinensis* (2,5 м) и тёмная акула *C. obscurus* (3,7 м), а нападать все акулы умеют и на мелководье, когда можно и не успеть “сгенерировать” электрический барьер.

Стоимость “*Shark Shield*” в розницу — \$700. Сейчас Sea Change занимается разработкой устройств, которые могли бы защитить от нападения акул целые пляжи, а в ближайшие полгода появятся разновидности “*Shark Shield*” для яхт и лодок.

С другой стороны, если акулам грозит экологическая опасность, как видно из обзора, то хорошо известно, что на некоторых пляжах оказалась бесполезна даже металлическая сетка под напряжением, а электрическое поле, напротив, — при некоторых обстоятельствах — может привлечь акулю стаю (телефонный провод окружен ЭМП с индукцией в диапазоне мкТл, которая вызывает у акул пищевой рефлекс). Таким образом, наблюдается трудно нивелируемое противоречие: новшества техники, как двуликий Янус, и полезны и вредны.

Радионавигационное обеспечение средств связи при картировании электрической проводимости воды

В разделе 2.1.2 были рассмотрены макроскопические электромагнитные характеристики пресных и морских акваторий, их расчет, измерение и значимость для решения разнообразных научных и практических задач. Здесь мы коснемся только узкоспециализированного вопроса, тесно примыкающего к проблеме навигационного обеспечения судоходства, его безопасности и четкого понимания роли среды в общей проблеме геоэлектромagnetизма.

Отдавая дань уважения многим моим коллегам, прилагавшим большие усилия к решению навигационных задач для ВМФ бывшего Советского Союза, хочется отметить работу Д.М. Филиппова, выполнявшего расчеты удельной электрической проводимости воды в океане. В то время, когда расчеты автора [Александров, 1966; 1967] базировались на возможностях ЭВМ первого поколения, и приходилось сознательно упрощать исходные формулы и программы (1964–1965 гг.), последующие аналитические материалы были получены на ЭВМ с большой памятью. Тем не менее, первые наши результаты уже предсказывали наличие слоя воды в океанах с минимальной удельной электрической проводимостью. Более поздние расчеты Филиппова подтвердили этот вывод [Филиппов, Олейников, 1978]. Д.М. Филиппов пытался зарегистрировать полученные материалы в Государственном комитете изобретений СССР как “открытие”, но успеха не добился, уйдя из жизни и не получив морального удовлетворения.

Неоднородность электрических характеристик водной среды (ϵ и χ) приводит к существенным ошибкам в определении места кораблей по радиопеленгу на ДВ и СДВ за счет искажения поверхностной волны в точке приема. Локальное искажение поля радиоволны, вызванное работой радиоприемных устройств кораблей и судов в условиях, отличных от тех, при которых определялась радиодевиация, иногда может значительно превзойти аппаратурные погрешности. В связи с этим был рассмотрен вопрос о влиянии изменения

электропроводимости морской воды на результаты определения места корабля с помощью радиопеленгования (РП).

По сравнению с сушей морская вода считается идеальным проводником, т.е. ее электропроводимость принимается равной бесконечности.

Предел $\chi = \infty$ является вполне строгим для высоко проводящей поверхности Земли. Электропроводимость суши, хотя величина ее примерно в 10^4 раз меньше, чем морской воды, не может считаться равной нулю. На частотах диапазона СДВ $\chi_{\text{суши}}$ играет существенную роль: потери мощности радиоизлучения увеличиваются по мере уменьшения электропроводимости почвы. Действительно, при распространении ЭМ волн над сушей с $\chi = 2 \cdot 10^{-3}$ См/м коэффициент ослабления поля вдвое больше, чем в случае распространения над морской поверхностью с $\chi = \infty$. Однако чем ниже электропроводимость подстилающей поверхности (почва, пресная вода), тем лучше условия для проникновения радиоволн в глубь среды; в хорошо проводящую среду радиоволны проникают слабо, в предельном случае идеально проводящей почвы (воды) с $\chi = \infty$ они вовсе не проникают*. Очевидно, прием радиосигналов в распресненном слое, особенно подо льдом, можно осуществить на больших глубинах, чем в высоко соленой воде. Следует отметить, что изменение поля поверхностной волны различных частот происходит различно при стабильности электрических свойств среды, т.е. наблюдается кажущаяся дисперсия электропроводимости при измерениях ее на разных частотах [Александров, 1969–1973].

Таким образом, условия радиосвязи будут наиболее успешными при проводимости среды, близкой к проводимости дистиллированной воды $\chi \approx 10^{-6}$ См/м. Повышение χ сказывается неблагоприятно на условиях распространения радиоволн. Поэтому становится весьма необходимым измерение $\chi_{\text{воды}}$ или, в крайнем случае, расчет ее. Эта задача для морских бассейнов решается сравнительно несложно, поскольку сведения о температурном и солевом режимах большинства районов мирового океана имеются. В настоящее время можно характеризовать бассейн не только одним средним значением электропроводимости, а проследить сезонные и, если нужно, суточные колебания этой характеристики по вероятным трассам радиосвязи и пеленгования, ввести статистическую оценку расчетных данных, что будет необходимо для составления радиопрогнозов.

*Имеет место скин-эффект — поляризация ЭМВ в поверхностном слое воды.

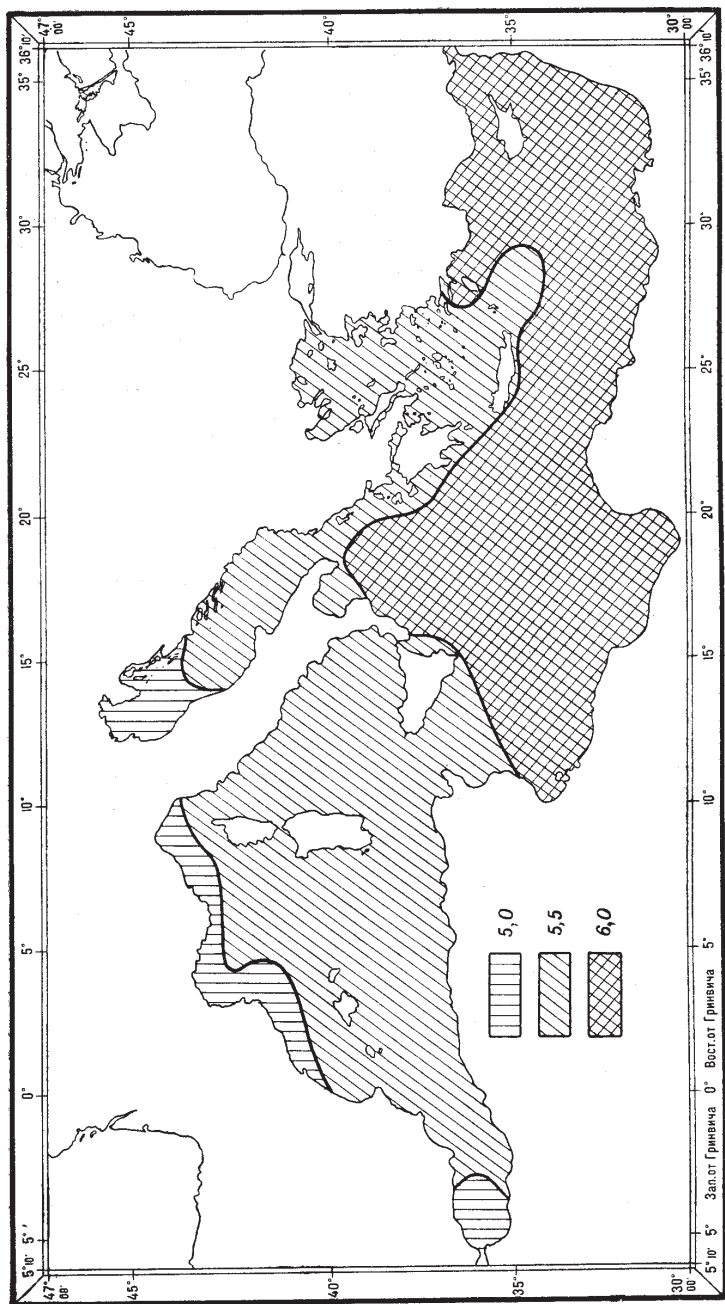


Рис. 4.39. Навигационная карта распределения удельной электрической проводимости воды в Средиземном море. Пределы изменения $\chi \approx 5 \div 6 \text{ См/м}$.
[Записки по гидрографии. 1967. № 2, 3]

Ранее (60–70-е годы XX века) во время радиодевiationsных работ или при расчете изменения радиодевiations, ввиду перехода плавсредств в новый район плавания, рекомендовалось учитывать изменения $\chi_{\text{воды}}$ путем расчета ее по температуре и солёности воды или вести измерения. Для облегчения этой задачи и были предложены автором специальные карты удельной электрической проводимости морской воды (рис. 4.39). Эти карты позволяют не тратить время на измерения или производить ориентировочные расчеты электропроводимости, а обеспечивают штурмана необходимыми данными в любой точке картированного бассейна. Карты автором составлялись только для холодных и теплых сезонов года, так как для практических целей к настоящему времени бóльшая детализация не требуется.

Были предложены и регулярно готовились дополнительные пособия для облегчения определения места кораблей и для радиосвязи под водой с помощью применяемых в ВМФ радионавигационных систем и при наличии передающих центров связи. В такие пособия предполагалось включение графиков и карт дальности и глубин уверенного приема сигналов радионавигационных систем с учетом не только их технических характеристик, но и расчетных данных, обусловленных средой (сферичность Земли, электромагнитные свойства подстилающей поверхности, состояние ионосферы в определенное время суток, наличие ледяного покрова и т.д.). Эти задачи могли быть успешно решены, поскольку уже к тому времени теоретическая разработка и схемы расчета имелись на кафедре радиофизики СПбГУ. К сожалению, проектировавшиеся пособия изданы не были, и удалось лишь создавать и публиковать карты проводимости морской воды для учета изменения радиодевiations на подводных кораблях. Например, в табл. 4.5 показано влияние изменения χ на изменение радиодевiations (РД) при переходе корабля из района, где РД определена, в район плавания. Расчеты и промежуточные выкладки опущены, поскольку они представляют специализированную задачу, а нас интересуют лишь принципиальные конечные результаты.

Поскольку причины ошибок при РП штурману известны, а допустимая ошибка в пеленге равна $1^{\circ},5$ и допустимая РД равна примерно $0^{\circ},5$, то из всей совокупности источников ошибок интересно выделить и оценить непосредственное влияние изменения $\chi_{\text{воды}}$ на изменение коэффициента радиодевiations D° при прочих равных условиях.

Таблица 4.5

Влияние проводимости воды на радиодевiation на кораблях

Частота пеленгуемой радиостанции $f_{\text{факт}}$, кГц	Радиокурсовой угол $q^{\circ}_{\text{факт}}$	Высота рамочной антенны h , м	χ воды в момент радиодевииции работ $\chi_{\text{рд}}$	χ воды в р-не плавания $\chi_{\text{факт}}$	Радиодевииция в момент радиодевииции работ $F^{\circ}_{\text{факт}}$ при $\chi_{\text{рд}}^{*}$	Изменение коэффициента радиодевииции ΔD° , обусловленное $\chi_{\text{факт}}$	Новое значение радиодевииции F°_1 , рассчитанное для района плавания при неизменных начальных условиях (за искл. велич. $\chi_{\text{рд}}$)
Пример 1. Переход г. Североморск–район Гольфстрима							
30	38°	1,2	3,0	5,5	6°	–2°,8	3°,2
100	210°	2,0	3,0	5,5	3°,7	0°,4	4°,1
Пример 2. Переход г. Владивосток–Чукотское море							
20	87°	0,8	4,8	2,5	8°	0°,2	8°,3
Пример 3. Переход г. Севастополь–Средиземное море							
16	33°	1,5	1,9	6,2	4°,2	–7°,2	–3°,0

*Предполагается, что $F^{\circ}_{\text{факт}}$ вычислена при наличии на корабле вспомогательных графиков радиодевииции на указанных частотах.

Для такой оценки была проанализирована взаимозависимость

$$\Delta D^{\circ} = f(\chi) \text{ и } F_1^{\circ} = f(\chi), \quad (4.7)$$

где ΔD° — изменение коэффициента радиодевииции; F_1° — значение радиодевииции, рассчитанное для района плавания при неизменных начальных условиях, за исключением электропроводимости воды. Условия для анализа (формулы (4.7)) взяты из примера 3 табл. 4.5. В результате расчетов показано, что изменение коэффициента радиодевииции колеблется от 0°,8 до 1°,2 при изменении электропроводимости на 1 См/м. Изменение радиодевииции F_1° на 0°,5 соответствует изменению приблизительно на 0,5 См/м при низком (неблагоприятном) расположении рамочной антенны и частоте пеленгования ≈ 16 кГц. Поэтому, исходя из требований допустимой радиодевииции, картирование электропроводимости с точностью до 0,5 См/м в общем удовлетворяет практическим требованиям при современной разрешающей способности радиоаппаратуры. Однако, если ошибка в радиопеленге окажется более 1°,5 за счет погрешностей в аппаратуре, за счет изменений расположения антенны относительно вторичных излучателей, за счет изменений параметров работающих радиосистем и т.д., появится необходимость рассчитывать и учитывать электропроводимость воды с более высокой точностью ($\approx 0,1$ См/м).

В районах с электропроводимостью менее 2 См/м радиодевационные работы необходимо производить не менее двух раз в год — при $\chi_{\max}$ и $\chi_{\min}$ с тем, чтобы последующие расчеты фактической радиодевации имели меньшие погрешности. Выбор времени радиодевационных работ определяется по предлагаемым картам электропроводимости, позволяющим выделить периоды с наступлением $\chi_{\min}$ и $\chi_{\max}$ воды. В морях с высокой электропроводимостью ($3,0 \leq \chi \leq 7,0$ См/м) радиодевационные работы можно производить один раз в год, так как здесь радиодевация меньше подвержена изменениям, хотя общие условия проникновения поверхностных радиоволн в воду значительно хуже, чем в морях с низкой электропроводимостью.

Полученные нами карты проводимости воды морей и океанов в первую очередь использовались для введения поправок для надежной надводной радиосвязи и точности определения места корабля с помощью радионавигационных систем. По трассам радиосвязи или радиопеленгования необходимо точно знать удельную электрическую проводимость воды, значение которой вводится в расчетные уравнения для определения фазовых скоростей и дальностей распространения радиоволн. До недавнего времени предполагалось, что такой учет важен лишь для морских акваторий. Это ошибочное мнение было опровергнуто при радиогеодезических работах на оз. Байкал в 1982 г. (разд. 2.1.2).

Рассмотрение примера прикладного использования электрических характеристик водной среды можно закончить краткими выводами:

1. Для повышения точности определения места корабля в подводном положении с помощью радиопеленгования сигналов береговых РС необходимо вводить в расчетные формулы для радиодевации величину электропроводимости воды, изменяющуюся по трассе.

2. Использование при расчетах лишь среднегодовой величины $\chi_{\text{воды}}$ для всего бассейна без учета ее сезонных колебаний приводит к существенным ошибкам в РП. Сезонные карты удельной электропроводимости воды в какой-то мере устраняют этот недостаток и способствуют повышению точности определения места кораблей при введении поправок в расчеты.

3. В перспективе для расчетов дальностей и глубин уверенного радиоприема упомянутые карты следует детализировать и сопоставлять их с конкретной гидрометеорологической обстановкой на море.

4. Для проведения гидрографических радионавигационных работ в крупных пресноводных бассейнах и ввиду повышения разрешающей способности современных РНС целесообразно также

построение карт удельной электрической проводимости по трассам или площадям с учетом гидрометеорологических особенностей объектов особенно в прибрежных районах, широких проливах и заливах, где водные массы отличаются своими физико-химическими свойствами.

Авторские расчеты, карты и рекомендации по их использованию в Управлении гидрографической службы ВМФ были внедрены в Картографическом производстве (акт внедрения № 15/3/0192 от 12.04.84 г., акт внедрения №02-2171 от 18.05.84 г.).

К вопросу о радионавигационных исследованиях, разработке методов борьбы с многочисленными ЭМ помехами тесно примыкает задача учета поля радиоизлучающих установок в режиме переговоров, поиска объектов связи и т.д. Еще в 1985 г. “Вестник АН СССР” (№ 5, с. 30) отмечал, что на службу народному хозяйству поставлены все участки электромагнитного спектра — от источников постоянного и переменного тока, многочисленных высокочастотных радиостанций, инфракрасных, видимых и ультрафиолетовых лучей до рентгеновских и гамма-лучей.

Однако этот исключительно важный вопрос о вторжении ЭМ полей в биосферу остается пока на уровне научных разработок. Например, автор наблюдал явление резкого изменения флуктуаций фона естественного электрического поля в Ладожском озере 23 июня 1974 г. при буксировании градиент-зонда в поверхностном слое воды в тот момент, когда начала работать судовая радиостанция на частоте 470 кГц. Оказалось, что напряженность естественного поля видоизменяется радиоволнами, и это регистрируется зондирующим устройством (длина измерительной буксируемой линии — 20 м) в виде серии импульсов с амплитудой, в 4–5 раз большей чем естественные колебания.

Специальные работы по учету возможных радиопомех при измерении естественного поля $\Delta\phi$ были проведены в штилевую погоду. Вертикальный зонд с размерами электродной измерительной линии $\Delta L = 2$ м служил “приемной антенной” и опускался в слои $0 \div 2$ и $3 \div 5$ м. Воспринимались радиосигналы судовой радиостанции на частоте 470 кГц. Измерительная аппаратура могла регистрировать флуктуации $\Delta\phi$ в полосе частот не выше 3 Гц.

Результаты измерений показали, что сигналы естественного поля модулируются искусственными — радиоволнами на глубинах $0 \div 5$ м при общей глубине места 12 м. В слое $0 \div 2$ м колебания фона, модулированные серией радиосигналов из 3 точек и 1 тире, оказываются по амплитуде в $3 \div 4$ раза выше, чем фоновые (рост от

300 мкВ до 1,2 мВ), и частота их отличается от естественной. В слое $3 \div 5$ м колебания естественного фона были близки к пороговой чувствительности установки и представляли собой плавную кривую, на фоне которой четко выделялись серии коротких (точки) и длинных (тире) сигналов, причем участок записи, включающий радиосигналы, характеризовался спадом уровня естественного фона, но амплитуда модулированных колебаний была значительно меньше, чем в слое $0 \div 2$ м. Таким образом, вертикальное зондирование среды в период работы судового радиопередатчика нецелесообразно (рис. 4.40).

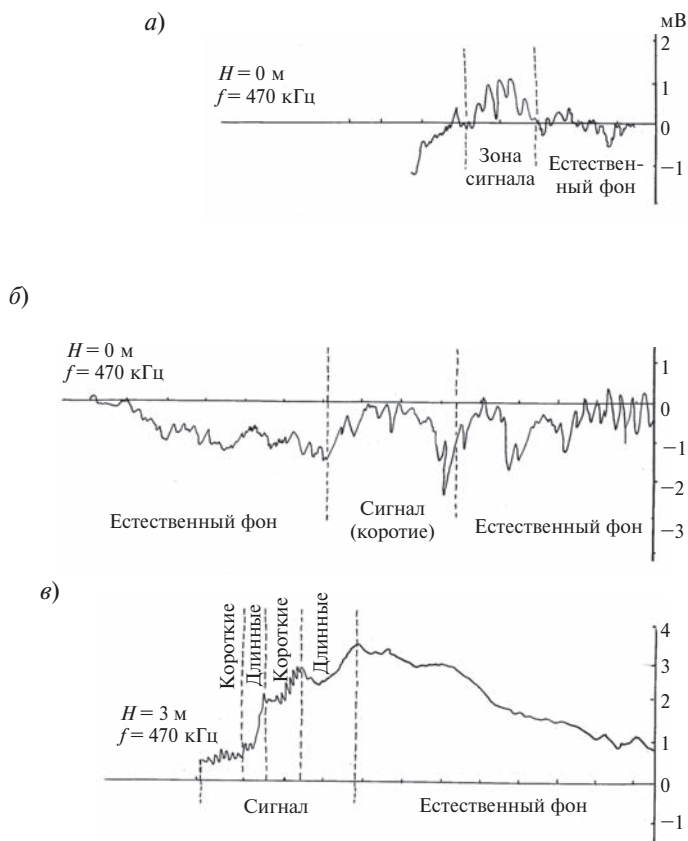


Рис. 4.40. Искажения естественного фона флуктуаций электрического поля при работе судовой радиостанции:

а — на поверхности воды; б — в слое $0 \div 2$ м; в — в слое $0 \div 5$ м

Другой пример дан в работе сотрудников Арктического и антарктического НИИ [Богородский, Трепов, Федоров, 1974]. Авторы проводили радиолокационное зондирование Онежского озера и обнаружили, что таким методом исследовать рельеф дна и решать другие задачи затруднительно, поскольку уровень помех под водой от работы телевизионных станций превышал уровень шума приемника зондирующего локатора на $50 \div 60$ дБ. Все эти сигналы искусственного источника создают электромагнитный фон, не свойственный водоему.

Можно полагать, что пелагические гидробионты (особенно одноклеточные) воспринимают это воздействие как наиболее уязвимая часть экосистемы, поскольку они не имеют возможности активным путем избежать воздействия (как нектон, например).

Третий случай наблюдался нами в районе Андижанского водохранилища в Средней Азии, когда измерить естественный фон флуктуаций ЭП практически не удавалось, ввиду близкого расположения к водоему высоковольтной линии электропередач; если можно было отфильтровать частоту колебаний поля переменного тока 50 Гц, то снизить высокий уровень напряженности не удавалось.

4.2.6. Перспектива развития электрофизических методов исследования водоемов и разработки новой аппаратуры

Многофакторность изменчивости электрофизических свойств водоемов обуславливает сложность исследования их, но, с другой стороны, при использовании новых современных средств технического обеспечения позволяет применить электрометрию для познания отдельных факторов и добиться практического выхода в конкретных задачах.

Рассмотрим некоторые аспекты практического использования электрометрии в будущем.

- Вся совокупность гидромеханических движений в воде описывается электродинамическими уравнениями. Поэтому целесообразно отойти от традиционных механических методов изучения водной среды, а внедрять прямой и методически более строгий — электрополюметрический. В открытых водоемах перспективно устанавливать многокомпонентные стационарные электрополюмеры для синхронных регистраций энергетических характеристик поля в различных частях водоемов. Получаемая информация удовлетворит и гидротехников, и навигаторов, и специалистов биолого-экологического профиля. Помехи, связанные с электрическим полем градиента концентрации посторонних примесей, могут быть учтены.

Перспективен бесконтактный способ измерения напряженности электрического поля — гидромодуляционный, основанный на преобразовании напряженности постоянного или медленно меняющегося поля (УНЧ-диапазон) в переменный сигнал с последующим его усилением на переменном токе с синхронным детектированием. На этой основе создается высокоточная аппаратура, удовлетворяющая современным метрологическим требованиям (СибНИИМ, ВНИИМ).

- В настоящее время достоверно установлены эффекты электромагнитных эмиссий в окружающую среду в моменты роста сейсмической активности, причем фактор этот является дальнедействующим. Сигналы электромагнитного излучения имеют импульсный характер в диапазоне радиоволн. По наблюдениям авторов работы [Гохбер и др., 1979], эти сигналы не связаны с изменчивостью градиента потенциала атмосферно-электрического поля. Поскольку основное затухание электромагнитного излучения по расчетам и наблюдениям происходит в поверхностных слоях земной коры с проводимостью примерно 10^{-2} См/м и достигает величин в пределах 10^2 дБ/км, большие скопления массы пресной воды на пути распространения излучения (озера) могут использоваться как потенциальные источники информации оповещения. Проводимость воды пресных озер на два порядка ниже проводимости тех горных пород, которые обуславливают затухание ДВ- и СДВ-радиоволн до 10^2 дБ/км, следовательно, процесс затухания этого излучения в воде будет значительно слабее.

- Повышение сейсмической активности сопровождается эффектами генерации звуковых и ультразвуковых колебаний (микросейсмы), которым сопутствует также изменчивость фона естественного электрического поля (ч. 2 и 3). Регистрация этих колебаний в воде является потенциальным индикатором и фактором дополнительной информации о напряженном состоянии земной коры. Службу оповещения, видимо, целесообразно организовать в сейсмически активных районах, используя естественные водоемы и искусственные водохранилища (Средняя Азия, Забайкалье, Камчатка, Сахалин).

- Крупные озера являются приемниками сточных вод промышленного производства. В разделах 4.2.2–4.2.4. показано, что применение электрометрии к исследованию экологического состояния больших акваторий, загрязняемых сточными водами целлюлозно-бумажных предприятий, перспективно с точки зрения оперативности оконтуривания опасной зоны. Но задача контроля состоит не только в этом. Во фронтальной зоне, разделяющей чистые и

загрязненные воды, идет бурное развитие целлюлозоразрушающих бактерий и их фагов — микрозоопланктона. Этому процессу соответствуют и характерное распределение и характерный амплитудно-частотный спектр градиента потенциала электрического поля, которые могут служить экологическим сигналом о неблагополучии акватории. Локальные электрические свойства фронтальной зоны можно будет использовать для физиологической оценки постепенной адаптации микроводорослей, бактерий и зоопланктона к новому абиотическому фактору среды обитания — локальному электрическому полю загрязнения. Известно, что любая адаптация (генотипическая или фенотипическая) есть адаптация к конкретным факторам среды, т.е. является экологической, и электрическое поле водоема не исключение из этого правила. Например, неоднородность электрического поля, связанная с гидродинамическими пульсациями, обуславливает отсутствие макроскопических водорослей на средних глубинах; это подтверждается [Гапочка, 1981] суточными колебаниями потенциала системы водоросли — внешний раствор, которые проявляются в динамике осмотического давления. Поэтому комплексное электрометрическое исследование пограничной зоны поможет в итоге лучше изучить регуляторные функции на поверхности раздела между внешней средой (водой) и одноклеточными организмами.

- Экологические проблемы в условиях возрастания электромагнитного воздействия на биоту будут решаться с применением электрометрии в широком диапазоне частот, и водоемы в этом отношении являются и обязательной сферой нашего контроля, и хорошим полигоном, где гидробионты сыграют основную роль для выработки безопасных нормативов предельно допустимых нагрузок (уровней) на живые системы. Без знания таких нормативов невозможно сохранение биотического баланса в рамках исторически сложившихся биоценозов. В философском аспекте на примере простейших может быть рассмотрена третья проблема экологии человека — загрязнение среды обитания.

На примере планктонных сообществ (ч. 2, 3, 4) очевидна перспектива нового применения электрополюметрии: концентрационные электрокинетические поля планктеров в электроразведочной геофизике могут использоваться как объект специального поиска. Именно поля планктеров — источник информации о территориальном нахождении пищевых ресурсов планктофагов, а электрополюметрия — простой и экологически безопасный способ слежения за перемещением организмов в глубинах акваторий.

С точки зрения автора, планктонные сообщества (фитопланктон) можно рассматривать как первичное звено в биорецепторной

цепи экосистемы водоема. На пути к кибернетике живого с помощью этих сообществ можно создавать простейшие модельные биологические системы для изучения внешних естественных и искусственных электромагнитных воздействий на живое вещество. При этом можно обеспечить жизненный цикл популяций, не нарушая его. С полным основанием можно ставить вопрос о расширении исследований по биофизике озер.

Лимническая система, особенно ее биотический компонент, испытывают воздействие ЭМ волн, которое проявляется в эффектах поляризации и намагничивания и может быть оценено с помощью известных характеристик — ϵ и μ . Эти характеристики [Торнунев, Куделькин, 1981] смогут дать представление о степени организации биологической системы (объекта), т.е., возможно, и покажут роль ЭМ полей в биологической эволюции. Бесспорной становится необходимость изучения развития биологических объектов с учетом внешних и внутренних (собственно организменных) электромагнитных полей, взаимодействие которых в биосистеме определяет ее функционирование и уровень жизнеспособности (особи, виды, популяции и т.д.). Известно, что собственные поля биообъектов малы по амплитуде, их напряженность и частота флуктуаций близки к естественным земным, но они несут информативную нагрузку, необходимую организму. Внешними помехами для жизнедеятельности являются поля промышленных источников — электромагнитные поля источников постоянного и переменного тока, радиоустановки, электротранспорт, водный транспорт и т.д. [Богородский, Трепов, Федоров, 1974; Протасов, Гусар, 1982; Шандала, Антипенко и др., 1982; Александров, 1985; Вестник АН СССР, 1985, с. 30; Холодов, Горбач, 1986]*. Однако этот исключительно важный вопрос о вторжении ЭМ полей в биосферу остается пока на уровне научных разработок, и задача дальнейшего научного поиска должна перерасти от констатации факторов к экологическому нормированию электромагнитных факторов, действующих на биосферу не в лабораторных, а в природных условиях.

Немаловажным моментом являются специализированные наблюдения над электрическими свойствами акваторий при наличии ледяного покрова, а также эксперименты по учету роли льда в процессе самоочищения водоема и проникновения ЭМ

*Избегая повторений, отсылаем читателя к обзорам во Введении и к начальным, обобщающим, комментариям в данной работе.

колебаний через лед, по изучению вихревых процессов методами электрметрии со стабилизированной платформы и т.д. Эти работы актуальны, и в перспективе необходимо обобщение материалов и опыта работ в Арктике и зимних работ в озерах.

В настоящее время актуальна задача поиска и оконтуривания океанических и морских месторождений марганцево-железистых конкреций. Это рудное вещество и вмещающая порода характеризуются сложностью химического состава. Концентрация сопутствующих микроэлементов (Fe, Mn, Co, Cu, Ni, Pb, Zn, Ti, W и др.) отличается высокой вариабельностью, что связано с многообразием природных факторов, сопровождающих процесс оруднения. Это все обуславливает сложность проблемы разработки и внедрения экспресс-методов обнаружения, картирования и получения достоверных данных о наличии и концентрации данного полезного ископаемого.

Для поиска районов предполагаемого месторождения конкреций можно применить два метода — геофизический и физико-химический. Назначение геофизического — дать рекогносцировочный показатель возможного скопления рудного вещества (на первом этапе работ, видимо, это будет косвенный показатель). Назначение физико-химического метода — дать дополнительную информацию для подтверждения достоверности наличия конкреций (метод прямой, но на первом этапе разработок он, скорее, лабораторный, нежели полевой). Возможным геофизическим методом поиска могут послужить электрополюметрия и кондуктометрия придонных слоев воды. Однако в условиях океана применение метода связано с техническими трудностями и наличием многочисленных факторов искажения полезного сигнала. Для разработки методики поиска и способов классификации полезных сигналов на рудных полях целесообразно использовать геофизические полигоны в озерах. В частности донные отложения оз. Красного содержат конкреции, электрический сигнал при зондировании этих отложений имел отличительные характеристики. Подобные рудные поля обнаруживались и на Ладожском озере. Поэтому целесообразным можно считать также внедрение магнитометрических методов.

Разработка физико-химических методов анализа будет базироваться на том, что окислы сопутствующих металлов присутствуют в придонной воде в виде коллоидной взвеси и мицелл, обладающих электрическим зарядом. Поэтому следует разработать методику измерения электрического поля данной взвеси или пленки, которая адсорбирует и поглощает за счет электрического взаимодействия ионы металлов — Ni, Cu, Co, Zn, Pb, Ti, — именно

те, что образуют примесь в веществе конкреций и представляют основную ценность руды.

Эта задача может решаться методами прямой потенциометрии при наличии ионоселективных электродов, обратимых относительно указанных ионов. Однако наша промышленность не изготавливает таковые для непосредственных измерений в естественных условиях и на больших глубинах. Поэтому первоначальным этапом будет исследование относительного потенциала взвеси.

Целесообразно освоить и внедрить в практику лабораторного анализа на судах методику инверсионного амперометрического измерения на твердых электродах концентрации в растворе (взвеси) ионов металлов, сопутствующих данному полезному ископаемому.

В настоящее время можно определить концентрацию Cu, Pb, Ni+Co, используя аппаратуру НПО “Теплоприбор” (Санкт-Петербург). Чувствительность $2 \div 3$ мкг/л.

Необходима разработка специализированного поисково-контрольного электрометрического комплекса, основная роль которого будет направлена на обеспечение рекреационных мероприятий в оздоровительных и заповедных зонах озер. Комплекс должен состоять из системы обнаружения, регистрации и автоматической расшифровки электрических сигналов в воде, источником которых могут быть — посторонние примеси в сточных водах, всевозможные металлические предметы на дне, фильтрующиеся подземные воды, электрохимический потенциал которых существенно отличается от такового в озерной воде. Данный комплекс может быть стационарного назначения (электрометрический мониторинг) или подвижного — поиск и оперативное оконтуривание зон с неблагоприятными электрофизическими характеристиками воды.

Составной частью такого комплекса должны быть электрополемеры, регистрирующие спектральные характеристики поверхностного волнения и внутриводных вихревых пульсаций. В первом случае будет решаться задача исследования рассеяния радиоволн и различно направленных зондирующих электромагнитных колебаний при взаимодействии их с полями поверхностного волнения; во втором — перестройка спектральных характеристик естественных и искусственных полей по вертикали, что позволит оценить погрешности магнитометрической аппаратуры, применяемой в морских условиях.

Комплекс должен обеспечить подразделения флота при решении ряда инженерно-технических задач — в диспетчерской службе портов, при охране плавсредств, для обнаружения опасных явлений природы (внутренних волн) и т.д.

Многообразие научных и практических аспектов (рассмотрен минимум) применимости электрометрии водоемов служит основанием для широкой пропаганды метода и внедрения его в ближайшее время в самых различных областях практической деятельности. В конечном счете ставится задача управлять свойствами природного объекта, но не вслепую, а опираясь на знание законов его развития. Задача трудная, однако решать ее приходится, повышая уровень качества прикладных работ на основе предшествующих фундаментальных исследований. Для успешного использования методов моделирования, особенно в области физического эксперимента, необходимо проведение глубокого исследования свойств среды, в нашем примере — электромагнитных свойств водной среды и сопредельных с ней оболочек — атмосферы и литосферы. “К сожалению, работы в этом направлении ведутся недостаточно интенсивно, и это тормозит применение математических моделей” [Самарский, 1985].

Таким образом, можно подытожить и обобщить перспективную значимость выполненных работ на акваториях:

Рассмотрены научные и прикладные аспекты развития электрометрии акваторий — целенаправленные исследования полей антропогенных источников и их регламентация, расчет и картирование проводящих свойств воды для обеспечения радионавигационных и геодезических работ (ч. 2 и 4), обнаружение стационарных и движущихся источников искажения естественного поля в пресной воде. Проведена экспериментальная оценка реакции водных организмов на действие электрического поля сточных вод промышленных предприятий.

В качестве модельного представления о реальном искажении естественного поля акватории стационарными крупными проводящими объектами проанализированы конкретные электрические поля исследовательских и других судов (кораблей). Показана вариабельность локального поля в зависимости от ориентации объекта относительно геомагнитного поля, состояния фоновых электромагнитных характеристик водоема, технических особенностей объекта, близости береговой зоны и т.д. Экспериментально получена группа функций распределения поля судна с глубиной, из которых наилучшее приближение дает функция типа потенциала Х. Юкавы. Выполнен расчет радиуса влияния объекта на естественный фон с высокой точностью на основе аппроксимированных уравнений. Даны практические рекомендации по применению различных модификаций зондов для обнаружения объектов, показаны реальные погрешности измеренных значений естественного поля при зондировании среды с экспедиционных судов. На примере исследования поля вблизи подводного гидротехнического

сооружения показана перспектива обследования акваторий с различными народнохозяйственными задачами — оценка коррозионного состояния трубопроводов, кабелей, насосных установок, поиск затонувших объектов, ухудшающих рекреационное использование прибрежных заповедных территорий, и т.д.

Показана перспектива использования индуцируемых электрических полей движущимися в воде крупными проводящими и диэлектрическими объектами. С помощью разработанных модификаций зондирующих устройств обнаруживаются источники искажения естественного фона. Отличительные амплитудно-частотные характеристики полей движущихся объектов (плавсредства, плывущий человек) могут использоваться в качестве информационных сигналов для диспетчерской службы в портах, для охраны узкостей и проливов, для обнаружения рыбных косяков и т.д. Разработан способ обнаружения движущихся объектов (А.с. № 64302, 1972).

Разработан аналитический метод расчета электропроводящих характеристик воды с учетом ионной концентрации, температуры и поправочного коэффициента на гидростатическое давление. Метод использован при механизированных расчетах электропроводимости морской воды для различных морей и океанов. На основании разработанной автором методики расчета и построения сезонных карт проводимости воды составлены и опубликованы картографические пособия для Черного, Средиземного, Карибского и Чукотского морей, которые используются гидрографической службой в радионавигационном обеспечении флота. Показан метод расчета проводимости пресной воды крупных озер с погрешностью не более 0,1 % на основе теории ионных растворов. Результат расчета проводимости воды для оз. Байкал был использован для определения фазовой скорости радиоволн при их распространении над водной поверхностью и позволил выбрать средства координирования гидрографических работ с высокой точностью (относительная погрешность $\approx 4 \cdot 10^{-5}$).

Внедрение электрометрии на крупных водоемах в ближайшее время должно быть направлено на решение ряда актуальных проблем: прогноз усиления сейсмической активности, разработка физиологической оценки адаптации биокomпонентов, развивающихся в зонах загрязнения озер, выработка безопасных нормативов предельно допустимых нагрузок (уровней) на живые системы со стороны электромагнитного излучения, поиск месторождений марганцево-железистых конкреций, создание специализированного электрометрического комплекса аппаратуры для решения различных научно-практических задач.

4.3. БИОГЕОЦЕНОЗЫ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ, ФАКТОРЫ РИСКА В ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИИ НАСЕЛЕНИЯ

- 4.3.1. О влиянии городских условий на локальные изменения магнитного поля ультранизкочастотного диапазона**
- 4.3.2. Методы изучения и оценка изменчивости пространственно-временной структуры электромагнитного поля в городских условиях**
- 4.3.3. Нравственно-правовая проблема антропосферы: повсеместное внедрение неионизирующего электромагнитного излучения в биоценозы**

Конец ушедшего XX века и начавшийся XXI век (1996–2010 гг.) кардинально изменили взгляды на оценку влияния техногенных электрических и магнитных полей на биологические объекты сухопутных и водных экосистем, поскольку этот фактор имеет прямое отношение к здоровью и выживаемости человеческой популяции. И если экспериментальные работы непосредственно с человеком не проводятся в соответствии с международной конвенцией, то опыты на животных до настоящего времени были разрешены. Однако с 1997 г. проходили крупные события в области физиологических наук. За указанный период мы проследили интенсивное развитие и становление многочисленных ассоциаций и сообществ, которые организуют регулярную работу и встречи научных и практических специалистов в области экологической значимости электромагнетизма. Не претендуя на абсолютную осведомленность, приведем хронологическую таблицу повторяемости международных конференций, симпозиумов и конгрессов, которые показывают опасность неионизирующего ЭМ излучения для выживаемости биосферы Земли в целом. Выборка сделана автором и поэтому может содержать элементы субъективности (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Международные мероприятия по оценке и координации научных достижений мирового сообщества в проблеме неионизирующего ЭМ излучения (1997–2010 гг.)

8–13.06.1997: THE SECOND WORLD CONGRESS FOR ELECTRICITY AND MAGNETISM IN BIOLOGY AND MEDICINE, PALAZZO DELL CULTURA E. DEI CONGRESSI, BOLOGNA, ITALY.

23–27.06.1997: THE HEALTH PHYSICS SOCIETY SUMMER SCHOOL, UNIVERSITY OF INCARNATE WORD, SAN ANTONIO, TX. TOPIC: NON-IONIZING RADIATION.

30.06–5.07.1997: XXXIII INTERNATIONAL CONGRESS ON PHYSIOLOGICAL SCIENCES, ST. PETERSBURG, RUSSIA (WORKSHOP DEVOTED TO ELECTROMAGNETIC FIELDS; CO-SPONSORED BY BEMS; SEE NEWSLETTER 129).

7–10.07.1997: SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HF RADIO SYSTEMS AND TECHNIQUES, EAST MIDLANDS CONFERENCE CENTRE, NOTTINGHAM, UK. INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS, SAVOY PLACE, LONDON WC2R OBL, UK.

7–11.07.1997: PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH SYMPOSIUM, MASSACHUSETTS, USA.

13–18.07.1997: 1997 IEEE AP-S INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND URSI NORTH AMERICAN RADIO SCIENCE MEETING, MONTREAL, CANADA.

15–17.09.1997: GENETIC TOXICOLOGY OF NON IONIZING RADIATIONS: GENETIC- AND EPIGENETIC EFFECTS, CARCINOGENESIS, DEVELOPMENTAL EFFECTS, ETC., HOLIDAY INN CROWN PLAZA, BRUGES, BELGIUM.

16–19.10.1997: LIFE SCIENCES '97 AND 2nd SLOVENIAN-CROATIAN MEETING ON MOLECULAR ONCOLOGY TODAY. SLOVENIA.

26–29.10.1997: THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR BIOLOGICALLY CLOSED ELECTRIC CIRCUITS IN BIOMEDICINE (IABC), MINNEAPOLIS, USA.

2–5.12.1997: 1997 ASIA-PACIFIC MICROWAVE CONFERENCE. CITY UNIVERSITY OF HONG KONG, HONG KONG.

1998: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOELECTROMAGNETISM, SHERATON TOWERS HOTEL, MELBOURNE, AUSTRALIA.

28–29.04.1998. EMF ENGINEERING REVIEW SYMPOSIUM: STATUS AND SUMMARY OF EMF ENGINEERING RESEARCH. USA.

18–22.05.1998. ELECTROMAGNETIC FIELDS RESEARCH IN EASTERN EUROPE. MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION.

23–29.05.1998. FOURTEENTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BIOELECTROCHEMISTRY AND BIOENERGETICS. VINGSTEDCENTRET, DENMARK.

12–16.07.1998. 43rd ANNUAL MEETING OF THE HEALTH PHYSICS SOCIETY. MINNEAPOLIS, USA.

19–24.07.1998. 1998 GORDON CONFERENCE ON BIOELECTROCHEMISTRY, ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS IN BIOLOGY AND MEDICINE. NEW ENGLAND COLLEGE, ENGLAND.

14–18.09.1998. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. UNIVERSITY OF ROME «LA SAPIENZA», ROME, ITALY.

27–30.09.1998. THIRD CONGRESS OF INTERNATIONAL ASSOCIATION OF BIOLOGICALLY CLOSED ELECTRIC CIRCUITS IN BIOMEDICINE AND 2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROCHEMICAL TREATMENT OF CANCERS. BEIJING, CHINA.

19–21.11.1998 4th EBEA CONGRESS ZAGREB, UNIVERSITY OF ZAGREB FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING & COMPUTING UNSKA 3, HR-10000 ZAGREB, CROATIA.

25–28.01.1999. COMMSPHERE 99 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE FUTURE OF TELECOMMUNICATIONS AND THE ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT. TOULOUSE, FRANCE.

3–4.02.1999. BIOSYS '99, NATIONAL SEMINAR ON LOW LEVEL ELECTROMAGNETIC FIELD PHENOMENA IN BIOLOGICAL SYSTEMS, NEW DELHI, INDIA.

28–31.03.1999. 1999 EPRI EMF SCIENCE SEMINAR, «20 YEARS BACK TO DENVER,» HYATT REGENCY DENVER DOWNTOWN, DENVER, CO. ELECTRICAL UTILITY INDUSTRY ATTENDANCE IS LIMITED TO THOSE SUPPORTING EPRI'S EMF PROGRAM, MINNEAPOLIS, USA.

20–23.05.1999. 18th SOUTHERN BIOMEDICAL ENGINEERING CONFERENCE & 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ETHICAL ISSUES IN BIOMEDICAL ENGINEERING, CLEMSON UNIVERSITY, USA.

11–16.07.1999. 1999 IEEE AP-S INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND USNC/URSI NATIONAL RADIO SCIENCE MEETING, RENAISSANCE ORLANDO RESORT, ORLANDO, USA.

9–10.11.1999 4th INTERNATIONAL CONFERENCE MOBILE PHONES, IBC IS THERE A HEALTH RISK? LONDON, UK.

29.10–3.11.2000. THE FIRST AUSTRALASIAN CONFERENCE ON BIOELECTROMAGNETICS, CONVENTION CENTRE, CHRISTCHURCH, NEW ZEALAND.

2–6.04.2000. SECOND WORLD CONGRESS ON MICROWAVE AND RADIO FREQUENCY PROCESSING, FLORIDA, USA.

9–14.04.2000. MILLENNIUM CONFERENCE ON ANTENNAS AND PROPAGATION. DAVOS, SWITZERLAND.

4–5.05.2000. LOW FREQUENCY EMF, VISIBLE LIGHT, MELATONIN AND CANCER. COLOGNE, FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY.

5–14.05.2000. PROGRESS IN ELECTROMAGNETICS RESEARCH SYMPOSIUM, CAMBRIDGE, USA.

1–15.10.2000. UNESCO SEMINAR ON CELLULAR MECHANISM OF BENEFICIAL AND HARMFUL EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS. YEREVAN, ARMENIA.

8–12.10.2000. 3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOELECTROMAGNETISM & 1st SLOVENIA-CROATIAN MEETING ON BIOMEDICAL ENGINEERING. BLED, SLOVENIA.

29.10–3.11.2000 AUSTRALASIAN CONF ON BEMS — CHRISTCHURCH, NEW ZEALAND.

30.11–1.11.2000 MILLIMETER WAVES IN MEDICINE AND BIOLOGY — 12th RUSSIAN SYMPOSIUM, MOSCOW.

7–8.12.2000 5th INTERNATIONAL CONFERENCE MOBILE PHONES — IS THERE A HEALTH RISK? — LONDON, UK.

2–4.04.2001. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETICS IN BIOLOGY AND MEDICINE. UNIVERSITY OF TOKYO, JAPAN.

29.04–3.05.2001. INTERNATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION ASSOCIATION (IRPA) EXECUTIVE COUNCIL MEETING. RECIFE, BRAZIL.

30.04–4.05.2001. WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) INTERNATIONAL EMF PROJECT STANDARDS HARMONIZATION MEETING. SOFIA, BULGARIA.

23–28.05.2001 IRPA INTERNATIONAL CONGRESS, MADRID, SPAIN.

1–6.06.2001. BES MEETING - BRATISLAVE, SLOVAQUIE.

8–10.06.2001. IEEE SCC-28 SUBCOMMITTEE 2. ST. PAUL, MINNESOTA, USA.

1–4.08.2001. ASIA-PACIFIC RADIO SCIENCE CONFERENCE. TOKYO, JAPAN.

6–8.09.2001. EUROPEAN BIO ELECTROMAGNETICS ASSOCIATION (EBEA) 5th INTERNATIONAL CONGRESS, MARINA CONGRESS CENTER, HELSINKI, FINLAND.

10.2001. WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) EMF BIOLOGICAL EFFECTS AND STANDARDS HARMONIZATION REGIONAL MEETING IN SOUTH KOREA.

5–7.11.2001. COURSE ON NONIONIZING RADIATION: AN OVERVIEW. SEATTLE, WASHINGTON, USA.

16–21.06.2002. IEEE APS INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND USNC/URSI NATIONAL RADIO SCIENCE MEETING. SAN ANTONIO. USA.

14–18.07.2002. 6th WORLD MULTI CONFERENCE ON SYSTEMICS, CYBERNETICS AND INFORMATICS, SCI 2002, ORLANDO, USA.

17–24.08.2002. INTERNATIONAL UNION OF RADIO SCIENCE (URSI) 2002–THE 27th TRIENNIAL GENERAL ASSEMBLY OF THE INTERNATIONAL UNION OF RADIO SCIENCE. EINDHOVEN, THE NETHERLANDS.

10–13.09.2002. 9th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICAL METHODS IN ELECTROMAGNETIC THEORY. KIEV POLYTECHNIC INSTITUTE, UKRAINE.

23–24.09.2002. THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMF AND HUMAN HEALTH. EMF AND STANDARDS. FUNDAMENTAL AND APPLIED RESEARCH. MOSCOW AND ST. PETERSBURG, RUSSIA.

8–11.10.2002. EUROPEAN CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION (IRPA). FLORENCE.

21–27.10.2002. WORLD HEALTH ORGANIZATION AND U.S. AIR FORCE ASIA PACIFIC EMF CONFERENCE. PHUKET ARCADIA BEACH RESORT, THAILAND.

21–22.01.2003. THE MOBILE HEALTH ISSUE - SEPARATING FACTS FROM FANTASY. LONDON. ENGLAND.

24–26.02.2003. CONFERENCE ON APPLICATION OF THE PRECAUTIONARY PRINCIPLE TO EMF. LUXEMBURG.

27–28.02.2003. ENVIRONMENTAL RF INTERACTIONS ON HUMAN, CELLS AND MEMBRANE. SINGAPORE.

14–17.04.2003. INTERNATIONAL CONFERENCE ON NON IONIZING RADIATION. UNIVERSITI TENAGA NASIONAL, KUALA LUMPUR, MALAYSIA.

11–16.05.2003. THE 2003 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC). ISTANBUL HILTON HOTEL, TURKEY.

8–11.06.2003. THE SOCIETY FOR PHYSICAL REGULATION IN BIOLOGY AND MEDICINE'S 22nd SCIENTIFIC CONFERENCE, SAN ANTONIO, USA.

8–13.06.2003. IEEE INTERNATIONAL MICROWAVE SYMPOSIUM. PHILADELPHIA.

19–24.06.2003. XVIIth INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BIOELECTROCHEMISTRY AND BIOENERGETICS. FIRENZE.

22–26.06.2003. THE BIOELECTROMAGNETICS SOCIETY 25th ANNUAL MEETING. MAUI, USA.

17–21.09.2003. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY. CANCUN, MEXICO.

16–19.09.2003. 5-Й МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭКОЛОГИИ, ЭМС-2003. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ. (ИЗДАТЕЛЬСТВО СПБГЭТУ “ЛЭТИ”. 2003, 453 С).

27–29.10.2003. GSM/GPRS/3G NETWORKS OPTIMISATION. AMSTERDAM. HOLLAND.

13–15.11.2003. EBEA 6th INTERNATIONAL CONGRESS. BUDAPEST, HUNGARY.

15–16.11.2003. COST281 MANAGEMENT COMMITTEE MEETING AND WORKSHOP: POTENTIAL HEALTH IMPLICATIONS FROM MOBILE COMMUNICATIONS SYSTEMS. BUDAPEST, HUNGARY.

26–30.01.2004. ASIA-PACIFIC EMF CONFERENCE - ELECTROMAGNETIC FIELDS, RESEARCH, AND STANDARDS HARMONIZATIONS. BANGKOK (THAILAND).

16–17.03.2004. 9th ANNUAL CONFERENCE ON MOBILE HEALTH&THE ENVIRONMENT. LONDON (UK).

19–22.04.2004. 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATION IN ELECTROMAGNETICS (CEM) STRATFORD (UK).

20–24.04.2004. THE 9th INTERNATIONAL CONGRESS OF HYPERTHERMIC ONCOLOGY (ICHO). ST. LOUIS, USA.

13–16.05.2004. 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOELECTROMAGNETISM (ICBEM). CHICAGO (USA).

23–28.05.2004. IRPA INTERNATIONAL CONGRESS, MADRID, SPAIN.

23–27.05.2004. URSI INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC THEORY. PISA (ITALY).

9–11.06.2004. WORKSHOP ON CHILDREN’S POSSIBLE SENSITIVITY TO EMF. ISTANBUL, TURKEY.

25–30.06.2004. GORDON CONFERENCE ON BIOELECTROCHEMISTRY, NEW LONDON, CONN. USA.

1–4.08.2004 16th CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR ENVIRONMENTAL EPIDEMIOLOGY (ISEE). NEW YORK (USA).

1–4.09.2004. 26th ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY (EMBS). SAN FRANCISCO (USA).

9–12.09.2004. 21st ANNUAL MEETING OF THE EUROPEAN SOCIETY FOR MAGNETIC RESONANCE IN MEDICINE AND BIOLOGY (ESMRMB). COPENHAGEN (DENMARK).

11.09.2004. SYMPOSIUM ON ELECTRICAL SENSITIVITY IN HUMAN BEINGS. LONDON (UK).

12–15.09.2004. 15th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERSONAL, INDOOR AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS (PIMRC). BARCELONA (SPAIN).

20–23.09.2004. MOBILE COMMUNICATION AND HEALTH: MEDICAL, BIOLOGICAL AND SOCIAL PROBLEMS. MOSCOW, RUSSIA.

23–24.09.2004. SECOND MOBILE COMMUNICATIONS SEMINAR HEALTH, ENVIRONMENT AND SOCIETY BEST PRACTICE EXCHANGES BETWEEN EU MEMBER STATES. BRUSSELLES (BELGIUM).

2–6.10.2004. ANNUAL ENVIRONMENTAL MUTAGEN SOCIETY MEETING (EMS). PITTSBURGH (USA).

4–8.10.2004. 3rd INTERNATIONAL WORKSHOP ON BIOLOGICAL EFFECTS OF EMF. KIPRIOTIS VILLAGE HOTEL, KOS, GREECE.

25–27.10.2004. WHO INTERNATIONAL SEMINAR & WORKING GROUP MEETING ON EMF HYPERSENSITIVITY. PRAGUE (CZECH REPUBLIC).

8–9.11.2004. INTERNATIONAL CONFERENCE: ELECTRO-MAGNETIC FIELDS FROM BIOEFFECTS TO LEGISLATION. LJUBLJANA (SLOVENIA).

11.11.2004. AWARENESS COURSE ON EMFS AND HUMAN HEALTH. CHILTON (UK).

19–24.06.2005. BIOEMS 2005— EBEA AND BEMS. DUBLIN, IRELAND.

03–07.07.2006. 4-Й МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС “СЛАБЫЕ И СВЕРХСЛАБЫЕ ПОЛЯ И ИЗЛУЧЕНИЯ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ”. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ. (ИЗДАТЕЛЬСТВО “НИВА”. 2006, 242 С).

10–13.04.2007. 8th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE EUROPEAN BIOELECTROMAGNETICS ASSOCIATION EBEA. BORDEAUX, FRANCE.

26.03–02.04.2008. EBEA INTERNATIONAL SCHOOL OF BIOELECTROMAGNETICS “A. CHIABRERA”. ERICE, ITALY.

8–12.06.2008. 30th ANNUAL MEETING OF THE BIOELECTROMAGNETICS SOCIETY (BEMS). SAN DIEGO, USA.

9–16.08.2008. XXIXth URSI GENERAL ASSEMBLY. CHICAGO, USA.

8–09.09.2008. 1st RADIATION RESEARCH TRUST CONFERENCE. JONDON, ENGLAND.

24–26.09.2008. 10th RUSSIAN CONFERENCE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF TECHNICAL DEVICES AND ELECTROMAGNETIC SAFETY. SAINT-PETERSBURG, RUSSIA.

28.09–02.10.2008. 5th INTERNATIONAL WORKSHOP ON BIOLOGICAL EFTECTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS. PALERMO, JTALY.

15–17.10.2008. ICNIRP INTERNATIONAL NIR WORKSHOP. RIO DE JANEIRO, BRAZIL.

19–24.10.2008. 12th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION (IRPA). BUENOS AIRES, BRAZIL.

20–22.10.2008. INTERNATIONAL PUBLIC HEALTH SYMPOSIUM ON ENVIRONMENT AND HEALTH RESEARCH. MADRID, SPAIN.

21–23.10.2008. THE FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ELECTROMAGNETIC RADIATIONS IN BIOLOGY; BIO-EMR-2008. KALUGA, RUSSIA.

24–26.10.2008. UNESCO/WHO SEMINAR ON ELECTROMAGNETIC FIELDS: MECHANISMS OF ACTION, EMF-SENSITVITY AND DOSIMETRY.YEREVAN, ARMENIA.

27–31.10.2008. 11th EUROPEAN MICROWAVE WEEK 2008. AMSTERDAM, HOLLAND.

12–13.11.2008. SCIENCE WEEK 2008 ON WIRELESS AND HEALTH AT THE AUSTRALIAN ACRBR. MELBOURN, AUSTRALIA.

17–19.11.2008. INTERNATIONAL SCIENTIFIC WORKSHOP “OPEN QUESTIONS IN THE RESEARCH ON BIOLOGICAL AND HEALTH EFFECTS OF LOW-INTENSITY RF-EMF”. STUTTGART, GERMANY. ABSTRACTS. STATE MINISTRY OF ENVIRONMENT.

ENVIRONMENT. [HTTP://WWW.BIOETHIK-DISKURS.DE/](http://www.bioethik-diskurs.de/)

21–24.11.2008. MICROWAVE 2008 — INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN MICROWAVE THEORY AND APPLICATIONS. JAIPUR, JNDIA.

12–16.01.2009. EMCZURICH 2009-20th INTERNATIONAL ZURICH-SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY. ZURICH, SWITZERLAND.

22–29.03.2009. INTERNATIONAL CONGRESS ON OCCUPATIONAL HEALTH (ICOH). CAPE TOWN, SOUTH AFRICA.

10–14.05.2009. 20th INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF BIOELECTROCHEMISTRY AND BIOENERGETICS. SIBIU (ROMANIA).

14–19.06.2009. BIOEM ANNUAL MEETING-2009. JOINT MEETING OF THE BIOELECTROMAGNETICS SOCIETY (BEMS) AND THE EUROPEAN BIOELECTROMAGNETICS ASSOCIATION (EBEA). DAVOS: SWITZERLAND.

15–18.06.2009. 7th NATIONAL CONGRESS OF FRENCH RADIATION PROTECTION SOCIETY. ANJERS, FRANCE.

16–19.06.2009. EMC-2009-8th INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND EXHIBITION ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY AND ELECTROMAGNETIC ECOLOGY. SAINT-PETERSBURG, RUSSIA.

29.06–03.07.2009. 5-Й МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС “СЛАБЫЕ И СВЕРХСЛАБЫЕ ПОЛЯ И ИЗЛУЧЕНИЯ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ”. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, РОССИЯ 2009 [2009@LFBM-CONGRESS.SPB.RU].

На примере публикаций, представленных в сборнике докладов Первого международного конгресса “Слабые и сверхслабые излучения в биологии и медицине” (СПб., 16–19.07.1997 г.), проблемы воздействия ЭМП на биологические системы и их совместимости с технологическими физическими полями признаны актуальными, и требования к экспериментам серьезно изменились.

В книге Л.Н. Галль рассматривается гипотеза о том, что в дисперсных водных системах при физико-химических процессах (например, метаболизме) возникают фрактальные структуры, образованные водой и биополимерами.

Фрактальные кристаллиты воды за счет своих спинов и наличия у них спинового магнитного момента μ в соответствии с принципами квантовой механики [Физический энциклопедический словарь, “Советская энциклопедия”, М. 1983, с. 698; с. 713-714] оказываются ориентируемыми и управляемыми энергией магнитного поля Земли. В результате этого явления реализуется известный эффект Зеемана в микробиомах, где неживые биополимеры ведут себя подобно живым молекулярным объектам.

Исходя из этого мы задаемся вопросом: опасно ли действие слабых электрических и магнитных полей крайне низкочастотного диапазона на живые организмы? В настоящее время (с 1997 г.) в отечественной промышленности и санитарно-гигиенической службе контроля качества окружающей среды вводятся в действие новые ужесточенные Государственные стандарты и санитарные нормы и правила, согласованные с требованием и методикой испытаний

Шведского стандарта *MPRII*. Этими документами являются ГОСТ Р50949-96; ГОСТ Р50923-96; СанПиН 2.2.2542-96. Данные стандарты нормируют четыре вида воздействий: низкоэнергетическое рентгеновское излучение, электростатическое поле, переменное электрическое поле (**ПеЭП**), переменное магнитное поле (**ПеМП**). Поэтому в данном разделе мы постараемся рассмотреть довольно неясный вопрос — какова роль ПеЭП и ПеМП в жизнедеятельности организмов. Именно неионизирующее электромагнитное излучение (**НЭМИ**) в КНЧ- и УНЧ-диапазонах затрагивает весьма различные сферы соприкосновения человека с энергетическим и психологическим действием слабых полей — от индукционных в области размещения высоковольтных линий электропередач (**ВЛ**), видео-дисплейных терминалов (**ВДТ**) до сотовой телефонной связи и т.д. Можно ли игнорировать требования ужесточения нормативных уровней НЭМИ (в соответствии с вышеупомянутыми стандартами), гарантирующие экологическую безопасность живым организмам? Тем более, что оценка роли этих полей трактуется неоднозначно — от полного отрицания эколого-физиологического влияния их на живое вещество до явного преувеличения прогнозируемой опасности нарушения естественного эволюционного процесса (генетическая опасность, канцерогенность и т.д.).

4.3.1. О влиянии городских условий на локальные изменения магнитного поля ультранизкочастотного диапазона

Общие сведения о неоднородности антропоферного ЭМП в городе

Известно, что последняя инверсия дипольного геомагнитного поля (**ГМП**) произошла около 730 тыс. лет тому назад (разд. 1.1). В течение этого периода структура и конфигурация поля оставались в пределах современных данных, поэтому филогенетические процессы в биосфере не нарушались, что обычно констатировалось при долговременных инверсиях ГМП. Это подтверждается детальным анализом результатов палеомагнитных исследований. И даже если принять во внимание, что крайне непродолжительные инверсии ГМП, или ивенты полярности, имеют продолжительность всего лишь $10 \div 20$ тыс. лет, то на этом фоне зародившееся существенное антропоферное воздействие на магнитное поле среды обитания животных и человека началось менее чем два века назад. Это воздействие по времени составляет приблизительно $0,02 \div 0,01$ % от того периода, в течение которого биосфера могла бы адаптироваться к глобальным процессам в системе Земля—Солнце. Поэтому мы не можем утверждать, что живое вещество не переживает адаптационного синдрома

при локальных или региональных флуктуациях ГМП, вызванных влиянием современных технических средств (связь, транспорт, энергосистемы и т.д.). Об этом убедительно свидетельствует мировая научная литература, базирующаяся на достоверном экспериментальном материале. Проблема адаптации к техногенным ЭМ нагрузкам в биосфере осложнена противоречивостью реакций животных на естественные аномалии геомагнитных колебаний (возмущения, бури). Поэтому она не решена и не может быть решена быстро, особенно в полосе ультранизких частот колебаний, где главную роль играют незначительные дозы неионизирующего излучения. Так, например, естественные МП в интервале частот $0,01 \div 10$ Гц с амплитудами от 0,01 до нескольких сотен нанотесл глобальны, усиливаются в периоды роста солнечной активности и могут нарушать обычные ритмы ГМП в течение нескольких суток. ЭМП техногенных источников охватывают широкий спектр частот, имеют характер систематических колебаний или нерегулярных и внезапных бросков напряженности и могут вызывать негативные и патологические ощущения у людей с ослабленной сердечно-сосудистой системой.

Далее следует обратить внимание на проблему градостроительства с учетом естественных аномальных значений ГМП, которые рассматриваются как существенный экологический фактор [Докл. АН. 1996. Т. 349, № 4. С. 539–541].

В части 1 было показано, что магнитосфера Земли играет исключительно важную роль в жизни биосферы, защищая ее от стерилизующего эффекта космического излучения — вторжения в радиационные пояса планеты солнечных космических лучей высоких энергий. Напоминаем также о специальных картографических изданиях, которые иллюстрируют аномальную структуру ГМП [Почтарев, 1984; Скайлс, 1989; Электромагнитные и плазменные..., 1989]. Эти карты характеризуют особенности строения приземной части магнитосферы, зависящие от свойств горных пород литосферы, т.е. достаточно долговременную и медленно меняющуюся часть главного магнитного поля Земли. Специальное изучение таких аномальных свойств ГМП, показанных на картах, например, на карте Всероссийского геологического института [М.: ВСЕГЕИ, 1974], и связанное с учетом расположения большинства крупных городов европейской части России (270 городов) убеждает в том, что исторически повышенная концентрация городов и городского населения сосредоточена вблизи нулевой изолинии аномального ГМП. Именно города возникали и строились там, где биологическое действие ГМП, его аномалий было минимальным, вплоть до влияния на репродукционные процессы. Предполагается, что главенствующую роль в этом играют постоянный минимальный уровень

аномального МП и мера его вариаций, которые вблизи нулевой линии не только незначительны, но и здесь меньше сказывается влияние естественных магнитных возмущений (магнитных бурь).

Сверхнизкочастотные электромагнитные поля широко распространены в биосфере. Достаточно заметить, что в обширном спектре электромагнитных полей, регистрируемых на поверхности Земли, максимальная интенсивность отмечается именно в диапазоне сверхнизких частот. Человек живет в океане электромагнитных полей естественного и техносферного происхождения. Естественные магнитные поля в интервале частот $0,01 \div 10$ Гц имеют амплитуды колебаний от 0,01 нТл до нескольких сотен нанотесл, наблюдаются на поверхности всего земного шара и резко усиливаются в периоды геомагнитных возмущений. Электромагнитные поля антропо-сферного происхождения наблюдаются в более широком диапазоне частот и связаны с уровнем развития индустриализации; они характеризуются внезапными изменениями амплитуд и иррегулярным характером. Во многих экспериментальных работах и клинических исследованиях показано, что биологические системы, и в частности человек, способны воспринимать вариации электромагнитных полей в диапазоне УНЧ. Было показано, что магнитные поля в УНЧ-диапазоне могут вызывать повышенную утомляемость, сильную головную боль, депрессии.

Существуют два основных источника магнитных флуктуаций в диапазоне УНЧ, которые присутствуют в нашей среде обитания: геомагнитные пульсации и антропо-сферные магнитные возмущения. Флуктуации в диапазоне частот $0,001 \div 10$ Гц с амплитудами от 1 до 100 нТл часто обсуждаются в отчетах о геомагнитной обстановке по всему миру. В частности, увеличение пульсационной активности происходит во время магнитных бурь. В продолжении бурь, вызванных солнечными вспышками, внезапные флуктуации могут длиться 1–2 дня с амплитудами, превышающими 1000 нТл в высоких широтах.

Наблюдения за изменениями магнитного поля УНЧ-диапазона в центре Санкт-Петербурга показали, что наибольшие флуктуации в среде обитания вызываются в основном транспортной городской энергосистемой. Было установлено, что в Санкт-Петербурге уровень техногенного электромагнитного шума в 10^3 раз выше, чем вне города. Около источников индустриальных ЭМП или внутри электропоездов интенсивность искажений может в $10^4 \div 10^5$ раз превышать естественный фон, измеренный вне влияния объекта излучения. Наблюдения техногенного фона, проведенные в рабочие и выходные дни в феврале 1994 г. в УНЧ-диапазоне, выявили, что

максимальные индустриальные ЭМП в период измерений ортогональных составляющих вариаций магнитного поля (H , D , Z) на земной поверхности в центре Санкт-Петербурга были зарегистрированы в Z -компоненте от движущихся трамваев и других силовых установок. Наиболее характерные индустриальные помехи имеют вид всплесков в Z -компоненте в частотном диапазоне $0,05 \div 0,2$ Гц. Эти всплески наблюдаются в течение нескольких минут и выглядят как естественные геомагнитные пульсации, но с гораздо большей амплитудой. В частности, их интенсивность в $10^3 \div 10^4$ раз превышает амплитуду аналогичных пульсаций на широте Санкт-Петербурга во время умеренной геомагнитной активности и в $10^2 \div 10^3$ раз превышает амплитуду пульсаций во время очень сильных бурь.

Вошедшая в “Экологический атлас Санкт-Петербурга” карта уровней электромагнитных полей — первая в мировой практике попытка подробного описания электромагнитной обстановки крупного промышленного города [Экологический атлас Санкт-Петербурга, 1993]. По картам этого атласа видно, что основные источники ЭМИ в городе — воздушные и кабельные линии электропередач, трансформаторные подстанции, теплоэлектроцентрали, телерадиоцентры, системы наблюдения ПВО и другое электрооборудование всевозможного назначения. Интенсивность ПеЭМП убывает по мере удаления от мощных источников, но длительное нахождение рядом с ними нежелательно.

Магнитные поля возникают в зоне движения городского электротранспорта. Повышенный уровень напряженности МП отмечен в местах соединения электрических кабелей с контактными проводами трамвайных и троллейбусных сетей, вблизи рельсовых путей и переводных стрелок.

На примере Санкт-Петербурга можно проследить неоднородность в пространственном распределении уровней напряженности МП, которая в общем аппроксимируется кривой, близкой по виду к нормальному закону.

Большая часть территории характеризуется фоновыми значениями напряженности, близкими к реальному ГМП региона ($\approx 0,6 \div 0,7$ Гс, или $(60 \div 70)10^3$ нТл). Часть территории образуют районы экологического загрязнения, где уровень на три порядка превышает фоновые значения, и, наконец, есть районы экологической опасности, где уровень МП превышает фоновые значения более, чем на три порядка.

Однако дело не только в пространственной локализации нежелательных с экологической точки зрения высоких уровней напряженности МП, но и в нестабильности этих уровней на протяжении

суток. Автором в 1996 г. была проведена специальная поисковая работа по оценке суточного ритма искажения геомагнитного фона техногенными источниками в лабораторных условиях (разд. 4.3.1). Спектральная обработка материала (Фурье-анализ) за суточные и многосуточные наблюдения показала, что на фоне регулярных длительных и кратковременных вариаций МП, связанных с процессами в магнитосфере и ионосфере, выделяется резкий рост амплитудно-частотной неоднородности поля, четко обусловленной суточным воздействием работающих систем электрооборудования как городского, так и местного уровней действия.

Таким образом, предварительные замечания о роли урбанизации и ее техносферного вклада в ЭМП среды обитания городского населения и изменения естественного ГМП свидетельствуют о том, что человечество сознательно вступило на путь искажения естественного ЭМПЗ с целью получения определенных социальных выгод. Но биологические последствия такого антропосферного взрыва еще не выявлены, хотя в Европе магнитофобия достаточно четко оформилась в связи с распространением новых шведских стандартов на ПДУ ЭМ воздействий.

***Изменение суточного цикла колебаний МП УНЧ-диапазона
в зависимости от локальной ритмичности расхода
сетевой электроэнергии***

Воздействие вариаций геомагнитного поля в диапазоне сверхнизких частот на биологические системы является предметом тщательных исследований многих ученых в последние годы. В связи с этим возникает необходимость установления источников дополнительных возмущений, искажающих естественный фон геомагнитного поля. Результаты исследований, проведенные в Санкт-Петербурге учеными СПб ФИЗМИР РАН, дают основания полагать, что в городских условиях уровень техногенных электромагнитных вариаций гораздо выше, чем в естественных условиях.

Учитывая рассмотренные выше сведения, в 1996 г. в Институте эволюционной физиологии и биохимии им И.М. Сеченова РАН (ИЭФБ) была впервые проведена экспериментальная работа по сравнительной оценке динамики геомагнитного поля в “экологически чистом” районе (МИО “Воейково”) и магнитного поля, индуцированного в условиях научно-исследовательской лаборатории (комбинированное поле, модулированное техногенными источниками). Поскольку ИЭФБ ведет постоянные физиологические и биохимические исследования на различных уровнях организации

живой материи (от внутриклеточных *in vitro* до организменных *in vivo*) в открытых и экранированных камерах, и, как правило, основные работы проводятся в дневное время, было целесообразно выявить тот “производственный электромагнитный фон”, который так или иначе влияет на результаты исследований. Тем более, что хорошо известны работы по влиянию слабых ЭМП на биологические растворы и белковые соединения *in vitro*. Аппаратура была размещена в обычных условиях рабочего помещения, не экранировалась и обеспечивала аналоговую регистрацию компонент (H , D , Z) магнитного поля*. К сожалению, материалы были обработаны лишь частично в 1999–2000 годах и публикуются впервые, с учетом более поздних исследований в других регионах**.

Аппаратура и методика обработки

В работе 1996 г. использовался магнитовариационный комплекс МВК-2 разработки СПбФИЗМИР РАН:

1. Прибор позволяет измерять и непрерывно регистрировать (самопишущий микровольтметр или ЭВМ) постоянные и переменные МП в диапазоне частот $0 \div 10$ Гц и имеет антисейсмическую защиту. В состав блока датчиков входят три идентичных магнитометра магнитостатического типа с глубокой отрицательной обратной связью по МП и фотоэлектрическим преобразованием сигнала.

2. Магниточувствительный элемент помещается в сменные герметические капсулы, что обеспечивает оперативную их замену; капсула с элементом заливается демпфирующей жидкостью для повышения устойчивости датчиков к динамическим нагрузкам и вибрационным помехам на частотах выше 1 Гц.

3. Блок датчиков автоматически устанавливается вертикально на кардановом подвесе, причем все элементы его (кроме чувствительного магнита) изготовлены из инертных к МП материалов.

4. Все три магнитометра (H , D , Z) смонтированы один под другим на цилиндрической стойке, жестко связанной с внутренним цилиндром блока датчиков, который арретируется во время транспортировки.

*Данные по синхронной регистрации ГМП были любезно предоставлены В.К. Кошелевским (обсерватория «Воейково»), оказавшим большую помощь в их интерпретации.

***Колесник, Нагорный, Цыбиков, Шинкевич.* Электромагнитный фон города и его вклад в магнитное поле земли: Сб. докл. МАНЭБ / Сибирский физико-технический институт. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1999.

5. В работе 1996 г. прибор МВК-2 применялся как вариационный комплекс для измерений магнитных пульсаций в помещении в течение марта—июля.

6. Аналоговая запись компонент Z и D МП была переведена в цифровую базу данных, синхронизирована с наблюдениями на МИО “Воейково” и статистически обработана методом быстрого преобразования Фурье пакета Microsoft Excel, с последующим построением спектрально-временных характеристик геомагнитных вариаций.

7. Для облегчения интерпретации вариаций Z и D (как наиболее информативных тестов) был проведен обзор состояния ГМП по изменению k -индексов в течение месячного цикла.

8. Анализ магнитограмм, полученных в ИЭФБ, предусматривал также фильтрацию сигналов артефактов, отмеченных оператором и связанных четко с антропогенными или техногенными источниками, присутствующими в лабораторном помещении.

Результаты и их обсуждение

Приведем краткий анализ наиболее спокойного и наиболее возмущенного дней, выделенных из ряда цифровых данных после статистической обработки в городских условиях, и для сравнения тех же дней в естественной среде (вне города).

Данные за 28.03.1996 г. характеризуют “спокойный период” геомагнитной активности (k_p -индекс меняется в пределах $2 \div 4$ баллов), данные за 17.04.1996 г. — наоборот, “период возмущенного состояния” геомагнитного поля (k_p -индекс меняется в пределах $4 \div 6$ баллов) (рис. 4.41). Эти дни выбраны для оценки вклада техногенных источников в возмущения естественного геомагнитного поля.

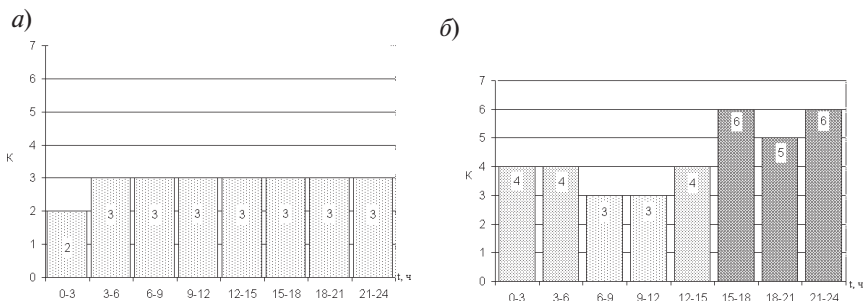


Рис. 4.41. Обзор суточного состояния магнитного поля в С-3 регионе России по изменению величины геомагнитного k_p -индекса:
а — “спокойный” день, 28.03.1996 г.; б — “возмущенный” день, 17.04.1996 г.

На рис. 4.42 (спокойный период) можно проследить следующее:

1. Общая картина естественного геомагнитного поля (“Воейково”) отражает типичную многолетнюю среднестатистическую структуру флуктуаций с амплитудами около $20 \div 40$ нТл, в течение суток прослеживаются крупные геофизические ритмы $3 \div 3,5$ ч и $8 \div 9,4$ ч (компонента D).

2. В лабораторных условиях зафиксировано искажение естественного поля в дневной период с резкими градиентами в ранние часы ($4 \div 5$ ч) и более плавными значениями в поздние вечерние часы ($22 \div 23$ ч). Значения амплитуд в дневной период возрастают в 4–5 раз по сравнению с ночным периодом.

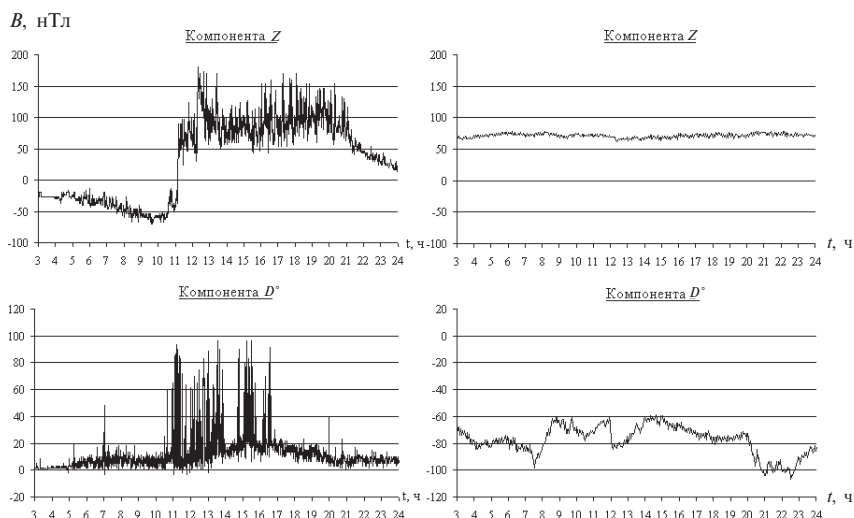


Рис. 4.42. Флуктуации магнитного поля (нТл) в городских условиях (слева) и в обсерватории “Воейково” (справа). 28.03.1996 г.

Локальные особенности искажения фоновых колебаний геомагнитного поля хорошо просматриваются в дневной период в течение $11 \div 16$ ч по компоненте D , когда активно работают различные энергоустановки в помещениях ИЭФБ (центрифуги, импульсные генераторы, вычислительная техника и т.д.), и наблюдаются волновые “пакеты”, перемежающиеся относительно меньшими возмущениями поля. Большая статистическая выборка позволяет характеризовать этот период как “техногенно-возмущенный”, неестественный, присущий только крупным промышленным объектам (см. рис. 4.42).

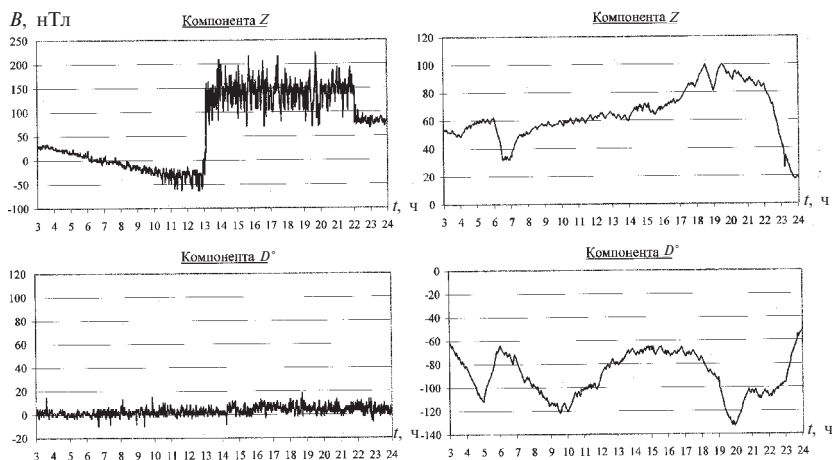


Рис. 4.44. Флуктуации магнитного поля (нТл) в городских условиях (слева) и в обсерватории “Восейково” (справа). 17.04.1996 г.

Фоновые спектральные характеристики поля (функция распределения спектральной плотности энергии флуктуаций геомагнитного поля $G(T)$, где T — период) для МИО “Восейково” в течение суток по компоненте Z практически не изменяются, и максимум энергии сосредоточен в пределах минутного диапазона примерно от 18 мин и выше, четко выделяются спадом энергии периоды $10,2 \div 8,5$; $4,5 \div 3,2$ и $2,6 \div 2,3$ мин. Более информативной с точки зрения неоднородности поля и выявления периодичности флуктуаций оказывается компонента Z , по которой прослеживаются максимум энергии в пределах $25,6 \div 52,2$ мин и выше на протяжении всех суток, значительный относительный рост $G(T)$ в середине дня на периодах $20 \div 12$ мин и снова в течение всех суток на периодах $8 \div 6,4$ мин и $2,2 \div 2,0$ мин и менее (рис. 4.43, а, б, цв.).

Спектральные характеристики для городских условий в течение суток отличаются более высокой относительной энергией флуктуаций (на 1–2 порядка выше), сосредоточенной в области периодов более, чем 25 мин, причем энергетический максимум прослеживается в течение суток от 5:30 до 21 ч, а более ярко от 9:30 до 18:30 ч, что хорошо согласуется именно с периодом функционирования энергосистем учреждения.

Несмотря на то, что распределение спектральной плотности энергии флуктуаций ΔB области низких частот (25 мин и выше)

характеризуется определенным сходством в обеих ситуациях (МИО “Воейково” и город), т.е. аппроксимируется степенным законом $G(f)=f^{-n}$, значение n различно для ночного и дневного периодов именно в городских условиях:

в ночной период $n = 11/14 = 0,8$;

в дневной период $n = 15/5 = 3,0$.

На рис. 4.44 и 4.45, цв., (период возмущенного состояния) можно проследить следующее:

1. Общая картина естественного геомагнитного поля (“Воейково”) характеризует возмущенный период с ярко выраженным понижением геомагнитной индукции в ночные и утренние часы по компоненте Z и значительной вариабельностью хода компоненты D в течение суток. Для периода существенен перепад амплитуд индукции примерно $90 \div 100$ нТл и более $80-90$ отн. ед. по вариациям направления полного вектора индукции D . Тем не менее, выделяются геофизические ритмы — $3,30 \div 4,40$; $6 \div 6,30$ и $9,30 \div 10$ мин, что в природных естественных условиях затухевывается в периоды сильных магнитных бурь.

2. В лабораторных условиях структура магнитного поля в общем сохраняется, отражая действие суммарного антропоферного фактора, и характеризует так называемый “социальный ритм” колебаний (длительность затишья с $22:00 \div 22:30$ и до $05:30 \div 6:30$ ч) и длительность возмущенного состояния с $06:30$ до $22:30$ ч). При этом резкое градиентное состояние для данного дня наблюдений наступает несколько позже, а именно в $12:30 \div 13:00$ ч, и работа локальных источников возмущений зафиксирована менее четко. Для городских условий наиболее показательна вариабельность вертикальной составляющей, характеризующей именно энергетический вклад промышленных помех. Следует отметить, что общий уровень индукции в период возмущения примерно на $25 \div 30$ % выше, чем в спокойный (компонента Z), но рост амплитуд флуктуаций днем возрастает также в $4-5$ раз по сравнению с ночным временем, как и в невозмущенные дни (см. рис. 4.44).

3. Спектральная структура функции распределения плотности энергии флуктуации геомагнитного поля $G(T)$ для МИО “Воейково” в течение суток в общем виде сохраняется, но отмечается концентрация энергии в пределах от 10 мин и выше (налицо смещение в более высокочастотную область, причем в невозмущенный день), кривая спектра имеет более плавный угол наклона, т. е. $n = 14/18 = 0,8$. Можно выделить периоды с четким спадом энергии для ночного и дневного времени за 17.04.1996 г., а именно: 7 ; $4,3$; $3,5$; $2,7$ и $2,3$ мин.

4. Динамические спектры естественного геомагнитного поля в течение возмущенного состояния показывают явление развития и затухания процесса — от сосредоточения максимума энергии в области примерно 52 мин и ниже до смещения в область $12 \div 13$ мин. Хорошо прослеживается дифференцированная структура поля развитого возмущения к 17.04.1996 г. (по обоим компонентам), где рост геомагнитной активности как бы перемежается с ее спадом в течение суток, видно движение “волновых пакетов” энергии возмущения. В этом заключается высокая информативность данного метода обработки материала (рис. 4.45,б).

5. Совершенно иная картина распределения энергетического спектра данных, полученного для городских условий. Индустриальные помехи маскируют естественный волновой процесс развивающегося и затухающего возмущения. Видно четкое разделение динамического спектра на две области — дневную и ночную (по вертикальной составляющей); ярко локализована область максимума энергии в полосе от 25,6 мин и ниже и приуроченная к 12–17 ч (“социальный ритм”); ночной минимум спектра также локализован, и период его существования длится от 0 до $3 \div 4$ часов. Направление вектора индукции (компонента D) для городских условий менее информативно, поскольку волновая естественная структура геомагнитного поля как бы нивелируется, выравнивается высоким энергетическим вкладом индустриальных помех (рис. 4.45,а).

Таким образом, удалось показать четкое различие выбранных районов по характеру индуцированного поля: естественный ход индукции в городских условиях существенно искажается, и выделяются периоды дневного и ночного уровня флуктуаций, высокие градиенты с переходом энергосистем на дневной и ночной режим работы, выделяются периоды, связанные с работой научного учреждения ($11 \div 16$ ч).

В городских условиях (на данном локально зафиксированном участке) не удалось выявить рост геомагнитной активности (магнитные бури), что связано с маскирующей ролью индустриальных помех. В этом случае подразделения скорой помощи, находящиеся в районах города с искаженным ГМП и имеющие, например, аппаратуру контроля магнитной индукции B с целью мониторинговых наблюдений за здоровьем пациентов с патологией сердечно-сосудистой системы, не получают своевременно необходимой информации для предупреждения и обоснования вероятных осложнений в состоянии больных в период сильных магнитных возмущений.

4.3.2. Методы изучения и оценка изменчивости пространственно-временной структуры ЭМП в городских условиях

В течение 1998–2004 годов проходило становление новой учебно-научной лаборатории (УНЛ) Учебно-научного центра (УНЦ СПбГПУ). Лаборатория была организована при кафедре экологических основ природопользования* и получила название: лаборатория “Электрофизика естественных экосистем” (<http://www.cef.spbstu.ru/mrns.shtml>). Научный координатор — профессор, д-р геогр. наук В.В. Александров.

Научное направление УНЛ

- Лаборатория “Электрофизика естественных экосистем” работает по общегосударственной проблеме обобщения научных основ рационального использования биологических ресурсов природных экосистем в условиях их комплексной эксплуатации.

- Стратегическая (перспективная) задача исследования — оценка воздействия электромагнитных полей энергетических объектов и локальных физико-химических источников загрязнения среды обитания животных и человека.

- Тактическая (методологическая) задача исследований — мониторинг динамики электромагнитного поля среды обитания и выявление физиологически опасных уровней и доз излучения для функционирования, выживаемости и воспроизводства целостных организмов *in vivo*.

Лаборатория может рассматриваться как своеобразный комплексный изолированный биоценоз, в котором кроме технического оснащения функционировали живые компоненты — научные работники и подопытные животные (рыбы), рис. 4.46, цв.

Методический подход к работе лаборатории сложился не сразу, но изначально ставилась задача: обеспечить мониторинг электромагнитного поля в помещении, контролировать его с учетом геомагнитных флуктуаций не только в Северо-Западном регионе, но и по данным зарубежных обсерваторий (например, *NOAA/SEC Boulder, CO USA*; *Tromsø Geophysical Observatory (Nordlysobservatoriet) Faculty of Science, University of Tromsø* (<http://www.geophys.uib.no/>)).

*Современное название кафедры “Гражданское строительство и прикладная экология” (Гс и ПЭ).

geo.phys.uit.no), а также обсерваторий ближнего зарубежья (Харьковская обсерватория, Украина (<http://www.unver.kharkov.ua/astron/sw/swnow.htm>)) и России (например, <http://www.izmiran.rssi.ru/space/solar/forecast>; <http://www.iki.comos.ru/forecast>).

Лаборатория оснащена измерительной аппаратурой, с помощью которой проводится и упомянутый мониторинг, и обеспечивается учебно-научная практика студентов СПбГПУ [Александров, Федоров, 1998, с. 357–364].

Поставленные задачи были реализованы в течение 1998–2009 годов: построены карты электромагнитных аномалий территории СПбГПУ, служебных, учебных и научных помещений университета, изучаются условия искажения естественного электромагнитного фона при использовании сотовых телефонов и др. Далее рассматриваются результаты этих исследований.

***Техническое обеспечение лаборатории
“Электрофизика естественных экосистем” (УНЛ).
Методика изучения ЭМП в учебных целях***

В предыдущих разделах (разд. 3.2, 4.3.1) читатель ознакомился с приборами и установками, применявшимися в значительной мере для стационарных исследований и наблюдений в научных и учебных целях в лабораторных условиях.

Переносные, легкие портативные приборы современного поколения применяются в учебно-научно лаборатории (УНЛ) в основном для решения учебных и прикладных задач*.

1. Магнитометрические приборы

Для измерения квазистационарной компоненты вектора индукции МП применяется тесламетр “НЕВА-4”. Он используется для контроля уровня магнитной индукции ферромагнитных изделий, излучателей магнитных полей. В основе работы тесламетра лежит метод выделения сигнала с помощью ферро модуляционного преобразователя.

*Автор глубоко признателен инженеру-программисту кафедры ЭОП (ГС и ПЭ) ИСФ СПбГПУ Д.А. Уставникову, который в течение 2000–2004 годов проводил практические занятия со студентами, готовил аппаратуру, компьютерные программы для обработки материалов, а также лично обеспечивал трудоемкий процесс сбора данных в период экспериментальных работ по оценке различных источников искажения естественного ЭМП.

Технические характеристики тесламетра “Нева-4”

1. Пределы измерения значений индукции постоянного и переменного магнитного поля, мкТл	100
2. Основная приведенная погрешность измерения индукции постоянного магнитного поля, %	± 5,0
3. Основная приведенная погрешность измерения индукции переменного магнитного поля, %	± 5,0
4. Частотный диапазон измерений индукции переменного магнитного поля, Гц	5–100
5. Дополнительная погрешность при изменении температуры на 10 °С — не более половины основной	
6. Нестабильность показаний тесламетра при измерении магнитной индукции постоянного магнитного поля не должна превышать половины основной погрешности в течение 30 минут непрерывной работы	
7. Питание тесламетра осуществляется от автономного источника тока	8,6 В
8. Время непрерывной работы без подзаряда аккумуляторов	не менее 5 ч
9. Габаритные размеры датчика	Ø 20 мм l=160 мм
10. Длина кабеля, соединяющего пульт с датчиком	3 м
11. Габаритные размеры пульта, мм	15×75×30
12. Масса тесламетра, кг:	
— пульта, не более	0,25
— датчика с кабелем	0,10

В основе работы тесламетра лежит метод выделения сигнала с помощью ферро модуляционного преобразователя ФП. Для преобразования индукции внешнего магнитного поля в электрический сигнал в обмотку возбуждения ФП подается сигнал, создаваемый задающим генератором, делителем частоты и усилителем мощности. Напряжение с сигнальной обмотки ФП поступает на магнитометрический канал, содержащий последовательно соединенные усилитель низкой частоты и синхронный детектор. Второй вход синхронного детектора соединен через фазовращатель с делителем частоты. Выход синхронного детектора соединен со входом усилителя постоянного тока, который через переключатель соединен с обмоткой обратной связи ФП и подключается либо к аналоговому преобразователю, либо к усилителю низкой частоты. Сигнал с усилителя низкой частоты поступает на последовательно соединенные детектор, фильтр и аналого-цифровой преобразователь. Выход аналого-цифрового преобразователя соединен со входом цифрового индикатора.

“Преобразователь магнитной индукции ПМИ Нева-5”, изготовленный фирмой “ЭТН” (Санкт-Петербург) в 1998 г., применялся для контроля переменного МП в Северо-Западном регионе России.

Технические характеристики ПМИ “Нева-5”

1. Пределы измерения значений индукции магнитного поля, мкТл	1, 10, 100
2. Коэффициенты преобразования на каждом пределе измерения, В/мкТл	5; 0,5; 0,05
3. Приведенная погрешность коэффициентов преобразования на каждом пределе, %, не более	± 5
4. Преобразователь обеспечивает автоматическую компенсацию индукции постоянного магнитного поля в диапазоне, мкТл	± 60
5. Питание преобразователя осуществляется от внешнего источника с постоянным напряжением, В, не менее	9
6. Преобразователь имеет выход для подключения к показывающему прибору, ЭВМ или другому регистрирующему прибору	
7. Преобразователь оснащен датчиком, размещенным в центре установочного координатора, выполненного в виде кубика, с кабелем длиной 1 метр	
8. Габаритные размеры, мм	
датчика	50×24
установочного кубика	60×60×60
пульта	150×80×50

Тесламетр “НЕВА-1” предназначен для измерения постоянной составляющей индукции магнитного поля. Используется для контроля уровня магнитной индукции излучателей магнитного поля. В основе работы лежит метод выделения сигнала с помощью преобразователя Холла.

Технические характеристики тесламетра “Нева-1”

1. Пределы измерения значений индукции постоянного магнитного поля, мТл	20,100
2. Основная приведенная погрешность измерения индукции постоянного магнитного поля, %	± 5,0
3. Дополнительная погрешность при изменении температуры на 10 °С — не более половины основной	
4. Нестабильность показаний тесламетра не должна превышать половины основной в течение 60 минут непрерывной работы	
5. Питание тесламетра осуществляется от источника постоянного тока	
6. Габаритные размеры датчика, мм	∅ 0,25 мм, l = 350
7. Габаритные размеры пульта, мм	155×75×30
8. Габаритные размеры блока питания, мм	115×60×35
9. Масса тесламетра, кг, не более	0,5

Тесламетр «НЕВА-2» предназначен для измерения переменной составляющей индукции магнитного поля. Используется для

контроля уровня магнитной индукции излучателей магнитного поля. В основе работы лежит метод выделения сигнала с помощью преобразователя Холла.

Технические характеристики тесламетра Нева-2

1. Пределы измерения значений индукции переменного магнитного поля, мТл	1; 10
2. Основная приведенная погрешность измерения индукции переменного магнитного поля в диапазоне частот $40 \div 100$ Гц, %	$\pm 5,0$
3. Дополнительная погрешность при изменении температуры на 10°C — не более половины основной	
4. Нестабильность показаний тесламетра не должна превышать половины основной в течение 60 минут непрерывной работы	
5. Питание тесламетра осуществляется от источника постоянного тока	
6. Габаритные размеры пульта, мм	$155 \times 75 \times 30$
7. Масса тесламетра, кг, не более	0,6

Тесламетр “НЕВА-3” предназначен для измерения переменной составляющей индукции магнитного поля. Используется для контроля уровня магнитной индукции излучателей магнитного поля. В основе работы лежит метод выделения сигнала с помощью преобразователя Холла.

Технические характеристики тесламетра “Нева-3”

1. Пределы измерения значений индукции переменного магнитного поля, мкТл	1; 10
2. Основная приведенная погрешность измерения индукции переменного магнитного поля в диапазоне частот $5 \div 2000$ Гц, %	$\pm 10,0$
3. Дополнительная погрешность при изменении температуры на 10°C — не более половины основной	
4. Нестабильность показаний тесламетра не должна превышать половины основной в течение 60 минут непрерывной работы	
5. Питание тесламетра осуществляется от источника постоянного тока	
6. Габаритные размеры пульта, мм	$155 \times 75 \times 30$
7. Масса тесламетра, кг, не более	0,6

2. Электрометрические приборы

Измеритель “Нева-Эдн” предназначен для измерения напряженности переменного электрического поля. Используется для контроля среднеквадратического уровня переменной напряженности электрического поля дисплеев ЭВМ, электронных и бытовых приборов. В основе работы измерителя лежит метод выделения сигнала с помощью емкостного преобразователя.

Технические характеристики измерителя “Нева-Эдн”

1. Пределы измерения значений напряженности переменного электрического поля, В/м	250, 1000
2. Частотный диапазон измерений значений напряженности переменного электрического поля, Гц	5 ÷ 2000
3. Основная приведенная погрешность измерения напряженности переменного электрического поля в полосе частот 50 ÷ 1000 Гц, %	± 1,5
4. Амплитудно-частотная характеристика в диапазоне частот 5 ÷ 2000 Гц, дБ, не более	3
5. Питание измерителя осуществляется от встроенного аккумулятора	
6. Габаритные размеры, мм	
датчика	Ø 80,1 × 200
пульта	155 × 75 × 30
7. Масса измерителя (комплект), кг, не более	0,6

*В настоящее время существует новейшая аппаратура фирмы NARDA, сведения о которой можно получить по рекламной публикации «Frequency-Selective, Isotropic measurement, Evaluation, and Recording of High Frequency Electromagnetic Fields. Narda safety Test Solutions GmbH An L^s Communications Company».

В частности, для работ по тематике, связанной с публикуемой монографией, можно рекомендовать приборы:

<NARDA BROADBAND FIELD METER NBM-500 SERIES> (Италия, Германия, США); NBM-520, NBM-550 (0-30 кГц) и (30 кГц-330 ГГц); EFA-300, ENSO-366.

Методика измерения компонент ΔB_z и ΔE_z при использовании тесламетра “НЕВА-4” и электрометра “НЕВА-Эдн”

1. Составляется (заказывается официально при необходимости) план исследуемой территории (помещения, открытой площадки, обширной зоны).

2. Исследуемая территория (план) размечается по сетке квадратов на полигон. Сторона квадрата выбирается в зависимости от размера полигона и необходимости точности и подробности съемки.

3. Оценивается возможность осуществления съемки на протяжении квазиоднородного периода состояния геомагнитного и электрического полей, т.е. прогностическая гарантия отсутствия сильного магнитного возмущения (менее 20 % вероятности бури) (ч. 1).

4. При значительных размерах полигона проводится геофизическое (геодезическое) профилирование с использованием приборов ориентирования по координатам (компас, нивелир, теодолит и т.д.).

5. В узлах сетки полигона производится измерение значений вертикальных компонент вектора индукции МП ΔB_z и вектора напряженности ЭП ΔE_z ; ведется журнал наблюдений с учетом сопутствующих аномальных метео- и геофизических показателей; как правило, для рассмотренных ниже результатов измерения проводились на уровнях: 0; 0,7; 1,5 м; сторона квадрата сетки равнялась 0,5 или 1 м.

6. Выполняется построение диаграмм распределения ΔB_z и ΔE_z по площади или по объему (в помещении); для построения используется современное программное обеспечение (*SPSS SigmaPlot*).

7. По диаграммам проводится выявление источников аномалий ΔB_z (или ΔE_z) по отношению к условно нормальному фону магнитного или электрического полей; используется план полигона (помещения) с нанесенными визуальными предметами — ориентирами (т.е. выполняется и предметная привязка аномалий ΔB_z и ΔE_z).

8. Обследование помещений необходимо проводить в двух режимах — при отключенном электропитании и при включенном электропитании и функционирующей измерительной аппаратуре. Такой метод позволяет учесть участки с неблагоприятным действием ЭМП на животных (человека) и продумать план (схему) размещения технических устройств-измерителей $\Delta \vec{B}$ и карту поправок для компенсации нежелательных помех. Аналогичным образом проводится измерение квазипеременного электрического поля $\Delta \vec{E}$ в помещении.

Служебные помещения (учебные аудитории, компьютерные классы, лаборатории, площадки возле шахты лифта, коридоры)

Примером учебного цикла “Оценка магнитоэкологического состояния служебных помещений” могут быть результаты измерений в здании III корпуса факультета экономики и менеджмента СПбГПУ:

- *Аудитория 406*: для работы были выбраны горизонтальная сетка $0,5 \times 0,5$ м и два уровня по вертикали: на высоте 0,7 и 1,5 м от пола.

Результаты измерений значений постоянной составляющей вектора индукции магнитного поля ΔB_z представлены на диаграмме распределения уровня магнитного поля в помещении (цветные рис. 4.47, 4.48).

- *Коридорные помещения и площадки на 2, 3, 4 и 5-м этажах*: для работы были выбраны горизонтальная сетка 1×1 м и один уровень по вертикали — на высоте 1,5 м от пола. Результаты измерений значений постоянной составляющей вектора индукции магнитного поля ΔB_z представлены на диаграммах распределения уровня магнитного поля на площадках (рис. 4.49, цв.).

• *Компьютерный класс в аудитории 309:* для работы были выбраны горизонтальная сетка $0,5 \times 0,5$ м и два уровня по вертикали: на высоте 0,7 и 1,5 м от пола. Измерения производились при выключенных, а затем при включенных компьютерах. Результаты измерений значений постоянной составляющей вектора индукции магнитного поля ΔB_z представлены на диаграммах распределения уровня магнитного поля в помещении (рис. 4.50, а-г, цв.).

Обобщенные результаты исследованных помещений приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Значения вектора магнитной индукции ΔB_z (пределы), мкТл

Высота над полом	ауд. 406	ауд. 309		2-й этаж	3-й этаж	4-й этаж	5-й этаж
		Без света	Со светом				
0,7 м	20,6–72,2	5,7–65,8	16–72,2	—	—	—	—
1,5 м	19,8–52,2	27,8–56,8	4,1–66,5	20–51,7	28,7–49,8	21,1–47,9	26,9–55,9

Фоновой характеристикой МП для всех обследованных территорий внутри здания принята величина 48 мкТл ($\pm 2,5\%$).

Сопоставляя диаграммы распределения уровня магнитного поля в помещениях и планы этих помещений, можно выявить источники магнитных аномалий.

Более подробно представленные результаты прослеживаются на примере компьютерного класса. Зная двухуровневые показатели изменчивости ΔB_z и при двух режимах функционирования аппаратуры, мы можем оценить суперпозицию полей в сложной обстановке, т.е. рассмотреть четыре пары взаимно связанных ЭМ явлений. В табл. 4.8 и 4.9 представлены:

1-я пара: распределение МП в компьютерном классе при выключенной аппаратуре.

2-я пара: распределение МП в компьютерном классе при включенной аппаратуре.

3-я пара: распределение магнитных полей для первого уровня (0,7 м), но при разных режимах регистрации (отключенной или включенной аппаратуре).

4-я пара: распределение магнитных полей для второго уровня (1,5 м) также при разных режимах регистрации (отключенной или включенной аппаратуре).

Две последние пары читатель самостоятельно сможет скомпоновать, используя рисунки (1-й и 2-й пары).

Сначала была сделана попытка выяснить коррелируемость явлений попарно для каждого режима (табл. 4.9).

Таблица 4.8

Усредненные локальные значения коэффициента корреляции по площади компьютерного класса (ауд. 309)

0,1527	−0,6769	0,4564	0,7027	7,0	x, м
0,3722	−0,7556	0,1129	0,0468	6,0	
−0,0970	−0,2894	0,0380	−0,0584	4,5	
0,0297	0,5266	0,1169	−0,3584	3,0	
0,3103	−0,7789	0,4268	0,4626	1,5	
6,0	4,5	3,0	1,5	0	
y, м					

Таблица 4.9

Усредненные значения коэффициента корреляции по всей площади компьютерного класса (использована программа Matlab)

Коэффициент корреляции	1,5 м и откл. питание	1,5 м и вкл. питание	0,7 м и откл. питание	0,7 м и вкл. питание
1,5 м и откл. питание	—	0,5496	−0,0525	0,1720
1,5 м и вкл. питание		—	—	—
0,7 м и откл. питание			—	0,4724
0,7 м и вкл. питание				—

Как видно из данных табл. 4.8 и 4.9, и усредненные значения коэффициента корреляции, и локальные значения его по всей площади компьютерного класса (равные по площади квадраты $1 \times 1 \text{ м}^2$) не дают четкого представления о связи полей на разных уровнях регистрации. Такая связь прослеживается лишь на тех участках, где присутствуют стабильные источники аномалий МП — железные двери, батареи отопления, щиты электропитания, магнитная демонстрационная доска и т.д. Поэтому был использован другой метод оценки связи — дифференциальный. Вычислив разность между величиной индукции ΔB_z относительно уровней 1,5 м

и 0,7 м при включенном и отключенном электропитании, удалось подтвердить размещение источников аномалий. Для этой цели в каждом элементе площади класса $\Delta S^n = 1 \times 1 \text{ м}^2$ была рассчитана совокупность точек

$$K(x, y) = \sum_{i,j=1}^{i,j} (\Delta B_{z_{1,5 \text{ м}}} - \Delta B_{z_{0,7 \text{ м}}}),$$

которая при последующем суммировании по всей площади помещения ΣS_n (ауд. 309) позволила представить план локализации аномалий МП (рис. 4.51, цв.).

Аналогичный расчет был выполнен и для характеристики магнитоэкологических условий в лаборатории “Электрофизика естественных экосистем” (см. цв. рис. 4.61, 4.62, помещение в ИСФ, № 205).

В 2004 г. представилась возможность сравнить характеристики распределения магнитных полей ΔB_z в компьютерных классах, где аппаратура функционирует, и там, где аппаратура только что установлена, но не подключена к сети. Это представляет определенный интерес с точки зрения как оценки общего уровня магнитной нагрузки в рабочем помещении, так и локализации высоких градиентов поля возле совершенно неработающей аппаратуры. То есть рассматривается вопрос — все ли так безоблачно с медицинской точки зрения даже если учащийся (или служебный персонал) находится возле ПЭВМ и не работает (отдыхает)?

Аудитория 203 (ИСФ) представлена как будущий компьютерный класс при отключенном электропитании (рис. 4.52, цв.). Здесь имеются положительные аномалии с индукцией до 80 мкТл и отрицательные с индукцией 20 мкТл на уровне пола, а также положительные аномалии менее 60 мкТл и отрицательные с индукцией до 30 мкТл на уровне 1,5 м от пола. Положительные аномалии обусловлены проложенной электрической проводкой, отрицательные — наличием блоков батарей отопительной системы. Таким образом, аномальные значения индукций ($-\Delta B_z$ или $+\Delta B_z$) могут обусловить некомфортное состояние операторов ПЭВМ даже, казалось бы, при благоприятном состоянии помещения (техника не работает).

Аудитория 409 (ИСФ) представлена как функционирующий компьютерный класс при включенной сети и включенных ПЭВМ (рис. 4.53, цв.). Положительные аномалии достигают индукции до 90 мкТл и отрицательные — до 20 мкТл, но это не отличается от подобных данных в современных публикациях отечественных и зарубежных исследователей.

Территория вблизи учебных зданий

Поскольку бесспорно в настоящей работе показана необходимость тщательного исследования влияния неионизирующего электромагнитного излучения на живые объекты в окружающей среде, то остро насущной становится задача выявления источников дополнительных возмущений, искажающих естественный фон магнитного поля Земли, которые не могут не сказаться на жизнедеятельности не только отдельных биосистем, но и биосферы в целом.

Для проведения полевых измерений администрация СПбГПУ обеспечила поисковую группу геодезической карто-схемой территории и стандартным топографическим оборудованием. Территория обследовалась по системе профилей с расстоянием 5 м между ними и с шагом измерения 1 м. В течение июля-сентября 2000 г. в соответствии с типовыми геофизическими требованиями к точности измерений (5 %) была проведена магнитосъемка территории (характеристики индукции постоянного магнитного поля), составлена компьютерная база данных, которая визуализирована с помощью пакета Microsoft Excel.

В качестве экологически благополучной (невозмущенной) зоны была условно выбрана территория парка СПбГПУ, где измеренные значения составляющих полного вектора магнитной индукции в период обследования имели следующие значения:

Номер точки	Магнитная индукция $\vec{B}$, мкТл			
	Вертикальная компонента $\vec{B}_Z$	Горизонтальная компонента $\vec{B}_X$	Горизонтальная компонента $\vec{B}_Y$	Полный вектор $\vec{B}_Z$
1	48,3	-5,3	8,0	49,24
2	46,3	-2,0	9,5	47,31
3	44,7	-2,0	10,2	45,89

При выполнении полевых измерений учитывались вариации геомагнитного поля, по данным магнитной обсерватории ИЗМИРАН (г.Троицк, Московская обл.) и обсерватории “Воейково” (Санкт-Петербург). В те дни, когда наблюдались сильные возмущения естественного фона, для обеспечения достоверности

показаний измерительной аппаратуры полевые работы не проводились.

Упомянутый выше (см. разд. 4.3.1) “Экологический атлас Санкт-Петербурга, 1992”, в котором имеется карта распределения электромагнитного поля по отдельным городским районам, характеризует энергетическое воздействие этого нового экологического фактора весьма схематично. Тем не менее, нами использован фрагмент этой карты, соответствующий территории СПбГПУ, который послужил ориентировочной вехой для последующей детальной проработки и составления подробного описания источников геомагнитных аномалий (рис. 4.54, цв.).

Основными источниками ЭМП являются городские системы энергоснабжения и электропотребления, работающие на переменном и постоянном токе. Переменные и постоянные магнитные поля возникают вблизи воздушных и кабельных линий электропередач (ЛЭП), электрооборудования различного назначения и теплоэлектроцентралей.

На упомянутой карте показано расположение воздушных ЛЭП с возможным превышением предельно допустимых значений напряженности поля $E \geq 1$ кВ/м темными линиями, в остальной части выбранной территории этот показатель близок к естественному фону.

Места предельно допустимых уровней постоянного магнитного поля показаны на карте кружками красного цвета. Такие уровни возникают в местах соединения электрических кабелей с контактными проводами трамвайных и троллейбусных сетей и считаются опасными для человека при длительном нахождении вблизи источника. В зонах рельсовых путей, переводных стрелок наблюдаются повышенные уровни постоянного магнитного поля. Они примерно в 10 раз ниже опасных для человека, но в 20–30 раз превышают уровень естественного магнитного поля Земли (см. рис. 4.54, цв.).

Поскольку повышенные уровни ЭМП могут возникать вблизи распределительных щитов, вблизи бытового электрического оборудования и электронных приборов, где, как правило, проходит работа обслуживающего учебного персонала и учащихся, то длительное пребывание их в зоне действия электромагнитных полей может отрицательно влиять на состояние их здоровья. Следует заметить, что по официальным обобщенным данным обследуемая территория является условно благополучной, но в нашей работе мы осознанно учитывали, что опубликованные данные не

отражают особенностей структуры магнитного поля, связанного с конкретными источниками на изучаемой территории (производственные, учебно-производственные здания, исследовательские центры и т.д.). Поэтому важно было постараться оценить очень сложную и весьма изменчивую картину распределения МП, хотелось бы приблизиться к ответу на вопрос о чувствительности организмов к слабым ЭМП сверхнизкочастотного диапазона, который эквивалентен вопросу — имеют ли естественные ЭМП экологическое значение? Известно, что в середине прошлого столетия большинство физиологов, биофизиков и специалистов по экологическим дисциплинам отвечало на него отрицательно. В тот исторический период широко распространилось убеждение о возможности воздействия ЭМП на биологические объекты только при напряженностях, которые обеспечивают нагрев тканей не ниже 10^5 В/м, что в естественных условиях никогда не реализуется, а эволюционная роль слабых ЭМП общеизвестна. Существующий теоретический пробел заставлял упорно искать ответа в экспериментальных исследованиях.

Результаты. По результатам измерений построена карта-схема изменчивости магнитного поля на обследованной территории (рис. 4.55, цв.).

На рис. 4.55, цв. фоновые характеристики магнитного поля, близкие по значениям к естественному, обозначены светлым тоном ($B_z = 46 \div 48$ мкТл); аномальные участки, характеризующиеся превышением естественного фона ($B_{\max} = 166$ мкТл), и участки, где наблюдалось понижение индукции ($B_{\min} = 18$ мкТл), представлены более темными тонами той или иной полярности поля.

По измеренным данным, относительные значения отличаются от официальных фоновых безопасных характеристик магнитного поля в 3–4 раза, что превышает данные по биологическому эффекту. Это позволяет сделать вывод об экологической опасности на отдельных участках обследованной территории СПбГПУ.

На основании проведенных измерений можно сделать заключение о состоянии магнитоэкологических условий на обследованной территории, о степени реальной значимости напряженности, о медико-экологической ситуации, о реальном риске для здоровья студентов и педагогического персонала под влиянием техногеннообусловленных вредных экологических факторов.

Полученные результаты помогут ответить на вопрос о роли главных факторов в создавшейся медико-экологической ситуации и соответственно разработать конкретные предложения для администрации района (города), направленные на проведение мероприятий по защите людей от экологически угрожающих факторов.

Работа может служить предварительным результатом к принятию соответствующих мер по обеспечению безопасности жизнедеятельности. Например, возможно установление ограждений участков, где наблюдались характерные аномалии, а также ограничение (по времени) пребывания людей на этой территории.

Периферийная зона университета в пределах размещения ЛЭП (высоковольтные линии электропередач)

В настоящее время повсеместно обсуждается и подвергается остракизму проблема техносферных ЭМП промышленной частоты 50 Гц или различных источников радиочастотного диапазона. Проблема остается достаточно болезненной и трудно разрешимой, словно человечество подступило к ней впервые. На самом деле имеются и серьезные теоретические и экспериментальные исследования, расчеты, нормативы, регламентирующие документы и т.д. Поток популярных публикаций в средствах массовой информации не иссякает. Наша задача скромна — показать незначительными средствами реальную картину распределения ЭП в близлежащей к университету зоне, которая не может быть получена только путем теоретического расчета. А также хотя бы попытаться обосновать или в будущем опровергнуть мнение о массовых канцерогенных заболеваниях населения, проживающего в районах расположения трасс ЛЭП. Эти задачи под силу только крупным комплексным учреждениям с высоким финансовым потенциалом и при серьезной поддержке Всемирной Организации Здравоохранения [Takabe et al., 1998; Smith, 1994; ЭМС-2004].

Методический прием

Измерения проводились около шести опор ЛЭП вдоль улиц Гжатская и Гидротехников, в течение четырех дней. Для площади в реальных пределах размещения ЛЭП была построена сетка профилей, идущих через каждые 20 м. За центральную линию отсчета принималась центральная линия между опорами, в свою очередь измерения проводились через каждые 10 м по профилю в пределах

30 ÷ 40 м от центральной оси с востока на запад (по Гжатской ул.) и с севера на юг (по ул. Гидротехников). Высота — 1,5 м и 0,5 м от земли. При измерении применяли прибор “Нева-Эдн”, предназначенный для измерения напряженности переменного электрического поля (см. разд. 4.3.2).

Для последующих измерений квазистационарной компоненты магнитного поля ΔB_z ЛЭП использовали тесламетр “НЕВА-4” (см. разд. 4.3.2), руководствуясь тем же методическим приемом.

Поскольку к настоящему времени не только в научных публикациях, но и в Интернете приводятся стандартные, соответствующие теоретическим расчетам, графические зависимости распределения ΔE и ΔB в зоне действия ЛЭП, в настоящем разделе приводятся конкретные реальные результаты измерений, которые могут нести в себе локальный вклад полей, зависящих от окружающих источников аномалий.

Изменение напряженности переменного электрического поля под ЛЭП как функции расстояния (ортогонально к оси ориентации трассы)

Диаграмма $\Delta E = f(L, m)$ иллюстрирует такое изменение, но несколько отличающееся от стандартного, в зоне отсутствия аномалий (рис. 4.56).

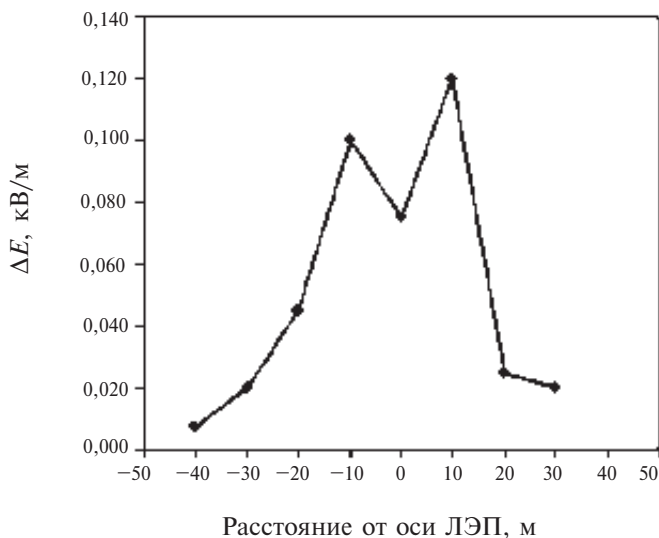


Рис. 4.56. Изменение напряженности ΔE под ЛЭП вне зоны аномалий поля. Измерения выполнены перпендикулярно оси ЛЭП по профилям с шагом через 10 м

На участках между опорами картина зависимости напряженности переменного электрического поля от расстояния была схожа со стандартными значениями зависимости, но на определенных участках профилей наблюдались аномальные скачки напряженностей. Такие аномалии наблюдались на участке 220 ÷ 340 м со стороны дороги по Гжатской улице.

На рис. 4.57, цв., 4.58 цв. представлены результаты профилирования для значений E , кВ/м. Как видно, в районе ул. Гидротехников напряженность переменного ЭП выше, чем на ул. Гжатская. На участке 220 ÷ 340 м выявлены аномальные изменения, где значения ΔE_z интенсивнее, что, видимо, обусловлено подвеской дополнительной линии транспортного и осветительного назначения.

Ознакомление с данными о состоянии ЭМП на территории лесопарка СПбГПУ показывает, что даже аномальные зоны в нем менее опасны, чем в пределах проходящей трасы ЛЭП: общая энергонасыщенность пространства вдоль названных улиц обуславливает неблагоприятную обстановку для пребывания в этих условиях жителей города.

В России в целях защиты населения от воздействия ЭМП ЛЭП установлены санитарно-защитные (охранные) зоны. В пределах зон запрещается размещать жилые здания, стоянки и остановки всех видов транспорта, устраивать места отдыха, спортивные и игровые площадки*.

Границы охранных зон в России:

Напряжение ЛЭП	330 кВ	500 кВ	750кВ	1150кВ
Размер санитарно-защитной зоны	20 м	30 м	40 м	50м

Границы охранных зон в городских условиях:

Напряжение ЛЭП	<20 кВ	35 кВ	110 кВ	150 ÷ 220 кВ	330 ÷ 500 кВ
Размер санитарно-защитной зоны	10 м	15 м	20 м	25 м	30 м

*Однако, практика показывает, что требования санитарных нормативов не выполняются, а органы контроля бездействуют.

Изменение магнитной индукции ΔB_z под линией ЛЭП как функции расстояния (ортогонально к оси ориентации трассы)

На рис. 4.59, цв., показано распределение ΔB_z в пределах трассы ЛЭП на улицах Гжатской и Гидротехников на двух уровнях измерения — 0,5 и 1,5 м от поверхности земли. Было пройдено 17 профилей длиной по 30 м в обе стороны от оси ориентации трассы, принятой за “нуль отсчета”.

Завершая представленные наблюдения в зоне действия ЛЭП, для удобства пользователя даем сведения о нормативных документах, разработанных в России (по отношению к объектам излучения ЭМИ в 50 Гц), а также допустимые уровни облучения магнитными полями промышленной частоты (50 ÷ 60 Гц) для различных стран и профессиональной ориентации:

Таблица 4.10

Вид поля и нормируемый диапазон частот	Нормативный документ
Электрическое поле 50 Гц	Сн № 2971-84 “Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты”
Магнитное поле 50 Гц	СанПин 2.1.2.1002-00 “Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям”

[Ю.Г. Григорьев, В.С. Степанов, О.А. Григорьев, А.В. Меркулов. *Электромагнитная безопасность человека: Справочно-информационное издание / Государственный научный центр Российской Федерации. Институт биофизики. М.: Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений, 1999. 145 с.; <http://www.pole.com.ru>*]

Уровень облучения магнитными полями промышленной частоты специалистов различных профессий в течение рабочего дня*

Профессия специалистов	Значение МП, мкТл	
	Среднее для группы	Диапазон для 90 % проконтролированных случаев
Различные профессии (Швеция)		
Автоводитель	0,08	0,03 ÷ 0,19
Учитель теоретических дисциплин	0,12	0,04 ÷ 0,31
Автомеханик	0,17	0,03 ÷ 0,37
Продавец различных товаров	0,27	0,08 ÷ 0,44
Электрики-профессионалы в различных отраслях промышленности (США)		
Инженер	0,17	0,05 ÷ 1,20
Электрик	0,31	0,16 ÷ 1,20
Электросварщик	0,82	0,17 ÷ 9,60
Специалисты систем производства и распределения электроэнергии (США)		
Конторский служащий без ПЭВМ	0,05	0,05 ÷ 0,16
Конторский служащий с ПЭВМ	0,12	0,03 ÷ 0,63
Электромонтер по обслуживанию ЛЭП	0,25	0,05 ÷ 3,50
Электромонтер	0,54	0,08 ÷ 3,40
Персонал подстанций	0,72	0,11 ÷ 0,34
Специалисты-профессионалы вне работы (дома, по пути следования)	0,09	0,03 ÷ 0,37
Специалисты систем связи (США)		
Радиомонтажник, наладчик	0,16	0,09 ÷ 0,31
Техник основного офиса	0,21	0,05 ÷ 0,82
Кабельщик	0,32	0,07 ÷ 1,50
Медицинский персонал (США)		
Медсестра	0,11	0,50 ÷ 0,21
Рентгенолог	0,15	0,01 ÷ 0,22
Рабочие швейной промышленности (Финляндия)		
Оператор швейных машин	2,20	1,0 ÷ 4,0
Прочие фабричные специальности	0,10	0,60

*Структура табл. отредактирована автором наст. изд.

Фитоценоз как тест-объект для контроля рекреационной территории СПбГПУ. Новый метод мониторингирования экологического состояния окружающей среды

Зададимся вопросом: какие идеи послужили основой для формулирования заглавия рассматриваемой проблемы? Первое, и это

главное, — именно научные. А далее — острая необходимость практически оценить экологическую ситуацию в озелененной части территории университета. Синтез научной и прикладной деятельности в данной проблеме настолько ярко проявляется, что оппонентам будет трудно задавать наболевший и неуклюжий вопрос — “А когда ваша деятельность окупится, или, проще говоря, когда вы внесете деньги в казну?” А теперь по существу.

Вокруг любого биологического объекта в процессе его жизнедеятельности возникает сложная картина (суперпозиция) физических полей (см. разд. 3.1, 3.2)*. И естественно, что живой объект, как и любое физическое тело, должен быть “источником равновесного электромагнитного излучения” [Кибернетика живого: Биология и информация. М.: Наука, 1984. 144 с., с. 111]. Например, такое излучение от теплокровного объекта далеко “уходит” от его поверхности, попадая в определенные частотные окна прозрачности — каналы информации, которые являются областями взаимодействия внутренних структур живого объекта с внешними полями геосферы. Низкочастотное ЭМИ в значительной мере экранируется высокопроводящими тканями биообъекта. Это затрудняет решение обратных задач: по измеренным величинам электрического потенциала $\Delta\varphi$ вблизи поверхности тела определить источник таких полей внутри объекта. В низкочастотной области излучения (видимо, в пределах до 1 кГц) должны наблюдаться и магнитные поля, связанные с электрическими токами в проводящих тканях, сопровождающими физиологические процессы (ионные токи). В отличие от электрических полей магнитные поля не экранируются тканями объекта, поэтому, регистрируя МП, можно с большей достоверностью выявить их источники. Это важно вплоть до расшифровки деятельности мозга и других внутренних органов, что уже весьма успешно осуществляется в медицинских исследованиях и при лечении заболеваний разной этиологии (см. разд. 3.3, 3.4). Помимо выявления названных выше каналов информации (частотных окон) необходимо дополнительное синхронное измерение комплекса физико-химических характеристик среды — газовый и аэрозольный состав, концентрация ионов, так как в процессе метаболизма биообъект вносит в нее возмущения, при которых меняются удельная электрическая проводимость χ и диэлектрическая проницаемость ϵ сопредельных участков всех компонентов среды (твердой, жидкой и газообразной фаз). Существенную пользу в таких исследованиях должна обеспечить современная аппаратура дистанционного зондирования (по аналогии с космическими и физиологическими задачами).

*В настоящем тексте рассматриваются только физические поля, связанные конкретно с электромагнитными явлениями.

Применяя новые методы медико-биологического контроля тепловых животных и человека к исследованию растений, можно на ранней стадии состояния их регуляторных систем и функций выявить изменения, приводящие впоследствии к патологии. Здесь мы вплотную подходим к рассмотрению задач, связанных с электрическими и магнитными биотропными реакциями растений на воздействие внешних факторов (источников) ЭМП и ЭМИ. **Таким образом, определяется первая часть нового методического подхода к изучению фитоценоза — биомагнитного (физиологически оправданный метод).**

Следует подчеркнуть, что биомагнитные сигналы очень слабы, и регистрация их — непростая физическая задача. Это объясняется высоким уровнем магнитных шумов в пространстве. Напомним, что индукция квазистационарного (постоянного — нормального поля Земли) имеет порядок $5 \cdot 10^{-5}$ Тл (см. ч. 1), квазиперемеменный геомагнитный фон (включая городской шум) $\approx (3-6)10^{-7} \div 10^{-8}$ Тл, ферромагнитные частицы индуцируют сигнал $\approx 10^{-6} \div 10^{-9}$ Тл, а сетевая помеха — $10^{-8} \div 10^{-10}$ (при частоте $10^2 \div 10^3$ Гц). Поэтому основная задача биомагнитных измерений — это применение специальных мер защиты от помех. Именно поэтому широкое внедрение биомагнитного метода в практику экологических исследований отстает от современных хорошо оснащенных в техническом отношении космических и медицинских достижений. С другой стороны, магнитные шумы в окружающем пространстве являются слабыми флуктуациями геомагнитных полей и полей промышленных источников, индуцируемых электроустановками. Это способствует использованию простейшего подхода для избежания внешних, в основном антропогенных, магнитных шумов, т.е. желательно измерения проводить непосредственно в природных условиях, вдали от существенных аномалий МП Земли и размещения электрических машин. Для биомагнитных измерений станет возможным применение приемного устройства типа “сквида”^{*}. Вспомните

^{*}“Сквид” — от англ. *Superconducting Quantum Interference Device* — сверхпроводящий квантовый интерференционный прибор для измерения МП, основанного на использовании чисто квантовых явлений — эффекта Джозефсона и интерференции волновой функции электронных пар в сверхпроводящем кольце, содержащем джозефсоновский переход. Фактически “сквиды” — это чувствительные элементы магнитометров, обеспечивающие измерение электрического тока, магнитной восприимчивости χ_m , перемещение магнетика и т.д. [ФЭС. М.: Сов. энцикл., 1983. С. 660]. Чувствительность “сквида” $\approx 10^{-15}$ Тл, а при измерении градиента МП $\approx 10^{-14}$ Тл/м.

хотя бы описанный в ч. 3 эффект реакции живого дерева (березы) на удар по стволу, в результате которого был зафиксирован радиометром импульс электрического поля $\Delta\varphi$. Безусловно, при такой высокой чувствительности магнитометров на основе “сквида” необходимо следить за колебаниями ΔB_z в течение суток (есть вероятность геомагнитных возмущений в пределах 100 нТл — слабая магнитная буря). Значение максимальной скорости изменения ГМП в полдень, т.е. $\text{grad } \Delta B_z$, равный примерно 0,3 нТл/мин, можно не учитывать, так как он на четыре порядка меньше фоновых значений ГМП (при кратковременном измерении в одной точке).

Вторая часть нового методического подхода к изучению фитоценоза весьма очевидна — геоботаническая. Геоботаника как наука сформировалась в XIX в., когда этот термин одновременно предложили в 1866 г. А. Гризебах и Ф.И. Рупрехт. С начала XX в. установилось современное понимание геоботаники, и ее стали рассматривать или как синоним фитоценологии (В.В. Алехин, А.П. Шенников), или как дисциплину, объединяющую ботаническую географию и фитоценологию (В.Н. Сукачев, В.Б. Сочава). В общей цепи геоботанических дисциплин нас интересует *экологическая геоботаника*, т.е. зависимость растительности от условий природной среды [Биологический энциклопедический словарь. М.: Сов. энцикл., 1989. С. 126.]. Именно условия природной среды могут формировать зоны биологического дискомфорта, пространственно связанные как с естественными неоднородностями геофизических полей, так и с антропоферными источниками — крупными промышленными зонами, нефтехранилищами, линиями метрополитена, территориями жилищной застройки и т.д. и т.п. Как показывает практика, в таких дискомфортных условиях формируется экологическая ситуация, способствующая развитию патологии и угнетению растительности. Для выявления патологического состояния древесной растительности проводится ландшафтная геоботаническая съемка — выявление зон, где деревья поражены различными заболеваниями (микозы; бактериальные патологии; разрушение древесной массы насекомыми и др.).

При подготовке настоящего раздела монографии к переизданию (4.3.2) автор столкнулся с обостряющейся проблемой старения и онкозаболеваний в мегаполисах. Современные взгляды в геронтологической науке для объяснения указанной проблемы привлекают новые разработки в области геоботаники, растениеводства,

клеточной биологии, биохимии. В частности, растения являются многоклеточными организмами, лишенными нервной системы. Регуляторные физиологические процессы в их организменной системе, например разрушительные, происходят при старении и онкогенезе аналогично тем разрушительным процессам, которые наблюдаются у растений с нормальным (не патологическим) онтогенетическим развитием. Выявлению сходства разрушительных процессов при нормальном онтогенезе у животных, размножающихся половым путем, и у растений посвящена работа [А.В. Макрушин. Что может дать физиология растений для понимания природы старения и онкогенеза // Успехи геронтологии. 2008. Т. 21, № 2. С. 195–197].

При выяснении геоботанического состояния древесной экосистемы в западной части парка сотрудники СПбГПУ и Лесотехнической академии провели первые поисковые работы по инвентаризации деревьев. В частности, были определены **таксономические характеристики (показатели) древесной растительности***, тем более что стала очевидной так называемая **таксономия опасностей****: порода, диаметр ствола, высота, класс Крафта, категория состояния, заболеваемость, степень повреждения. Составлен инвентаризационный план, соответствующий произрастающему насаждению на момент обследования.

Далее каждое дерево было фитопатологически обследовано: территория разделена на 10 участков, ограниченных проезжими и пешеходными дорогами;

деревья нумеровались (в натуре и на плане) по каждому участку отдельно;

фиксирувалась визуально порода дерева;

производилась морфометрическая оценка;

категория состояния деревьев оценивалась по 6-балльной шкале в соответствии с “Санитарными правилами в лесах Российской Федерации” [М.: Экология, 1992. 16 с.].

*Таксономия (от таксон + гр. *nomos* — закон) — теория и практика научной систематики и классификации. Раздел систематики, учение о соподчинении таксономических категорий — таксонов — от видов до систематических царств. Таксон (греч. *taxis* — расположение в порядке) — то же, что и единица таксономическая — группа родственных организмов, которым можно присвоить таксономическую категорию.

**Таксономия опасностей — классификация и систематизация опасностей по различным признакам. По происхождению опасности делятся на 6 групп: природные, техногенные, антропогенные, биологические, экологические, социальные [Безопасность деятельности: Энциклопедический словарь / МАНЭБ. СПб.: ЛИК, 2003. С. 382].

Сведения внесены в электронную базу данных в программе *Mapinfo Professionl*.

Первичные результаты показали, что в парке распространены грибковые заболевания (загнивание ствола, некрозы коры и ветвей, ржавчина и черная пятнистость листьев, мучнистая роса листьев и др.), ведьмины метлы и гнилость корней, плодовые тела различных трутовиков, дупла, сухие сучья, механические повреждения (табл. 4.11).

С помощью ГИС-технологий выделены деревья в отдельный информационный слой из общего числа графических объектов (деревьев), пораженных заболеванием *Nectria galligena*, а в дальнейшем при использовании 3-го (магнитологического) метода оценки экосистемы результаты были объединены в единое информационное пространство (разд. 4.3.2, см. рис. 4.60, цв.).

Таблица 4.11

Заболеваемость древесных пород

Название болезни или повреждения	Латинское название	Повреждаемая древесная порода.
Лиственные породы		
"Ведьмины метлы"	<i>Taphrina betulina</i>	Береза
Мучнистая роса	<i>r.Uncinula</i>	Береза, клен, ива
Некроз ветвей	<i>Nectria cinnabarina</i>	Клен, липа, береза
Рак ступенчатый	<i>Nectria galligena</i>	Береза, липа, клен
Черная пятнистость листьев клена	<i>Rhytisma acerinum</i>	Клен
Ржавчина листьев березы	<i>Melampsoridium betulae</i>	Береза
Ржавчина листьев тополя	<i>Melampsora populina</i>	Тополь
Рак тополя	<i>Hypoxyton pruinaum</i>	Тополь
"Чага" (стволовая гниль)	<i>Jnonotus obliquus</i>	Береза
Опенок осенний (гниль корней)	<i>Armielariella mellea</i>	Береза, ольха
Березовый трутовик	<i>Lepzites betulina</i>	Береза
Хвойные породы		
Рак лиственницы	<i>Lachnellula wilcommii</i>	Лиственница
Рак сосны	<i>Peridermium pini</i>	Сосна
Некрозы ветвей сосны	<i>Cenangium abietis</i>	Сосна

Заболееваемость древесных пород

<i>Name of disease or damage</i>	<i>Latin name</i>	<i>Damaging wood species</i>
<i>Broadleaved species</i>		
«Witch's broom»	<i>Taphrina betulina</i>	Birch
Mildew	<i>r. Uncinula</i>	Birch, maple, willow
Branch's necrosis	<i>Nectria cinnabarina</i>	Maple, linden, birch
Ladder-shaped canker	<i>Nectria galligena</i>	Birch, linden, maple
Maple's black leaf mottle	<i>Rhytisma acerinum</i>	Maple
Birch leaf rust	<i>Melampsoridium betulae</i>	Birch
Poplar leaf rust	<i>Melampsora populina</i>	Poplar
Poplar cancer	<i>Hypoxylon pruinaum</i>	Poplar
«Birch fungus» (trunk rot)	<i>Jnonotus obliquus</i>	Birch
Autumn honey fungus (phytophthora)	<i>Armielariella mellea</i>	Birch, alder
Birch fungus	<i>Lepzites betulina</i>	Birch
<i>Coniferous species</i>		
Larch cancer	<i>Lachnellula willkommii</i>	Larch
Pine cancer	<i>Peridermium pini</i>	Pine
Pine branch's necrosis	<i>Cenangium abietis</i>	Pine

Рассмотренные выше предпосылки для формирования нового подхода к мониторингованию природной среды на территории университета пришлось яснее и четче сформулировать, когда обострилась проблема экстренной и обязательной паспортизации рекреационной зоны.

В 2003 г. руководством СПбГПУ было утверждено распоряжение “**О необходимости проведения комплексного обследования парка СПбГПУ, используя учебный и научный потенциал подразделений университета**”. Техническое задание №1/2003 преследовало цель — “проведение внутреннего контроля за состоянием зеленых насаждений, находящихся на территории СПбГПУ”.

С учетом требований технического задания лаборатория “Электрофизика естественных экосистем” предложила использовать третью часть нового методического подхода — геомагнитометрический, а в данном контексте **магнитоэкологический метод мониторингования зоны парка, используя главное его преимущество — экспрессность**. А далее предполагается наращивать качественность исследования, расширяя комплексность и синхронность измерений (см. первый и второй методы мониторингования).

Методика третьей части нового подхода обследования

1. *Оценка фонового геомагнитного поля.* Как известно, эта характеристика описывается уравнением для **нормального магнитного поля Земли К.Ф. Гаусса** (см. ч. 1 и 2). Но также известно, что “представительной математической модели ГМП до настоящего времени не создано” [Почтарев В.И. Нормальное магнитное поле Земли. М.: Наука, 1984]. Наличие аномалий делает эту задачу чрезвычайно трудной. Хотя за последние 30 лет и разработано значительное количество международных аналитических моделей ГМП (см. ч. 1), все они являются математическим описанием с различной степенью приближения наблюдаемого поля $\vec{B}$, а не нормального $\vec{B}_0$. **Нормальное поле** в магнитологии трактуется как определенный уровень отсчета, включающий основную, главную часть общего, присущего планете Земля, магнитного свойства. Понятия “нормальное поле”, “нормальный уровень”, “нормальный фон” применяются и в других научных дисциплинах (гравиметрии, аэрологии и др.). Необходимость сформулировать понятие нормального поля возникла в результате выявления в различных районах земного шара интенсивных аномалий в структуре ГМП, обусловленных различными геолого-физическими причинами.

В 2007 году ЮНЕСКО и Комиссия по геологии (Франция) опубликовали мировую карту магнитных аномалий. Карта представляет собой первую попытку дать сводку результатов исследований на протяжении последних 50 лет, используя сухопутные, морские и спутниковые измерения. Зарегистрированные аномальные значения МП представляют собой примерно 1 %-ые отклонения от ГМП. Карта для широт севернее и южнее $67^{\circ}33'$ выполнена в полярной проекции, а пояс между полярными кругами — в проекции Меркатора. Она поможет локализовать геологические неоднородности, разломы, ударные кратеры, вулканические новообразования и др. (рис. 4.61, цв.). [La Recherche, 2007, № 411. р. 13].

В основном это объяснялось присутствием железосодержащих гипермагнитных руд в земной коре. Поэтому разделение сложного явления на нормальную компоненту — главную первичную, порожденную основными (общими) причинами, и аномальную — вторичную, являющуюся неким следствием планетарных и космических взаимодействий, представляет общенаучный методологический интерес.

Без учета влияния флуктуирующих электромагнитных источников (геомагнитные колебания суточного цикла, аномальные всплески в системе солнечно-земных связей, сейсмические

явления планетарного масштаба и т.д., ч. 1) собственное ГМП, $\bar{B}$, качественно может быть представлено в виде суммы структурных частей:

$$\bar{B} = \bar{B}_0 + \bar{B}_M + \bar{B}_{кр} + \bar{B}_p + \bar{B}_л + \delta\bar{B}, \quad (4.8)$$

где $\bar{B}_0$ — поле диполя (поле однородно намагниченного шара с соответствующим магнитным моментом M), при этом $\bar{B}_0 \approx 80 \% \bar{B}$;

$\bar{B}_M$ — поле мировых магнитных аномалий крупномасштабного характера в размере нескольких тысяч км, $\bar{B}_M \approx (10 \div 15 \%) \bar{B}$.

$\bar{B}_{кр}$ — крупные региональные аномалии, выявленные сравнительно недавно, размерами примерно 400–500 км (реже (1000 км), $\bar{B}_{кр} \approx 1 \% \bar{B}$;

$\bar{B}_p$ — региональные аномалии с поперечными размерами в пределах 30 ÷ 40 км, $\bar{B}_p \approx 1 \% \bar{B}$. Кстати, мегаполис, как например, Санкт-Петербург, можно классифицировать как некую региональную магнитоэлектрическую (переменную по интенсивности излучения) аномальную структуру;

$\bar{B}_л$ — локальные аномалии с размерами примерно 3 ÷ 5 км, причем $\bar{B}_л \approx 1 \div 3 \% \bar{B}$ ($\bar{B}_p$ и $\bar{B}_л$ — многочисленные и распространенные классы аномалий на Земле);

$\delta\bar{B}$ — изменение среднегодовых значений ГМП в пункте наблюдения, выявленные в течение не менее 10 лет, $\delta\bar{B} \approx 0,1 \% \bar{B}$.

Таким образом, основная, главная часть магнитного поля Земли,

$$\bar{B}_0 + \bar{B}_M \cong 95 \%.$$

С методической точки зрения следует отметить, что долгопериодные изменения уровня ГМП за периоды 10 и более лет могут привести к серьезным ошибкам в расчете ($\bar{B}_0 + \bar{B}_M$), поэтому геомагнитную информацию необходимо приводить к одной эпохе, кратной 5 ÷ 10 годам. Подобные интенсивные колебания осредненных значений магнитных свойств планеты обусловлены непрекращающимися активными процессами в ядре и мантии Земли (самоподдерживающееся динамо, ч. 1).

2. *Выявление локальных устойчивых аномалий магнитного поля $\bar{B}_n$ на территории СПбГПУ.* Рассмотренные выше основы аналитического представления структуры ГМП показывают, что при отсутствии сведений о нормальном геомагнитном поле $\bar{B}_0$ построение карт (схем) аномальных полей невозможно. Поэтому уже с 1965 г. в СПбФИЗМИР РАН разрабатывалась модель математического описания магнитного поля Земли для территории бывшего СССР. На основе этой модели построены крупномасштабные карты ГМП, по которым можно определить $\bar{B}_0$ регионального масштаба, а далее, производя необходимые обследования, выявить локальные аномалии $\bar{B}_n$, анализировать их и соотносить с реальными источниками возмущения антропоферного характера.

Конкретно для рекреационной зоны СПбГПУ выполнены следующие исследования:

- По картам ГМП эпохи 1980-х годов [Почтарев, 1984, с. 32–33] найдена величина региональной осредненной по площади характеристики вертикальной компоненты индукции поля $\Delta\bar{B}_z \cong 48,0 \div 48,5$ мкТл для Северо-Западного региона России с максимальной погрешностью $\delta \approx 50$ нТл (0,1 %).

- План участка рекреационной зоны в масштабе 1:500 с постройками и пронумерованными деревьями разделен на микроучастки со стороной квадратной ячейки в 10 м, стороны квадрата ориентированы по сторонам света.

- В узлах подготовленной сетки выполнены измерения величины $\Delta\bar{B}_z$ магнитометром “НЕВА-4” (см. разд. 4.3.2).

- Данные по измерениям $\Delta\bar{B}_z$ в соответствии с плановым геодезическим обоснованием представлены на рис. 4.60, цв. После произведенной обработки этих данных в программе DeltaGraph получены результаты в виде карт-схем распределения $\Delta\bar{B}_z$ по площади парка на поверхности земли (0 м) и на уровне 0,7 м от поверхности земли (рис. 4.60). Одновременно с измерением $\Delta\bar{B}_z$ были учтены наблюдения за переменной частью $\Delta\bar{B}_0$ (по данным обсерватории ИЗМИРАН в г. Троицке, Московская обл.; 23–25.06.2003 г.), которые показывают, что вариации модуля индукции за период измерений не превышали амплитуды 80 нТл, т.е. 0,02 %, и они не представляют серьезной ошибки при определении локальных аномалий $\Delta\bar{B}_n$.

Резюмируя проведенные исследования на территории парка СПбГПУ магнитоэкологическим методом, отметим, что фоновый

уровень квазипостоянного ГМП, оцененный по величине $\Delta \bar{B}_z$, практически соответствует данным для эпохи 1980 г., а именно — 48 мкТл. Прослеживается изменение этой характеристики в зависимости от высоты измерения: 0 или 0,7 м (над поверхностью земли). Отрицательные аномалии $\Delta B_{\text{л}}$ выявлены в центральной части территории вблизи строений и несанкционированной свалки, где были обнаружены негодные для употребления радиодетали. Положительные аномалии наблюдаются в северо-восточной части парка в пределах слоя от 0 до 0,7 м, вблизи ограды территории Университета.

Можно полагать, что эти аномалии $\Delta B_{\text{л}}$ связаны с подземными источниками ЭМИ, поскольку поверхность земли экологически соответствовала требованиям СанПиН 2.1.7.1287-03 (Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы), а магнитосферные возмущения ГМП также исключаются (солнечные вспышки в период измерений не наблюдались). Модуль индукции в пределах слоя в 1 м с высотой уменьшается. Таким образом, не исключается локализация в подповерхностном слое источника ЭМИ, влияющего негативно на экологическое состояние растительности и почвы.

Для решения комплексной задачи (см. представленные три составляющих метода мониторинга рекреационной зоны СПбГПУ) была проведена обработка экспериментальных наблюдений (состояние древесных пород и структура ГМП в парковой зоне; выборки 200 и 100 деревьев). У каждого дерева было произведено 5 измерений $\Delta \bar{B}_z$ (четыре на расстоянии 1 м от ствола и одну у ствола с вычислением среднего значения); условно подразделили общее число деревьев на больные и здоровые по категории состояния $0 \leq 3 \leq 5$ (трех-бальная шкала) табл. 4.13.

Таблица 4.13

Шкала категорий состояния деревьев

Категория деревьев	Признаки состояния деревьев по породам	
	хвойные	лиственные
1	2	3
I — без признаков ослабления	Крона густая, хвоя (листва) зеленая, блестящая; прирост текущего года нормального размера для данной породы, возраста, сезона и условий место-произрастания, стволы и корневые лапы не имеют внешних признаков поражения.	

Категория деревьев	Признаки состояния деревьев по породам	
	хвойные	лиственные
1	2	3
II — ослабленные	Крона ажурная; хвоя зеленая, светло-зеленая или обожжена не более чем на 1/3; прирост уменьшен не более чем наполовину; усыхание отдельных ветвей, повреждение отдельных корневых лап, местное повреждение ствола.	Крона ажурная; листва рано опадает, прирост уменьшен до 1/2; усыхание отдельных ветвей; местные повреждения ствола и корневых лап; единичные водяные побеги.
III — сильно ослабленные	Крона весьма ажурная; хвоя бледно-зеленая или матовая либо обожжена более 1/3; прирост очень слабый; усыхание до 2/3 кроны; повреждения корневых лап или ствола, окольцовывающие их до 2/3; попытки поселения или местные поселения стволовых вредителей; плодовые тела и иные признаки деятельности дереворазрушающих грибов на стволе и корневых лапах.	Крона значительно ажурная; листва очень мелкая, светлая, рано желтеет и опадает; прирост очень слабый или отсутствует; усыхает до 2/3 кроны; повреждение ствола и корневых лап на 2/3 их окружности; сокоотечение на стволах и скелетных ветвях; попытки поселения стволовых вредителей; множественные водяные побеги; плодовые тела или иные признаки деятельности дереворазрушающих грибов на стволе.
IV — усыхающие	Крона ажурная; хвоя желтоватая или желто-зеленая, осыпается; прирост очень слабый или отсутствует; усыхание более 2/3 ветвей; повреждения ствола и корневых лап более 2/3 окружности; имеются признаки заселения стволовыми вредителями.	Усохло или усыхает более 2/3 кроны; повреждение более 2/3 окружности ствола и корневых лап; признаки заселения стволовыми вредителями; усыхающие водяные побеги.
V — свежий сухой (текущего года)	Хвоя серая, желтая или красно-бурая, частично осыпалась; частичное опадание коры; заселено или повреждено стволовыми вредителями.	Листва усохла, увяла или отсутствует; частичное опадание коры; заселено или повреждено стволовыми вредителями.
VI — старый сухой (прошлых лет)	Живая хвоя (листва) отсутствует; кора и мелкие веточки осыпались частично или полностью; летные отверстия стволовых вредителей; под корой грибница дереворазрушающих грибов.	

Таким образом, здоровые характеризовались баллом <3 , а больные ≥ 3 . Построены две тематические карты с цветовым разграничением:

— геомагнитная обстановка (рис. 4.60, а,б,в, цв.):

$40,0 \text{ мкТл} < \Delta \bar{B}_z < 48,0 \text{ мкТл}$ (ниже фонового значения);

$48,0 \text{ мкТл} < \Delta \bar{B}_z < 48,8 \text{ мкТл}$ (фон);

$48,8 \text{ мкТл} < \Delta \bar{B}_z < 51,0 \text{ мкТл}$ (выше фонового значения);

— локализация деревьев по категории состояния (рис. 4.62, цв.)

1) состояние < 3 б. (здоровые) — зеленый цвет.

2) состояние ≥ 3 б. (больные) — красный цвет.

Далее обсудим полученные результаты, опираясь на тематические карты и таблицу 4.14. В таблице 4.14 в графе “Соответствие” указано количество деревьев для каждой части парка (1–8), здоровые состояние которых соответствуют фоновому значению $\Delta \bar{B}_z$ (З-Ф) и нездоровое состояние, когда наблюдается отклонение от фонового значения $\Delta \bar{B}_z$ (Б-ΔФ). В графе “Несоответствие” указано количество деревьев для каждой части парка (1-8), где нездоровое состояние деревьев соответствует фоновому значению $\Delta \bar{B}_z$, а здоровое состояние, наоборот, соответствует отклонению от фоновых данных $\Delta \bar{B}_z$ (Б-Ф, З-ΔФ).

Таблица 4.14

Часть парка	Соответствие		Несоответствие
	З-Ф	Б- Δ Ф	Б-Ф, З- Δ Ф
5	5	15	10
4	3	11	1
8	10	15	7
2	3	1	3
1	0	0	3
3	0	0	2
6	5	7	1
итог	75		27

Из данных таблицы 4.14 видно, что адекватное состояние характерно только для 75 деревьев ($\Delta\bar{B}_z$ — фоновое) и неадекватное (не фоновое) — для 27 деревьев ($48,8 \text{ мкТл} \leq \Delta\bar{B}_z \leq 51,0 \text{ мкТл}$). Также отметим, что количество больных деревьев равно 49 и при этом магнитное поле $\Delta\bar{B}_z$ отклоняется от фонового значения $\bar{B}_z$; и количество здоровых деревьев равно 27 при отклонении $\Delta\bar{B}_z$ от фонового значения $\bar{B}_z$. Таким образом, наличие отклонения МП ($\Delta\bar{B}_z$) от фонового ($\bar{B}_z$) приводит к соотношению: больные деревья / здоровые деревья = $49/27 \approx 1,81$. Иначе, если аномалии магнитного поля не сказываются на здоровье деревьев (27 здоровых соответствует 100 %), то заболевших деревьев оказывается на 81 % больше, чем здоровых. Таким образом, аномалии МП ($\Delta\bar{B}_z$) независимо от их знака (отрицательные или положительные) обуславливают существенную заболеваемость хвойных деревьев. Существует прямая корреляционная связь между заболеваемостью и аномальным состоянием магнитного поля в парковой зоне СПбГПУ.

Электромагнитное излучение элементов сотовой телефонной связи и ответные реакции экосистем

I. Методология измерения и анализа спектра энергии излучения телефонных аппаратов сотовой связи

Современное состояние экологической безопасности населения связано с остросоциальной проблемой повсеместного внедрения бурно развивающейся отрасли электроники — сотовой телефонной связи.

Оценка неуклонного роста публикаций, анализ сообщений в Интернете и других средствах массовой информации убедили автора отказаться от попытки провести обзор литературных источников. Действительно, этим вопросом занимаются специализированные учреждения*. Тем не менее, в лаборатории “Электрофизика естественных экосистем” СПбГПУ изучалась динамика $\Delta\bar{B}_z$ различных источников излучения ЭМИ, в том числе телефонных аппаратов сотовой связи (ТА), на магнитное поле среды обитания в

* (см. конец раздела 4.3.3).

аквариумной системе рыб *Carassius Auratus* автоматизированным методом видеосъемки, который был применен для этой цели впервые.

Очевидная острая необходимость выявления физиологической роли действия НЭМИ современной аппаратуры сотовой связи на человека обязывает нас включиться в исследования по обоснованию критериев безопасности, по поиску средств нейтрализации последствий интенсивного облучения тканей головного мозга человека.

Поскольку достижения последних 3-5 лет показывают, что медицинские аспекты проблемы остаются крайне обостренными и далекими от разрешения [BioEM2009. Davos, Switzerland. Technical program, 2009, June 14–19. 58 p.], нами проведена экспериментальная работа по выявлению защитного эффекта применения технических устройств фонда развития новых медицинских технологий “АЙРЭС”.

Последовательная цель исследования:

- выявить изменение $\bar{B}_z$ в объеме пространства в ближней зоне ТА различных конструкций и модификаций;
- оценить изменчивость $\bar{B}_z$ при использовании различных режимов функционирования ТА;
- испытать матричные преобразователи-аппликаторы конструкции Фонда новых медицинских технологий “Айрэс”, предназначенные для возможного снижения уровня энергии воздействия ЭМИ на слуховые органы потребителя;
- подтвердить возможность действия современных ТА на физиологию поведения гидробионтов (аквариумные золотые рыбки *Carassius Auratus*);
- определить пороги индукции $\Delta\bar{B}_z$ при снижении влияния излучения для различных способов получения информации потребителем.

Для рашения поставленных задач предварительно обследовались электромагнитные поля ЭМП помещения и применявшейся аппаратуры сотовой связи (ТА) и оптимально размещалась установка, включавшая в себя: источники ЭМИ (ТА), аквариумы с рыбами (два опытных, один контрольный), ПЭВМ, оснащенные web-камерами, а также комплект контроля переменного МП в лаборатории. В комплект входили: преобразователь магнитной индукции ПМИ “НЕВА-5”, преобразователь квазипостоянного МП тесламетр “НЕВА-4”, преобразователь индукции переменного магнитного поля тесламетр “НЕВА-3”, измеритель напряженности переменного электрического поля “НЕВА-Эдн”. Аппаратура сконструирована и аттестована Государственным Научным Центром ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (фирма “ЭТН”. Санкт-Петербург) (см. 4.3.2, рис. 4.63 а,б, в).

Краткие технические характеристики приборов представлены в [4.3.2, рис. 4.63, цв.].

Для проведения экспериментов использовалась операционная система Windows XP на трех компьютерах следующего наполнения:

1. Intel Celeron 764 МГц, 128 Мб, HDD – 40 ГГб, , web-camera Creative,
2. Intel Celeron 1100 МГц, 128 Мб, HDD – 30 ГГб, web-camera Logitech,
3. Intel Celeron 433 МГц, 128 Мб, HDD – 4 ГГб, CDRW 40.

Микроструктура квазипостоянного ЭМИ ТА

Оценка состояния магнитного поля в аудиториях СПбГПУ

Для работы выбиралась горизонтальная сетка 0,5*0,5 м и два уровня по вертикали: на высоте 0,7 и 1,5 м от пола. Характерные примеры диаграмм распределения уровня магнитного поля B_z в помещении представлены на рисунках 4.63, а, б, цв. (опыты 2008 года).

Магнитным фоном для исследуемого помещения является величина 48 мкТл ($\pm 2,5\%$).

Значения вектора магнитной индукции изменяются в пределах:

- с включенным электропитанием 20,8–86,4 мкТл (на высоте 0,7 м) и 23,4–56,0 мкТл (на высоте 1,5 м);
- без электропитания 23,5–57,2 мкТл (на высоте 0,7 м) и 29,1–56,8 мкТл (на высоте 1,5 м).

Сопоставляя диаграммы распределения уровня магнитного поля в помещении и план этого помещения, определяли источники магнитных аномалий.

Электрическим фоном для лаборатории можно условно принять напряженность 0,005–0,01 кВ/м при отключенном и включенном электропитании. Значения вектора напряженности ЭП E_z изменяются в пределах: при отключенном электропитании 0,005 – 0,050 кВ/м (0,7 м) и 0,005–0,100 кВ/м (1,5 м); при включенном электропитании 0,005–0,200 (0,7 м) и 0,005–0,160 (1,5 м) кВ/м.

Таким образом, на основании тщательно измеренных значений B_z и E_z и, исходя из реальных возможностей помещения, были выбраны площадки (на столах) для размещения предполагаемых

биологических объектов (экосистем), действующих источников облучения (телефоны) и web-камеры регистраторов.

Оценка состояния индукции B_z в пределах рабочей зоны. Рабочая площадка разделяется сеткой с шагом 5*5 см ($S = 3600 \text{ см}^2$). В каждом узле сетки получают значение вертикальной составляющей B_z .

Квазистационарное магнитное поле B_z изменялось, как правило, в пределах 40–65 мкТл. Для Северо-Западного региона фоновое значение составляет 48 мкТл. Получив карту распределения индукции B_z в пределах экспериментальной площадки и определив зону фонового значения магнитной индукции, в этой зоне проводят дальнейшие измерения излучения интересующего нас объекта (рис. 4.65,1 и 4,65,2, цв.).

Пространственная модель микроструктуры E_z и B_z в ближней зоне телефонного аппарата сотовой связи. В пределах рабочей зоны выявляют площадку с фоновыми значениями магнитной индукции. Ее разделяют сеткой с шагом 1 * 1 см. На площадку помещают, например сотовый телефон Nokia 3110 с нейтрализатором *AIRES* и изучают структуру электрического и магнитного полей в ближней зоне сотового телефона в стационарном режиме.

Очевидно, что рассчитать пространственную структуру изменения таких полей, учитывая массу побочных источников, весьма сложно, а моделирование также даст лишь идеализированную картину. Поэтому было произведено измерение электрического и магнитного полей вблизи ТА в режиме “звонка” на реальных расстояниях от оси ориентации приборов (4.63, цв. и 4.64 цв.).

Таким образом, в квазистационарном режиме электрическое и магнитное поле изменяются возле излучателя в пределах 160 ÷ 180 мм вдоль центральной оси симметрии ТА следующим образом:

- $\Delta \bar{E}_z$ от 0,6 до 0,015 кВ/м для ТА без “защитного устройства” и от 0,2 до 0,005 кВ/м для ТА с “защитным устройством”;

- $\Delta \bar{B}_z$ от 140 до 0 мкТл.

Отличительная черта объемных структур — убедительная разница их для ТА в обычном режиме работы и для ТА с “нейтрализатором”: его наличие обуславливает двухвершинное распределение электрического и магнитного полей, причем максимальная амплитуда E_z примерно в два раза меньше, чем для ТА без нейтрализатора, хотя амплитуды по B_z весьма близки (рис. 4.66, цв. и рис. 4.67, цв.).

Структура переменной компоненты МП сотового телефона

При изучении процесса влияния ЭМИ сотового телефона на среду обитания перед нами возникла проблема электромагнитной совместимости технических средств, биологических объектов и изменчивости геофизических факторов (в частности ГМП). Выяснилась очень интересная подробность при анализе и интерпретации колебаний МП в лаборатории, которое мы регистрировали как фоновую характеристику в реальном амплитудно-временном масштабе. Тем более, это стало теперь важным, если нужны нюансы при оценке слабых воздействий.

На рис. 4.67 представлены реализации колебаний МП в лаборатории, характеризующие помехи, обусловленные работой ТА. Телефонные аппараты помещали возле магнитометрического датчика и точно отмечали время воздействия ЭМИ в режиме “ожидания” или в режиме “звонка”. Применяли попеременно аппараты без “защитного устройства” и с “устройством” в течение 400 с.

В режиме “звонка” ЭМИ ТА без “устройства” индуцирует нарастающий сигнал, который в итоге смещает средний условный фоновый уровень магнитных колебаний (см. рис. 4.67, режим 2, участок Б) почти в 6 раз в направлении “+”, при этом амплитуда колебаний также возрастает примерно в два раза. Самым неприятным здесь оказывается последующее состояние датчика МП, у которого отключается автокомпенсация постоянной составляющей компоненты $\bar{B}_z$, и условный фоновый уровень становится новым. При автоматической компьютерной регистрации МП это может привести к появлению неконтролируемых ошибок.

При использовании ТА с “защитным устройством” картина вполне удовлетворительная: соответствующий участок “звонка” (рис. 4.68, режим 3, участок Б) выделяется также ростом амплитуды колебаний примерно в 1,5–2 раза, но условный фоновый уровень не смещается, и автокомпенсация датчика не нарушается. Таким образом, достигается гармонизация в электромагнитной совместимости между аппаратурой и естественным фоном среды обитания. Мы полагаем, что это является определенным достижением защитного устройства “АЙРЭС”. Нужны глубокие экспериментальные проработки и статистические данные для получения окончательных рекомендаций и оценок.

В период функционирования ТА спектральная структура ЭМП возле прибора изменяется. Поэтому была проведена специальная работа по регистрации флуктуаций ΔB_z в трех режимах:

- режим “ожидания”;
- режим “звонка”;
- режим “разговора”.

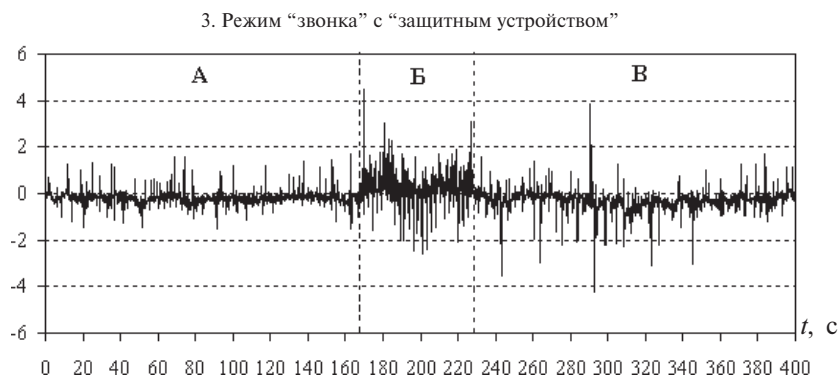
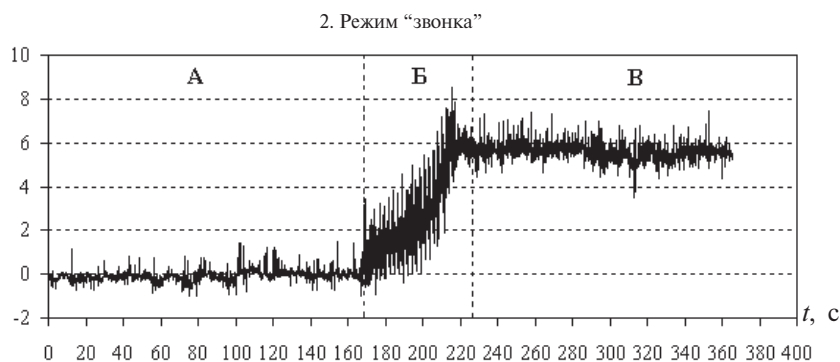


Рис. 4.68. Изменение вертикальной составляющей переменного магнитного поля около сотового телефона в режиме ожидания (1), звонка (2) и звонка с защитным устройством (3)

Спектральная характеристика ЭМИ сотового ТА. Преобразователь магнитной индукции “Нева-5” регистрирует флуктуационную часть ΔB_z при компенсации постоянного геомагнитного поля ГМП, и частотный спектр ЭМИ заведомо не известен. Таким образом, если регистрация идет в широком спектре частот, причем наша методика допускает разрешение 0,001 с, результирующий эффект будет зависеть именно от этого, и диапазон анализируемого излучения будет в пределах $0 \div 500$ Гц. Таким образом, при излучении в диапазоне 900/1800 МГц мы заведомо фильтруем высокочастотную часть спектра и получаем оценочные результаты.

Измерения проводились в четырех режимах функционирования сотового телефона (ожидание, звонок, разговор и прием текстового сообщения).

Чтобы получить объективную информацию и исключить ошибки, измерения проводились пять дней для двух телефонов по три раза, и каждое измерение длилось по 4 мин (телефонный аппарат находился 1 мин в режиме ожидания, 1 мин шел звонок, 1 мин длился разговор и снова шла 1 мин ожидания). Прием текстовых сообщений проводился с начала второй минуты эксперимента. Измерения проводились на нулевом расстоянии от ПМИ “Нева-5”.

Для каждого измерения была построена трехмерная спектрограмма $G(f,t)$:

f — частота флуктуаций ΔB_z , регистрируемая ПМИ “Нева-5” и t — время, в течение которого длился процесс ЭМИ от источника; $G(f,t)$ — функция спектральной плотности энергии магнитного поля.

Затем эти спектры усреднили и построили общую спектрограмму.

Обработка реализаций проводилась с помощью пакетов анализа Microsoft Excel. Каждая запись разбивалась на одинаковые временные отрезки для вычисления спектров на основе метода быстрого преобразования Фурье. Полученные спектры собирали вместе, и для этого массива производилось построение временных спектрограмм.

На рис. 4.69, а, б, в, цв.:

по горизонтали (ось x) откладывалось время $t(0-240$ с), $t(0-120$ с);

по вертикали (ось y) откладывалась частота $f(0-500$ Гц);

по ортогонали к плоскости чертежа в виде градаций цвета откладывалась функция спектральной плотности $G(f,t)$.

Результаты измерений представлены на спектрограммах флуктуаций плотности энергии магнитного поля (рис. 4.69 цв., а, б, в) для разных ТА и в режиме приема сообщений.

На рис. 4.70 (а,б,в) представлены спектральные функции флуктуирующего магнитного поля, излучаемого аппаратами сотовой

связи в течение 0 – 2600 с для различных режимов работы. Как видно, в зависимости от режима (ожидание или прием текстового сообщения) минимум спектра смещается в более высокочастотную область излучения.

Кроме того, представлены спектрограммы плотности энергии $\bar{B}_z$ в иных условиях измерения и для других ТА (рис. 4.71, цв.) с учетом защитных устройств Фонда “Айрэс”.

Известно, что тонкие измерения, которые проводились нами на протяжении многих лет, могут быть связаны с погрешностями. Поэтому весьма необходима достоверность, обусловленная геомагнитной обстановкой в Северо-Западном регионе.

С этой целью выбираются особые дни, когда космическая погода благоприятна. В частности, измерения в 2008 году проводились в течение пяти дней: 01.10.08, 03.10.08, 06.10.08, 09.10.08, 13.10.08 (Рис. 4.72). В эти дни геомагнитная обстановка была в Северо-Западном регионе спокойной (только 3.10.08 наблюдались геомагнитные возмущения). При этом по данным ИЗМИРАН (Институт земного магнетизма и распространения радиоволн Российской Академии Наук), пятнообразовательная активность Солнца прошедшего периода была на очень низком уровне. Вспышечная активность была на очень низком уровне весь период. В остальные дни геомагнитная обстановка была спокойной и слабо возмущенной. [www.izmiran.ru].

UT дни	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	ΣK
1	1	2	3	3	3	3	3	3	21
2	2	2	3	4	4	4	4	2	25
3	3	2	3	3	4	4	4	4	27
4	2	3	3	3	3	2	2	2	20
5	1	2	2	2	2	2	2	2	15
6	1	3	3	2	2	2	1	1	15
7	0	1	1	2	2	3	2	1	12
8	1	0	0	0	0	0	0	0	1
9	0	0	1	1	2	1	1	0	6
10	0	0	1	2	2	2	2	2	11
11	2	1	4	3	5	6	4	3	28
12	4	3	2	3	3	4	3	3	25
13	3	3	3	3	3	2	3	2	22
14	1	1	3	3	2	2	2	1	15
15	2	2	3	3	3	2	3	2	20

Рис. 4.72. Значения К-индексов (трехчасовая характеристика цифрового вида геомагнитной обстановки СЗ региона, данные ИЗМАРАН с 1.10.08 по 15.10.08)

Нужно отметить, что испытывались различные типы “защитных устройств”, и впоследствии разработчики смогли отказаться от ряда неэффективных образцов.

Полученные спектрограммы флуктуаций $\Delta \bar{B}_z$ обуславливают необходимость еще раз подчеркнуть сложность решаемой задачи и вероятность неоднозначности интерпретации результатов. Налицо локальные изменения индукции геомагнитного поля $\Delta \bar{B}_z$ под воздействием высокочастотного электромагнитного излучения телефонных аппаратов сотовой связи (900/1800 МГц).

При наличии прибора ПМИ “НЕВА-5” с ферромагнитным зондом имеется возможность изучать только динамику квазипостоянной компоненты как функцию переменной величины геомагнитного поля $\Delta \bar{B}_z$ при скомпенсированном региональном уровне вертикального вектора индукции $\Delta \bar{B}_z$. Частота таких колебаний лежит в пределах $5 \div 10$ Гц. Важно отметить, что в период измерений неоднократно действие ЭМИ источника нарушало установленную компенсацию постоянной компоненты геомагнитного поля $\Delta \bar{B}_z$, и приходилось подстраивать прибор заново.

Мы установили (2007–2008 гг), что кроме основного несущего сигнала (900/1800 МГц) телефонный аппарат в режимах звонка и разговора генерирует переменное электрическое поле в диапазоне 5–2000 Гц и переменное магнитное поле в диапазоне 5–500 Гц. Эти поля фиксировались нашими приборами в ближней зоне над поверхностью корпуса ТА (0–30 мм) и имеют сложное распределение в пространстве и по корпусу аппарата (рис. 4.72, цв.).

Человеческий организм, и мозг в том числе, представляют собой коллоидную систему, в которой генерируется спектр ЭМ колебаний, еще не изученный окончательно. Телефон сотовой связи вблизи головы и уха (несколько мм) возбуждает низкочастотные электроакустические поля непосредственно в тканях мозга. В соответствии с фундаментальными принципами электроакустических и электромеханических аналогий, указанные НЧ ЭМП преобразуются в НЧ звуковые колебания, которые по экспериментальным исследованиям Роберта Уильямса Вуда (иностр. почетный член АН СССР, 1930), весьма негативно действуют на психику человека [380, С. 865–866; 95, С. 233].

Известно, что колебания инфранизкочастотных компонент геомагнитного поля $\Delta \bar{B}_x$, $\Delta \bar{B}_y$ и $\Delta \bar{B}_z$ в пределах примерно $0,01 \div 10$ Гц обладают высокой биоактивностью (магнитные возмущения вызывают критические состояния в ЦНС и периферической НС человека, гипертонические кризы и т.д.). При возникновении эффекта

резонанса в результате дополнительного действия источника ЭМИ патологические явления в ЦНС могут усиливаться (электрокинетические процессы в проводящих структурах, крови, лимфе и т.д.). Поэтому зарегистрированные флуктуации $\Delta \bar{B}_z$, интерпретируемые нами как результат модуляции естественного поля электромагнитным излучением сотовых ТА и применявшимися специальными матричными “защитными устройствами”, косвенно выявляют частотные окна (зоны) и энергию спектра флуктуаций $\Delta \bar{B}_z$. Характеризуется, таким образом, роль источника как биологического (экологического) агента, оценить которую можно лишь в специальных медико-биологических опытах на добровольцах.

Кроме рассмотренных результатов, связанных с искусственным ЭМИ, следует акцентировать внимание на естественное эволюционное поведение ГМП, аппроксимированное поведением гидромагнитного динамо.

Аппроксимация геомагнитного поля плоским геоцентрическим диполем была постулирована К.Гауссом, но современное представление о происхождении ГМП и его свойствах, изменяющихся на протяжении миллиардов лет, обосновано сравнительно недавно, оно базируется на постулировании эффекта самовозбуждения магнитных полей вследствие движения проводящей жидкости или газовой плазмы — динамо-эффекта [380, С. 161].

Динамо-эффект для Земли как космического тела обусловлен несовпадением оси вращения Земли и ее магнитной оси, и его связывают с конвективным движением проводящего вещества ее жидкого ядра и со всплыванием в этой среде более легких примесей под действием архимедовой силы. Конвективные движения приподнимают силовые линии тороидального поля и при определенных условиях они могут образовывать петли, которые потом сливаются с полоидальным полем и усиливают его.

Теория динамо-эффекта приводит также к возможности самообращения магнитной оси (переполюсовке магнитного поля Земли) и долгопериодическим колебаниям ГМП (вековым вариациям), что отражает реальные свойства земного магнитного поля.

Наше мнение заостряет внимание специалистов на том, что биообъекты, адаптированные в течение миллиардов лет к таким свойствам ГМП, в современных условиях попадают в поле воздействия ЭМИ высоких частот и теряют естественные физиологические свойства как целостных организмов, так и его частей. Этим вполне объяснима угнетающая роль ЭМИ ТА при экспериментах [BioEM2009. Davos, Switzerland. Technical program, 2009 June 14–19, 58 p.].

II. Водные экосистемы как тест-объект для оценки воздействия ЭМИ сотовой телефонной связи в сети МТС

На основании вышеизложенной методики исследования эксперименты проводились на трех компьютерах (операционная система Windows XP).

Intel Celeron 764 МГц, 128 Mb, HDD-40 Гб, web-camera Creative

Intel Celeron 1100 МГц, 128 Mb, HDD - 30 Гб, web-camera Logitech

Первые два компьютера оснащены web-камерами для съемки поведения рыб в аквариумах. Камеры управлялись с помощью программного пакета Image Studio 7.2, который производил считывание информации с камер, вывод на экран и сохранение полученных файлов в формате AVI. Третий компьютер использовался как сервер, был объединен в сеть с остальными и производил запись на CD диски для последующей обработки (рис. 4.73, цв.).

Аквасистемы. Исследовалась физиология поведения популяции золотой рыбки *Carassius Auratus japonicus flabellicaudatus*, Slutsky, 1985. Популяция создана в 1970 году на основе близкородственного скрещивания организмов, имеющих общих предков (жесткий инбридинг). Генетически чистый материал поддерживается в настоящее время в государственном НИИ охраны рыбного хозяйства (рис. 4.74, цв.).

Рыб размещали в трех аквариумах емкостью 30 л по 20 особей в каждом. Два аквариума из них применили непосредственно в опытах: на первый аквариум действовал сотовый телефон с нейтрализатором, а на второй — сотовый телефон без нейтрализатора. Третий аквариум использовался в качестве контрольного. Все аквариумы были оснащены фильтрами для очистки воды, аэраторами и термодатчиками. Проводился контроль состояния воды с помощью рН-метра. Регистрация двигательной активности *in vivo* (ДА) рыб осуществлялась с помощью web-камер Logitech и Creative. Видеосъемка требует специальных условий освещения, защиты поля зрения камер от побочных источников помех, обеспечения защиты животных от дополнительных и нежелательных источников раздражения (освещения, шума) и сохранения покоя при достаточном снабжении кислородом. Необходим комфортный режим для работы телефонных аппаратов, компьютеров и т. д. Структура метода регистрации ДА рыб показана на рис. 4.75.

Методика должна обеспечить объективную автоматизированную оценку ДА для заданных периодов времени и предполагает минимальное участие человека на всех этапах получения и обработки данных.

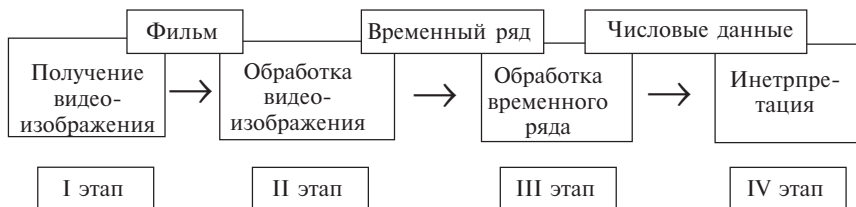


Рис. 4.75. Структура метода обработки видеосъемки

На схеме (рис. 4.75) расшифрована структура метода регистрации активности рыб:

На I этапе получен файл видеоданных (фильм, хранящийся на жестком диске ПК).

На II этапе после математической обработки фильма получают первичную кривую ДА рыб, т. е. временной ряд чисел, характеризующий интенсивность движения рыб в каждый момент времени.

На III этапе после математической обработки первичной кривой ДА для выявления различных характеристик активности получают статистический материал — спектр плотности энергии активности для характерных биоритмов, статистические оценки, корреляционные функции и т. д.

На IV этапе формируются оценки, дающие представление о том, насколько измеренные характеристики ДА для определенного промежутка времени (биоритма) отклоняются от нормы поведения, т. е. имеется (или нет) аномальность в активности, исходя из опыта многолетних наблюдений и статистических данных.

Особо следует остановиться на характеристике подсистемы “обработка видеоизображения” (II этап). Она представляет собой набор программ с использованием стандартной библиотеки функций обработки изображений. Исходным для данного комплекса программ является фильм в формате AVI; результат работы — первичная кривая ДА и статистическая диаграмма расположения рыб (рис. 4.76, цв.).

Эта диаграмма представляет собой поверхность на трехмерном графике, где координатная плоскость XY соответствует плоскости изображения, а координата Z каждой точки поверхности равна числу кадров, на которых точка с координатами (x, y) была белой. Т.е. чем выше лежит точка над плоскостью XY , тем дольше рыба находилась в этой области кадра за исследуемый промежуток времени.

Основные этапы математической обработки фильма показаны на рис. 4.77, 4.78.

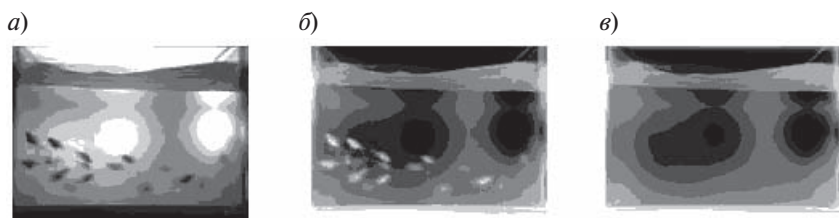


Рис. 4.77. Примеры кадров на разных этапах обработки фильма:
а — исходный фильм; *б* — после инвертирования усредненный кадр;
в — усредненный кадр

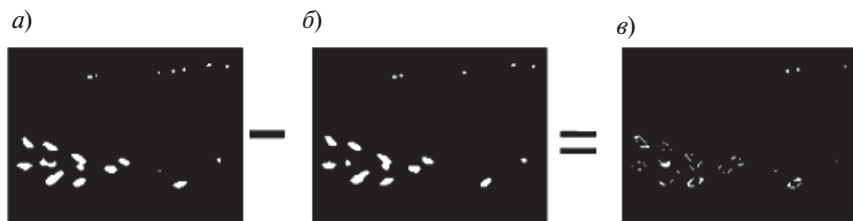


Рис. 4.78. Получение разности кадров для оценки интенсивности движения:
а и *б* — два последовательных кадра после пороговой обработки и фильтрации;
в — разность кадров

Таким образом, последовательность операций, выполненных для каждого кадра исходного фильма, дает зависимость числа белых точек на картинках за счет вычитания двух последовательных кадров, образуя первичную кривую ДА рыб.

Опыт обработки изображения по изложенному алгоритму показал трудоемкость расчетов и их длительность. Поэтому необходимо совершенствование и оптимизация программ.

Далее рассмотрим реальные примеры визуализации результатов видеосъемки в период облучения экосистем ЭМИ сотовой связи.

Спектральная оценка двигательной активности рыб при кратковременном воздействии (08.01.2003г.). Для предварительной оценки результатов измерений и наблюдений за поведением рыб в течение кратковременного воздействия излучения сотовых телефонов (от 1 мин до 1 ч) выделены три блока графических материалов:

- спектральная плотность энергии двигательной активности (ДА) за периоды: 08.01.2003 в течение 16.46–17.40 и 09.01.2003 и в течение 17.50–19.30;

- диаграммы группового перемещения рыб в объеме аквариума в поле зрения web-камеры за период 08.01.2003 в течение 16.46–17.40;

- усредненная спектральная плотность энергии ДА рыб за период 11.01.2003 в течение 10.30–13.30 (рис. 4.76).

Проведены кратковременные циклы облучения рыб в различных режимах функционирования ТА по 3 мин (статистика более ста опытов), длительное облучение от 1 ч до 1 сут (статистика 14 опытов), проведены спектральный и фрактальный анализы пульсаций ДА, получены оценочные данные по результатам съемки (*Hurst-exponent*, *Fractal Brownian motion coefficient*, *Spectral dimension*), статистические диаграммы плотности распределения рыб по аквариуму, выявлены спектральные энергетические зоны в распределении $G(f) \sim f^n$, характеризующие поведение рыб.

Обнаружили различие в действии ЭМИ ТА в диапазоне 900/1800 МГц для двух принципиально разных условий жизнедеятельности животных:

- угнетающая роль излучения при обычных условиях функционирования ТА;

- защитная функция нейтрализаторов Фонда “Айрэс”, проявившаяся в сохранении ДА при кратковременном экспонировании.

На (рис. 4.79, цв.) представлены данные по фоновому состоянию активности рыб для двух типов аквариумов, а также для режима ожидания (рис. 4.79, цв.).

При звонке по телефонам существенной разницы в активности не отметили, но в режиме “разговора” разница была существенной (рис. 4.80, а, цв.) для тех же аквариумов: наблюдается расслоение группы и погружение части популяции на дно (угнетение активности).

Как показывают диаграммы на рис. 4.80, б, в, цв., животные после воздействия ЭМИ даже после отдыха без аэратора и с аэратором, не возвращаются в прежнее состояние, и активность их долгое время угнетена.

Таким образом на кафедре “Гражданское строительство и прикладная экология” в течение длительного времени создавалась новая методика регистрации двигательной активности рыб путем анализа видеоизображений.

Проведено много испытаний и получены обнадеживающие результаты, которые показывают, что такой подход может быть использован не только к водным экосистемам. Насекомые, сухопутные животные, даже растения, могут быть взяты в качестве экспериментального материала для изучения различных видов ЭМИ и их воздействие на отдельные экосистемы с различными вариантами содержания, питания, размножения и т. д. Поэтому целесообразно такую методику развивать, оптимизируя программы вычислений и повышая достоверность результатов при снижении материальных затрат*.

Кроме рассмотренных результатов действия ЭМИ высокой частоты следует обратить внимание и на эволюционный аспект проблемы взаимодействия биообъектов с геомагнитным полем. [см. раздел выше, I].

Основные результаты экспериментальной оценки ЭМИ сотовых телефонов

Автор считает, что выполненная работа — новая, поисковая и преследует цели развития современных методов оценки физиологии поведения и ответных реакций водных организмов, особенно в условиях плохо изученного влияния ЭМИ различных частотных диапазонов, которые приближенно могли быть использованы в неврологии.

Положено начало созданию новой экспериментальной методики исследования физиологии поведения водных организмов в условиях действия контролируемых антропоферных факторов. На примере действия ЭМИ сотовых телефонов с учетом динамики ГМП и ЭМП в лаборатории разработаны приемы по индикации нежелательных помех и их снижению. Разработан простейший вариант регистрации поведенческих реакций организмов с помощью видеонаблюдения и последующей компьютерной оценки результатов на основе новой методики обработки и анализа сигналов.

*Автор выражает признательность коллегам, студентам, инженерам, внесшим большой вклад в полученные результаты: И.А. Цикину, В.М. Данилову, И.Н. Серову, Д.А. Уставникову, А.Я. Сергееву Ю.М. Балагуле, Е.А. Кичигину, М.А. Тришину, Э.А. Ярошевичу, Т.В. Акинчиц, В.А. Тартыжеву, О.Е.Богодист, В.А. Ефремову, Н.В. Коровкину, В.А. Сороцкому, Д.И. Иванову, Л.А. Поповой.

Изучена структура ЭМП современного сотового телефонного аппарата в статике и динамике с учетом применения “защитного устройства Фонда АЙРЭС”. Показана эффективность использования данного устройства для снижения интенсивности ЭМП ТА в режиме активного излучения (режим “звонка” и режим “разговора”). Тем не менее, автор считает, что результаты предварительны и требуют серьезной проверки.

Проведена оценка электромагнитной совместимости работающего сотового ТА с ЭМ фоном среды обитания. Показана интенсивность искажения естественного ЭМ фона при включении и работе ТА. Отмечен положительный эффект по снижению ЭМИ в условиях применения “защитного устройства Фонда АЙРЭС”.

Установлено, что кроме основного несущего сигнала на частотах 900/1800 МГц мобильный телефон в режимах “звонок” и “разговор” генерирует переменное электрическое поле в диапазоне $5 \div 2000$ Гц и переменное магнитное поле в диапазоне $5 \div 500$ Гц. Эти поля фиксируются аппаратными методами в ближней зоне непосредственно над поверхностью корпуса мобильного телефона на расстоянии нескольких мм (в диапазоне от 0 до 30 мм) и имеют сложное распределение в пространстве по корпусу телефона.

Показано, что биоритмы головного мозга человека $0,3 \div 0,4$ Гц (Δ -ритм), 4–8 Гц (θ -ритм), $8 \div 13$ Гц (α -ритм), $13 \div 25$ Гц (β -ритм) и $35 \div 50$ Гц (γ -ритм) лежат в той же низкочастотной области излучения магнитной компоненты ΔB_z , индуцируемой ТА, и отсутствие корреляции между биологическими и техногенными ритмами может провоцировать патологические явления в ЦНС [<http://www.aires.ru>].

Работа может рассматриваться как стартовая для перспективы выделения конкретных частотных окон (зон) в спектре ЭМИ, кратных биоритмам головного мозга человека, которые могут быть опасны для жизнедеятельности.

Резюме

Раздел 4.3.2 целесообразно завершить определенным организующим замечанием, в котором дается перечень учреждений, фиксирующих тщательно новые публикации и нормативные документы по развитию новых технологий в сфере сотовой телефонной и радиосвязи:

Российский национальный комитет по защите от неионизирующего излучения, Москва.

НИИ медицины труда РАМН, Москва.

Всемирная Организация Здравоохранения (*WHO*).

ICNIRP.

CENELEC ENV, ЕС.

IEEE std, USA.

ARIB STD, Japan.

Рассмотрение проблемы, изложенной в разделе 4.3.2, было бы неполным и неполноценным, если не коснуться измерительных средств и самых последних методов оценки изменчивости пространственно-временной структуры электромагнитного поля, обусловленного самыми различными техногенными источниками. В табл. 4.15–4.22 предлагается обзорный материал по таким средствам (приборам) [Аполлонский и др., 2002, с. 24–36]*.

Таблица 4.15

Измерители напряженности постоянного электрического поля

Тип прибора	Пределы измерений потенциала, кВ	Пределы измерений напряженности, кВ/м
ИЭСП-01	0,1÷19,9	1÷180
ИЭСП-6	0,1÷10,0	0,1÷20
СТ-01	0,1÷15	0,3÷180
ИЭЗ-1	0÷50	
ПК2-3А	0÷50	
ИЭСП-1		0,2÷2500
ИЭСП-7		2÷200
ИЭЗ-П		4÷500
ИЭЗП-П		20÷1000
ИНЭП-1		0,2÷2500
ИНЭП-20Д		0,2÷2500
ПЗ-27		0,3÷180
ЭСПИ-301В		0,3÷180; 1,5÷200
ЕМ-1*		5÷50

*Прибор фирмы Mundingek, Германия.

*Смотрите также новейшие разработки ассоциации NARDA, в библиогр. списке, с. 707 наст. издания

Таблица 4.16

Измерители напряженности переменного электрического поля

Тип прибора	Пределы измерений, В/м	Частотный диапазон, кГц
ИЭП-04	10 ÷ 1000 1,0 ÷ 100	0,005 ÷ 2 2,0 ÷ 400
ИЭП-05	10,0 ÷ 200 1,0 ÷ 20	0,005 ÷ 2 2,0 ÷ 400
ПЗ-25	50,0 ÷ 12000 150,0 ÷ 30000	0,02 ÷ 20
ПЗ-26	50 ÷ 12000	0,02 ÷ 20
ПЗ-1М	20,0 ÷ 100000	0,05
ПЗ-50А	10,0 ÷ 180000	0,05
ЕММ-4	0,06 ÷ 2000	0,005 ÷ 2 2,0 ÷ 400

Таблица 4.17

**Измерители напряженности переменных электрических ($\vec{E}$)
и магнитных ($\vec{H}$) полей**

Тип прибора	Частотный диапазон, МГц	Пределы измерений $\vec{E}$, В/м	Частотный диапазон, МГц	Пределы измерений $\vec{H}$
ПЗ-15 ПЗ-17	0,1 ÷ 300	1,0 ÷ 3000	0,01 ÷ 30	0,5-500 А/м
ПЗ-16	0,1 ÷ 300	1,0 ÷ 1000	0,01 ÷ 30	0,5 ÷ 16 А/м
ПЗ-21	0,01 ÷ 300	1,0 ÷ 1000	0,01 ÷ 30	0,5 ÷ 16 А/м
ПЗ-22	0,01 ÷ 300	1,0 ÷ 3000	0,01 ÷ 30	0,5 ÷ 500 А/м
ПЗ-28	0,000005-0,4	1,0 ÷ 100	0,000005-0,4	0,01 ÷ 5,0 А/м (12,57 ÷ 6285 нТл) 0,01 ÷ 0,8 А/м (12,57 ÷ 1005,6 нТл)
ПЗ-50В	0,00005	10 ÷ 180000	0,000005	0,01 ÷ 1800 А/м
ЭЛОН (NFM-1)	0,06 ÷ 300 0,00005	2 ÷ 1500 2000 ÷ 40000	0,06 ÷ 10	1,0 ÷ 10 А/м
ИМП-101(М)	0,03 ÷ 1200 2400 ÷ 2500	1,0 ÷ 500	0,03 ÷ 50	0,1 ÷ 50 А/м
В&Е АТ-002	0,000005 ÷ 0,002 0,002 ÷ 0,4	8,0 ÷ 100 0,8 ÷ 10	0,000005 ÷ 0,002 0,002 ÷ 0,4	0,08 ÷ 1,0 мкТл 0,008 ÷ 0,1 мкТл
ЕФА-3	0,000005 ÷ 0,03	0,5 ÷ 100000	0,000005 ÷ 0,003	0,005 ÷ 10,0 мТл
ИНМП-50	—	—	0,00005	0,0 ÷ 10000 А/м

**Измерители напряженности переменных электрических ($\bar{E}$) и
магнитных ($\bar{H}$) полей и плотности потока энергии ($\bar{S}$)**

Тип прибора	Частотный диапазон, МГц	Пределы измерений $\bar{E}$, В/м	Частотный диапазон, МГц	Пределы измерений $\bar{H}$, А/м	Частотный диапазон, МГц	Пределы измерений $\bar{S}$, мкВт/м ²
Поле-3	0,01 ÷ 300	1,0 ÷ 1000	0,001 ÷ 30	0,5 ÷ 16	300 ÷ 178000	10,0 ÷ 10000
ИМП-101(М)	0,03 ÷ 200	1,0 ÷ 500	0,03 ÷ 50	0,1 ÷ 50	2400 ÷ 2500	—
EMR 20/30	0,1 ÷ 3000	0,8 ÷ 800	—	—	0,1 ÷ 3000	0,17 ÷ 70000
EMR 200/300	0,1 ÷ 8000	1,0 ÷ 1000	0,003 ÷ 1000	0,03 ÷ 250	0,1 ÷ 18000	0,27 ÷ 65000

Таблица 4.19

Измерители индукции постоянного магнитного поля

Тип прибора	Пределы измерений, мТл
Ш1-8	10 ÷ 1600; 0,01 ÷ 1,6
Ф4354/1	150 ÷ 1500
Ф4355	5 ÷ 1500
ЕТМ-1	0,1 ÷ 2000
МПМ-2	0,01 ÷ 199,9

Таблица 4.20

Измерители индукции переменного магнитного поля $\Delta \bar{B}$

Тип прибора	Частотный диапазон, кГц	Пределы измерений $\Delta \bar{B}$, мТл
ИМП-04	0,005 ÷ 2,0 2 ÷ 400	0,2 ÷ 50 0,01 ÷ 1,0
ИМП-05	0,005 ÷ 2,0 2,0 ÷ 400	0,1 ÷ 2,0 0,01 ÷ 0,2
ИМП-50	0,05	0,0001 ÷ 10
ТП2-2У	0,02 ÷ 10	0,01 ÷ 1999
МПМ-4	0,04 ÷ 0,2	0,01 ÷ 199,9
Г-79	0,02 ÷ 20	0,0001 ÷ 1,0
ВММ-3	0,005 ÷ 2,0	0,0 ÷ 2,0
ВММ-5	2,0 ÷ 400	0,0 ÷ 0,002
ЕФА-1	0,005 ÷ 30	0,0005 ÷ 10
НЕВА-4	0,02 ÷ 0,2	0,005 ÷ 0,1

Измерители плотности потока энергии ($\bar{S}$)

Тип прибора	Частотный диапазон, ГГц	Пределы измерений $\bar{S}$, мкВт/см ²
ПЗ-18	0,3 ÷ 39,65	0,32 ÷ 10; 3,2 ÷ 10
ПЗ-19	0,3 ÷ 39,65	0,32 ÷ 10
ПЗ-20		20,0 ÷ 100
ПЗ-23	37,6 ÷ 118,1	0,9 ÷ 3200
ПЗ-24	37,5 ÷ 178,4	10,0 ÷ 30000
ПЗ-18А	0,3 ÷ 39,65	0,9 ÷ 10; 3200 ÷ 10000
ПЗ-19А	0,3 ÷ 39,65	6,0 ÷ 66,6; 20000 ÷ 100000

Неионизирующие электромагнитные поля и излучения

№	Наименование	Измеряемый параметр	Измеряемый диапазон частот (длин волн)	Пределы измерений	Погрешность, %	Поставщик/производитель
2.2	Измеритель напряженности электростатического поля ИЭСП-7	Напряженность электростатического поля (ЭСП)	Электростатическое поле	±(2 ÷ 200 кВ/м)	± 10	125565. Москва. А/Я-7, НПЦ «ЭМС»
2.4	Тесламетр Ф-4354/1	Магнитная индукция	Постоянное магнитное поле	150 ÷ 1500 мТл	± 2,5	262003. г. Житомир, ул. Котовского.3, ПО «Электроизмеритель»
2.7	Измеритель напряженности электрического поля ИНЭП-50	Напряженность ЭП .	50 Гц	0,5 ÷ 50 кВ/м	10	Опыт. пр-во. СибНИИЭ. г. Новосибирск
2.17	Комплект приборов для контроля излучений от ПЭВМ и ВДТ	Напряженность ЭП . Магнитная индукция. Электростатический потенциал	ЭП : 5 Гц ÷ 2 кГц 2 ÷ 400 кГц МП : 5 Гц ÷ 2 кГц 2 ÷ 400 кГц	1 ÷ 200 В/м 10 ÷ 2000 нТл 0,05 ÷ 20 кВ	± 10 ± 10 ± 20	ГНПП «Циклон-тест», г. Фрязино Моск.. обл.

№	Наименование	Измеряемый параметр	Измеряемый диапазон частот (длин волн)	Пределы измерений	Погрешность, %	Поставщик/производитель
2.19	Комплект приборов для измерения электромагнитных излучений от ВДТ (ЕММ-4, ВММ-3, ВММ-5)	Напряженность ЭП. Магнитная индукция. Электростатический потенциал	ЭП: 5 Гц ÷ 2 кГц 2 кГц ÷ 400 кГц; МП: 5 Гц ÷ 2 кГц, 2 кГц ÷ 400 кГц	0,06-2000В/м 40 нТл ÷ 2 мТл	±5	Швеция, пост.: 127490, Москва, ул. Пестеля. 8. к. 282 «Октава+»
2.25	Измерители низкочастотных электрических и магнитных полей типа ЕФА	Напряженность ЭП. Магнитная индукция	ЭП, МП: 5 Гц ÷ 30 кГц	ЭП: 0,1 В/м- 100 кВ/м МП: 5 нТл ÷ 10 мТл	±(3-5)	«Wandel&Goltermann». Германия
2.26	Измерители высокочастотных электрических и магнитных полей типа EMR	Напряженность ЭП. Напряженность МП. Плотность потока энергии	ЭП: 100 кГц ÷ 3 ГГц МП: 1 МГц ÷ 30 МГц	ЭП: 1-1000 В/м МП: 0,015-15 В/м; ЭМИ: 0,0025 ÷ 2,5 кВт/м ²	±1 дБ	«Wandel&Goltermann». Германия
2.29	Аргус-03	Облученность	0,25 ÷ 10 мкм	1 ÷ 2000Вт/м ²	±6 %	Москва, ВНИИ-ОФИ

Существуют и другие официальные нормативные документы, которыми целесообразно пользоваться при выборе и приобретении приборов для контроля электромагнитного состояния среды обитания и оценки доз излучения от технических устройств, в частности: “Перечень приборов для экспертизы условий труда”. Руководство Р 2.2.755-99; Охрана труда: организация и управление: Учебное пособие / Под. ред. О.Н. Русака. СПб.: Профессия, 2002. 240 с. Приводим выдержку из данного Руководства (см. табл. 4.20).

Таким образом, можно констатировать, что в течение незначительного по продолжительности времени, как в Российской Федерации, так и за рубежом были созданы новейшие средства измерения характеристик неионизирующего электромагнитного излучения, что вселяет надежду на глубокое изучение последствий воздействий этого излучения на биосферу в целом и на усиление экологической защиты человека.

4.3.3. Нравственно-правовая проблема антропосферы: повсеместное внедрение неионизирующего электромагнитного излучения в биоценозы*

Эти строки пишутся спустя ровно 25 лет после того, как и помышлять-то о правовых проблемах НЭМИ было невозможно. Мои коллеги по Институту озераведения АН СССР подвергали насмешкам любое стремление убедить общественность учреждения уделить серьезное внимание экологической опасности, обусловленной электромагнитным загрязнением среды обитания. Это напоминало “охоту на ведьм” в средневековье или гонения на генетику и кибернетику в 50–60 годы XX века. Все это в прошлом. В настоящее время приходится констатировать остроту противоречий между пользой, удобством, мощным прыжком в будущее цивилизации и — противоестественностью, обусловленной слабостью современной науки, которая бессильно топчется на месте, борясь с засильем промышленных корпораций, выбрасывающих на рынок миллионы изделий высокотехнологичной, но и весьма опасной для здоровья продукции электроники и электротехники. В этом отношении Россия стоит на передовых позициях, разрабатывая современную нормативную и правовую базу для обеспечения в будущем здоровья и воспроизводимости человеческой популяции.

Критерии гигиенического нормирования

В качестве основного критерия нормирования воздействия ЭМП в Российской Федерации принято положение, в соответствии с которым безопасным для человека считается ЭМП такой интенсивности, которая не приводит даже к временному нарушению гомеостаза

*Биоценоз: сообщество живых организмов в пределах экосистемы [Энциклопедический словарь: Безопасность деятельности. СПб.: ЛИК, 2003. С. 50]. Подробнее см.: Н.Ф. Реймерс “Популярный биологический словарь”. М.: Наука, 1991. С. 74–76.

(включая репродуктивную функцию), а также к напряжению защитных и адаптационно-компенсаторных механизмов ни в ближайшем, ни в отдаленном периоде времени.

Виды условий воздействия ЭМП

В нормативно-методических документах по электромагнитной безопасности, действующих на территории Российской Федерации, различаются два основных вида условий воздействия ЭМП: условия профессионального и непрофессионального воздействия.

Лица, трудовая деятельность которых прямым образом связана с эксплуатацией, ремонтом и настройкой источников ЭМП, работают в условиях профессионального воздействия. На всех остальных людей, по тем или иным причинам вынужденных пребывать в зоне действия источников ЭМП будь то на работе или дома, распространяются условия непрофессионального воздействия.

Для работы в условиях профессионального воздействия ЭМП в соответствии с требованиями Министерства здравоохранения России персонал обязан проходить предварительный (при поступлении на работу) и периодические медосмотры, позволяющие предупредить возникновение патологий, связанных с данным физическим фактором. Существует перечень заболеваний, при наличии которых запрещается работа с источниками ЭМП. Кроме того, регулярно проводимая на предприятиях и в организациях процедура аттестации рабочих мест по условиям труда позволяет в достаточной мере контролировать электромагнитную обстановку на производстве.

Условия непрофессионального воздействия характеризуются чрезвычайно широким перечнем типов реципиентов ЭМП (дети, пожилые люди, беременные, лица, страдающие всевозможными недугами, в том числе заболеваниями центральной нервной, иммунной и эндокринной систем, различными формами аллергии), а также практическим отсутствием полной информации о характере и уровнях электромагнитного воздействия. Это объясняет введение более жестких предельно допустимых значений интенсивности ЭМП для условий непрофессионального воздействия.

В качестве примера гигиенического нормирования в России рассмотрим нормативно-методические документы, регламентирующие воздействие ЭМП, создаваемого элементами системы сотовой радиосвязи.

В Российской Федерации на сегодняшний день базовым нормативно-методическим документом, регламентирующим воздействие ЭМП, создаваемого элементами системы сотовой радиосвязи,

базовыми станциями (БС) и радиотелефонами (РТ), для условий профессионального обслуживания и профессионального воздействия являются Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 “Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)”. Кроме того, действуют другие документы, вторичные по отношению к СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96:

Гигиенические нормативы ГН 2.1.8./2.2.4.019-94 “Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой радиосвязи”;

Межгосударственные санитарные правила и нормы МСанПиН 001-96 “Санитарные нормы допустимых уровней физических факторов при применении товаров народного потребления в бытовых условиях”.

В соответствии с Федеральным законом “О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения” от 30 марта 1999 г. № 52-ФЗ все перечисленные выше нормативы носят обязательный характер, и их требования должны соблюдаться на всей территории России.

Методика расчетов и инструментального контроля санитарно-защитных зон (СЗЗ) и зон ограничения застройки (ЗОЗ) для базовых станций (БС), а также методика оценки интенсивности ЭМП, создаваемого РТ, приводится в методических указаниях МУК 4.3.046-96 “Определение уровней электромагнитного поля в местах размещения передающих средств и объектов сухопутной подвижной радиосвязи ОВЧ- и УВЧ-диапазонов”.

Предельно допустимые значения интенсивности ЭМП, создаваемого элементами системы сотовой радиосвязи

В соответствии с требованиями СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 контролируемым параметром интенсивности ЭМП в диапазоне частот $300 \text{ МГц} \div 300 \text{ ГГц}$, включающим рабочий диапазон частот сотовой радиосвязи ($300 \text{ МГц} \div 3 \text{ ГГц}$), является среднее значение плотности потока энергии (ППЭ) эквивалентной плоской волны, выраженное в мкВт/см^2 . Величина ППЭ определяется по значениям напряженности электрического поля E или напряженности магнитного поля H с использованием соотношения для дальней (волновой) зоны ЭМП, в условиях свободного пространства, т. е. когда на измерительной площадке отсутствует искажение ЭМП, вносимое различными близко расположенными предметами.

Для условий профессионального воздействия оцениваемой характеристикой ЭМП служит энергетическая экспозиция (энергетическая нагрузка) — интегральное (за целую рабочую смену) произведение ППЭ на время воздействия t . Единица измерений энергетической

экспозиции — $\text{мкВт}\cdot\text{ч}/\text{см}^2$. Предельно допустимый уровень энергетической экспозиции в диапазоне частот 300 МГц ÷ 300 ГГц в соответствии с СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 равен $200 \text{ мкВт}\cdot\text{ч}/\text{см}^2$. Предельно допустимое значение ППЭ на конкретном рабочем месте оценивается в зависимости от времени воздействия по формуле $\text{ППЭ} = 200/T$ (рис. 4.81). При этом независимо от продолжительности воздействия ППЭ не должна превышать $1000 \text{ мкВт}/\text{см}^2$.

Оцениваемым параметром для условий непрофессионального воздействия, в том числе для населения, проживающего на территориях, прилегающих к БС, являются значения ППЭ вне зависимости от времени воздействия. Предельно допустимое значение ППЭ при этом составляет $10 \text{ мкВт}/\text{см}^2$.

Исходя из предположения, что пользователь РТ тратит на телефонные разговоры в среднем не более 2 часов в день, для этой категории населения установлен предельно допустимый уровень ППЭ, равный $100 \text{ мкВт}/\text{см}^2$ (ГН 2.1.8./2.2.4.019-94)*.

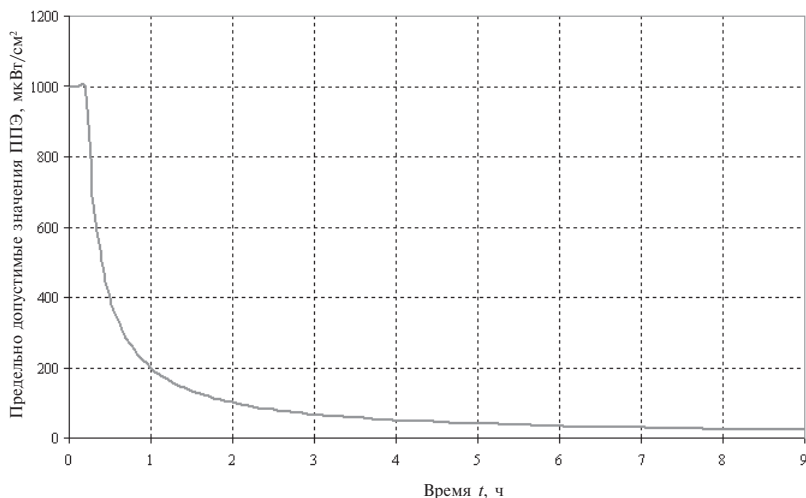


Рис. 4.81. Предельно допустимое значение ППЭ в зависимости от времени контакта с источником ЭМП в условиях профессионального воздействия

*Современные контрольные измерения и научные публикации свидетельствуют о серьезной физиологической опасности действия ЭМИ сотовой радиотелефонной связи на генетику человека и рекомендуют снизить длительность переговоров в пределах нескольких минут в день. Поэтому норматив $\approx 100 \text{ мкВт}/\text{см}^2$ нам представляется весьма завышенным.

Следует отметить, что проблема борьбы с электромагнитными излучениями на государственном уровне впервые встала перед законодательными органами в 1995 г. Тогда и была создана рабочая группа из представителей ведущих научных организаций и институтов, в которую вошли: Институт биофизики Министерства здравоохранения РФ, Институт медицины катастроф, НИИ гигиены им. Эрисмана, Эниологический центр “Квант Вега”, который является создателем уникальной аппаратуры, фиксирующей *реликтовое излучение, или излучение Козырева–Дирака*. В том же 1995 г. по решению Государственной Думы России начал разрабатываться закон о защите населения от энергоинформационного влияния. В 1998 г. экологическим центром “Валкон” в сотрудничестве с указанными институтами было создано устройство “Нейтроник”, защищающее от вредных излучений персональных компьютеров, мобильных телефонов и телевизоров. При его разработке были использованы технологии, полученные в лабораториях военно-промышленного комплекса, которые работали над созданием психотропного оружия и защиты от его воздействия на человеческий организм*.

С точки зрения правовых (юридических) нормативов Российское законодательство предъявляет достаточно жесткие требования к работодателям по поводу охраны труда сотрудников при работе на персональных компьютерах.

Вопросы, относящиеся к обеспечению охраны труда при работе за компьютером, регулируются Федеральным законом от 17 июля 1999 г., № 181-ФЗ “Об основах охраны труда в Российской Федерации” и Санитарными правилами и нормами СанПиН 2.2.2.542-96 “Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы”.

Аналогичные требования предъявляются и к работе с иными приборами. В частности, на работодателя возлагается обязанность обеспечить:

- безопасность работников при эксплуатации оборудования;
- применение средств индивидуальной защиты работников;
- выполнение соответствующих требований охраны труда, безопасность условий труда на каждом рабочем месте;
- информирование работников об условиях и охране труда на рабочих местах, существующем риске повреждения здоровья и полагающихся им компенсациях и средствах индивидуальной защиты.

*Эти вопросы еще находятся в стадии разработки, дискутируются в научных кругах и не могут быть приняты однозначно в нормативные и юридические документы.

Несоблюдение этих требований может повлечь ответственность работодателя за вред, причиненный жизни и здоровью работника при исполнении им трудовых обязанностей (предусмотрено ст. 1084-1094 Гражданского кодекса РФ, Федеральным законом №125-ФЗ “Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний” от 24.07.98 г. и иными нормативными актами).

Однако финансирование научных разработок в России значительно ниже, чем в ведущих капиталистических странах, исходя из опубликованных данных в Интернет* (табл. 4.23):

Таблица 4.23

Основные национальные исследовательские программы по биологическому действию ЭМП сотовой связи

Страна	ЕС
Название программы	В рамках <i>Fifth Framework Research Programme</i>
Период действия программы	2002–2005 гг.
Бюджет	Финансируемые совместно — ЕС, производителями мобильных телефонов, академическими организациями
Направления исследований	Средства выделены на 5 проектов по исследованию биоэффектов ЭМП сотовых телефонов: • комбинированное действие ЭМП и различных видов канцерогенов: генетические изменения и восприимчивость. Эксперименты на животных <i>in vitro</i>, • оценка риска возможных неблагоприятных эффектов действия низкоинтенсивных ЭМП с использованием чувствительных методов <i>in vitro</i>. Исследование действия на гены, дифференциацию и функцию эмбрионов, опухолевые клетки, экспрессию генов, иммунную систему, клетки, • исследование возможных эффектов воздействия на здоровье людей ЭМП сотовых телефонов и базовых станций: изучение канцерогенеза на крысах, • разработка рекомендаций по оценке риска импульсных ЭМП от различных источников

*К публикации материалов следует относиться критически.

Страна	Германия
Период действия программы	2002–2005 гг.
Ведомство	Федеральное Министерство по окружающей среде, сохранению природы и радиационной безопасности (<i>BMU</i>)
Исполнитель и разработчик программы	Федеральная служба по радиационной защите (<i>BfS</i>)
Бюджет	8,5 млн. евро
Источник финансирования	Промышленность (6 компаний операторов сотовой связи)
Направления исследований	Дозиметрия, биологические эксперименты <i>in vivo</i> , <i>in vitro</i> , эпидемиология, оценка рисков

Страна	Великобритания
Название программы	Мобильные телефоны и здоровье населения (<i>Mobile Telephone Health Research</i>)
Период действия программы	2002–2005 гг.
Ведомство	Министерство здравоохранения
Бюджет	7,4 млн. фунтов стерлингов
Источник финансирования	Смешанное (50 % правительство, 50 % промышленность)
Направления исследований	Совершенствование дозиметрии; эпидемиологические исследования и исследования на добровольцах; влияние на функцию мозга; возможные эффекты действия импульсных сигналов; возможные изменения здоровья при нарушении клеточных и субклеточных функций

Страна	Австралия
Период действия программы	2001–2006 гг.
Ведомство	Комитет по проблемам электромагнитной энергии
Бюджет	4,5 млн. дол. США
Источник финансирования	Правительство (целевым назначением из средств, полученных из налога на пользование телефоном)

Страна	Франция
Название	Национальная программа Франции по исследованию биологических эффектов действия мобильных телефонов и их сертификации / <i>COMOBIO</i>
Период действия программы	2001–2005 гг. (ориентировочно)
Ведомство	Министерство промышленности и исследований
Бюджет	1 млн. евро в год
Источник финансирования	Смешанное (50 % промышленность и 50 % социальный фонд)
Направления исследований	дозиметрия, исследования на добровольцах и животных.

Страна	Южная Корея
Период действия программы	2001–2006 гг.
Ведомство	Министерство связи
Бюджет	8 млн. дол. США
Источник финансирования	Смешанное (25 % правительство и 75 % промышленность)
Направления исследования	Эпидемиологические исследования включая исследования на добровольцах, <i>in vitro</i> и <i>in vivo</i> , дозиметрия

Страна	США
Программа I	<i>USAF RF Research Program: Biomolecular and subcellular RF bioeffects</i>
Период действия программы	Не определен
Ведомство	<i>USA Air Force Office of Scientific Research</i>
Бюджет	На 2002 г. 5 млн. долл. США
Источник финансирования	Правительство
Программа II	Биоэффекты действия ЭМП РЧ беспроводных телефонов на здоровье человека / <i>Cooperative Research and Development Agreement – Health Effects of RF Emissions from Wireless Phones (CRADA)</i>
Период действия программы	1996–2004 гг. (ориентировочно)
Ведомство	<i>Center for Devices and Radiological Health (CDRH)</i> при Американском управлении по контролю продовольствия и лекарственных средств (<i>FDA</i>)

Страна	США
Программа II	<i>USAF RF Research Program: Biomolecular and subcellular RF bioeffects</i>
Бюджет	2002 г. — 7 млн. долл. США 1996-2001 гг. — 27 млн. долл. США
Источник финансирования	Промышленность (<i>Cellular Telephone Industry Association / CTIA</i>)
Цель	Оценка риска, связанного с использованием мобильных телефонов. Исследования должны быть качественными, научно независимыми, и эффективными
Направления исследований	Канцерогенез и эпидемиология

Страна	Финляндия
Название	Национальная программа исследований Финляндии (<i>Finnish Research Programme</i>)
Сроки	2000–2002 гг.
Руководитель программы	профессор Юкка Ютилаинен / <i>Jukka Juutilainen University of Kuopio</i>
Цели программы	1. Изучение влияния ЭМП РЧ на память, внимание и мозговую функцию, слух, равновесие, циркуляционные реакции человека; на кардиостимуляторы. 2. Разработка достоверных биологических маркеров для изучения эффектов действия ЭМП РЧ. 3. Изучение основных реакций клетки на действие ЭМП РЧ и возможного канцерогенного действия. 4. Совершенствование дозиметрии и моделирование воздействия ЭМП РЧ на людей и клеточные культуры

Страна	Япония
Период действия программы	2000–2002 гг.
Ведомство	Министерство печати и телекоммуникаций
Бюджет	5,2 млн. дол. США
Источник финансирования	Правительство

Дальнейший обзор проблемы прав и защиты человека от нежелательного ЭМИ показывает, что наиболее компетентными и озабоченными организациями в разработке современной нормативной базы можно считать:

- Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений (Москва);
- НИИ медицины труда РАМН (Москва);
- Всемирную Организацию Здравоохранения (*The World Health Organization, WHO*).
- Британскую комиссию по радиологической защите (*National Radiological Protection Board, NRPB*).
- Комиссию по международным стандартам безопасности (*International Commission on Nonionizing Radiation Protection, ICNIRP*, Европа).
- Ассоциацию производителей средств сотовой связи (*Cellular Telecommunications Industry Association, CTIA, USA*).
- Испанский институт здоровья им. Карла III.
- *American Health Foundation*.
- Управление по лекарствам и продуктам питания (*Food and Drug Administration, FDA, USA*). Финансирует их CTIA.
- *Integrated Laboratory Systems*.
- Национальный институт “рабочей жизни”, Швеция.
- Норвежскую комиссию по радиологической защите (*Norwegian Radiological Protection Board*).
- Британский Бристольский университет и Бристольский королевский госпиталь.

Далее логично рассмотреть также нормативные документы по гигиеническому нормированию электромагнитного поля, создаваемого элементами системы сотовой радиосвязи за рубежом.

Критерии гигиенического нормирования

В подавляющем большинстве развитых зарубежных стран, прежде всего в США, в государствах-членах ЕС, в Соединенном Королевстве, Японии, принято считать биологически действующим ЭМП такой интенсивности, воздействие которого приводит к научно доказанным опасным для функционирования человеческого организма последствиям, в том числе обратимым.

Поскольку в свою очередь к научно доказанным последствиям относят исключительно результаты электромагнитного воздействия так называемого теплового уровня, то основным критерием для определения предельно допустимого значения интенсивности ЭМП

в рабочем диапазоне частот для системы сотовой радиосвязи (в МГГ-диапазоне) является увеличение температуры тела человека на 1 °С вследствие влияния ЭМП.

В связи с этим предельно допустимые значения идентичных нормируемых величин, например ППЭ, гораздо выше в зарубежных нормативных документах по сравнению с российскими.

Типы условий воздействия ЭМП

Как и в Российской Федерации, за рубежом различаются два основных типа условий воздействия ЭМП: профессиональное и непрофессиональное.

Нормативно-методические документы, регламентирующие воздействие ЭМП, создаваемого элементами системы сотовой радиосвязи

Зарубежные нормативно-методические документы, регламентирующие в том числе электромагнитное воздействие элементов системы сотовой радиосвязи, имеют как обязательный, так и рекомендательный статус (табл. 4.24).

Таблица 4.24

Зарубежные нормативно-методические документы, регламентирующие воздействие ЭМП, создаваемого элементами системы сотовой радиосвязи

Страна (страны) действия документа	Наименование документа	Статус документа
Международный	<i>ICNIRP "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)"</i>	Рекомендательный
ЕС	<i>CENELEC ENV 50166-2 "Human exposure to electromagnetic fields. High frequency (10 kHz to 300 GHz)"</i>	Обязательный
США	<i>IEEE Std C95.1, 1999 Edition "IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz"</i>	Рекомендательный
Япония	<i>ARIB STD-38 "Radiofrequency - exposure protection ARIB standard"</i>	Рекомендательный

Предельно допустимые значения интенсивности ЭМП, создаваемого элементами системы сотовой радиосвязи

Основным (базовым) нормируемым параметром в зарубежных нормативно-методических документах для рабочего диапазона частот системы сотовой радиосвязи является средняя удельная поглощенная мощность (УПМ) (англ. *SAR — Specific Absorption Rate*), измеряемая в Вт/кг. Эта величина представляет собой мощность, поглощаемую биологической тканью определенной массы за некоторый период времени. Обычно УПМ определяют для ткани массой 1 или 10 граммов за интервал 6 минут.

В качестве предельно допустимого для условий профессионального воздействия принято значение УПМ, равное 0,4 Вт/кг для тотального воздействия на тело реципиента и 10 Вт/кг для локального воздействия на его голову и торс, для условий непрофессионального воздействия — 0,08 и 2 Вт/кг соответственно.

Контролируемым параметром ЭМП при тотальном воздействии, например, при нахождении человека в зоне действия БС, служит значение плотности потока энергии (ППЭ) эквивалентной плоской волны. В зависимости от стандарта и частоты предельно допустимые значения ППЭ для условий профессионального воздействия изменяются от 1000 до 10000 мкВт/см², для условий непрофессионального воздействия — от 200 до 2000 мкВт/см² (рис. 4.82, цв.).

При локальном воздействии ЭМП, например, в случае воздействия на пользователя РТ, измеряют или рассчитывают значения УПМ на соответствующем фантоме модели головы, что является довольно сложной инженерно-технической задачей, требующей значительных материальных и временных затрат.

За рубежом достаточно часто на региональном уровне рассматриваются предложения кардинально ужесточить требования к предельно допустимым значениям интенсивности ЭМП, создаваемого именно элементами системы сотовой радиосвязи. Например, в июне 2000 г. на Международной конференции “Cell Tower Siting”, состоявшейся в Зальцбурге (Австрия), сообщалось, что на территории г. Зальцбурга предлагается ввести норматив 0,1 мкВт/см² для БС стандарта GSM-900/1800.

В связи со систематизацией и упорядочением требований по защите населения от ЭМИ нередкими стали судебные процессы с претензиями потребителей к коммерческим и государственным корпорациям и компаниям, выпускающим изделия электронной промышленности. Так, биолог Роже Когхилл уже давно ведет кампанию против сотовых телефонов, доказывая их вред для здоровья

человека. Им уже приводились факты о вызванных головных болях и нарушениях памяти при использовании сотовых телефонов. Последние данные свидетельствуют о вредном влиянии микроволн на лейкоциты и о снижении защитных сил организма. В 2002 г. Когхилл (Coghill Laboratory, Wels, UK) организовал судебные процессы против местных распространителей сотовой телефонии, чтобы утвердить прецедент нарушения ими британского закона о защите прав потребителя от 1987 г. Своими исками Когхилл желает добиться, чтобы изготовители сотовых телефонов наклеивали на телефонные трубки ярлыки с предупреждающими надписями — как это делается на пачках сигарет. Как отметил исследователь, сотовые телефоны в настоящее время являются наиболее интенсивными микроволновыми излучателями (не считая микроволновых печей) среди бытовых приборов, и прикладывать их к голове, самому чувствительному органу, — чистое безумие. Все исследователи единодушно сходятся в том, что электромагнитные излучения от сотовых телефонов, конечно же, влияют на ткани мозга. В настоящее время в ряде стран разворачивается общественное движение за то, чтобы допустимые нормы поглощенных излучений были снижены, а для сотовых телефонов стали обязательными защитные экраны, предохраняющие голову от излучений. Озабоченность здоровьем своих служащих выражают и компании. К примеру, лондонский магазин подарков “Asprey” уже принял меры: все его служащие пользуются сотовыми телефонами с обязательными защитными экранами.

Наконец, следует обратить внимание на позицию ВОЗ в отношении ЭМП сотовых телефонов. Всемирная Организация Здравоохранения (ВОЗ) серьезно озабочена проблемой защиты здоровья населения в условиях действия ЭМП. С 1994 г. ВОЗ проводит специальную программу “WHO International EMF Project” — Международный проект ВОЗ по электромагнитным полям. В ВОЗ считают, что ЭМП в определенных условиях может вызывать раковые заболевания, нарушения поведения, ослабление памяти, болезни Паркинсона и Альцгеймера и многие другие болезни. Однако, несмотря на большое количество проведенных исследований по биологическому действию ЭМП радиочастотного диапазона, однозначно на эти вопросы ответить пока нельзя. В связи с этим в 1999 г. в Лондоне на III Международной конференции министров экологии и здравоохранения была принята декларация с обращением ВОЗ учитывать “необходимость строгого соблюдения предупредительного принципа при оценке рисков и подходить более активно к анализу опасности”. В 2000 г. ВОЗ подготовила документ

“Электромагнитные поля и здоровье населения. Предупредительная политика”. Предупредительная политика — это стратегия управления риском, которая применяется в условиях недостаточного научного знания проблемы и предполагает принятие превентивных мер для избежания возможного вреда, даже если вероятность его возникновения ничтожна.

Предупредительной концепции в отношении ЭМП сотовых телефонов придерживаются ряд стран: Швейцария, Италия, Австралия, Швеция, Израиль, Великобритания, Франция, Венгрия и др. С ВОЗ сотрудничают еще более 40 стран и 7 научно-исследовательских центров.

Основные направления, по которым проводятся исследования: дозиметрические, эпидемиологические исследования, исследования на добровольцах, эксперименты на животных *in vivo* и *in vitro*. Исследования, представляющие наибольший интерес:

- влияние на функцию мозга, память, внимание;

- комбинированное действие ЭМП и различных видов канцерогенов;

- исследование возможных эффектов воздействия на здоровье людей;

- канцерогенез ЭМП;

- симптомы гиперчувствительности;

- влияние ЭМП РЧ на кардиостимуляторы;

- определение достоверных биологических маркеров для изучения эффектов действия РЧ ЭМП.

Действующие в России нормативные документы, регламентирующие воздействие ЭМИ сотового радиотелефона, неадекватно отражают сущность произошедших перемен, являются по ряду вопросов спорными и противоречивыми. Разработка новых санитарных норм и правил, регламентирующих воздействие ЭМИ сотового телефона, требует предварительного проведения высокочувствительных медико-биологических исследований. Даже в случае немедленного начала финансирования и проведения этих исследований результаты могут быть получены не ранее 2003—2004 г. В связи с мировым финансовым кризисом 2008—2010 гг. указанные сроки скорее всего сдвинутся на неопределенное время. Ни в коем случае не отрицая актуальности проведения этих исследований, мы отмечаем, что в настоящий момент в нашей стране необходимо принятие ряда мер предупредительного характера. При разработке системы мероприятий по обеспечению безопасности систем сотовой связи следует использовать методологию добровольного и вынужденного экологического риска.

Понятие техногенного риска жизни можно применять к конкретному человеку, сообществу людей, объединяемых по тому

или иному признаку (например, по территории проживания, профессии). Не вызывает сомнения принцип отнесения профессионального риска к категории добровольного, в то же время отнесение риска воздействия ЭМИ на население к категории вынужденного в настоящее время неправомерно. В подавляющем большинстве случаев население подвергает себя риску воздействия ЭМИ добровольно (сознательно или неосознанно). Индивидуальный риск жизни должен выбираться человеком добровольно. Нормирование (принудительное) индивидуального электромагнитного риска жизни должно осуществляться на стадиях детства и репродукции жизни человека. На стадиях социальной активности человека индивидуальный техногенный риск должен добровольно им выбираться — в этом есть элемент свободы человека. Общество обязано лишь определить данный риск и предупредить человека о потенциальных опасностях.

Риск жизни человека проявляется в двух формах — добровольный и принудительный (вынужденный) риск. Для отнесения риска к одной из форм служат методически обусловленные осведомленность и согласие человека принять или не принять на себя дополнительные нагрузки и воздействия, опасные для здоровья и жизни. В настоящее время проблематично говорить о возможности снижения уровня электромагнитных полей до естественного электромагнитного фона. Основная цель системы электромагнитной безопасности — обеспечение приемлемого уровня опасных для жизни человека воздействий электромагнитных полей и компенсация человеку нанесенного ущерба.

При регулировании вынужденного риска предпочтение следует отдать нормативным, административным и экономическим механизмам, при регулировании добровольного риска приоритетными должны стать просветительские методы. Необходимо переложить основной акцент с административных мер регулирования на экономические и просветительские.

Типичным источником добровольного риска является носимый радиотелефон, типичным источником вынужденного риска воздействия ЭМИ является базовая станция сотовой связи.

Учитывая, что основной задачей системы электромагнитной безопасности станет перевод риска вынужденного в риск добровольный, в настоящее время необходимо определить технические требования к сотовому телефону, позволяющие пользователю радиотелефона самостоятельно выбирать и контролировать уровень воздействия ЭМИ. В первую очередь это будет касаться возможности контроля экспозиции, контроля системы динамической регулировки

мощности излучения и возможности самостоятельной регулировки уровня воздействия. Из всех видов мобильной радиосвязи сотовая является самой безопасной, поскольку мощность излучения радиотелефона устанавливается минимально возможной для обеспечения устойчивой связи. К сожалению, этот декларируемый всеми операторами сотовой связи принцип не всегда реализуется на практике. Так, проведенные испытания радиотелефонов в городском районе, где 0,05 Вт мощности телефона обеспечивали устойчивую радиосвязь, 80 % радиотелефонов работали при мощности 0,6 Вт и более. Кроме того, у 60 % обследованных радиотелефонов декларируемый принцип регулировки мощности не работал. К сожалению, в настоящее время пользователь сотового радиотелефона ни при его покупке, ни при эксплуатации не может контролировать мощность телефона и самостоятельно ее регулировать*.

Можно сформулировать следующие основные положения, необходимые для реализации принципа добровольного риска пользователя сотового радиотелефона:

- пользователь должен знать уровень воздействия ЭМИ радиотелефона и быть предупрежден о его возможном негативном влиянии на здоровье;
- пользователь радиотелефона должен быть предупрежден об опасности пользования радиотелефоном детьми и женщинами в состоянии беременности;
- пользователь радиотелефона должен иметь возможность контроля уровня ЭМИ и экспозиции своего радиотелефона;
- пользователь радиотелефона должен иметь возможность самостоятельно ограничивать мощность своего радиотелефона;
- должны быть введены ограничения на пользование радиотелефоном в местах массового скопления населения.

Воздействие ЭМИ базовых станций, в отличие от носимого радиотелефона, является типичным примером вынужденного экологического риска. В этом случае при регулировании воздействия ЭМИ предпочтение следует отдать административным (нормативно-правовым) механизмам регулирования. Необходимо также учитывать,

*См. последние публикации по нерешенным проблемам в современной оценке опасности ЭМИ на организм человека: 1. "Open questions in Research on Biological and Effects of Low-Intensity RF-EMF". Intern. Sci. Workshop, Organized by FGF, Research Ass. for Radio Applications and Ministry of Environment, 17–19.11.2008, Stuttgart. 2. BIOEM 2009 DAVOS. Joint Meeting The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association. Abstract Collection. Davos, Switzerland, June 14–19, 2009.

что каждый оператор сотовой связи стремится обеспечить достаточный уровень электромагнитного излучения во всех местах возможного скопления населения. В этих условиях на определенные участки городской территории оказывают свое воздействие одновременно несколько базовых станций, и последствия такого комплексного воздействия практически не изучены.

Изложенный выше общий подход к систематизации и оценке негативного влияния ЭМИ средств сотовой связи предполагается использовать при разработке соответствующих нормативно-технических документов и при принятии управленческих решений.

Необходимо отметить, что ЭМИ является одним из немногих видов негативного антропоферного воздействия, в отношении которого не реализуется принцип — “загрязнитель платит”. В условиях перехода к рыночной экономике крайне необходимо введение экономических механизмов регулирования ЭМИ. Введение экологического налога за воздействие ЭМИ предусмотрено проектом соответствующей главы Налогового кодекса РФ. Кроме того, введение налога за воздействие ЭМИ позволит направить часть собранных средств на финансирование крайне необходимых медико-биологических исследований.

Резюме по проблеме сотовой телефонной связи

Таким образом, краткий экскурс в медико-биологические аспекты проблемы сотовой связи позволил убедиться, насколько многогранной и сложной является проблема. Несмотря на большое число проведенных исследований, ни одна научная организация в мире пока не может дать однозначного ответа потребителям: насколько безопасно или опасно воздействие ЭМП сотового телефона и базовых станций на человека. В настоящее время мнения отдельных ученых по поводу опасности элементов сотовой связи разделяются на несколько групп практически поровну: абсолютно безопасны — безопасны в определенных условиях — смертельно опасны. В этом ряду рекомендации Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений и рабочей группы правительства Великобритании (группа Стюарта) являются наиболее четкими. В целом можно констатировать, что ярко выраженные специфические симптомы или нарушения функционирования организма при воздействии ЭМП сотового телефона у здорового человека сразу не возникают или колеблются в пределах нормы, поэтому такую реакцию можно воспринять как адаптацию к данному фактору. На уровне популяции (сообщества)

отдаленные и кумулятивные эффекты действия могут проявиться спустя десятилетия и должны быть подтверждены достоверной статистической зависимостью (исторические аналогии — никотин, ионизирующая радиация, асбест, диоксины и т.п.). Каждый пользователь должен самостоятельно взвесить все “за” и “против” относительно проблемы сотовых телефонов и сделать осознанный выбор — пользоваться удобствами, предоставляемыми сотовой связью, или не подвергать себя дополнительному риску. Такой выбор возможно сделать только на основании доступной научно обоснованной информации, принимая во внимание положения предупредительного принципа [Григорьев, 1999, с. 13–47; Григорьев, Степанов, 1999, 145 с.; Грешневиков, Маликов и др., 2001; Пальцев Ю.П., Рубцова Н.Б.; Сомов А.Ю. Заседание Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений. М., 20.02.2001 г. и 20.12.2001 г.]

Установление причинно-следственных связей в системе “среда обитания—здоровье человека” занимает центральное место в комплексных гигиенических (санитарно-экологических) исследованиях в регионах и населенных пунктах, проводимых с целью разработки профилактических и оздоровительных мероприятий по защите людей от действия установленных в ходе этих исследований вредных факторов.

Необходимо провести целый комплекс мероприятий по оценке магнитоэкологических условий на различных участках, используя конкретные источники возмущения МП. Результатом анализа сведений о качестве окружающей среды являются рекомендации лицам, принимающим решения по выбору приоритетных проблем и действий для их устранения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии впервые предпринята попытка обобщить накопленный опыт естествознания в новой междисциплинарной научной области, посвященной оценке влияния неионизирующего электромагнитного излучения на природно-технические системы, на обитателей биосферы *in vivo*. В настоящее время этим занимаются экологизированные научные направления (учебные дисциплины), в которых остаются нерешенными взаимосвязанные проблемы геокосмоса, геоэкологии, медицины, антропоэкологии. Подчеркнем, что нами рассматриваются именно экологические проблемы электромагнетизма среды обитания, которым еще совсем недавно не уделялось должного внимания: анализируются результаты энергетического действия геофизических и антропосферных электромагнитных полей на живое вещество, т. е. в центре внимания стоят минимальные объекты экологии — целостные организмы *in vivo*, а не их составные части (органеллы, ткани, клетки) *in vitro*.

Известно, что по сути своей экология как научная дисциплина очень близка к *“общей теории систем”*. Но важно знать, как электромагнитные поля (потоки энергии) соотносятся с общими принципами и законами поведения систем — независимо от вида и природы элементов, составляющих систему. С позиции общей теории систем логично рассматривать функционально целостные совокупности — источники неионизирующего излучения — как особые индивидуальные объекты. Интегральные свойства этих объектов превышают сумму частей, составляющих систему, и их согласованность с общими законами природы позволяет изучать системы на основе физических и математических моделей. Именно поэтому экология как наука (научная дисциплина) близка к общей теории систем, поскольку еще со времени определения новой науки Эрнстом Геккелем (1866), *предметом её исследований стали системные взаимоотношения, а не материальные тела, формы движения или процессы*. В подтверждение этого тезиса сошлюсь на свой опыт: в 1970—1980 годах было обращено внимание на пространственно-временное распределение элементов экосистем, которые находились в функциональной зависимости от структуры и динамики геомагнитного поля, но этот феномен не подвергся тщательному исследованию ни биологов, ни геофизиков. Важно было бы уже тогда решать задачу объяснения природы феномена, а не только его констатировать. Также необходимо было бы вникать в сущность “индивидуализма живых организмов” на примере двигательного поведения рыб, который удалось обнаружить при Фурье-анализе

спектральной плотности распределения $G(f)$ электрического потенциала, генерируемого животными в аквариуме.

Здесь наша позиция не расходится с мнением известного биолога-эволюциониста Л.Г. Раменского (1924 г.), который рассматривал распределение растительного покрова на определенной изолированной территории (фитоценоз) не как совокупность сообществ, а как *“многими факторами обусловленную текучую непрерывность, сложно отзывающуюся на смену условий в пространстве и во времени”* [Раменский Л.Г. Основные закономерности растительного покрова и их изучение. Воронеж: Вестник опытного дела, 1925].

Как видно, Л.Г. Раменский призывал “изучать не сообщества, а закономерности пространственно-временного распределения разных видов растений” [А.М. Гиляров. Перестройка в экологии: от описания видимого к пониманию скрытого // Вестник РАН. 2005. Т. 75, № 3. С. 214–223].

Некоторые нерешенные проблемы экологической роли электромагнетизма в среде обитания

Геокосмос

Выяснение роли поведения слабого, исходного (так называемого “затравочного”) магнитного поля в турбулентной проводящей среде как в космосе, так и Земле (познание магнитогидродинамической природы взаимодействия околоземного межпланетного магнитного поля с электрофизическими полями Земли и ее биосферы) [Физический энциклопедический словарь. 1983. С. 364–366].

Выяснение существования магнитного монополя*. Известно, что частицы с электрическими (положительными или отрицательными зарядами) постоянно наблюдаются в природе, и они создают в окружающей среде кулоновское электрическое поле. Магнитные же заряды, ни положительные, ни отрицательные, никогда не наблюдались в отдельности. Однако законы классической электродинамики допускают существование частиц с одним магнитным полюсом — *магнитных монополей* — и дают для них определенные уравнения поля и уравнения движения. Магнитный монополюс — стабильная частица, он не может исчезнуть до тех пор, пока не встретится с другим монополюсом, имеющим равный по величине и противоположный по знаку магнитный заряд. Если магнитные монополюсы генерируются высокоэнергетическими *космическими лучами*, непрерывно падающими на Землю, то они должны встречаться

*см. библиогр. ссылку Daninos Franck.

повсюду на земной поверхности. Однако поиски таких частиц не дали результатов. Остается открытым вопрос, связано ли это с тем, что магнитные монополи очень редко рождаются, или же они вообще не существуют [Dirac P.A.M. Quantised singularities in the electromagnetic field // Proceedings of the Royal Society. Ser.A: 1931. Vol.133, № 821; Воспоминания о И.Е. Тамме. М.: Наука, 1986. С. 99, 111, 162]. Существование магнитного монополя объяснило бы наблюдаемое в природе “квантование” электрического заряда — кратность его элементарному электрическому заряду [Большой энциклопедический словарь. М.—СПб., 1998, с. 672].

Разработка эффективных методов прогноза солнечных хромосферных вспышек, которые от проблем чисто геокосмического значения приводят к проблемам сугубо медицинским. В частности, рост солнечной активности, сопровождающийся сильными вспышками, геомагнитными возмущениями и другими геофизическими проявлениями неустойчивости, нестационарности в системе солнечно-земных связей, вызывает рост многообразных социально-медицинских отрицательных последствий действия неионизирующего излучения на состояние здоровья человека, на рождаемость, смертность, генотип, темпы роста и развития и т.д. (см. ч.1).

Выяснение механизма передачи аномального поведения геомагнитного поля перед землетрясениями или цунами непосредственно в рецепторные органы животных (земноводных, рыб, млекопитающих). До настоящего момента предвестники землетрясений — компоненты биосферы — используются неэффективно.

Выяснение причинно-следственной связи в явлении пространственно-временного запаздывания потенциалов электромагнитного поля. Эффект запаздывания имеет фундаментальное значение в решении сложных задач геокосмических масштабов с учетом конечной скорости распространения электромагнитного взаимодействия (в частности скорости света). *Однако справочные литературные источники не рассматривают этой проблемы* [Физические величины: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991; Физика космоса: Малая энциклопедия / Под ред. Р.А. Сюняева. М.: Сов. энциклопедия, 1986]. Запаздывание потенциалов обусловлено изменением ЭМ поля в данной точке пространства по отношению к изменению зарядов и токов, создающих поле и находящихся на некотором расстоянии R от рассматриваемой точки. Такое явление весьма реально в некоторый момент времени t , который определяется

плотностями тока и заряда источника поля в отличный от t момент времени τ , а именно:

$$\tau = t - R/c, \text{ где } c — \text{ скорость света.}$$

Здесь соотношение R/c — величина времени запаздывания.

Если заряды и токи непрерывно распределены в некотором объеме пространства, то запаздывающие потенциалы определяются интегрированием по этому объему элементарных запаздывающих потенциалов, создаваемых зарядами и токами в отдельных очень малых его областях [Тамм И.Е. Основы теории электричества. 9-е изд. М., 1976].

Идею о пространственно-временном запаздывании потенциалов ЭМП можно с определенной степенью осторожности применить к макроскопическим системам локальных наземных (лабораторных) масштабов. Автор не имеет возможности получить теоретическое обоснование или результаты математического моделирования, но экспериментальные наблюдения сосредотачивают внимание на явлении запаздывания потенциалов, природа которого имеет другую, физико-химическую, точнее, электро-кинетическую основу, — перемещение объемного заряда (коллоидные частицы, ионные носители, гетерогенные примеси) в гидрофизических автономно изолированных экосистемах. Так, в аквариумных условиях достоверно наблюдалось запаздывание скачка разности потенциалов $\Delta\phi$ на электродной установке в воде при изучении движения животных (рыб, планктона) (см. ч. 3).

Геоэкология

Выяснение плохо изученного вопроса об изменчивости спектральной структуры колебаний низкоинтенсивных электромагнитных полей (“биосферных шумов”), распространяющихся в геоэкологической среде — ионосфера—литосфера [И.Л. Гуфельд, В.А. Липеровский // Международный симпозиум “Корреляции биологических и физико-химических процессов с солнечной активностью и другими факторами окружающей среды”. Пушино, 1993]. Упомянутые “биосферные ЭМ шумы” в значительной степени обусловлены состоянием ионосферы, параметры которой изменяются не только при крупномасштабных геологических процессах в литосфере (катастрофические землетрясения), но и с проявлением мощных антропогенных воздействий в зонах мегаполисов и крупных промышленных объектов: взрывные работы при крупномасштабном строительстве, преобразование больших территорий

при освоении земельных и литосферных ресурсов, форс-мажорные военные действия и т.д. Комплексное изучение закономерностей взаимодействия геофизических полей в системе ионосферно-литосферных связей, безусловно, должно способствовать выяснению долговременных последствий восприятия человеком подобных ухудшений качества среды обитания.

Выяснение природы, полное описание механизма генерации и построение модели многолетних вариаций геомагнитного поля во времени и пространстве с точностью, удовлетворяющей современным практическим требованиям (например, созданию карт ГМП навигационного назначения). Анализ таких в общем-то длительных изменений поля в пределах периодов от 1 до 100 лет должен учитывать как солнечную активность, так и скорость суточного вращения Земли (продолжительность земных суток). Очевидно, такой анализ приобретает не только геокосмическую значимость (динамика Солнца как звезды в пределах от ядра до короны), но может в дальнейшем использоваться для развития новых методов исследования в общей экологической науке. Так, например, отмечается, что в течение последних примерно 250 лет в группе многолетних вариаций геомагнитного поля преобладает мощная гармоника с периодом $T \approx 90 \div 100$ лет [Ривин Ю.Р. Циклы Земли и Солнца. М.: Наука, 1989. 165 с.]. Однако неясно, насколько устойчив максимум таких 90-летних вариаций, проявляющийся не только в динамике чисел Вольфа (количество пятен на Солнце W), но и в геомагнитной активности. Это явление многие исследователи связывают с процессами в жидкой части ядра Земли вблизи мантии, которые приводят к перераспределению моментов вращения и изменению скорости суточного вращения Земли. Интересно, что некоторые специалисты-физиологи связывают этот 90-летний период вариаций ГМП с рождением талантливых людей.

Выяснение особенностей пространственно-временной неоднородности в распределении электрических, магнитных и метеорологических полей в их связи с СА, а также последствий влияния комплекса этих характеристик на здоровье человека. Было выяснено, что в зимнее время неоднородность полей проявляется в региональном масштабе, а в летнее — в локальном, мелкоструктурном. Расчеты выявили зоны значительных градиентов вариаций энергетических характеристик комплекса геофизических полей, которые обладают наибольшей неустойчивостью в зимний период и

имеют отчетливый 11-годовой период в соответствии с солнечным циклом активности; зоны с незначительными градиентами вариаций энергетических характеристик геофизических полей (летний период) зависимостью от солнечного цикла не обладают. Полагают, что влияние СА на самочувствие человека через неустойчивость процессов в тропосфере зависит от первоначальной фазы состояния комплекса геофизических полей [Михневич В.В., Яичков А.П. // Сб. “Полярная ионосфера и магнито-ионосферные связи”. Якутск, 1984. С. 157–162].

Обоснование достоверности экспериментальной оценки роли солнечной и геомагнитной активности в динамике численности населения России. Были проанализированы ежегодные данные о смертности и рождаемости людей в России за 30-летний период (1867–1897 гг.) [Зайцева С.А., Пудовкин М.И. // Биофизика. 1995. Т. 40, вып. 4. С. 861–864]. Получены эмпирические соотношения, позволяющие количественно рассчитать процентное значение смертности и рождаемости за год с учетом чисел Вольфа и вариаций **K_p -индекса** возмущенности ГМП. Коэффициент корреляции между вычисленными и наблюдаемыми величинами равен +0,78 для смертности населения и –0,67 для рождаемости. Авторы констатируют влияние солнечной активности и вариаций геомагнитной активности на выживаемость населения; при этом рост активности Солнца и изменение уровня **K_p -индекса** относительно многолетнего среднего значения приводит не только к возрастанию смертности ($r = 0,78$), но и к падению рождаемости ($r = -0,67$). Эти данные, на наш взгляд, весьма неутешительны, хотя ряд наблюдений взят недостаточным.

Необходимо аналогичный анализ провести на большем статистическом материале с учетом современной эпохи, однако данные за периоды мировых войн 20-го столетия, конфликтных ситуаций последних десятилетий должны быть отфильтрованы. В противном случае необходимо ждать более благоприятный социально-исторический период.

Геофизика

Выяснение проблемы расширения понятия “критерий нормального электрического поля акваторий”, которое сформулировано автором монографии, но остается до сих пор не обоснованным в официальной геофизической терминологии. К этой проблеме тесно примыкает вопрос о недостаточно изученной области геофизических ритмов внутригалактических и внегалактических высокоэнергетических возмущений электрического поля Земли и биосферы (разд. 2.1.3). Исходя из результатов обработки

геологических изысканий США в 1954 г. и катастрофического землетрясения в Чили в 1969 г. [327], а также советских исследований 1974–1982 гг. [229; 12], необходимо отметить, что проблема современного прогноза землетрясений требует серьезного разрешения на международном уровне, с привлечением реальных результатов сейсмической катастрофы на о. Гаити в 2010 г. Мы полагаем, что достоверность прогноза сейсмоопасности могла быть выше, если бы учитывались электрометрические работы в воде, сейсмические данные в земле и радиофизические измерения в воздухе. См. также в настоящем издании: с. 37, с. 233, с. 274. Имеются разъяснения по рентабельности прогноза в сейсморазведке и вулканологии [219; 136; 328].

Выяснение модуляции теллурического поля различными гидродинамическими полями (потенциальными пульсационными, вихревыми, конвективными), передающими энергию движения водных масс в глубинные слои водоемов и искажающими естественный электромагнитный фон, внося помехи в измерительно-регистрирующий тракт технических устройств самого различного назначения (разд. 2.4.4).

Внедрение усовершенствованной новой электрополюметрической аппаратуры регистрации турбулентности в акваториях, как наиболее эффективной для изучения закономерностей передачи энергии гидродинамических полей от поверхностных слоёв до глубинных (установка “Вихремер” конструкции ИЗМИРАН, Москва) (разд. 2.4.4).

Геохимия—ихтиология—биохимия

Изучение активной роли электрохимических процессов геолого-минералогической этиологии на мелководье (разд. 2.2.4), где высокоточные измерения сигналов $\Delta\phi$ электрического поля могут существенно модулироваться за счет электродинамических потенциалов, связанных с движением отдельных рыб или их косяков. Это явление потребует надежного идентифицирования именно биоэлектрических полей на фоне собственного электрического поля акватории (разд. 2.5.1).

Выяснение тонкого механизма генерации электрических потенциалов на границе раздела или в переходной зоне между областями высокой концентрации микрзоопланктона и условно чистыми водными массами, что позволяет надежно использовать биотестирование для оценки качества воды (разд. 2.5.2).

Разработка комплексного метода разделения суммарного электрического потенциала на составляющие при идентификации (тестировании) условно чистых и загрязненных водных масс, в особенности биоэлектрической компоненты, обусловленной бактериопланктоном, фитопланктоном и зоопланктоном в отдельности (разд. 2.5.2—2.5.3).

Выяснение исключительно важной проблемы в магнитобиологии — причин и механизмов вертикальных суточных миграций планктонных сообществ в морской и пресной воде. Достоверное обоснование причин миграций возможно лишь при максимально продуманном и комплексно обеспеченном аппаратурой эксперименте (высокоточной электрополюметрической и магнитометрической) (разд. 2.5.3)*.

Крайне болезненные и нерешенные проблемы современной электроэкологии и всемирной организации охраны биоресурсов крупных морских и пресноводных акваторий возникли в последнее десятилетие XXI века.

Внедрение повсеместного строительства мощных установок производства и накопления электроэнергии за счет естественных источников ее генерации (солнечная и ветровая энергетика) создало новые препятствия миграционным перемещениям животных и рыбных косяков, сложившихся в природе эволюционно. Обширная сеть электрокабельной системы транспорта энергии вдоль побережий и на шельфе акваторий обусловили локализацию новых сильных ЭМ полей, опасных для жизни животных.

Строительство мощных нефтедобывающих подводных сооружений стало опасным не только с точки зрения изъятия литосферных энергоресурсов в непредсказуемом количестве и объеме, но и с точки зрения высокого риска аварийности технологического оборудования (например, катастрофическая авария на подводной буровой платформе в Мексиканском заливе и долговременный разлив нефти из скважины в 2010г.). В перспективе — гибель nekтона и бентоса в регионе. Таковы антропогенные экологические последствия бурного развития современных технических достижений, они оборачиваются человечеству потерей качества природной среды и утратой ценных биологических пищевых ресурсов гидросферы в целом.

*Данный тезис базируется на авторском предложении о введении терминологически расширенное понятие “квазистационарное электрическое поле”,

Проведение экспериментально-аналитического исследования влияния искусственной ионизации рыб в установке с напряжением 20 ÷ 60 кВ (аналог “люстры Чижевского”). Необходимо проверить утверждение, что в таких условиях рыбы растут в 2 раза быстрее (Япония).

Безусловно, в этом кратком обзоре нет возможности рассмотреть всё многообразие проблем физиологии и в частности ихтиологии, но интересно отметить, что всемирно известный психоаналитик Зигмунд Фрейд три первые свои исследовательские работы посвятил рыбам [Томас Д.М. Вкушая Павлову. М.: Эксмо, 2003. 368 с.].

Задумываясь над вопросом об отношении к экологической роли электромагнетизма в биосфере, убеждаешься в справедливости высказывания Н. Макиавелли о том, что “тяжелую болезнь в начале легко вылечить, но трудно распознать. Когда же она усилилась, ее легче распознать, но уже труднее вылечить”. А от этого напрямую зависит здоровье сограждан, которое, по словам А. Шопенгауэра, на девять десятых обеспечивает наше счастье.

Abstract

Present monograph is devoted to the ecological role of electrophysical processes in natural-and-technical objects and systems.

The author's exploratory development and theoretical evidence, allowing to show up and to make scientific ground for mutual interaction of electric and magnetic effects, which follow the law of motion for macroscopic objects and laws of physical kinetics, has been generalized.

The interconnections and mutual interaction of substances, being in various aggregative states, with surroundings, conditioning metathetical energetic processes have been observed on samples of water ecosystems and abiotic environment of large inland bodies, laboratory aquarium physical models, extensive urbanized terrains and indoor educational-and-practical spaces, modern electric and electronic devices.

Natural environment is saturated with nonionizing electromagnetic radiation. Though, plants, animals and man have been adapted during their evolution to the action of the part of radiation spectrum. It is hard foreseen the aftereffects of such selective and bioactive effect of the oscillation of electromagnetic field and radiation of differently generated energy sources, especially anthropospheric ones. Therefore it is necessary an introduction of the latest methods and technologies for the biosphere's protection.

The book's content is intended for specialists and students researching biospheric processes.

In this publication message carries a wealth of information concerning in modern knowledge about environment electromagnetics and ecological condition of living Nature, people, animals.

The structure of monograph below is a summary.

I. Geomagnetism and solar-earth communication system

1. Electromagnetic field of the Earth and its role in biosphere

1.1. Geomagnetism and biosphere of the Earth

1.2. The elements of geomagnetic field

1.3. Space-temporal differentia of geomagnetics

1.4. The geomagnetic charts

2. Evolutionary and ontogenetic role of geomagnetism

3. Electromagnetic fields in solar-earth communication system: dynamic processes and the response of ecosystems

3.1. Electromagnetic and corpuscular radiation of the Sun

3.2. Inter-planetary magnetic fields and its connection with geomagnetic field

3.3. Solar activity and its appearances on the Earth

The destination of Part I

The aim of this part is to demonstrate modern scientific achievements in the branch of cognition of geocosmic electromagnetic phenomena and show their evolutionary significance in biosphere of the Earth.

The aspects of fundamental significance of Part I

The authentic of estimation ecological state of ground resources and the perspective of conservation of life on the Earth are possible only under complete connaissance and understanding of mechanisms determining the essence of energetic interaction between Earth-Environment Space systems. However, electromagnetic interaction plays the main role between the Sun (nearest star to the Earth), interplanetary magnetic field and electromagnetism of the Earth.

The aspects of applied adoption fundamental research results

For example, the regular inter-governmental provision of the non-hinderance heliogeophysical information concerning Cosmic Weather in boundaries of magnetosphere of the Earth:

- Increasing of the reliability and examination of meteorological and climatic prognoses (long-term and short-term for different branches of human activity).
- Providing guarantee of safety for space shuttle's flights in the earth's magnetosphere and also for aviation in the stratosphere.
- Wireless safety within the ionosphere.
- Safety and energetic systems persistence providing on the base of Cosmic Weather prognoses (particularly the increasing of the universal magnetic storms (intensity more 1000 nT) prognoses punctuality), etc.
- Providing of the medical dispensaries offices by correct prognoses through service of the Sun-Earth communications systems.

Similar information is permissible to estimate the perspective of geomagnetic disturbances for lowering of a risk of perishes of human suffering by lost vasculocardiac pathology.

Modern condition of the scientific projects adoption for resolution of applied tasks of planetary importance:

- The state services of the Sun-Earth communications are created in the leading developed countries – Russia, USA, Great Britain, Norway, Japan, France, and China. You can get information at the International Centre of cosmic data and also through the Internet.

- The state services (data bank) engaged in geomagnetism are founded Russia, USA, Great Britain, Japan) to provide navigation demands of the biggest maritime states. Also it is used to provide magnetotelluric methods of soundage of large water area for researching mineral resources on shelf and in the great depth (abyssal).

- The new scientific-applied international association for electromagnetic were arose (EBEA, BEMS, CDRH, CTIA, etc).

They are employing new form of knowledge distribution , realizing the exchange of information for practical aims by means of the holding international meeting in the branch of ecological activity.

II. Electrophysics of aquatic landscape and the methods of its research

1. Electromagnetic phenomena in hydrosphere

- 1.1. Electrophysics of water area in system of natural exploration

- 1.2. Macroscopic electromagnetic characteristics of water body (water medium)

- 1.3. Natural electric and magnetic fields in the basin

- 1.4. The rhythmical fluctuations of electric field in water

2. The methods and facilities of the estimations of ecological condition hydrophysic ecosystems

- 2.1. “Electropolemetry” is a new perspective method of the water reservoirs exploration (this electrometric method is a similar to potentiometry)

- 2.2. Measuring electrode systems

- 2.3. The sounding (or sondage) installation and their destination

- 2.4. The metrological estimation of electrical sounds, the analyse of hindrances and methods of their decrease at the field conditions

- 2.5. The principal facilities of aquatoriafull-scale measurement by potentiometry methods

- 2.6. At the latest means of the measurer of electric and magnetic fields

3. The simulation of electrokinetic phenomena’s in laboratory conditions

- 3.1. Oscillatory waves, currents, movement of alluvium and sedimentation in channels

- 3.2. The subaquatic filtration in reservoirs

- 3.3. The management of solid-phase additions movement in aqueous electrolytes by action of magnetic fields at flat thin-layer reservoir model

4. Experimental research results of functional geophysical areas (zones) in water basins

- 4.1. Structure of basin normal geophysical field

- 4.2. The complex electrophysical estimation of ecological condition in water basin

- 4.3. The Background Geomagnetic and telluric fields
- 4.4. Coastal area, bottom relief, clastic deposits – stationary factors of disturbance of electric fields in water bodies
- 4.5. Hydrodynamic fields and their contribution in telluric oscillations (vibrations)
- 4.6. Vorticity of electric fields in water trophogenous layers
- 5. Ecologic and physiologic role of geomagnetism
- 5.1. Electrokinetic's phenomena in bioactive functional zone of basins
- 5.2. Pelagic hydrobionts – space-time resource of aqueous electrokinetic fields
- 5.3. Magnetobiological conception of movement activity and vertical planktonic migrations
- 5.4. Electromagnetic characteristics of habitat and physiological reactions of aquatic animals

The destination of Part II

The author concentrated his primary attention for discovering natural regularity of physical processes in water basin **during of many years research**. Particularly, this established in branch of interaction electromagnetic forces in solar-earth communication system within limits of spectrum non-ionized and weak irradiance.

In this part author demonstrates the unity of electrodynamical law within boundary – from planetary scales to local phenomena in geophysical zones as in large aquatoria (oceans, seas) so as in terrestrial basin (lakes, rivers).

The real perception by biosphere of interaction of electromagnetic fields of planetary and local scales was shown.

The aspects of fundamental significance

It is necessary to stress that electromagnetic methods for ecological aims in water are taken in a new view. However, the earlier realized geophysical investigation were concerning the distinct problems of electrophysical underwater resources (oil, gas, manganese concretion et al and measurement stationary large see currents, etc).

Complex ecological program and methods are considered in cycle of the knowledge about earth biospheric response reaction to electromagnetic action in nature and technosphere. These actions are alterations of steady evolutionary development of biogeozenoses, therefore the cited above methods are like the fundamental and new point of view on nature at the whole.

Only knowledge of regularity that formed space-time variable of macroscopically water characteristics, their sources of inhomogeneity

and dynamics electric and magnetic properties just so in open aquaecosystems, is a guarantee for perspective of applied usage of scientific results in the future.

Aspects of applied adoption of fundamental research results

- In the present form the electrometric methods for aquatories had its origin since twenty years with active participation of the author. The bases contain the methods and facilities of electrometry on aquatories, metrological demands and prosperity of accuracy measuring results, etc.

- This devise is dedicated to the questions of the modeling electrokinetic phenomena in laboratory conditions (hydromechanic movements, manipulation with solid-state and soliquid insertion, behavior and activity of watery organisms under artificially electromagnetic fields action). Besides, it has important significant for education.

The scientific fundamental developments as the object applied sense

Chapter 4 and 5 contain the typical fundamentals which have ecosystem's electrophysic properties, so as these are the materials for future applied aims. For instance, hydromechanical fields, shoreline, bottom relief as the hindrances for practical investigations.

Chapter 4 forms full information about the latest experimental results of coastal and deep-water landscapes structure, the alteration of electrical conductivity properties of lakes and seas water mass, electric fields within currents in large basin.

The author gives a base about a necessity to introduce a conception — “*the generalization criterion of stationary geoelectric field structure of terrestrial water basin*”. This is necessary because electric field has the constantly existed fluctuated component, connected with unstationary natural processes and own earth's oscillations. The unique data is represented. They have reported evidence from **EMFs** measurements that energetic oscillation spectrum is characterized by the regulation distribution: electric fields are generated by the hydrodynamic sources (wave and vortex processes, turbulent pulsations) and meteorological conditions in transient layer “air-water”.

In *Chapter 5* the author discusses ecological-physiological role of geomagnetism. Now there is the most important problem of environmental conservation, including the aquatories of the Earth. It may be decided by usage of exploring results electromagnetic interactions between habitats and living organisms. The base of these interactions are determined by

EMFs of water ecosystems together with contacted **EMFs** of atmosphere and lithosphere.

That is why electric fields of hydrobionts (protozoa, zooplankton, fishes), their receptivity to hydrophysical fields of fresh-water and marine organism's ecosystems are studied intensively during last 20 years. Physiology pays great attention to the role of geophysical factors responsible for evolution electrosensoral organs, behavior and neuronal reactions of different types of biota. The considerable successes are achieving on researching of fishes electrophysiology.

So, in this chapter objective has been achieved: the correlation connection is opened between bioelectric planktonic field and geomagnetic field and its rhythms; has been shown, that hydrobionts sense low electric and magnetic fields in limit of 5 microvolt and 5-10 nanotesla.

This is the magnitudes commensurable with the stationary electric aquatic field under conditionally.

III. Magnetobiological phenomena and behavior of ecosystems

1. Physiological adjustment of ecosystems in natural condition
 - 1.1. Electromagnetic irradiance of biological origination
 - 1.2. The perception of non-stationary signal-informative weak **EMFs** by animals and plants
 - 1.3. Electromagnetic environment and Man
 - 1.4. Laboratory and clinical observations upon the reactions of living systems including action of **EMFs**
2. Experimental simulation of weak external **EMFs** action upon biological and physical-chemical systems
 - 2.1. Aquatic ecosystems as a three-dimensional test-model
 - 2.2. Methodical approach for research
 - 2.3. Discussion of the experimental evidence
3. Decisive role of modern electromagnetic methods in health organization and development of new biotechnologies
 - 3.1. The adjustment of physiological functions in animal and mankind population
 - 3.2. Electromagnetic radiation in medical problems
 - 3.3. The development adaptation of organisms under **EMFs** action:
 - neurocybernetics
 - biotic inverse motion processes in living organisms
 - the extremely high-frequency radiation for clinic application

The destination of Part III

The modern requires to ecological specialist are caused by necessary of elaborating full educational discipline "Electromagnetic ecology". This

training curriculum was formed by the author and have been reading since 1995 year in Saint-Petersburg State Polytechnic University. The principal aim of these lectures lay in development of knowledge about role of technical sources as new and often dangerous factors of environment **EMFs**.

The aspects of fundamental significance of Part III

Analyze of experimental scientific research findings for open ecosystems (for example, aquatic) has shown necessity of intelligible internal processes in surroundings. They are determined by the complex of physic-chemical, biological and ecological phenomena. Therefore, the problems of the earth biosphere electrophysics have not been studied by. But different investigation were carried out hydrosphere, atmosphere, biophysics, et al. The importance and essential in this investigations were deciphered on many conferences, congresses, etc. Particularly the problems of cosmic, terrestrial and anthropogenetic action **EMFs** on biosphere in the whole and man is among other things. As a result of these undertakings the manifold and multi-purpose researching are erected. They concern of electromagnetic non-ionized radiation in environment, electromagnetic properties of physical-chemical and biological systems. There were discovered a solution of complicated problems of interaction between the Earth and Cosmic Space, also planetary living organisms with non-living constituents.

Now a new equipment are constructed to measure weak **EM** signals in extremely low frequency range of oscillations (as for example, rocket measurements). This results taking account because of importance for understanding of planetary and local geophysical processes.

The aspects of applied promoting the scientific and technical advances

In the mid-nineteenth century new electromagnetic methods of environmental investigations received the wide usage in practice. The **EMFs** is the objective natural factor, which plays an important role in formation abiotic condition in water basins and influence to current processes in biosphere. Because of this after industrial revolution all natural evolution is changing. Henceforward electromagnetic fields naturally occurring is turning-point, and may be applied for instrumental research of dynamical environmental ecological condition. Among other things there is a measure of technogenical influence on destructional ecosystems. The investigation of the changeability in ecosystems at a sacrifice electromagnetic action permits to receive the informations about the causes theirs restructure in evolutionary process. Also it is possible to estimate brief-periodical external human impact on the environment (affects influences). Until the present time the relative weakness of natural

radiation as compared with the technogenic sources of distortion and disturbance them essentially made difficult its investigation and output from the whole spectrum of fluctuations. However, modern electrophysical device which measure with high-strung permit to investigate a subtle difference between the matter and a surrounding **EMFs**.

The author considers problems of ecological electrogenees using as example large (deep-water) and little (shallow-water) freshwater lakes also marine aquatoria. He considers that creative and destructive human activity reflects in lakes as in mirror. The lake systems may be a source of information about: where and how moves the active human interference to environments. Apart from, the problems of existent ground animals and mankind which undergo action of **EMFs** are analysed.

IV. Anthroposphere and nonionizing electromagnetic radiation

1. The modern understanding of ecological role a technospherical sources of electromagnetic energy

1.1. Some basin ideas that enter into the treatment of biological danger of electromagnetic field energy

1.2. The living systems in condition of inevitable surplus **EM** energy from industrial category objects

1.3. Biological shielding from the combined action **EMFs** and variations of geomagnetic field under fast shifting

1.4. New ecological problem arises as strengtly **EMFs** have a profound effect when “non-declared function an uranium enrichment by electromagnetic methods” use

2. Ecological vulnerability of aquatoria and continuous exposure to the hydrobionts by environment electromagnetic fields

2.1. There is a little information on problems of clean water

2.2. The electrical field of heterogeneous water masses containing the pollutants

2.3. The means of water quality according its electrophysical indicators

2.4. The ecological state of lakes in North-West-Russian region according to electrometric control

2.5. Primary results which unknown to readers were promoting on aquatoria for solution to navigation and scientific tasks

2.6. Perspective of development and introducing of electrometric instruments and research for large cistern and new technical invention

3. Biogeocenosis of urbanized territories and affords a high degree of safety for population

3.1. About an influence of town on local changeable of magnetic field an extremely low frequency range

3.2. Methods and estimation of changeable space-time structure of **EMFs** in urbanic conditions

3.3. Moral-legal (juristical) problems of anthroposphere: the introducing of technical **EMFs** equipment into life of biocenosis

The destination of Part IV

In this part the author presents the totality of experience about practical usage of a new methods in different aspects of the environmental protection from technical contamination **EMFs** sources.

It is connected with an essential preliminary to the scientific bases of control and the rational water resources usage and with the elaboration. This new development are both applied to electrophysical characteristics of environment. It is determined by a new principles and methodical possibilities under the promotion of ecological monitoring for researching aquatories. It may be realized as in scientific investigations and in essentially for practical purposes. Particularly it is important to remark that the electrometry methods have major advantages over other methods, that is the velocity of measure and the assessment of results. The monitoring of continental lakes was permitted appraisal of their ecological state and shown the role of electrokinetic phenomena in the lowering of self-purified ability in water basin. There results are accepted under the preparation of directing documents regarding preserve of lakes.

From this prerequisite in division are considered:

- estimation of ecosystems stability to **EMFs** action;
- electric field of heterogeneous water masses containing artificial pollution substance;
- way of control of water quality in according to its electrophysical indicators;
- ecological condition of lakes in the North-West of Russia under the results of electrometric control; the installations and mechanisms for the formation of stationary and fluctuated electric fields in water;
- protection systems for natural and industrial objects from **EMFs** radiation;
- ecological dosimetry and the account of the electromagnetic influence;
- modern demands to give new insight into knowledge of electromagnetic action on environment and optimum protection of Man.

According to author's opinion this part could be aimed for young future ecologist to elaborate different problems of the environment control. This may be: the water and water resource protection, the biom close from degradation, the compatibility of natural and technical generation of **EMFs** in biosphere, development of new parameters in account of electromagnetic influence when new equipment are produce, etc.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК*

1. **Абрамова Л.М., Бондаренко А.Л., Новыш В.В.** Методы измерения электрического поля, индуцируемого морскими волнами // Морское магнитотеллурическое зондирование / ИЗМИР РАН. М., 1978. С. 34–38.
2. **Агасян П.К., Николаева Е.Р.** Основы электрических методов анализа (потенциометрический метод): Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1986. 196 с.
3. **Александров В.В.** Расчет электропроводности морской воды на электронно-вычислительной машине ЭВ-80 // Записки по гидрографии. Л.: Изд-во Гидрогр. Упр. МО СССР, 1966. № 3. С. 64–66.
4. **Александров В.В.** Электропроводность морской воды – один из важнейших параметров, определяющих физические процессы в океане // Записки по гидрографии. Л.: Изд-во Гидрогр. Упр. МО СССР, 1967. № 2, 3. С. 116–121.
5. **Александров В.В.** Наблюдения электрического и магнитного полей в прибрежной северо-западной части Ладожского озера // Вести ЛГУ. География. 1968. № 18, вып. 3. С. 131–136.
6. **Александров В.В.** Естественное электрическое поле в озерах // Гидрофизические исследования озер. Л.: Наука, 1973. С. 5–156.
7. **Александров В.В.** Опыт определения границ зон загрязнения в озерах // Изв. Всесоюз. географ. об-ва. 1973. Т. 105, вып. 3. С. 267–274.
8. **Александров В.В.** Электрическое поле озер как источник информации о диффузионно-адсорбционных и гидродинамических явлениях // Научно-техн. бюл. по агрономич. физике / Агрофизич. НИИ ВАСХНИЛ. Л., 1977. № 30. С. 41–43.
9. **Александров В.В.** Электрическое взаимодействие поляризованных водных масс и зоопланктона в водоемах // Гидробиологический журнал. 1980. Т. 16, № 3. С. 13–19.
10. **Александров В.В.** О вихревых гидродинамических флуктуациях электрического поля в Ладожском озере // Проблемы морских электромагнитных исследований / ИЗМИРАН. М., 1980. С. 183–190.
11. **Александров В.В.** Гидродинамические источники флуктуаций электрического поля в озерах // Термодинамические процессы в глубоких озерах. Л.: Наука, 1981. С. 200–224.
12. **Александров В.В.** Электрофизика пресных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 184 с.
13. **Александров В.В.** Поведенческие и ориентационные физиологические реакции высших гидробионтов в условиях изменения фоновых

*Новейшие публикации см. во введении.

электромагнитных характеристик среды обитания // Экология моря. 1990. Вып. 37. С. 64–72.

14. **Александров В.В.** Электрическое поле акваторий и его биологическое значение // Современные проблемы изучения и сохранения биосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. Т. 3. С. 133–146.

15. **Александров В.В.** Электрическое поле двигательной активности рыб и его корреляция с геомагнитными ритмами // Тез. докл. 3-го Международ. симпозиума “Корреляции биологических и физико-химических процессов с солнечной активностью и другими факторами окружающей среды” / ИТЭБ. Пушино, 1993. С. 9–10. (русс., англ.).

16. **Александров В.В.** Влияние геомагнитных и электрических полей на экологическую физиологию водных организмов // Третья научно-технич. конф. “Электромагнитная совместимость технических средств” 8–10.09.94. Тезисы докладов. СПб., 1994. С. 98–100.

17. **Александров В.В.** Электрокинетические поля гидробионтов. Биоритмы локомоторной активности. Связь с геомагнетизмом // Биофизика. 1995. Т. 40, вып. 4. С. 771–777.

18. **Александров В.В.** Закономерности распределения энергии турбулентных пульсации в биоактивных слоях акваторий // Научно-практич. конф. СПбГТУ–1997. Секция экологии и энергетики. С. 79–80.

19. **Александров В.В.** Индикация гидродинамической турбулентности в озерах электрополюметрическим методом // Энергетика, гидротехника: Сб. науч. тр. СПбГТУ. № 475. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. С. 153–164.

20. **Александров В.В.** Физиология поведения водных организмов и электромагнетизм среды обитания // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы научно-технич. конф. 25–26 июня 1998. СПб., 1998. С. 167–169.

21. **Александров В.В.** Поведенческие реакции водных организмов как отражение геокосмических связей в биосфере // Научные чтения “Белые ночи”. Секция “Электромагнитная экология” / МАНЭБ. 1–3 июня 1999 г. СПб., 1999. С. 9–13.

22. **Александров В.В.** Поведенческие реакции водных организмов как отражение геокосмических связей в биосфере // Международная академия. Вестник № 1–2С. Январь 2000 г. СПб.: Изд-во МАИСУ, 2000. С. 35–36.

23. **Александров В.В.** Электромагнетизм среды обитания и поведение водных организмов // Пятьдесят лет развития кибернетики: Тр. конф. 5–7 октября 1999 г. СПб., 1999. С. 95–96.

24. **Александров В.В., Александров Д.В.** Учет влияния судна на структуру естественного электрического поля водного объекта // Гидрофизические исследования озер. Л.: Наука, 1973. С. 104–115.

25. Поведение аквариумных рыб в поле электромагнитного излучения сотовых телефонов / В.В. Александров, Б.В. Александров, И.Н. Серов, Д.А. Уставников // Тр. III Междунар. конгресса “Слабые и сверхслабые магнитные поля и излучения в биологии и медицине”. Санкт-Петербург, 1–4 июля 2003 г. С. 119.

26. Метод регистрации двигательной активности рыб с применением фрактального анализа видеозаписей / В.В. Александров, Б.В. Александров,

Ю.М. Балагула, И.Н. Серов, Д.А. Уставников // V Междунар. симпозиум по электромагнитной экологии: Сб. научных докл. ЭМС–2003, 16–19 сентября 2003 г. СПб: Изд-во СПбГЭТИ, 2003. С. 411–414.

27. Магнитофизиологические принципы контроля поведенческих реакций водных организмов при стрессе / В.В. Александров, Д.В. Александров, Е.С. Слуцкий, Д.А. Уставников // Вестник МАНЭБ. 2001. № 3 (39). С. 5–19.

28. Оценка устойчивости водных организмов к действию переменных электрических полей промышленной частоты / В.В. Александров, Д.В. Александров, М.П. Федоров, И.О. Шилов // Четвертая Российская научно-технич. конф. “Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов. ЭМС-96”. СПб., 1996. С. 541–543.

29. Александров В.В., Вотяков А.П., Скорняков В.П., и др. А. с. № 64302. 1972.

30. Александров В.В., Гак Е.З. Природа вариаций естественных электрических и магнитных полей в океанах, морях и водоемах суши // Электромагнитные явления в природных водах. Л.: Гидрометеоздат, 1984. С. 91–99.

31. Александров В.В., Гак Е.З., Гиндия Н.К. Применение магнитных полей для моделирования процессов распространения примесей в водоемах // Исследования в области действия электромагнитных полей на растения и другие биологические объекты / Агрофизич. НИИ ВАСХНИЛ. Л., 1980. № 41, вып. 3. С. 41–46.

32. Александров В.В., Григорьян Р.А., Хорьков А.Д. Двигательная активность молоди карпа после воздействия искусственного электрического поля и высокой температуры // Тез. докл. X совещ. по эволюционной физиологии, посвященного памяти академика Л.А. Орбели. Л.: Наука, 1990. С. 132–133.

33. Александров В.В., Зайцев Л.В. Естественное электрическое поле озер как показатель загрязнения воды посторонними примесями // Изв. Всесоюз. геогр. об-ва. 1977. Т. 109, вып. 3. С. 226–237.

34. Александров В.В., Зайцев Л.В. Теоретические основы изменчивости электрического поля в озерах // Изменчивость гидрофизических полей в озерах. Л.: Наука, 1978. С. 176–276.

35. Александров В.В., Кутикова Л.А. Электрический мониторинг динамики зоопланктона озера // Тез. докл. 1-го Всесоюз. биофизич. съезда. М.: Наука, 1982. Т. 4. С. 77.

36. Александров В.В., Кутикова Л.А. Флуктуации естественных электромагнитных полей и ритмы суточных миграций зоопланктона в пресной воде // Биофизика. 1984. Т. 29, вып. 6. С. 1025–1030.

37. Александров В.В., Кутикова Л.А. Об элементах связи суточной миграции озерного зоопланктона с флуктуациями электрического и магнитного полей Земли // Гидробиологический журнал. 1985. Т. 21, № 4. С. 17–29.

38. Электрическая индикация пространственно-временных неоднородностей трофогенного слоя пресноводных озер / В.В. Александров, Л.А. Кутикова, И.П. Николаева и др // Электрические свойства гидробионтов. М.: Наука, 1986. С. 165–198.

39. Возможно ли лабораторное моделирование поведенческого адаптационного синдрома у водных организмов электромагнитными методами? / В.В. Александров, Д.А. Уставников, Д.В. Александров и др. // Научные чтения “Белые ночи”. Секция “Электромагнитная экология” / МАНЭБ. 1–3 июня 2000 г. СПб., 2000. С. 13–24.

40. Стресс гидробионтов при кратковременном индуцировании комбинированных магнитных полей / В.В. Александров, Д.А. Уставников, Г.В. Соколов и др. // II Междунар. конгресс “Слабые и сверхслабые магнитные поля и излучения в биологии и медицине”: Тезисы. Санкт-Петербург, 3–7 июля 2000 г. С. 68–69.

41. **Александров В.В., Уставников Д.А., Александров Д.В.** Физиологическое воздействие электромагнитного поля для получения ответных реакций подопытных животных (рыб) в лабораторных условиях // Тр. II Междунар. научно-практич. конф. “Информационные технологии в моделировании и управлении”. 20–22 июня 2000 г. Санкт-Петербург. СПб: Изд-во СПбГТУ, 2000. С. 36–39.

42. Влияние городских условий на локальные изменения магнитного поля ультранизкочастотного диапазона / В.В. Александров, Д.А. Уставников, П.М. Воронов, В.И. Россиянов. // Сб. докл. шестой Российской научно-технич. конф. “Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов. ЭМС–2000”. СПб., 2000. С. 445–451.

43. Моделирование поведенческих реакций водных организмов электромагнитными методами / В.В. Александров, Д.А. Уставников, Е.С. Слуцкий и др. // Там же. С. 573–582.

44. **Александров В.В., Федоров М.П.** Геофизика акваландшафта как фундаментальный элемент в проблеме совместимости экологии и энергетики // Сб. докл. пятой Российской научно-технич. конф. “Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов. ЭМС–98.” СПб., 1998. С. 357–364.

45. **Александров В.В., Федоров М.П.** Опасно ли действие слабых электрических и магнитных полей крайне низкочастотного диапазона на живые организмы? // Научно-практич. конф. СПбГТУ–1997. Секция экологии и энергетики. С. 66–68.

46. **Александров В.В., Федоров М.П.** Междисциплинарное направление в учебном процессе “Электрофизический мониторинг природных экосистем” // Докл. III Всероссийской научно-практич. конф. с международным участием “Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности”. 16–18 июня 1998. СПб., 1998. Т. I. С. 236–241.

47. **Александров В.В., Юровский Ю.Г.** Об электрометрическом определении параметров субаквальных источников // Гидрофизические исследования озер. Л.: Наука, 1973. С. 151–156.

48. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. / М.С. Александров, З.М. Бакленева, Н.Д. Гладштейн и др. М.: Наука, 1972. 196 с.

49. **Альпин Л.М.** Теория поля. М.: Недра, 1966. 384 с.

50. **Андрианов Ю.Н., Броун Г.Р., Ильинский О.Б.** Физиология электрорецепторов рыб // Физиол. журн. СССР. 1979. Т. 65, № 6. С. 785–800.

51. Докл. АН СССР. / Анисимов С.В., Гохберг М.Б., Иванов Е.А. и др. // 1985. Т. 281, № 3.

52. Влияние светового режима и электромагнитных полей на канцерогенез молочных желез у самок крыс / В.Н. Анисимов, О.В. Жукова и др. // Биофизика. 1996. Т. 41, вып. 4. С. 807–814.

53. **Аполлонский С.М. и др.** // Научные чтения “Белые ночи”: Докл. междунар. экологического симпозиума. СПб., 2002. С. 24–36.
54. **Арманд Д.Л.** Географическая среда и рациональное использование природных ресурсов. М.: Наука, 1983. 238 с.
55. **Афонина В.М. и др.** Влияние экранирования ЭМП на продолжительность жизни мух-дрозофил // Влияние естественных и слабых искусственных магнитных полей на биологические объекты. Белград, 1973. С. 83–85.
56. Электрическое обезоживание шлам-лигнина и активного ила Байкальского ЦБК / В.А. Бабкин, Е.Н. Сердобольская, О.Л. Алексеев, А.В. Слаутин, Ю.П. Рулев, О.Е. Голубкин // Тез. докл. Всесоюз. конф. “Электрохимия и охрана окружающей среды”. Иркутск, 1984. С. 15–16.
57. **Баньков В.И., Макарова Н.И., Николаев Э.Н.** Низкочастотные импульсные сложномодулированные электромагнитные поля в медицине и биологии. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 1992.
58. **Барон В.Д.** Электрогенераторные системы рыб (эволюция и механизмы адаптации). М.: Наука, 1982. 112 с.
59. **Барон В.Д., Протасов В.Р., Саблин-Яворский А.Д.** О квазипостоянном электрическом поле вблизи рыб // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238, № 3. С. 713–721.
60. **Барон В.Д., Протасов В.Р., Саблин-Яворский А.Д.** Структура постоянных электрических полей вблизи пресноводных рыб // Новое в гидробионике. М.: Наука, 1980. С. 5–7.
61. **Баскаков В.К.** К вопросу измерения скорости в гидродинамических исследованиях // Метрология в гидродинамических измерениях М.: Изд-во ВНИИФТРИ, 1976. Вып. 28(58). С. 70–73.
62. **Басов В.М.** Электрические поля пресноводных неэлектрических рыб. М.: Наука, 1985. 72 с.
63. **Бауэр Э.С.** Теоретическая биология / ВИЭМ. М.–Л., 1935. 205 с.
64. Безопасность деятельности: Энциклопедич. словарь. СПб.: ЛИК, 2003. 502 с.
65. **Белишева Н.К., Попов А.Н.** Динамика морфофункционального состояния клеточных культур при вариациях геомагнитного поля в высоких широтах // Биофизика. 1995. Т. 40, вып. 4. С. 755–764.
66. Оценка медико-биологических эффектов низкочастотных вариаций геомагнитного поля в высоких широтах / Н.К. Белишева, А.Н. Попов, К.С. Осипов и др. // Международный симпозиум “Корреляции биологических и физико-химических процессов с солнечной активностью и другими факторами окружающей среды”: Тезисы докл. Пушино: Наука ИТЭБ, 1993. С. 15–16.
67. Качественная и количественная оценка воздействия вариаций геомагнитного поля на функциональное состояние мозга человека / Н.К. Белишева, А.Н. Попов, Н.В. Петухова и др. // Биофизика. 1995. Т. 40, вып. 5. С. 1005–1012.
68. **Белов К.П., Бочкарев Н.Т.** Магнетизм на Земле и в Космосе. М.: Наука, 1985. 192 с.
69. **Беляев В.С., Озмидов Р.В., Пыжевич М.Л.** Эмпирические законы распределения значений одномерных спектральных плотностей пульсаций скорости и электропроводности в океане // Океанология. 1974. Т. 14, вып. 5. С. 802–805.

70. **Бенькова Н.П.** Магнитные бури и система электрических токов // Тр. НИИ Земного магнетизма. Л.: Гидрометеиздат, 1958. Вып. 10 (20). 158 с.
71. **Бенькова Н.П., Долгинов Ш.Ш.** Геомагнитное поле: исследование внутренних и внешних источников со спутников // Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли. М.: Наука, 1989. С. 233–246.
72. **Бессонов Б.И., Буцук С.В., Ясенецкий Г.Н.** Изучение молекулярных механизмов генерирования электрических полей постоянного тока кожей подкаменщика *Myoxocephalus brandtii* // Возможности использования физико-химических раздражителей для управления поведением рыб. М.: Наука, 1983. С. 18–21.
73. Биогенный магнетит и магниторецепция. Новое в биомагнетизме: В 2 т. / Пер. с англ.; под ред. Дж. Киршвинка, Д. Джонса, Б. Мак-Фаддена. М.: Мир, 1989. 878 с.
74. Биологическая обратная связь. 2000. № 1.
75. Биологический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1989. 864 с.
76. Биофизика. 1981. Т. 26, № 4; 1982. Т. 27, № 3; 1991. Т. 36, № 5; 1992. Т. 37, № 4; 1995. Т. 40, № 4; 1996. Т. 41, № 3; Т. 41, № 4; 1998. Т. 43, № 5; Т. 44, № 2; 1999; 2000; 2001. Т. 45, № 5; Т. 46, № 3; 2004. Т. 49, № 1.
77. **Блиох П.В., Николаенко А.П., Филиппов Ю.Ф.** Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля—ионосфера // Киев: Наук. думка, 1977. 200 с.
78. **Богородский М.М.** Статическая барочувствительность измерительных электродов и оценка погрешностей при измерении электрических полей волнения // Фундаментальные проблемы морских электромагнитных исследований / ИЗМИРАН. М., 1980. С. 78–91.
79. **Богородский В.В., Гусев А.В., Хохлов Г.П.** Физика пресноводного льда. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 227 с.
80. Радиолокационное зондирование пресных озер / В.В. Богородский, Г.В. Трепов, Б.А. Федоров, Г.П. Хохлов // Водные ресурсы. 1974. № 5. С. 178–184.
81. Опыт наблюдения и интерпретации волновых сигналов, регистрируемых донной электрометрической установкой на мелководье / М.М. Богородский, С.М. Коротаев, А.И. Лепицкий и др. // Проблемы космической электродинамики / ИЗМИРАН. М., 1981. С. 208–213; 214–220.
82. **Богуславский Л.И., Ягужинский Л.С.** Биоэлектрохимические явления и граница раздела фаз // Электросинтез и биоэлектрохимия. М.: Наука, 1975. С. 305–340.
83. Большая советская энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1974. Т. 16. С. 61.
84. Большой энциклопедический словарь. 1998. 1456 с.
85. Результаты экспериментальных исследований электромагнитных полей, индуцируемых морскими ветровыми волнами и зыбью / А.Л. Бондаренко, В.С. Бычков, С.Г. Гринфельдт и др. // Морское магнитотеллурическое зондирование / ИЗМИРАН. М., 1978. С. 69–70.
86. **Бондаренко Н.Ф., Гак Е.З.** Электромагнитные явления в природных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 152 с.

87. **Бондаренко Н.Ф., Гак М.З.** Применение магнитогидродинамических эффектов в электролитах для моделирования вихревых гидродинамических процессов // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14, № 2. С. 207–212.

88. **Бочкарев Н.Г.** Магнитные поля в космосе. М.: Наука, 1985.

89. Влияние геомагнитных возмущений на различные медицинские патологии (Москва, 1979–1981) / Т.К. Бреус, Л.И. Дорман, Н. Иючи и др. // Международный симпозиум “Корреляции биологических и физико-химических процессов с солнечной активностью и другими факторами окружающей среды”: Тезисы докл. Пушино: Наука ИТЭБ. 1993. С. 35–36.

90. **Бреус Т.К., Халберг Ф., Корнелиссен Ж.** Влияние солнечной активности на физиологические ритмы биологических систем // Биофизика. 1995. Т. 10, вып. 4. С. 737–748.

91. **Броун Г.Р., Ильинский О.Б., Волкова Н.К.** Изучение некоторых свойств электрорецепторных структур боковой линии черноморских скатов // Физиол. журн. СССР. 1972. Т. 58. с. 1499–1505.

92. Восприятие магнитного поля рецепторами ампул Лоренцини черноморских скатов / Г.Р. Броун, О.Б. Ильинский, В.М. Муравейко и др. // Физиол. журн. СССР. 1977. Т. 63. С. 232–238.

93. Восприятие электрорецепторами ампул Лоренцини акулковых рыб теллурических токов, обусловленных геомагнитными вариациями / Г.Р. Броун, О.Б. Ильинский, В.М. Муравейко и др. // Докл. АН СССР. 1978. Т. 241. С. 1228–1231.

94. **Броун Г.Р., Ильинский О.Б.** Физиология электрорецепторов. Л.: Наука, 1984. 247 с.

95. **Броун Г.Р., Муравейко В.М.** Восприятие магнитного поля ампулами Лоренцини скатов // Сигнализация и поведение морских рыб. Л.: Наука, 1980. С. 39–64.

96. **Букин В.А.** Акустическое исследование гидратации нуклеиновых оснований в водных растворах: анализ аномалий воды в гидратной оболочке // Биофизика. 1988. Т. XXXIII, вып. 6. С. 926–931

97. **Вернадский В.И.** Биосфера. Л., 1926.

99. **Вернадский В.И.** Биосфера. Л., 1967.

100. **Вернадский В.И.** Размышления натуралиста: В 2 кн. Кн. 2: Научная мысль как планетное явление. М.: Наука, 1977. 191 с.

101. **Вернов С.Н., Куликов А.М.** // Докл. АН СССР. 1948. № 6.

102. **Вернов С.Н. и др.** // Докл. АН СССР. 1952. № 3.

103. Радиодистанционные измерения внутренних волн с борта судна / В.М. Веселов, А.А. Давыдов, В.А. Скачков и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20, № 3. С. 308–317.

104. Вестник дерматовенерологии. 1994. № 3.

105. Вестник МАНЭБ. 2001. № 3(39).

106. Вестник медицины. 1995. №7–8. С. 2.

107. Вестник медицины. 1995. №9–10. С. 6.

108. Вестник офтальмологии. 1996. №1. С. 6.

109. Вестник РАН. 2004. Т. 74, №1, С. 68–70.

110. Вестник СПбО РАЕН. 1999. 3(4). С. 388–403.

111. Парамагнетизм модифицированной воды / М.М. Викторина, Б.В. Дерягин, И.Г. Ершова и др. // Докл. АН СССР. 1971. 191 с.
112. **Виноградов П.А.** О регистрации градиента потенциала электротеллурического поля на некоторых глубинах оз. Байкал // Докл. АН СССР. 1957. Т. 113, № 6. С. 1255–1258.
113. **Виноградов П.А.** Некоторые выводы из наблюдений над градиентом потенциала электротеллурического поля на разных глубинах оз. Байкал // Тр. НИЗМИР. Новосибирск, 1959. Вып. 15(25). С. 164–167.
114. **Владимиров В.А., Тарасов В.Ф.** Структура течения вязкой жидкости с замкнутыми линиями тока // Докл. АН СССР. 1982. Т. 262, № 2. С. 297–300.
115. **Владимирский Б.М., Нарманский В.Я., Темурьянц Н.А.** Космические ритмы. Симферополь, 1994. 176 с.
116. **Войтылов В.В.** Изучение электрических характеристик коллоидных частиц и их распределения по размерам электрооптическими методами: Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук / ЛГУ. Л., 1977. С. 16.
117. Вокруг света. 2004. № 2. С. 56.
118. **Волькенштейн М.В.** Энтропия и информация. М.: Наука, 1986.
119. Вопросы истории естествознания и техники. 1995. № 3. С. 155–156, 46–49.
120. **Воробьев Н.И.** Применение измерения электропроводимости для характеристики химического состава природных вод. М.: Наука, 1963. 144 с.
121. **Воронин, Подвигин, Куликов.** Информационные взаимодействия в биологии. М.: Наука, 1990.
122. Практикум по коллоидной химии и электронной микроскопии / С.С. Воюцкий, Р.М. Панич, Н.Н. Иванова и др. М.: Химия, 1974. 224 с.
123. **Галазий Г.И., Вотинцев К.К.** О научных основах разработки ПДК веществ в промышленных стоках с позиции лимнологии // Водные ресурсы. 1973. № 4. С. 140–144.
124. **Галаницкий А.А.** К механизму влияния магнитных, электромагнитных, ультразвуковых полей на состояние дисперсных примесей и водных систем в целом. М.: ВИНТИ. Рег. № 3209-74 Деп., 1974. 17 с.
125. **Гапочка Л.Д.** Об адаптации водорослей. М.: Изд-во МГУ, 1981. 100 с.
126. **Гаценко В.М.** Основы теории безгалсового способа измерения морских течений ЭМИТ на ходу корабля // Тр. ДВНИГМИ. Л.: Гидрометеиздат, 1970. Вып. 30. С. 117–150.
127. **Головков В.П., Коломийцева Г.И., Ротанова Н.М.** // Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли. М.: Наука, 1989. С. 220.
128. Там же, с. 222.
129. **Голубев В.Н., Пурин Б.А.** Об электрохимической нестабильности жидких мембран в условиях стационарного процесса электропереноса // Докл. АН СССР. 1978. Т. 241, № 5. С. 1121–1123.
130. **Гордиенко В.И., Калашников Н.И., Надточий К.Д.** Измерение низкочастотных вихревых электрических полей. Киев: Наук. думка, 1975. С. 9–15.
131. **Горина М.Ю., Барабанова Н.П.** Исследование стабильности и воспроизводимости потенциала хлорсеребряного электрода // Исследования в области гидрофизических измерений: Тр. метрологич. ин-тов СССР. Л.: Энергия, 1978. Вып. 194(254). С. 47–50.

132. **Горина М.Ю., Барабанова Н.П.** Высокостабильный плоский хлор-серебряный электрод // Исследования в области гидрофизических измерений: Тр. метрологических ин-тов СССР. Л.: Энергия, 1979. Вып. 235(295). С. 29–30.

133. **Горина М.Ю., Рывкина Л.Е.** Ионоселективный электрод для определения сульфат ионов // Журнал аналитической химии. 1975. Т. 30, вып. 8. С. 1681–1638; там же. 1978. Т. 33, вып. 11. С. 2263–2271.

134. **Горленко В.М., Дубинина Г.А., Кузнецов С.И.** Экология водных микроорганизмов. М.: Наука, 1977. 288 с.

135. **Горская Е.М., Скрынников Р.Г., Соколов Г.В.** Вариации магнитного поля, индуцированные движением морских волн на мелководье // Геомагнетизм и аэрономия. 1972. Т. 12, № 1. С. 153–156.

136. **Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Аронов Е.Л.** О высокочастотном электромагнитном излучении при сейсмической активности // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248, № 5. С. 1077–1081.

137. Экологический налог за воздействие электромагнитного излучения: региональный аспект проблемы / А.Н. Грешневиков, А.Н. Маликов, А.А. Кравченко и др. // Проблемы региональной экологии. 2001. №. 4.

148. **Григорьев Ю.Г.** Электромагнитные поля: физическая характеристика, биологическое действие, гигиеническая регламентация. М., 1999. С. 13–47.

139. Электромагнитная безопасность человека. Справочно-информационное издание / Ю.Г. Григорьев, В.С. Степанов, О.А. Григорьев, Меркулов А.В. / Государственный научный центр Российской Федерации. Институт биофизики. М.: Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений, 1999. 145 с.

140. **Григорьян Р.А., Бойко Н.Е.** Условнорефлекторное двигательное поведение осетровых рыб в слабых электрических полях // Сигнализация и поведение рыб. Апатиты: Наука, 1985. С. 41–45.

141. **Грилихес М.С., Филановский Б.К.** Контактная кондуктометрия. Л.: Химия, 1980. 175 с.

142. **Гульельми А.В., Троицкая В.А.** Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973.

143. Влияние магнитных бурь на капиллярный кровоток у больных ишемической болезнью сердца / Ю.И. Гурфинкель, В.В. Любимов, В.Н. Ораевский и др. // Международный симпозиум “Корреляции биологических и физико-химических процессов с солнечной активностью и другими факторами окружающей среды”: Тезисы докл. Пущино: Наука ИТЭБ, 1993. С. 75–76.

144. **Любимов В.В., Ораевский В.Н. и др.** Влияние геомагнитных возмущений на капиллярный кровоток у больных ишемической болезнью сердца // Биофизика. 1995. Т. 40, вып. 4. С. 793–799.

145. **Данюлите Г.П.** Воздействие электрических полей на рыб // Основные особенности поведения и ориентации рыб. М.: Наука, 1974. С. 122–154.

146. Пороги чувствительности рыб к электрическому току, определенные разными методами / Г.П. Данюлите, И.М. Нактинюс, Б.И. Симонавичене,

А.И. Швейстите // Возможности использования физико-химических раздражителей для управления поведением рыб. М.: Наука, 1983. С. 7–11.

147. Двойной слой и электродная кинетика. М.: Наука, 1981. 876 с.

148. О биоэлектрическом эффекте фитопланктона / Р.М. Деменицкая, А.М. Городницкий, В.Д. Федоров и др. // Геофизические методы разведки в практике / НИИГА. Л., 1972. Вып. 7. С. 101–104.

149. **Деряпа Н.Р.** // Проблемы медицинской адаптации биоритмологии. М.: Медицина, 1985. 208 с.

150. **Дерягин Б.В.** Итоги и перспективы исследования модифицированного состояния жидкостей и их граничных слоев // ЖВХО. 1967. Т. 12, вып. 5. С. 521.

151. **Дзюбан А.Н.** Численность бактерий и деструкция органического вещества в донных отложениях Саратовского водохранилища // Биология внутренних вод. Л.: Наука, 1978. № 40. С. 11–15.

152. **Догель В.А.** Общая протистология. М.: Советская наука, 1951. 604 с.

153. **Долуханов М.П.** Распространение радиоволн. Изд. 3. М.: Связь, 1965. С. 27.

154. **Долуханов М.П., Коган В.С.** К вопросу о береговой рефракции // Морской сборник. 1935. № 3. С. 21.

155. **Доронин Ю.К.** Электрофизиологические исследования простейших // Движение и поведение одноклеточных животных. Л.: Наука, 1978. С. 41–61.

156. **Дубов Э.Е., Хромова Т.П.** Индексы солнечной и геомагнитной активности // Биофизика. 1992. Т. 37, вып. 4. С. 785–804.

157. **Дубовой Л.В.** Влияние переменного магнитного поля на кинетику выживания мышей, больных раком молочной железы // Информ. журнал “Современные технологии”. 2001. № 7. С. 32–34.

158. **Дубров А.П.** Геомагнитное поле и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 176 с.

159. **Думанский А.В.** Лиофильность дисперсных систем. Киев: Наук. думка, 1960. С. 41–61.

160. **Духин С.С.** Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. Киев: Наук. думка, 1975. 246 с.

161. **Духин С.С., Шилов В.Н.** Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах. Киев: Наук. думка, 1972. 204 с.

162. **Егоров Б.Ф., Игнатьев М.Б.** О новых направлениях в работе отдела РФФИ по науке о человеке и обществе // Вестник РФФИ. Март 2000. № (19). С. 27–31.

163. **Журавлев В.И., Сидорин А.Я.** Компенсационный метод измерения вариаций электрического сопротивления земной коры с использованием естественных электрических полей // Докл. АН СССР. 1978. Т. 243, № 1. С. 58–61.

164. **Журбицкий З.И.** Влияние постоянного электрического поля на адсорбцию CO_2 листьями растений // Докл. АН СССР. 1975. Т. 223, № 5. С. 1273–1275.

165. Записки по гидрографии. 1967. № 2–3.
166. **Заринский В.А., Ермаков В.И.** Высокочастотный химический анализ. М.: Наука, 1970. 200 с.
167. **Зонтаг Г., Штрэнге К.** Коагуляция и устойчивость дисперсных систем / Пер. с нем. Л.: Химия, 1973. С. 47.
168. **Зубов Н.Н.** Океанологические таблицы. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 478 с.
169. **Иванов-Муромский К.А.** Электромагнитная биология. Киев: Наук. думка, 1977. 156 с.
170. **Извеков Е.И.** Частотные спектры электровосприимчивости пресноводных рыб // Биология внутренних вод. Л.: Наука, 1985. № 65. С. 42–46.
171. **Извеков Е.И.** Частотные характеристики реакций окуня на электрический ток в ходе индивидуального развития // Биология внутренних вод. Л.: Наука, 1987. № 73. С. 60–64.
172. Известия АН СССР. Сер. физич. 1953. №1.
173. Изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии на акваториях морей и океанов электромагнитными методами / ИЗМИР РАН. М., 1981. С. 23, 80, 90, 108, 132.
174. **Ильницкий Ю.С.** Пульсации плотности тока реагирующих ионов при диффузионной релаксации электролита // Докл. АН СССР. 1985. Т. 282, № 1. С. 130–133.
175. Инструкция по электроразведке. Ч.1. Л.: Госгеолтехиздат, 1951. С. 20–35.
176. Ионоселективные электроды и ионный транспорт // Тез. докл. Всесоюз. конф. Ленинград, 26–28 окт. 1982 г. Л.: Наука, 1982. 159 с.
177. **Иоссель Ю.Я., Шигловский К.Б.** На борту янтарное электричество. Л.: Судостроение, 1966. 140 с.
178. Исследование геомагнитного поля на акваториях морей и океанов / ИЗМИР РАН. М., 1978. С. 143, 151, 164, 172, 191, 200.
179. **Йовчев М.П.** Диамагнетизм природных вод и использование его для объяснения противонакипного эффекта при магнитной обработке воды / ВИНТИ. № 77716/9. М., 1970. С. 1–14 (пер. с болгарск.).
180. **Казначеев В.П.** Очерки теории и практики экологии человека. М.: Наука, 1983. 260 с.
181. **Казначеев В.П., Михайлова Л.П.** Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей. Новосибирск: Наука, 1985. 181 с.
182. **Кайбышев М.С.** Возмущенность магнитного поля и сердечные ритмы // Солнечная динамика. 1968. № 2. С. 96.
183. **Калинников В.Т., Ракитин Ю.В.** Введение в магнетохимию. М.: Наука, 1980. 302 с.
184. **Карасик А.М., Касьяненко Л.Г., Цуцкер Б.М.** Геомагнитные исследования на акваториях морей и океанов // Электромагнитные и плазменные процессы от Солнца до ядра Земли. М.: Наука, 1989. С. 262–274.
185. **Касимов А.Г.** Методика исследования влияния загрязнения на биологическую продуктивность морских водоемов // Методики биологических исследований по водной токсикологии. М.: Наука, 1971. С. 269–278.
186. **Касьяненко Л.Г., Пушкин Н.А.** Магнитное поле, океан и мы. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 192 с.

187. Кибернетика живого: Биология и информация. М.: Наука, 1984. 144 с.
188. Кибернетика и вычислительная техника. 1986. Вып. 70. С. 76.
189. **Киваева Л.И.** Определение объемной доли свободной воды хлопчатоплодов с помощью СВЧ-дизелькометрии // Физико-химические аспекты реакции водных систем на физические воздействия / Агрофизич. НИИ ВАСХНИЛ. Л., 1979. С. 149–158.
190. **Кизим Н.Ф., Добрыднев С.В., Ягодин А.Г.** Скачок потенциала на границе вода–воздух // Химия и технология воды. 1981. Т. 3, № 3. С. 201–203.
191. **Клековкин В.А., Селятицкий В.Г.** А.с. 917134, заявл. 15.09.80, № 2980844/18-21//Бюл. изобр. 1982. № 12, МКИ, 01, 29/08.
192. Гидромуляционный преобразователь электрического поля / В.А. Клековкин, В.Г. Селятицкий, А.П. Сыпко, С.Г. Федюнин // Фундаментальные проблемы морских электромагнитных исследований / ИЗМИР РАН. М., 1979. С. 65–70.
193. Кондуктометр КД-1 // Приборы для электрохимических исследований / И.А. Козловская, Б.П. Артамонов, Н.С. Грилихес, Б.К. Филановский. Л.: Изд-во ВНИИнаучприбор, 1972. Вып. 2. С. 30–40.
194. **Козловский П.А.** Связь проблем гидрологии и проблем земного электричества // Тр. 3-го Всесоюз. гидролог. съезда. Л.: Гидрометеиздат, 1957. С. 16–19.
195. **Колесников А.Г., Пантелеев Н.А.** Исследования мелкокомасштабной турбулентной структуры океана // Исследование турбулентной структуры океана. Севастополь, 1975. С. 17–29.
196. **Колодченко В.П.** Влияние геомагнитных возмущений на высшую нервную деятельность людей пожилого возраста // Тез. докл. XXI украинской республиканской научно-технич. конф. Киев, 1972. С. 56.
197. **Комаров С.Г.** Техника промысловой геофизики. Изд. 2-е, переработ. М.: Гостоптехиздат, 1957. 562 с.
198. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике. Изд. 4-е. М.: Наука, 1977. 832 с.
199. Корреляции биологических и физико-химических процессов с солнечной активностью и другими факторами окружающей среды // Тез. докл. Междунар. симпозиума. Пушино: Наука, ИТЭБ. 1993. С. 193–194, 242–243.
200. Космический пульс жизни. М.: Мысль. 1995.
201. **Кочурова И.Н., Русанов А.И.** Изменение структуры поверхности воды под влиянием температуры и ионных примесей // Физико-химические аспекты реакции водных систем на физические воздействия / Агрофизич. НИИ ВАСХНИЛ. Л., 1979. С. 69–74.
202. **Краев А.П.** Основы геоэлектрики. Л.: Недра, 1971. 587 с.
203. **Красногорская Н.В.** Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 324 с.
204. **Кривец И.А.** Изменения свойств микроорганизмов под влиянием поверхностно-активных веществ // Химия и технология воды. 1984. Т. 6, № 5. С. 455–463.
205. **Кройт Г.Р.** (ред.). Наука о коллоидах. Ч.1: Необратимые системы / Пер. с англ. М.: ИЛ, 1955. 538 с.
206. **Крюков П.А.** Горные, почвенные и иловые растворы. Новосибирск: Наука, 1971.

207. **Кулин Е.Т.** Биоэлектретный эффект. Минск, 1980. 212 с.
208. Проблема подземного стока в моря / Б.И. Куделин, Н.С. Зекцер и др. // Советская геология. 1971. №1. С. 72–80.
209. **Кукушкин А.С., Карнаушенко Н.Н.** Исследование статистических характеристик естественного электромагнитного поля в морях средних широт // Изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии на акваториях морей и океанов электромагнитными методами / ИЗМИР РАН. М., 1981. С. 132–137.
210. **Кукушкин А.С., Карнаушенко Н.Н., Жилина А.И.** Статистические характеристики естественного электромагнитного поля в морях и океанах // Проблемы морских электромагнитных исследований / ИЗМИР РАН. М., 1980. С. 38–45.
211. **Кукушкин А.С., Лобачев В.Н., Нуждин С.Ф.** Буксируемый двухкомпонентный электромагнитный измеритель течений // Автоматизированные системы сбора и переработки гидрофизической информации. Деп. ВИНТИ. № 6427-85. С. 42–50.
212. **Кульский Л.А.** Теоретические основы и технология кондиционирования воды (процессы и аппараты). Изд. 3-е. Киев: Наук. думка, 1980. 564 с.
213. **Лайзан Л.К., Гусев Н.И.** Гид в тренировке. Ижевск: Удмуртия, 1979. 87 с.
214. **Лайонс Л., Уильямс Д.** Физика магнитосферы. Количественный подход / Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 312 с.
215. **Лапкин В.В., Протасов В.Р.** Влияние грозových разрядов на поведение осетровых // Электрические свойства гидробионтов. М.: Наука, 1986. С. 149–164.
216. **Лебедева М.Н., Шумакова Г.В., Бучачийская Л.Н.** Бактерии в сообществе планктонных организмов Ионического и Средиземного морей // Экология моря. Киев: Наук. думка, 1982. Вып. 8. С. 56–66.
217. **Леенсон И.А.** Молекулы без прикрас: ион-циклотронный резонанс // Химия и жизнь. 1982. № 7. С. 26–30.
218. **Лейкис Д.И., Кабанов Б.Н.** Неполаризующиеся электроды для измерения малых разностей потенциалов в море // Тр. Ин-та океанологии. 1956. Т. 11.
219. Сверхдлиннопериодные колебания Земли / Е.М. Линьков, Л.Н. Петрова, Н.Г. Савина, Т.Б. Яновская // Докл. АН СССР. 1982. Т. 262, № 2. С. 321–324.
220. **Литвинов Э.М., Подгорных Л.В.** Неполаризующиеся электроды при измерении естественных электрических полей // Информ. сообщение. Серия региональная, разведочная и промысловая геофизика / ОНТИ–ВИЭМС. М., 1966. № 6. 11 с.
221. **Лободин Т.В.** Результаты атмосферно-электрических измерений над океанами и в Антарктиде // Метеорологические исследования. М.: Наука, 1963. № 5. С. 89–99.
222. **Лопатников В.И.** Некоторые результаты исследования естественного электрического поля в море // Тр. Морск. гидрофиз. ин-та АН УССР. Киев, 1966. Т. 37. С. 154–162.

223. **Лопатников В.И.** О распределении электротеллурического поля во внутреннем море // Тр. Морск. гидрофиз. ин-та АН УССР. Киев, 1968. Т. 40. С. 21.

224. **Лопатников В.И.** К проблеме измерения электрического поля в океане // Морские гидрофизические исследования. 1973. № 4 (63). С. 123–131.

225. **Лопухин А.С., Каменир Ю.Г., Чепурнова Э.А.** Суточная динамика аденозинтрифосфата размерных фракций микропланктона // Докл. АН СССР. 1987. Т. 296, № 6. С. 1512–1516.

226. **Ляцкий В.Б.** Токовые системы магнитосферно-ионосферных возмущений. Л.: Наука, 1978. 199 с.

227. **Майрановский С.Г.** Свойства растворов тетразамещенных солей аммония. Их влияние на электродные процессы // Электросинтез и биоэлектрохимия. М.: Наука, 1975. С. 252–281.

228. Солнечно-земные связи, погода и климат / Б. Мак-Кормак, Т. Селлига и др.; Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 384 с.

229. **Малинин Л.В., Протасов В.Р.** Влияние грозových разрядов на поведение осетровых // Электрические свойства гидробионтов. М.: Наука, 1986. С. 149–164.

230. **Маляров В.В.** Основы теории атомного ядра. М.: Наука, 1967. 512 с.

231. **Мансуров С.М.** Возникновение локальных геомагнитных вариаций в районе станции Мирный // Информ. бюл. советск. антаркт. экспедиций. 1958. № 2. С. 37–41.

232. **Маргулис М.А.** Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях). М.: Высш. шк., 1984. 242 с.

233. **Мардерфельд Б.Е., Билинский А.И., Кобзова В.И.** Магнитотеллурическое зондирование над островами различной формы // Изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии на акваториях морей и океанов электромагнитными методами / ИЗМИР РАН. М., 1981. С. 80–85.

234. **Маркевич Г.И.** Суточная динамика вертикального распределения массовых форм зоопланктона в оз. Сиверском // Экология водных организмов верхневолжских водохранилищ // Тр. ИБВВАН СССР. Л.: Наука, 1982. Вып. 45(48). С. 100–122.

235. **Матвеева Э.Т.** // Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 897–899.

236. **Медведев М.И., Максимова В.П., Панасевич А.А.** Адсорбционные свойства шламов-коагулянтов, подверженных пиролизу // Химия и технология воды. 1981. Т. 3, № 3. С. 215–220.

237. Удаление из воды лигносульфонатов продуктами гидролиза солей магния / М.И. Медведев, З.Н. Шкваро, О.С. Зульфягаров и др. // Химия и технология воды. 1984. Т. 6, № 5. С. 409–413.

238. **Мейтис Л.** Введение в курс химического равновесия и кинетики / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 484 с.

239. **Мелвин-Хьюз Э.А.** Физическая химия. Кн. 2. М.: ИЛ, 1962.

240. Мембраны: ионные каналы / Пер. с англ. М., 1981.

241. Миллиметровые волны в науке и медицине. 2000. № 1 (17).

242. Миллиметровые волны в науке и медицине. 2000. № 2 (18).

243. Миллиметровые волны в науке и медицине. 2000. № 3 (19).

244. **Мизун Ю.Г.** Полярные сияния. М.: Наука, 1983. 136 с.
245. **Мизун Ю.Г., Мизун П.Г.** Волны в космосе. М.: Наука. 1988. 176 с.
246. **Мирошниченко Л.И.** Солнечная активность и Земля. М.: Наука, 1981. 145 с.
247. Мир науки. 1990. Т. 34, № 1. С. 32.
248. **Митрофанов В.Н.** Влияние электродов на измерения электрического поля в морской воде // Электромагнитные явления в море: Тр. Морск. гидрофиз. ин-та АН УССР. Киев: Наук. думка, 1968. Т. 40. С. 120–123.
249. **Миттон С.** Дневная звезда. М.: Мир. 1984. 208 с.
250. **Монахов Ф.И.** Низкочастотный сейсмический шум Земли. М.: Наука, 1977. 95 с.
251. **Монин А.С., Озмидов Р.В.** Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 320 с.
252. Морское магнитотеллурическое зондирование / ИЗМИР РАН. М., 1978. С. 3, 29, 4. 67, 71.
253. Морские электромагнитные исследования. М.: Наука, 1976. С. 3–52.
254. **Морф В.** Принципы работы ионоселективных электродов и мембранный транспорт. М.: Мир, 1985. 280 с.
255. **Моффат Г.** Возбуждение магнитного поля в проводящей среде / Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 340 с.
256. **Музалевская Н.И.** Характеристика возмущенного магнитного поля как раздражителя // Проблемы космической биологии. М.: Наука, 1973. Т. 18. С. 123–148.
257. **Муравейко В.М., Степанюк И.А.** Электромагнитные поля циклона и их действие на рыб // Сигнализация и поведение рыб. Апатиты: Наука, 1985. С. 19, 24.
258. Практикум по коллоидной химии / Р.Э. Нейман, В.Н. Вережников, А.П. Кирдеева и др. М.: Высш. шк., 1972. 176 с.
259. **Никитюк И.Е.** // Вопросы охраны материнства и детства. 1987. Т. 32, № 9. С. 71.
260. **Николаевский В.С.** Биомониторинг, его значение и роль в системе экологического мониторинга и охране окружающей среды // Методологические и философские проблемы биологии. Новосибирск: Наука, 1981. С. 341–354.
261. **Новиков В.В., Кувичкин В.В., Фесенко Е.Е.** // Биофизика. 1999. Т. 44, вып. 2. С. 224–230.
262. **Овчаренков Ю.А., Иванов В.Т., Шкроб А.М.** Мембрано-активные комплексы. М., 1974.
263. Озера Карельского перешейка. Л.: Наука, 1971. С. 326–374, 129–210.
264. Поле электропроводности воды северных частей Атлантического и Тихого океанов / С.А. Олейников, Л.И. Галеркин, В.П. Кутько и др. М.: Гидрометеиздат, 1982. 117 с.
265. **Оль А.И.** Проявления солнечной активности в магнитосфере и ионосфере Земли // Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли. М.: Наука, 1971. С. 104.
266. **Ольшанский В.М., Орлов А.А., Протасов В.Р.** Оценка возможностей электрокоммуникационной системы рыб // Изв. АН СССР. 1978. № 1. С. 110–120.

267. **Ольшанский В.М., Орлов А.А., Протасов В.Р.** Оценка возможной дальности электрокоммуникации рыб // Новое в гидробионике. М.: Наука, 1980. С. 4–5.

268. Основы физиологии человека: Учебник для вузов. СПб., 1994. Т. 1. 567 с.

269. **Остроумов Г.А.** Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М.: Наука, 1979. 320 с.

270. **Осика Д.Т., Мегаев А.Б.** Изменение удельной электропроводности воды зурамакентских термальных источников в связи с сейсмичностью недр области дагестанского клина // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238, № 3. С. 558–560.

271. Офтальмологический журнал. 1991. № 6. С. 271.

272. **Павлович С.А.** Магниточувствительность и магнитовосприимчивость микроорганизмов. Минск: Беларусь, 1981. 172 с.

273. **Павловский Р.А., Поляков А.В.** Способ измерения переменного электрического поля. А.с. 194985, СССР, заявка 13.03.65, № 948837/26-25. Оpubл. 12.01.67, МПК бюл. «Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки». 1967. 9 с.

274. **Пиккарди Дж.** Химические основы медицинской климатологии. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 96 с.

275. **Плонси Р., Барр Р.** Биоэлектричество. Количественный подход / Пер. с англ. М.: Мир, 1992. 357 с.

276. **Повх И.Л.** Аэрогидродинамический эксперимент в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1974. 479 с.

277. **Повх И.Л.** Техническая гидромеханика. Л.: Машиностроение, 1976. 504 с.

278. **Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М.** Морская вода: Справочное руководство. М.: Наука, 1979. 327 с.

279. Биологические действия электростатических полей / Ф.Г. Портнов, Л.Ф. Воробьева, Э.Г. Ларский, А.П. Иерусалимский // Успехи современной биологии. 1985. Т. 100, вып. 3(6). С. 433–471.

280. **Почтарев В.И.** Магнетизм Земли и космического пространства. М.: Наука, 1966. 144 с.

281. **Почтарев В.И.** Нормальное магнитное поле Земли. М.: Наука, 1984. 232 с.

282. **Пресман А.С.** Электромагнитная сигнализация в живой природе. М.: Сов. радио, 1974. 64 с.

283. Природа. 1976. № 11.

284. Проблемы морских электромагнитных исследований / ИЗМИР РАН. М., 1980. С. 38, 162, 177, 183.

285. Проблемы бионики. М: Наука, 1981. С. 202.

286. **Протасов В.Р.** Поведение рыб. М.: Пищевая пром-сть, 1978. 296 с.

287. **Протасов В.Р., Бондарчук А.И., Ольшанский В.В.** Введение в электроэкологию. М.: Наука, 1982. 336 с.

288. Процессы самоочищения морских вод от химических загрязнений // Тр. ГОИН. 1978. Вып. 128. М.: Гидрометеиздат. С. 7, 66.

289. **Пушкарёв В.В., Трофимов Д.И.** Физико-химические особенности очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ. М.: Химия, 1975. 144 с.
290. **Пчелин В.А.** О структуре воды на границе с неполярной средой в связи с гидрофобными взаимодействиями в растворах дифильных молекул // Связанная вода в дисперсных системах. М.: Из-во МГУ, 1970. Вып. 1. С. 74–77.
291. **Равич-Шербо М.И., Новиков В.В.** Физическая и коллоидная химия. Н.: Высш. шк., 1975. 187 с.
292. Развитие точных наук в СССР за 25 лет // Вестн. АН СССР. 1943. № 1–2. С. 26–40 (перепечатано в: Вестн. АН СССР. 1985. № 5. С. 30).
293. Распределение и поведение морского планктона в связи с микроструктурой вод. Киев: Наук. думка, 1977. 108 с.
294. **Раухийнен М.И., Сеничева М.И.** Суточная динамика и продукция мелких жгутиковых водорослей в Севастопольской бухте // Гидробиол. журн. 1977. Т. 13, № 5. С. 82–87.
295. **Ребиндер П.А.** Поверхностные явления в дисперсных системах // Коллоидная химия: Избр. труды. М.: Наука, 1978. 368 с.
296. **Реймерс Н.Ф.** Популярный биологический словарь. М., 1991. С. 49.
297. **Рикитак Т.** Электромагнетизм и внутреннее строение Земли / Пер. с англ. Л.: Недра, 1968. 332 с.
298. **Робинсон Р., Стокс Р.** Растворы электролитов / Пер. с англ. М.–Л.: ИЛ, 1963. 646 с.
299. **Рожков В.А., Трапезников Ю.А.** Методические рекомендации, алгоритмы и программы расчета вероятностных характеристик ветрового волнения на ЭВЦМ. Обнинск: ЛОГОИН, 1969. 388 с.
300. Роль ионов кальция в обмене веществ у *anodonta Cygnaea* / В.Д. Романенко, О.М. Арсан, В.Д. Соломатина и др. // Гидробиол. журн. 1977. Т. 13, № 5. С. 116.
301. **Романенко В.И., Пубинес А., Даукшта А.С.** Развитие бактерий на поверхности воды в экспериментальных условиях // Биология внутренних вод. 1978. № 40. С. 4–7.
302. **Романенко А.Ф., Сергеев Г.А.** Вопросы прикладного анализа случайных процессов. М.: Сов. радио, 1968. 256 с.
303. **Ромашкан А.Д., Ромашкан Н.В.** Влияние магнитного поля на магнитные свойства молекул воды и водные системы // Физико-химические аспекты реакции водных систем на физические воздействия / Агрофизич. НИИ ВАСХНИЛ. Л., 1979. С. 31–32.
304. **Рудяков Ю.А.** Суточные вертикальные миграции пелагических животных // Океанология. Биология океана. Т. 1. Л.: Наука, 1977. С. 151–159.
305. Влияние возмущений ГМП на суточную ритмику физиологических функций / Г.В. Рыжков, В.А. Кузьменко и др. // Физиология человека. 1982. Т. 8, № 2. С. 192–198.
306. **Рыжкова А.Н., Моисеева В.П.** Оценка степени токсичности биологически очищенных сульфат-целлюлозных сточных вод для рыб // Экспериментальная водная токсикология. Рига, 1986. № 11. С. 44–48.
307. **Рыкунов Л.Н.** Микросейсмы. Н.: Наука, 1967. 86 с.

308. **Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В.** Модуляция высокочастотных микросейсм // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238, № 2. С. 303–306.
309. **Савченко В.Н.** О связи геоэлектромагнитных вариаций волн с рельефом дна электростратифицированного моря // Проблемы морских электромагнитных исследований / ИЗМИРАН. М., 1980. С. 177.
310. Нелинейные явления и вычислительный эксперимент / А.А. Самарский, С.П. Курдюмов, Т.С. Ахrameева, Г.Г. Малинецкий // Вестн. АН СССР. 1985. № 9. С. 64–77.
311. **Самойлов В.О.** Электромагнитная совместимость в биосфере // Тезисы докл. 4-й научно-технич. конф. “Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов. ЭМС–1996”. С. 572–576.
312. **Светлов П.Г.** Вопросы цитологии и общей физиологии. М., 1960. С. 263–285.
313. **Семенов А.С.** Электроразведка методом естественного поля. Изд. 3-е. Л.: Наука, 1980. 446 с.
314. **Семенов В.Ю., Зайцев Л.В., Филатов Н.Н.** Об измерении ротора скорости течений в Ладожском озере // Термодинамические процессы в глубоких озерах. Л.: Наука, 1981. С. 198–200.
315. **Семенов В.Ю., Фонарев Г.А.** Измерение производных естественного электрического поля в море // Морское магнитотеллурическое зондирование / ИЗМИРАН. М., 1978. С. 71–74.
316. **Семиглазов В.Ф., Веснин А.Г., Моисеенко В.М.** Минимальный рак молочных желез. СПб.: Гиппократ, 1992. 240 с.
317. **Семихина Л.П.** Эффективность магнитной обработки воды в полях различной величины // Физико-химические аспекты реакции водных систем на физические воздействия / Агрофизич. НИИ ВАСХНИЛ. Л., 1979. С. 13–14.
318. Сенсорные основы поведения морских рыб арктических морей. Апатиты: Наука, 1991. 43 с.
319. **Сенько П.К.** Береговой эффект в магнитных вариациях // Информ. бюл. советск. антарктич. экспедиций. М.: Гидрометеоиздат, 1959. № 4.
320. **Сергеев Г.А., Янтуш Д.А.** Статистические методы исследования природных объектов. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 300 с.
321. **Сердюк А.М.** Взаимодействие организма с электромагнитными полями как с факторами окружающей среды. Киев: Наук. думка, 1977. 227 с.
322. Сигнализация и поведение морских рыб // Тр. АН СССР. Л.: Наука, 1980. 152 с.
323. **Скайлс Д.Д.** // Биогенный магнетит и магниторецепция: В 2 т. М.: Мир, 1989. Т. 1. С. 63–144.
324. **Скорчеллетти В.В.** Теоретическая электрохимия. Л.: Химия, 1970. 608 с.
325. **Слоним А.Д.** Экологическая физиология животных. М.: Высш. шк. 1971. 448 с.
326. **Смирнова Т.С.** Планктонные коловратки и ракообразные // Зоопланктон Онежского озера. Л.: Наука, 1972. С. 126–240.

327. **Соболев Г.А., Демин В.М.** Механоэлектрические явления в Земле. М.: Наука, 1980. 214 с.
328. Собственные колебания Земли. М.: Мир, 1964. 316 с.
329. **Соколов Г.В.** Спектр магнитного поля, создаваемого волнением // Геомагнитные исследования. 1975. № 16. С. 24–27.
330. **Сокольников В.И., Семенов В.П., Козаренко Т.Д.** Сорбционные свойства модифицированного полукоркса при доочистке сточных вод сульфатцеллюлозного производства // Химия и технология воды. 1981. Т. 3, № 3. С. 207–211.
331. **Солуха Б.В.** Поведенческие оценки чувствительности рыб к слабым физическим воздействиям // Сигнализация и поведение рыб. Апатиты: Наука, 1985. С. 10–18.
332. **Сопач Э.Д.** Электропроводность как метод определения солености морских вод. М.: Гидрометеиздат, 1958. 139 с.
333. **Сотскова Т.З., Гутовская В.В., Кульский Л.А.** Электрокинетические потенциалы межфазной поверхности раздела жидкость—газ // Химия и технология воды. 1981. Т. 2, № 1. С. 3–8.
334. **Сочельников В.В.** Основы теории естественного электромагнитного поля в море. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 216 с.
335. **Сочельников В.В., Гольмшток А.Я., Полонский Ю.М.** Методика и техника морских магнитотеллурических исследований // Серия XIII. Морская геология и геофизика: Обзор ВИЭМС Мин. геологии СССР. М., 1974. 51 с.
336. Справочник геофизика. Т. 2. М.: Гостоптехиздат, 1961. 760 с.
337. Справочник геофизика. Т. 3. М.: Гостоптехиздат, 1963. 760 с.
338. Справочник геофизика. Т. 6. Магниторазведка. М.: Недра. 1969. 398 с.
339. Справочник по теории вероятности и математической статистике / Ред. В.С. Королюк. Киев: Наук. думка, 1978. С. 123–125.
340. Справочник химика. М.—Л.: Химия, 1967. Т. 6. С. 75.
341. Справочник химика-энергетика / Водоподготовка. Т. 1. М.: Энергия, 1972. С. 455.
342. **Стадник А.С., Дедков Ю.М.** Вымораживание как метод концентрирования примесей в водах // Химия и технология воды. 1981. Т. 3, № 3. С. 227–233.
343. **Степанов В.Н., Светличный Л.С.** Исследования гидромеханических характеристик планктонных копепод. Киев: Наук. думка, 1981. 128 с.
344. **Стернин В.Г., Никоноров И.В., Бумейстер Ю.К.** Электролов рыбы. М.: Пищевая пром-сть, 1972. 360 с.
345. Структура электромагнитного поля геомагнитных пульсаций. М.: Наука, 1980. С. 4, 145, 148, 157, 160.
346. **Сысоев Н.Н., Волков В.Г.** Руководство по электромагнитному методу измерения скорости морских течения на ходу судна // Тр. Ин-та океанологии. М.: Наука, 1957. Т. 24. С. 173–199.
347. **Суббота А.Г.** О совместимости электромагнитных излучений с биообъектами // Тезисы докл. 4-й научно-технич. конф. “Электромагнитная совместимость технических средств и биологических объектов”. ЭМС — 1996. С. 501–505.
348. **Сукачев В.Н., Воронов А.Г.** Геоботаника. 2-е изд. М.: Наука, 1973 .

349. **Тарасов В.А.** Разработка и исследование электролитических первичных измерительных преобразователей для измерения параметров электрического поля моря: Дис. ... канд. техн. наук / ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Л., 1980.

350. Метрологические характеристики первичных измерительных преобразователей с электролитическими цепями / Ю.В. Тарбеев, С.Я. Антонов, В.М. Симахин, В.А. Тарасов // Современные проблемы метрологии. М.: Атомиздат, 1975.

351. Измеритель напряженности электрического поля / Ю.В. Тарбеев, С.Я. Антонов, В.А. Тарасов, В.М. Симахин. А.с. № 514219 // Бюл. изобр. 1976. № 18.

352. **Тарбеев Ю.В., Тарасов В.А.** Проверка переносной геофизической аппаратуры // Современные проблемы метрологии. М.: Атомиздат, 1976.

353. Тезисы докладов пленарных лекций и симпозиальных докладов. 1-й Всесоюз. биофиз. съезд. М.: Наука, 1982. С. 116–119, 124–158.

354. Тезисы докладов стендовых сообщений. 1-й Всесоюз. биофиз. съезд. М.: Наука, 1982. Т. 4. С. 84.

355. **Темникова Н.С.** Аэроны на рижском взморье. Л.: Гидрометеиздат, 1968. С. 51.

356. **Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.Г.** Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. Киев.: Наук. думка, 1992, 186 с.

357. **Темурьянц Н.А., Шехоткин А.В., Насилевич В.А.** Магниточувствительность эпифиза // Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 5. С. 761–765.

358. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. Изд. 5-е. М.: Наука, 1977. 735 с.

359. **Торнуев О.В., Куделькин С.А.** Электромагнитные поля в процессе формирования и развития живых систем // Методологические и философские проблемы биологии. Новосибирск: Наука, 1981. С. 152–164.

360. **Трунова О.Н.** Биологические факторы самоочищения морских и континентальных водоемов от химических и бактериальных загрязнителей: (аннотир. указат. литерат.). Апатиты: Кольск. фил. АН СССР, 1977. 95 с.

361. **Тютюнова Ф.И.** Физико-химические процессы в подземных водах. М.: Наука, 1976. 127 с.

362. Ускоренное определение сульфатов в водах методом потенциометрии с *Pb*-селективным электродом // Химия и технология воды. 1985. Т. 7, № 5. С. 29–32.

363. **Фарадей М.** Экспериментальные исследования по электричеству / Пер. с англ. М.: Наука, 1947. Т. 1. 848 с.

364. **Фейнман Р.** Характер физических законов. М.: Мир, 1968.

365. Электроэнергию вырабатывают микробы // Физика в школе. 1997. № 6. С. 6–9.

366. Физика космоса: Маленькая энциклопедия (Редкол.: Р.А. Сюняев и др.). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Сов. энциклопедия, 1986. 783 с.

367. Физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизации воздуха // Материалы Всесоюз. научно-технич. симпозиума. М.: Наука, 1975. Т. 1. С. 26–38, 68–73, 96–124.

368. Физико-химические аспекты реакции водных систем на физическое воздействие / Агрофизич. НИИ ВАСХНИЛ. Л., 1979. С. 3–10, 68–70, 72–73, 96–102, 103–111, 114–124.

369. Физический энциклопедический словарь. Т. 1, 3. М.: Сов. энциклопедия, 1964.

370. Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983.

371. **Филановский Б.К., Александров В.В., Артамонов Б.П.** Кондуктометрический контроль пресной воды, содержащей примеси отходов целлюлозно-бумажного производства // Охрана окружающей среды от загрязнения промвыбросами. Л., 1977. Вып. 5. С. 80–87.

372. **Филимонова Н.А.** Распределение микроорганизмов в воде и донных отложениях // Кондопожская губа Онежского озера в связи с ее загрязнением промстоками ЦБК. Петрозаводск: Карельск. филиал АН СССР, 1975. Т. 2. С. 213–230.

373. **Филиппов Д.М.** Климатический анализ физических полей Атлантического и Тихого океанов. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 213 с.

374. **Филиппов Д.М., Олейников С.А.** О слое минимальных значений электропроводности в Мировом океане // Докл. АН СССР. 1978. Т. 242, № 2. С. 434–437.

375. **Фонарев Г.А.** Об одном виде помех, наблюдаемом при измерении теллурических токов в море // Тр. Морского гидрофизич. ин-та. 1968. Т. 40. С. 108–111.

376. **Фонарев Г.А.** Прикладные аспекты морских электромагнитных исследований // Изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии на акваториях морей и океанов электромагнитными методами. ИЗМИР РАН. М., 1981. С. 99–107.

377. **Фонарев Г.А., Семенов В.Ю.** Об измерении электрического поля, индуцируемого морскими волнами // Морские электромагнитные исследования / ИЗМИР РАН. М., 1976. С. 46–51.

378. **Фонарев Г.А., Семенов В.Ю.** Электромагнитное поле морских поверхностных волн // Исследование геомагнитного поля на акваториях морей и океанов / ИЗМИР РАН. М., 1978. С. 143–150.

379. **Фонарев Г.А., Шнеер В.С.** К вопросу о вертикальных электрических полях морских течений // Проблемы Арктики и Антарктики. 1969. Вып. 31. С. 48–52.

380. **Франтов Г.С.** Геология и живая природа. Л.: Недра, 1982. 141 с.

381. **Фридрихсберг Д.А.** Курс коллоидной химии. Л.: Химия, 1984. 368 с.

382. **Фритч Ф.Н.** Электрические измерения в трехмерных проводниках применительно к прикладной геоэлектрике. М.: Гостоптехиздат, 1963. 387 с.

383. Кинетика электродных процессов. / А.Н. Фрумкин, В.С. Багоцкий, З.А. Иофа, Б.Н. Кабанов. М.: Изд-во МГУ, 1952. 819 с.

384. Фундаментальные проблемы морских электромагнитных исследований / ИЗМИР РАН. М., 1980. С. 30–35, 65–90, 224–252.

385. **Харгривс Дж. К.** Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи / Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 351 с.

386. Хасельман, см. [251].

387. Химический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия. 1983. 792 с.
388. Химия и жизнь. 2001. № 3. С. 7; 2001. № 5. С. 6.
389. **Холодов Ю.А., Козлов А.Н., Горбач А.М.** Магнитные поля биологических объектов. М.: Наука, 1987. 145 с.
390. **Чанг Р.** Физическая химия с приложениями к биологическим системам / Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 662 с.
391. **Черногоренко М.И.** Периодичность, суточный ритм и экологические факторы, влиявшие на выход церкарий // Санитарная гидробиология и гидропаразитология. 1981. № 8. С. 71–79.
392. **Чижевский А.Л.** Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1973. 349 с.
393. **Чижевский А.Л.** Космический пульс жизни. М.: Мысль, 1995. 766 с.
394. Генетическая опасность микрорадиоволн нетепловой интенсивности и ее гигиенические аспекты / М.Г. Шандала, Е.М. Антипенко и др. // Гигиена и санитария. 1982. № 10. С. 36–41.
395. **Шатов Б.Н.** Вероятностные характеристики процесса затухания ветровых волн с глубиной по натурным данным // Комплексные исследования в мировом океане. М.: Гидрометеиздат, 1975. С. 95–100.
396. **Шварц С.С.** Эволюционная экология животных. Свердловск: Изд. АН СССР, 1969.
397. **Шерклиф Дж.** Курс магнитной гидродинамики / Пер. с англ. М.: Мир, 1967. 320 с.
398. **Шноль С.Э.** Концепция стохастического детерминизма в прошлом и настоящем. Инерция сложившихся взглядов и стратегия новых научных истин. Пушино: Наука, 1982. С. 1–9.
399. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мелихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
400. **Фрумкин А.Н.** Кинетика электродных процессов. М.: Изд-во МГУ, 1952. 184 с.
401. Швецов Ю.П., Новиков В.В., Фесенко Е.Е., и др. // Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 6. С. 977–980.
402. Макроскопические флуктуации — общее свойство водных растворов различных белков и других веществ. Статистический спектральный анализ макроскопических флуктуаций / С.Э. Шноль, В.А. Коломбет, Н.П. Иванова, Т.Я. Брицина // Биофизика. 1980. Т. 25. С. 409.
403. **Шпарковский И.А.** Действие пентагастрина, ангиотензина II и нейротензина на двигательную активность пищеварительного тракта рыб // Эколого-физиологические исследования промысловых рыб Северного бассейна. Л.: Наука, 1987. С. 18–32.
404. **Шулейкин В.В.** Физика моря. М.: Наука, 1968. 1083 с.
405. **Эйзенберг Д., Кауцман В.** Структура и свойства воды / Пер. с англ. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 280 с.
406. Экологический атлас Санкт-Петербурга. СПб., 1993.
407. Электреты / Под ред. Г. Сеслера. М.: Мир, 1983. 487 с.
408. Электрические свойства гидробионтов. М.: Наука, 1980.
409. Электромагнитные и акустические процессы в океане // Межвуз. сб. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1987. 192 с.

410. Электромагнитные поля в биосфере: В 2 т. / Под ред. Н.В. Красногорской. М.: Наука, 1984. 375 с; 321 с.
411. Электронная промышленность. 1991. № 3. С. 76–79.
412. Электроповерхностные явления в дисперсных системах. М.: Наука, 1972. С. 6–9, 29–38, 49–55, 59–64, 70–81, 89–95.
413. **Эльпинер И.Е.** Биофизика ультразвука. М.: Наука, 1973.
414. Эрвин Бауэр и теоретическая биология. К 100-летию со дня рождения: Сборник научных трудов. Пушино, 1993. 255 с.
415. **Эме Ф.** Диэлектрические измерения / Пер. с нем. М.: Химия, 1967. 224 с.
416. Юбилейный сборник СПбГТУ. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.
417. **Яворский Б.М., Детлаф А.А.** Справочник по физике. М.: Наука, 1974. С. 168.
418. **Якубовский Ю.В., Ляхов Л.Л.** Электроразведка. М.: Госгеолтехиздат, 1964.
419. **Яновский Б.М.** Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 591 с.
420. Справочник по физиологии рыб / А.А. Яржомбек, В.В. Лиманский, Т.В. Шербина и др. М.: Агропромиздат, 1986. 192 с.
421. **Alexandrov V.V.** Natural electrical field in freshwater Lakes // Hydrology of Lakes Symposium IAHS-AISH Publication. Helsinki: Published by IAHS Ad-lard and Son, Ltd, Bartholomew, Dorking, Surrey. 1973, № 109. P. 60–65.
422. **Arx W.S.** An introduction to physical oceanography. Mass.: Addison-Wesely Publishing Co. 1962. P. 422.
423. **Bastian J.** Frequency response characteristics of electroreceptors in weakly electric fish (gymnotoidei) with a pulse discharge // J.Comp.Physiol. 1976. Vol. 112. P. 165–180.
424. **Bastin-Merkeman J.** Contribution au transport de charges aux electrodes // Revue energie primaire. 1966. Vol. 2, № 2. P. 63–68.
425. **Beal H.T., Weaver J.T.** Calculations of magnetic variations induced by internal ocean waves // J.Geophys. Res. 1970. Vol. 75, № 33. P. 6846–6852.
426. **Beiss V.L., Heppner F.H.** Circadian activity rhythm influenced by near zero magnetic field // Nature. 1976. № 261. P. 411–412.
427. **Belyaev J.Ya., Matronchik A.Yu., Alipov Y.D.** The effect of weak static and alternating magnetic fields on the genome conformational state of E.coli cells: The evidence for model of phase modulation of high frequency oscillations // Charge and Field Effects in Biosystems-4, eds. M.J. Alien, S.F. Cleary. A.E. Sowers. World Sci. Publ. Co. Pte. Ltd. 1994. P.174–185.
428. **Bennett M.V.L., Clusin W.T.** Physiology of the ampulla of Lorenzini. The electroreceptor of elasmobranchs // Sensory Biology of Sharks, Skates and Rays. Washington DC: Government Printing Office. 1978. P. 483–505.
429. **Blakemore R.P.** Magnetotactic bacteria // Science. 1975. № 190. P. 377–379.
430. **Blakemore R.P., Frankel R.B., Kalmijn A.J.** South-seeking magnetotactic bacteria in the Southern hemisphere // Nature. 1980. Vol. 286, № 5771. P. 384–385.
431. **Blakemore R.P., Short K.A., Bazylinski D.A. et al.** Microaerobic conditions are required for magnetite formation with *Aquaspirillum magnetotacticum* // Geomicrobiol J. 1985. № 4. P. 53–71.
432. **Blanchard D.C.** // Nature. 1955. Vol. 175. P. 334.

433. **Brown N.L.** Salinometer including first and second order temperature and third compensation for variations between conductivity and salinity // The Blisset-Berman Comp., USA. GO1r, 11/44, № 3491287. Publ. 20.01.70.
434. **Bullard E.C., Parker R.L.** Electromagnetic induction in the oceans // The Sea / Ed. A.E. Maxwell. New York etc.: Wiley. 1970. Vol. 4 (1). P. 695–730.
435. **Bullock T.H., Bodznick D.A., Northcutt R.G.** The phylogenetic distribution of electroreception: evidence for convergent evolution of a primitive vertebrate sense modality // Brain Res. Rev. 1983. № 6. P. 25–56.
436. **Chapman S., Bartels J.** // Geomagnetism. Vol. 1,2. Oxford Univ. Press, London, 1940.
437. **Clark W.H.** Oxidation-reduction potentials of organic systems // Baltimore, 1960. P. 19–21.
438. **Cox C.S., Filloux J.H., Larsen J.C.** Electromagnetic studies of ocean currents and electrical conductivity below the ocean floor // The Sea / Ed. A.E. Maxwell, New York etc.: Wiley. 1970. Vol. 4 (1). P. 637–693.
439. Costa Ribeiro I. // An Acad. Bras. Cienc., 1950. 22,325.
440. **Crarroll J.S., Hammond S.B., Stewart E.H.** Measuring and recording atmospheric electrostatic potential // Electrical Engineering. 1955. Vol. 74, № 8. P. 690–693.
441. **Crews A., Futterman J.** Geomagnetic micropulsation due to the motion of ocean waves // J.Geophys. Res. 1962. Vol. 67, № 1. P. 299–306.
442. **Crowley J.M.** Effect of electromagnetic force on the stability of liquid films // Industrial and Engineering Chemistry fundamentals. 1967. Vol. 6, № 2. P. 243–246.
443. Daninos Franck/ Physique du solide. Les premiers monopoles magnetiques // La Recherche 2010. № 437 janvier S. 48-51 // www.Larecherche.fr/content/actualite/article.
444. **Debouck C., Rooze M., Hinsenkamp M.** Effects of electromagnetic field amplitudes on quali embryos: preliminary result. // Bioelectrochemistry and Bioenergetics. 1993. Vol. 30. P. 189–193.
445. **Dungey J.W.** Loss of Van Allen electrons due to whistlers // Planet, Space Sci. 1963. № 11. P. 591.
446. **Dungey J.W.** Effects of electromagnetic perturbations on particles trapped in the radiation belts // Space Science. Rev. 1965. № 4. 199 p.
447. **Drost-Hansen W.** The water ice interface as seen from the liquid side // J.Colloid and Interface Sci. 1967. Vol. 25, № 2. P. 131–160.
448. **Enright J.T., Hamner W.M.** Vertical diurnal migration and endogenous rhythmicity // Science. 1967. Vol. 157, № 3791. P. 937–941.
449. **Erb D., Neumann D., Ratte H.-T.** Tagesperiodische Vertikalanderungen der in Flachgewassern beheimateten Larven von Chaoborus crystallinus (Diptera, Culicimorpha) // Entomol. Gen. 1979. Vol. 5, № 2. S. 163–168.
450. Eyerer P. // Adv. Colloid Interface Sci. 1972. 3,233.
451. Fessard A. (Editor). Electroreceptors and other specialised receptors in lower vortebtraters // Handbook of sensory physiology. New York etc.: Springer-Verlag. 1974. Vol.3. 457 p.

452. **Filloux J.H.** Observation of very low frequency electromagnetic signals in the ocean // *J. Geomag. Geoelectric.* 1980. Vol. 32, Suppl. 1. S1-S112.
453. **Frankel R.B., Blakemore R.P., Wolfe R.S.** Magnetite in freshwater magnetotactic bacteria // *Science.* 1979. № 203. P. 1355–1356.
454. **Frankel R.B., Blakemore R.P. et al.** Magnetotactic bacteria at the geomagnetic equator // *Science.* 1981. № 212. P. 1269–1270.
455. **Frazer D.C.** The magnetic field of ocean waves // *Nature.* 1965. Vol. 206, № 4984. P. 605.
456. **Glatzmaier G.A., Roberts P.H.** A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal // *Montly Nature.* 1995. Vol. 3, № 9(33). P. 75–81.
457. Potentiation of daunorubicin cytotoxicity by A60Hz magnetic field / C.J. Hannan, Liang Jr. and Yayun, B.K. Chang, W.W. Shelton // *Charge and Field Effects in Biosystems-4*, eds. M.J. Alien, S.F. Cleary, A.E. Sowers. World Sci. Publ. Co. Pte. Ltd. 1994. P. 218–222.
458. **Harris J.E.** The Role of endogenous rhythms in vertical migration // *J. Marine Biol. Assoc. U.K.* 1963. Vol. 43, № 1. P. 153–166.
459. **Harrison G.C.A.** Evolutionary processes and reversals of the earth's magnetic field // *Nature.* 1968. № 217. P. 46–47.
460. **Hays J.D.** Faunal extinctions and reversals of the earth's magnetic field // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1971. № 82. P. 2433–2447.
461. **Ho W., Hall W.F.** Measurements of the dielectric properties of seawater and NaCl solutions at 2,65 GHz // *J. Geophys. Res.* 1973. Vol. 78, № 27. P. 6301–6315.
462. **Horne R.A., Courant R.A.** Application of Waldan's rule to the Electrical Conduction of Sea-Water // *J. Geophys. Res.* 1964. Vol. 69, № 10. P. 1971–1977.
463. **Jacobson J.I., Saxena B.** // *Proceedings of 4th EBFA Congress.* Zagreb. 1998. P. 46–47.
464. **Johann S., Lederer T. et al.** Influence of electromagnetic fields on morphology and mitochondrial activity of breast cancer cell line MCF7 // *Current Concepts in bioelectromagnetics.* Vol. 30, Brussels, 1993. P. 127–132.
465. **Kalliaz L., Suchecka T.** Znaczenie pewnych organizmow w procesie oczyszczania sciekow w stawach biologicznych // *Gaz, woda i technika sanitarna.* 1966. Vol. 40, № 7. P. 236–237.
466. **Kalmijn A.J.** The detection of electric fields from inanimate and animate sources other than electric organs // *Handbook of Sensory Physiology.* Berlin etc.: Springer-Verlag. 1974. Vol. III/3. P. 147–200.
467. **Kalmijn A.J.** Biophysics of geomagnetic field detection // *JEEE Trans. on Magnetics.* 1981. Vol. mag. - 17, № 1. P. 1113–1124.
468. **Kalmijn A.J.** Electric and magnetic field detection in elasmobranch fishes // *Science.* 1982. № 218. P. 916–918.
469. **Kalmijn A.J.** Theory of electromagnetic orientation: a further analysis // *Comparative Physiology of Sensory Systems.* Cambridge University Press. 1984. P. 525–560.
470. **Keeton W.T.** The oriental and navigational basis of the homing in birds // *Adv. Study Behav.* 1974. № 5. P. 47–132.

471. **Kemper W.D.** Movement of water as effected by free energy and pressure gradients // J. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 1961. Vol. 25, № 4. P. 17.
472. **Kirschvink J.L.** South-seeking magnetic bacteria // J. Exptl. Biol. 1980. Vol. 86. P. 345–348.
473. **Kirschvink J.L.** Birds, bees and magnetism: A new look at the old problem of magnetoreception // Trends Neurosci. 1982. Vol. 5. P. 160–167.
474. **Kwee S., Raskmark P.** Changes in cell proliferation due to environmental electromagnetic fields. // Charge and Field Effects in Biosystems-4, eds. M.J. Alien, S.F. Cleary, A.E. Sowers, World Sci. Publ. Co. Pte. Ltd. 1994. P.255–259.
475. **Lanter F., Steiner R.A., Ammann D., Simon W.** //Anal. Chem. Acta. 1982. Vol. 135. P. 51–59.
476. **Larsen J.C.** The electromagnetic field of long and intermediate water waves // J. Mar. Res. 1971. Vol. 29, № 1. P. 28.
477. **Lindauer M., Martin H.** Magnetic effect on dancing bees // Animal Orientation and Navigation, NASA SP-262, U.S. Government Printing office, Washington D.C., 1972.
478. **Lissmann H.W., Machin K.E.** Electric reception in a nonelectric fish (Clarlias) // Nature. 1963. Vol.199, № 6. P. 88–89.
479. Ultrastructure, morphology and organization of biogenic magnetite from sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*: implications for magnetoreception) / S. Mann, N.H.C. Sparks, M.M. Walker, J.L. Kirshvink // J. Exp. Biol. 1988. Vol. 140. P. 35–49.
480. **Markov M.S., Wang S., Pilla A.A.** Effects of weak low frequency sinusoidal and dc magnetic fields on myosin phosphorylation in cell-free preparation // Current Concepts in bioelectromagnetics. Vol. 30. Brussels, 1993. P. 119–125.
481. **Markov M.S., Muehsam D.J., Pilla A.A.** Modulation of cell-free myosin phosphorylation with pulsed radio frequency electromagnetic fields // Charge and Field Effects in Biosystems-4, eds. M.J. Alien, S.F. Cleary, A.E. Sowers. World Sci. Publ. Co. Pte. Ltd 1994 P.274-288.
482. **Martin J.** Experiences de C.E.K. vertical dans le detroit de Gibraltar // Cahiers Oceanogr. 1964. Annee 16, № 5. P. 377–392.
483. **McLeod B.R., Liboff A.R., Smith S.D.** // Electromagnetobiology. 1992. Vol. 11. P. 29.
484. **Metzger J., Dobbins W.E.** Role of fluid properties in gas transfer // Environmental Sci. and Technology. 1967. Vol. 1, № 1. P. 57–65.
485. **Miller F.J., Word G.K., Chetrikina P.V.** // J. Amer. Chem. Soc. 1977. Vol. 61. P. 1492.
486. **Moore F.R.** Geomagnetic disturbance and the orientation of nocturnally migrating birds // Science. 1977. № 196. P. 682–684.
487. **Morat P.** Magneto-tellurique marine // Mises a jour scientifiques. 1970. Vol. 5, № 2. P. 143–164.
488. **Nafziger J., Desjobert H. et al.** DNA mutations and 50 Hz electromagnetic fields // Current Concepts in bioelectromagnetics. Vol. 30. Brussels, 1993. P. 133–141.
489. **Nadjakoff G.** // C.R. Acad. Sci. 1937. 204.

490. [Новая аппаратура: Frequency-selective, Isotropic measurement, Evaluation and Recording of High Frequency Electromagnetic Fields. NARDA Safety Test Solutions, GmbH An L³ Communications Company. Narda Safety Test Solutions GmbH, Germany; Narda Safety Test Solutions, USA; Narda Safety Test Solutions, srl, Italy. Информация: The 8th meeting of Bioelectromagnetics Association of Europe (EBEA), France, Bordeaux, 4–8 april,, 2007.

491. Magnetic particles in chum salmon (*Oncorhynchus keta*): extraction and transmission electron microscopy / M. Ogura, L.M. Kato, N. Arai et al. // Can.J.Zool. 1992. Vol. 70. P. 874–877.

492. Orientation and navigation birds, humans and other animals. The 1993 Intern. Conf. of the Royal Inst. of Navig. 15–17.04.93, Oxford, England. P. 4, 9, 12, 21, 24, 33, 34.

493. **Petia G. et Morat P.** Bruit et derive thermique d'electrodes d'enregistrement du champ electrique tellurique // Communication presentee au Workshop du Nurnau RFA. 1978. Sept. P. 1–14.

494. **Potter M.C.** Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds // Proc. Roy. Soc. 1911. Ser.B 84, № 260.

495. **Phillips J.B.** Use of the earth's magnetic fields by orienting cave salamanders (*Eurycea lucifuga*) // J. Comp. Physiol. 1977. A, № 273. P. 273–288.

496. Problems of Geocosmos, Book of Abstracts, Intern Confer., June 17–23, 1996. St-Peterburg, Russia. 150 p.

497. **Rankin C.H., Moller P.** Social behavior of the African electric catfish, *Malapterurus electricus*, during intra- and interspecific encounters // Ethology. 1986. Vol. 73, № 3. P. 177–190.

498. **Reid G.C., Isaksen I.S.A. et al.** Influence on ancient solar-proton events on the evolution of life // Nature. 1976. № 259. P. 177–179.

499. **Roden R.** Electromagnetic Core-mantle Coupling // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. London. 1964. Vol. 8, № 4. P. 375–388.

500. **Runcorn S.K.** Electric currents in the Earth // Discovery, London. 1964. Vol. 25, № 8. P. 20–25.

501. **Ryokborst H., Christie R.O.** Feasibility of electromagnetic streamflow measurements using the Earth's field // Hydrol. Sci. Bull. 1976. Vol. 22, № 2. P. 241–255.

502. **Saxton S.A., Lane S.A.** Electrical properties of Sea Water // Wireless Eng. (Journ. Radio Res. and Progress). 1952. № 10.

503. **Schimmelpfeng J., Dertinger H.** The action of 50 Hz magnetic and electric fields upon cell proliferation and cyclic AMD content of cultured mammalian cells // Current Concepts in bioelectromagnetics. Vol. 30. Brussels, 1993. P. 143–150.

504. **Sharp J.J.** Spread of buoyant jets at the free surface // Proc. J. Hydrologics Division. 1969. Vol. 95, № 3. P. 811–825.

505. **Siedler G.** On the «in situ» measurements of temperature and electrical conductivity of Sea-Water // Deep-Sea-Res. London. 1963. Vol. 10, № 3.

506. **Siscoe G.L., Chen C.-K., Harel M.** On the altitude of the magnetopause during geomagnetic reversals // J.Atmos. Terr. Phys. 1976. № 38. P. 1327–1331.
507. **Sisler F.D.** Electrical energy from microbiological fuel cells. // Global impacts of Applied Microbiology, John Wiley and Sons. Inc. New York, 1964. 31 p.
508. **Serrano P., Alvarez-Ude J., Bardasano J.L.** // Proceedings of 4th EBEA Congress. Zagreb. 1998. P. 113–114.
509. **Smith C.W., Best S.** Electromagnetic Man. Health and Hazard in the Electrical Environment. J.M. Dent and Sons Ltd, London, 1989.
510. Harmonic ICR tuning for cations alters radish seedling germination and growth / S.D. Smith, B.R. McLeod, AR. Liboff, V.H. Papstein // Charge and Field Effects in Biosystems-4, eds. M.J. Alien, S.F. Cleary, A.E. Sowers World Sei. Publ. Co. Pte. Ltd. 1994. P. 324–333.
511. **Squire A., Moller P.** *Brienomyrus niger*. Effect of Water conductivity on electrocommunication in the weak-electric fish *Brienomyrus niger* (*Mormyriiforms*) // Anim. Behav. 1982. Vol. 30, № 2. P. 375–382.
512. **Szabo T.** Anatomy of the specialized lateral line organs of electroreception // Handbook of sensory physiology. Berlin etc.: Springer-Verlag. 1974. Vol. 3. P. 13–56.
513. **Szmigielski S.** Electromagnetic field and neoplasms with special reference to extremely low frequencies. // Bioelectrochemistry and Bioenergetics. 1993. Vol. 30. P. 253–264.
514. Biological and Health effects from exposure to power-line frequency electromagnetic fields / H. Takabe, T. Shiga, M. Kato, E. Masada. 1999. Oshmsaha, Ltd Publisher, Tokyo, 368 p.
515. **Thorpe S.A., Callius E.C., Gough D.I.** G.E.K. for measurements turbulency fluctuations of bottom layer // Deep Sea Res. 1973. Vol. 20, № 10. P. 933–938.
516. **Uffen R.J.** Influence of the earth's core on the origin and evolution of life // Nature. 1963. № 198. P. 143–144.
517. **Walcott C.** Anomalies in the eath's magnetic field increase the scatter of pigeons vanishing bearings // Animal Migration, Navigation, and Hommig, Berlin, Spinder-Verlag, 1978, 143–151.
518. **Walker M.M., Montgomery J.C., Pankhurst P.M.** Toward a sensory basis for magnetic navigation by animals. // RIN93. Orientation and navigation birds, humans and other animals. The 1993 Intern. Conf. of the Royal Inst. of Navig. 15-17.04.93, Oxford, England. P. 4.
519. **Wikswow J.P., Jr., Barach J.P., Freeman J.A.** Magnetic field of a nerve impulse: First measurement // Science. 1980. № 208. P. 53–55.
520. **Wiltchko W.** The migratory orientation of garden warblers. Avian Navigation, Berlin, pringer-Verlag, 1982. P. 50–58.
521. **Workman E.J., S.E. Reynolds** // Phys. Rev. 1950. Vol. 78, № 3. P. 254–259.
522. **Valenzuela G.K.** Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves: A review // Boundary Layer Meteorol. 1978. Vol. 13, № 1–4. P. 61–85.
523. **Verwey B.J.W., Overbeek J.T.G.** Theory of the stability of Liophobic Colloids. // Amsterd., Elsevier. 1948. 205 p.
524. **Zoeger J., Dunn J.R. Fuller M.** Magnetic material in the head of the Pacific dolphin, Science // Science. 1981. № 213. P. 892–894.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абсолютная диэлектрическая проницаемость (разд. 2.1.2)
Абсолютная магнитная проницаемость (разд. 2.1.2)
Абсолютные практические электрические единицы (разд. 1.1.2–1.1.3; 2.1.1)
Абсорбция (разд. 2.4.1)
Авроральные зоны (ч. 1)
Автоколебания (разд. 3.2.1)
Агрегатные состояния (разд. 4.2.1–4.2.4)
Адаптация, адаптационный синдром (разд. 3.3.3)
Аденилпирофосфорная кислота (АТФ) (разд. 3.1.4)
Аденозиндифосфат (АДФ) (разд. 3.1.4)
Адреналин (разд. 3.1.3; 3.2.2)
Адсорбция (разд. 2.4.1)
Аккреция (разд. 2.3)
Акселерация (разд. 3.1.3)
Аллель (разд. 3.2.1)
Альфвеновские волны (разд. 1.3.2)
Аминокислоты (разд. 3.1.3; 3.2.2)
Ампера закон (разд. 1.1.1; 2.1.3)
Аномалии воды (разд. 2.1.2)
Антенны (разд. 2.2–4.2)
Антиоксиданты (разд. 3.1.3)
Антропосфера (разд. 4)
Антропоэкология (разд. 1; 4)
Артериальное давление (разд. 3.1.3)
Атмосфера (разд. 1)
Атмосферики (разд. 2.1.4)
Атмосферное динамо (ч. 1)
Атмосферно-электрическое поле (разд. 1)
Аут(о)экология (Введение)

Б

Бактерии, чувствительность к МП (разд. 2.5.1; разд. 3)
Баллистическое электрическое поле (разд. 3.1.3)
Баллоэлектрический эффект (эффект Ленарда) (разд. 2.1.3)
Белок (разд. 3.1.1)

Белый шум (разд. 2.4.4)
Береговой рефракции явление (разд. 2.4.4)
Бесстолкновительная волна (затухание в плазме) (разд. 1.3.2)
Биогенез (Введение; разд. 3; 4)
Биогены (Введение; разд. 3.1.3)
Биогеосфера (Введение; разд. 3; 4.3)
Биогеоценоз (Введение; разд. 4.3)
Биоиндикаторы (разд. 4.1.2; 4.2)
Биологическая система (разд. 3)
Биологически активные вещества (разд. 3)
Биологические часы (разд. 1.1.1; 4.1.1–4.1.3)
Биологическое электромагнитное поле (разд. 3.1)
Биолокация (разд. 3.1)
Биомасса (разд. 2.5)
Биоритмология (разд. 3.1.3)
Биосфера (разд. 3)
Биотропность (разд. 3.1.3)
Биоценоз (разд. 4.1.2)
Биоэлектреты (разд. 3.1.1)
Биоэлектромагнитная совместимость (разд. 3.3.1)
Биполярное отведение (разд. 2.2.3)
Близкородственное скрещивание (разд. 3.2.1)

В

Вектор Пойнтинга (разд. 1; 2.1.3)
Вероятность термодинамическая (разд. 3.2.2)
Вещество живое (разд. 3.1.1)
Вид (разд. 3)
Вина эффект (разд. 2.1.2)
Витальные функции (разд. 3.1.3)
Вольфа числа (разд. 1.3.3)
Воркмана–Рейнольдса эффект (разд. 2.1.3)
Воспроизводимость (разд. 3.2.1)
Вращательное движение (разд. 2.4; 2.1.3)
Время релаксации для воды (разд. 2.1.3)

Г

Гелиобиология (разд. 1.3.2)

Гемоглобин(ы) (разд. 3.1.1)
Генетическая изменчивость (разд. 3.1.4)
Геном (разд. 3.1.4)
Генотоксичность (разд. 3.1.4)
Гены (аллели) (разд. 3.2.1)
Геоманнитное поле (разд. 1)
Геотаксис (разд. 1)
Гидробионты (пелагические, донные) (разд. 2.5)
Гидрофобность (разд. 2.4.1)
Гидрофобные и гидрофильные аминокислоты (разд. 2.4.1)
Гипофиз (разд. 3.3.1)
Гомеостаз (разд. 3.3)
Гормоны (разд. 3.3)

Д

Дарвинизм (Введение; разд. 1.2)
Двойной электрический слой (ДЭС) (разд. 2.4.1)
Дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК) (разд. 3.1.1, 1.4)
Денитрификация (разд. 4.2.4)
Дзета-потенциал (разд. 2.4.1)
Диастола (разд. 3)
Динамика (чего-либо) (разд. 1.1.3, 1.3.1–1.3.3)
Диссипативных структур теория (разд. 3.2; 3.3)
Диффузно-адсорбционные электрические поля (разд. 4.2.2)
Домены (разд. 3.1.1)
Доннана электролитическая (концентрационная) цепь (разд. 2.2.2)
Дорна эффект (разд. 2.1.3)

Ж

Железы (разд. 3.1.3; 4.1.3)
Живое вещество (разд. 3.1)
Животное (разд. 3.1)

З

Загрязнение биосферы (Введение)
Закон биогенетический (онтог + филог) (Введение; разд. 3.2.1)
Закон биогенной миграции атомов (Вернадский) (разд. 3)

Закономерность распределения спектральной плотности
энергии турбулентности [спектры Колмогорова] (разд. 2.4.3, 2.4)
Зеемана эффект (разд. 2.4)
Зеемана–Лармора–Лоренца эффект (разд. 2.1.3)
Зенит (разд. 1.1.1, 1.1.2)
Золотые рыбки (разд. 3.2; 4.3.2)
Зона адаптивности (разд. 1.2; 3.2.1)

И

Излучение
– ионизирующее
– неионизирующее (Введение; разд. 1.1.3., 1.3.3)
Иммунитет (разд. 3.1.4)
Инбридинг (разд. 3.2)
Инвариантность заряда (разд. 2.1.3)
Инверсии геомагнитного поля (разд. 1.2)
Ингибитор (разд. 1.2)
Индексация геомагнитных возмущений (разд. 1.3)
Индуктивность, взаимная индуктивность (разд. 2.1.3)
Индуктор (разд. 2.1.3)
Инженерия генов (разд. 3)
Ионные связи (разд. 2.1.3, 2.2)
Ионный потенциал (разд. 2.1.1)
Ионосфера Земли (разд. 1.3.3–1.3.4)

К

Кавитационные явления (разд. 2.1.3)
Карта (разд. 1.1.4)
Карцинома молочных желез (разд. 3.2)
Квинке эффект (разд. 2.3.1)
Кератин (разд. 2.1.1)
Клеточные многоядерные ассоциаты (разд. 2.1.1, 2.1.2)
“Количество магнетизма” (разд. 2.1.3)
Коллаген (разд. 3.1.1)
Колмогорова закономерность распределения плотности

энергии спектра турбулентного процесса в жидкости (разд. 2.4.4)
Кольцевой ток (разд. 1.3.1)
Коммуникация (разд. 1.2, 1.3)
Компартменты (разд. 3.1.1)
Консументы (разд. 3.1.1)
Конформация белков (разд. 3.2.2)
Косты—Рибейро эффект (разд. 2.1.1)
Коэффициент давления воды (разд. 2.1.3)
Коэффициент ионизации (разд. 1)
Коэффициент сжимаемости воды (разд. 2.1.3)
Критерий нормального поля для акваторий (разд. 2.1.3)

Л

Ленгмюра циркуляция (разд. 2.4.6)
Линейная поверхностная и объемная (пространственная) плотность электрического заряда (разд. 2.1.3)
Лоренца сила (разд. 2.1.3)
Лунные ритмы (разд. 2.1.4)
Льюиса и Уайтмена микровихревая пленочная концепция (разд. 2.4.1)

М

Магнетит (разд. 3.1)
Магнитная буря (разд. 1.3.3—1.3.4)
Магнитная индукция (разд. 2.1.3)
Магнитная масса (количество магнетизма) (разд. 2.1.2)
Магнитная постоянная (разд. 2.1.2)
Магнитная проводимость (разд. 2.1.2)
Магнитная чувствительность (ч. 1, разд. 3.1.2)
Магнитный момент (разд. 2.1.3)
— диполя (разд. 2.1.3)
— контура (разд. 3.1.1)
Магнитный поток (разд. 2.1.1)
Магнитобиологические явления (разд. 2.5)
Магнитодвижущая (намагничивающая) сила (разд. 2.1.3)
Магниторецепция (разд. 3.1.1)
Магнитосомы (разд. 3.1.1)
Магнитосфера Земли (разд. 1.3.2)

Магнитотропные реакции (разд. 3.1.1, 3.1.4)
Межпланетное магнитное поле (разд. 1.3.2)
Мелатонин (разд. 4.1.2)
Мёссбауэровский метод спектроскопического анализа (разд. 2.1.2, 3.1.1)
Метод расчета электропроводимости пресной и морской воды (разд. 2.1.2)
Миграции (разд. 2.5.3)
Микропульсации электромагнитные (разд. 2.1.4)
Микроядерный тест (разд. 3.1.4)
Митоз (разд. 3.1.3, 3.1.4)
Момент количества движения (кинетический момент) (разд. 2.1.3)
Момент электрического диполя (разд. 2.1.3)
Монополярное отведение (разд. 2.2.2)
Мутации, мутационный процесс (разд. 3.1.4; 4.1.1)

Н

Навигация (разд. 4.2.5)
Надир (разд. 1.1.2)
Напряжение (разность электрических потенциалов) (разд. 2.1.3)
Напряженность
— магнитного поля (разд. 2.1.3)
— электрического поля (разд. 2.1.3)
Нелинейная динамика (разд. 3.2.2)
Неполяризующийся электрод (разд. 2.2.2)
Неравновесность водных экосистем (разд. 2.1.1, 2.2.2)
Нормальное геофизическое (геомагнитное) поле (разд. 2.4.1)
Нормальное электрическое поле атмосферы (разд. 2.4.1)

О

Объемная плотность энергии (разд. 1.3.1)
Объемный заряд (разд. 2.1.1–2.1.3)
Онсагера—Фюосса уравнение (разд. 2.1.2)
Онтогенез (разд. 1.2)
Онтогенетическая роль (разд. 1.2)
Ориентация животных в пространстве (разд. 1.2; 2.5)

П

Пеленгация, пеленговать (разд. 2.1.2)
Поведение (разд. 2.5)
Поляризационный эффект (разд. 1.1.3)
Поляризация ЭМИ (разд. 1.3.1)
Поляризованность (интенсивность поляризации) (разд. 2.1.1)
Потенциал действия (ПД) (разд. 3.2)
Потенциал земной поверхности (разд. 2.4.1)
Потенциалы замерзания (разд. 2.1.3)
Поток электрического смещения (поток электрической индукции) (разд. 1.1.2, 2.1.1)
Пояса радиации (разд. 1.3.1)
Предел упругости для поверхностной пленки (разд. 2.4.1)
Принцип устойчивого неравновесия (разд. 3.2)
Продуценты (разд. 2.5.1)
Противонакипной эффект (разд. 2.1.2)

Р

Радиационные пояса Земли (разд. 1.3)
Радиолиз воды (разд. 4.1.1)
Реактивное поведение (разд. 3.1, 3.2)
Реакция избегания (разд. 3.2)
Регуляторы (разд. 2.1.1; 3.1.3)
Регуляция (разд. 3)
— естественная (разд. 3)
— искусственная (разд. 3)
Резонансное поглощение энергии (разд. 2.4.5)
Резонансные эффекты (разд. 2.4.5)
Рейнольдса число (разд. 2.3.3)
Рейс НИС “Витязь” (разд. 1.3.1)
Реликтовое излучение (разд. 4.3.3)
Ретардация (разд. 3.1.4)
Рецепторы (разд. 3.5)
— магниточувствительности
— электрочувствительности
Рибонуклеиновая кислота (РНК) (разд. 3.3.1)
Рибосомы (разд. 3.1.1; 3.1.4)

С

Самоорганизующиеся и саморегулирующиеся экосистемы (ч. 2)
Свертываемость крови (разд. 3.1.3)
Связанная вода (разд. 3.1.1)
Сенсоры (разд. 1; 3.1.3, 3.2.1)
Симпатическая нервная система (разд. 3.3.1)
Синтез воды (разд. 2.1.1)
“СКВИД” (разд. 4.3.2)
Собственные колебания Земли (разд. 2.4.1)
Солнечная активность (разд. 1.3.3)
Солнечно-земные связи (ч. 1)
Солнечные космические лучи (СКЛ) (разд. 1.3.1)
Солнечный ветер (разд. 1.3.1)
Сольватность (разд. 2.4.1)
Соотношение между единицами электромагнетизма (разд. 2.1.3)
Сотовая телефонная связь (разд. 4.3.2; 4.3.3)
Спектры распределения энергии турбулентных пульсации (разд. 2.4.4)
Степень диссоциации (разд. 2.2)
Структурированная вода (разд. 2.1.1)
Субаквальная фильтрация (разд. 2.3.2)
Суточное распределение активности (у рыб)(разд. 3.2.3)

Т

Таракановые (разд. 1.2)
Теллурическое поле (разд. 2.1.3)
Терминологические понятия и определения по геомагнетизму в абиотической водной среде (разд. 2.1.3)
Термодинамическая вероятность (разд. 3.2.1)
Техносфера (разд. 4.1)
Трибополяризация (разд. 2.2.4)
Тройничный нерв (разд. 3.1.2)

У

Удельная электрическая проводимость (разд. 2.1.2)
Урбанизация (разд. 4.3)
Уровни энергии (разд. 1.3; 1.3.4)

Ф

Фазоаурометр (разд. 3.1.3)
Фазы магнитной бури (ч. 1)
Ферменты (разд. 3.1.1)
Ферромагнитные домены (разд. 3.1.2)
Фетопатия (разд. 3.1.3, 3.1.4)
Фибробласты (разд. 3.3.1)
Филогенез (ч. 1)
Фитопланктон (разд. 2.5.3)
Флокуляция в белково-коллоидных растворах (разд. 4.2.2)
Флуктуционно-диссипативная теорема (разд. 2.1.1)
Фоновые излучения (Вселенной) (разд. 1.1)
Фотон(ы) (разд. 1.3.1)

Х

Хейса гипотеза (разд. 1.3.3)
Хеморецепция (разд. 4.1.1)
Хигби и Данкверта пленочная концепция структуры поверхности раздела фаз (разд. 2.4.1)
Хитин (разд. 3.1.1)
Хромосфера, хромосферная вспышка (разд. 1.3.3)

Ц

Центральная нервная система (ЦНС) (разд. 3.1.2–3.1.3)
Циркадианные ритмы (разд. 3.3)
Цитопения (разд. 3.3.1)

Ч

Часы биологические (разд. 3.3)
Черенкова–Вавилова эффект (разд. 1.3.1)
Числа Вольфа (разд. 1.3.3)

Ш

Широтный эффект в СКЛ (разд. 1.3.1)

Э

Эволюция, доказательство, роль (разд. 1.2)
Экология (Введение)
Экосистема (разд. 3)
Электреты (разд. 3)
Электрическая емкость (электроемкость) (разд. 2.1.3)
Электрическая мощность (разд. 2.1.3)
Электрическая проводимость (разд. 2.1.2)
Электрическая работа и энергия (разд. 2.1.1)
Электрический потенциал (разд. 2.2.4)
Электрическое напряжение (разд. 2.2.4)
Электрогенез животных клеток (разд. 3.1)
Электродвижущая сила (ЭДС) (разд. 2.2.2, 2.2.4)
Электрокинетический потенциал, электрокинетические явления (разд. 2.1.3)
Электролиты, Дебая—Хюккеля теория (разд. 2.1.3)
Электромагнитная совместимость (разд. 3.3.1)
Электрополюметрия (разд. 2.2)
Электропроводимости растворов теория (Фуосса—Онсагера) (разд. 2.1.2)
Электрорецепция (разд. 3.1, 3.2)
Электросейсмологические явления (разд. 2.4.2)
Электротеллурическое поле (разд. 2.4)
Электрохимическая ячейка (разд. 2.2.2)
Электрочувствительность (разд. 3.1.2)
Элементы земного магнетизма (разд. 1.1.2)
Эмбриональное развитие (разд. 3.1.4)
Энергия (разд. 2.1.1)
Эпифиз (и мелатонин) (разд. 4.1.2)
Эрготическая гипотеза (разд. 2.3.5, 2.4.4)
“Эффект балерины” (Альфвена эффект) (ч. 1)
Эффекторы (разд. 3.1.1)

Я

Явление береговой рефракции (разд. 2.4.4)

АВТОР МОНОГРАФИИ **“ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА”**

Александров Владимир Владимирович

Высшее образование получил в Ленинградском государственном университете.

Работал в проектных, научно-исследовательских и гидрографических организациях Военно-Морского Флота СССР.

Более 30 лет посвятил изучению физических явлений в морях и озерах и физиологии поведения водных животных в Санкт-Петербургских учреждениях Российской Академии наук.

В настоящее время В.В. Александров доктор географических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры “Гражданское строительство и прикладная экология”, руководит лабораторией “Электрофизика естественных экосистем” инженерно-строительного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Действительный член (академик) Международной Академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ), действительный член Европейской Ассоциации по биоэлектромагнетизму European Bioelectromagnetic Association (EBEA) с 1990 г.

Научные интересы: геокосмос, биомедицинское действие электромагнитного излучения на живые организмы и растения *in vivo*; защита биосферы от неионирующего электромагнитного излучения; антропоэкология.

В течение более 12 лет передает свои знания студенчеству Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Решением Совета Президиума Учебно-методического объединения по университетскому политехническому образованию рукописи В.В. Александрова “Экологическая роль электромагнетизма” присвоен гриф “Учебное пособие” для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 280200 — “Защита окружающей среды” (протокол Учебно-методической

Комиссии от 05.10.2009, № УМК-53-09, Протокол заседания Совета Президиума УМО от 12.10.2009 г. № 14/09).

Рукопись переработана и подготовлена на основе монографии В.В. Александрова “Экологическая роль электромагнетизма”, опубликованной в 2006 году и отмеченной следующими наградами: Диплом за победу в конкурсе “Лучшая книга 2006” в номинации “Электромагнитные проблемы экологии” и медаль им. М.В. Ломоносова, присужденные Президиумом Международной Академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности в 2007 г.; Диплом II степени за победу в конкурсе учебных и научных изданий ВУЗов и ССУЗов Санкт-Петербурга в номинации “Лучшее научное издание”, присужденный 26.10.2007 г. Комитетом по науке и высшей школе при Правительстве Санкт-Петербурга.

В.В. Александров включен в Международный Биографический справочник за плодотворную научную деятельность, Великобритания, 31-я редакция, 2004 г. (DICTIONARY OF INTERNATIONAL BIOGRAPHY 31ST EDITION, 2004. REF CR/AM/DIB31/73468, IBC WORLD PUBLICATION, 25 october 2005. p. 74, International Biographical Centre, Cambridge, CB2 3QP, England.

Заявки на предполагаемое издание направлять в издательство СПбГПУ в производственный отдел, по электронному адресу olga@mediabooks.ru зам. дир. Ольге Юрьевне Поповой, или по факсу: 8(812) 552-36-78, тел. 8(812) 552-77-17.

ЧАСТЬ I.

ГЕОМАГНЕТИЗМ И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫЕ СВЯЗИ

**1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ
И ЕГО РОЛЬ В БИОСФЕРЕ**

**2. ЭВОЛЮЦИОННАЯ И ОНТОГЕНЕТИЧЕСКАЯ
РОЛЬ ГЕОМАГНЕТИЗМА**

**3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В СИСТЕМЕ
СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ: ДИНАМИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ И ОТКЛИК ЭКОСИСТЕМ**

1. Назначение Ч.1.

Преследуется цель по возможности объективно описать современные научные достижения в области познания геокосмических электромагнитных явлений и показать их эволюционную значимость для биосферы Земли.

2. Аспекты фундаментальной значимости Ч.1

Достоверность оценки экологического состояния земных ресурсов, выбор стратегии их использования и перспектива сохранения жизни в целом на планете Земля возможны лишь при глубоком знании и понимании механизмов, определяющих суть энергетических преобразований в системе Земля-Космос, но основную роль играют здесь электромагнитные взаимодействия между ближайшей звездой к Земле — Солнцем, межпланетным магнитным полем и электромагнетизмом Земли.

**3. Аспекты прикладного внедрения результатов
фундаментальных исследований**

Планомерное, межгосударственное обеспечение бесперебойной гелиогеофизической информацией о состоянии Солнечной Погоды в пределах магнитосферы Земли:

- повышение надежности и оправдываемости климатологических и метеорологических прогнозов (долгосрочных и краткосрочных для любой хозяйственной деятельности);
- обеспечение безопасности полетов космических кораблей в пределах магнитосферы Земли, а также авиации в пределах стратосферы;
- надежность и безопасность радиосвязи в пределах верхней атмосферы (ионосферы);

- обеспечение безопасности и живучести наземных энергосистем на основе прогнозов Космической погоды (особенно повышение точности прогноза мировых магнитных бурь интенсивностью более 1000 нТл) и т.д.;

- обеспечение службой солнечно-земных связей достоверными прогнозами лечебно-профилактических медицинских учреждений о перспективе геомагнитных возмущений в целях снижения риска летальных исходов для людей, страдающих сердечно-сосудистой патологией.

4. Современное состояние внедрения научных разработок в решение прикладных задач в планетарном масштабе (4.1):

- созданы государственные службы Солнечно-земных связей (солнечных данных) в основных ведущих развитых странах - России, США, Великобритании, Норвегии, Японии, Франции, Китае. Существует Международный центр данных, информация доступна в Интернет;

- созданы государственные службы (банк данных) по геомагнетизму (Россия, США, Великобритания, Япония) для обеспечения навигационных потребностей крупных морских государств (геомагнитное картирование океанов и морей), а также применения магнитотеллурических методов зондирования крупных акваторий для поиска природных минеральных ресурсов на шельфе и в абиссали;

- созданы крупные научно-прикладные международные ассоциации по электромагнетизму среды обитания (ЕВЕА, ВЕМС, WHO и т.д.), осуществляющие новую форму распространения фундаментальных знаний и обменом информацией для практических целей путем проведения международных конгрессов, симпозиумов, конференций именно в сфере экологической деятельности.

ЧАСТЬ II. ЭЛЕКТРОФИЗИКА АКВАЛАНДШАФТА И СРЕДСТВА ЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ГИДРОСФЕРЕ

2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕ- НИЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЗОН АКВАТОРИЙ

5. ЭКОЛОГО-ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ГЕОМАГНЕТИЗМА

1. Назначение Ч. II.

Большая часть поверхности планеты Земля покрыта водой. Это основная абиотическая среда обитания, являющаяся колыбелью жизни. Многолетние исследования автор сосредоточил на выявлении закономерностей Природы именно в водоемах, в области взаимодействия электромагнитных сил в системе солнечно-земных связей, в спектре неионизирующего и слабого излучения.

В этой части показана преемственность законов электродинамики от планетарных масштабов до их локальных проявлений в контактных геофизических функциональных зонах как на крупных акваториях (океаны, моря), так и в водоемах суши (озера, водотоки). Показано реальное восприятие биосферой взаимодействия электромагнитных полей планетарного и локального масштабов.

2. Аспекты фундаментальной значимости

Электромагнитные методы оценки экологического состояния водных ресурсов рассмотрены впервые, хотя ранее проводившиеся в акваториях геофизические работы затрагивали частные проблемы электрофизики водоемов (поиск рудных и нефтегазоносных ресурсов, измерение стационарных крупных течений в море и др.).

Комплексная экологическая направленность в цепи общепланетарного познания ответной реакции биосферы Земли на электромагнитное воздействие естественных и техносферных источников

изменения устойчивого эволюционного развития биогеоценозов выдвигает эти методы в ряд фундаментального и принципиально нового подхода к Природе в целом.

Именно выявление закономерностей формирования пространственно-временной изменчивости макроскопических характеристик воды, источников неоднородности и динамики электрических и магнитных свойств и поля гидросферы в открытых естественных экосистемах, гарантирует перспективу последующего прикладного использования научных результатов измерений.

3. Аспекты прикладного внедрения результатов фундаментальных исследований

- на протяжении долгих лет внедрение новых электромагнитных методов исследования акваторий испытывало определенные трудности, что было обусловлено отсутствием описания стройной методики измерений электромагнитных характеристик открытых акваторий. К настоящему моменту основы такой методики разработаны и не без участия автора книги, где четко изложены сами методы, принципиальные способы и новые средства электрометрии акваторий, метрологические требования и обеспечение достоверности результатов измерений, способы снижения технических погрешностей при полевых работах и т.д.

- учебно-познавательная направленность в Ч. II книги заложена в разделе, посвященном моделированию электрокинетических явлений в лабораторных условиях (гидродинамические явления, управление движением твердо-фазных примесей, поведение и активность водных организмов в условиях искусственно создаваемых режимов электрического и магнитного воздействия).

4. Научные фундаментальные разработки как предмет прикладной значимости

Разделы (главы) 4 и 5 в Ч. II занимают особое, пограничное, состояние. С одной стороны, это типичные фундаментальные исследования, которые важны сами по себе как характеристики проявления электрофизических свойств экосистем и абиотической среды, с другой, - они задуманы заранее, как будущие источники информации прикладного назначения. Касается это, например, гидродинамических полей, геоструктур подводного ложа водоемов, береговой зоны и др. геофизических явлений, которые могут оказаться естественными помехами в поисково-разведочных работах в геологии, биологии, навигации.

Глава 4 формирует представление о ландшафтно-геофизической диагностике акваторий по результатам электрофизических исследований.

Дается наиболее полный объем сведений о новых экспериментальных результатах, характеризующих структуру прибрежных и глубинных ландшафтов, изменчивость проводящих свойств водных масс озерных котловин и морей, электрические поля течений в крупных озерах (Ладожское, Онежское).

Дается обоснование необходимости введения понятия “обобщенного критерия нормального электрического поля водоемов” ввиду постоянно существующей флуктуационной части его, связанной с нестационарностью природных процессов и собственными колебаниями Земли.

Представлен уникальный материал, характеризующий закономерности распределения функций спектральной плотности энергии электрических полей, обусловленных гидродинамическими источниками (волновые и вихревые процессы, турбулентные пульсации) и метеорологическими условиями в переходном слое воздушная — водная среда.

Глава 5 посвящена эколого-физиологической роли геомагнетизма.

Одна из главнейших задач освоения акваторий состоит в обеспечении условий сохранения экологического равновесия в окружающей среде. Решению этой задачи могут способствовать проведенные и планируемые исследования электромагнитных взаимодействий среды обитания с живыми ее компонентами. Основу таких взаимодействий определяют электрические и магнитные поля водных экосистем и контактирующие с ними поля атмосферы и литосферы. Поэтому в течение последних 20 лет изучались электрические поля гидробионтов, восприятие ими гидрофизических полей пресноводных и морских экосистем и внешних геомагнитных воздействий. Подчеркнем, что в физиологической науке существенная роль отводится геофизическим факторам, ответственным за эволюцию электросенсорных органов, поведенческие и нейрональные реакции у низших и высших животных. Значительные успехи в этом направлении достигнуты при электрофизиологических исследованиях рыб и разработке ряда теоретических вопросов электрогенеза живых систем на примере одноклеточных и многоклеточных организмов (простейших).

Таким образом, в данном разделе курса излагается:

- электромагнитное излучение биологической природы;
- электрические поля водных организмов и их чувствительность к электромагнитным полям среды обитания;
- физиология поведения гидробионтов как показатель геомагнитной активности;

— экологическая уязвимость и проблемы адаптации водных организмов в условиях неограниченного действия электромагнитных полей;

— биоинформационная функция естественных электромагнитных полей в биосфере.

В результате целенаправленных полевых исследований в озерах и море были выявлены корреляционные связи биоэлектрических полей планктонных организмов с элементами геомагнитного поля, установлено, что периодичность внутрисуточных вертикальных перемещений зоопланктона (“трофогенный слой водоема”) соответствуют геомагнитным ритмам. Далее показано, что пороговая зона восприятия гидробионтами электрического и магнитного полей низкой интенсивности соизмерима с величиной “критерия условного нормального поля” водоема (≈ 5 мкВ).

ЧАСТЬ III. МАГНИТОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПОВЕДЕНИЕ ЭКОСИСТЕМ

1. РЕГУЛЯЦИЯ ФИЗИОЛОГИИ ЭКОСИСТЕМ В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЛАБЫХ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ФАКТОРОВ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

3. ДЕТЕРМИНИРУЮЩАЯ РОЛЬ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ И РАЗВИТИИ НОВЫХ БИОТЕХНОЛОГИЙ

1. Назначение Части III.

Исходя из перспективы совершенствования и развития новых учебно-методических направлений и требований к современному специалисту-экологу, на кафедре “Экологические основы природопользования” ИСФ СПбГПУ в настоящее время “Гражданское строительство и прикладная экология” был сформулирован и преподается с 1995г. учебный курс “Электромагнитная экология” (первоначальное название “Электрофизический мониторинг природных экосистем”) по специальности 553500 — Инженерная

защита окружающей среды. “Современные экологические проблемы безопасности жизнедеятельности”.

Новые разделы по изучению и анализу воздействия неионизирующего электромагнитного излучения (**НЭМИ**) на экосистемы биосферы Земли должны не только ознакомить студентов с проблемами влияния естественного геомагнитного и теллурического полей на биоту, но и помочь формированию современного осознания роли техногенных источников **НЭМИ**, как нового и зачастую опасного экологического фактора окружающей среды (ОС).

Развитие научно-исследовательской и учебно-методической работы не должно замыкаться только на изложение теоретического курса, необходимо внедрение экологического практикума с использованием современных технических средств и аппаратуры.

В качестве механизма, обеспечивающего оптимальный и кратчайший по времени путь от теории до реального управления экологическими процессами организована Лаборатория “Электрофизика естественных экосистем”. Именно она должна способствовать развитию электромагнитных методов экологического мониторинга.

В этом ее междисциплинарная значимость и связь с общеуниверситетской программой становления сквозного экологического образования.

Теоретический курс и лабораторный практикум преследуют цель обеспечить получение новых комплексных знаний в междисциплинарной области **электрофизика -экологическая физиология** и формирование нового экологически грамотного мышления при проектировании, изыскательских работах, строительстве, а также последующем хозяйственном использовании природных ресурсов.

Следует подчеркнуть, что на данном этапе природопользования зримо ощущается совместимость проблем экологической физиологии с проблемами инженерно-технического обеспечения сохранения экологического равновесия (генетического и физиологического гомеостаза) в природных экосистемах

2. Аспекты фундаментальной значимости Части III.

Биосфера Земли обладает собственными внутренними источниками генерирования электромагнитных колебаний. Анализ экспериментальных данных, получаемых в сложных условиях, требует совместного решения задач электрогидродинамики, электрохимии и коллоидной химии, гидрологии, гидробиологии, биофизики, водной токсикологии, геологии, радиотехники. Поэтому из-за объективно существующих трудностей проблема электрофизики биосферных экосистем практически не рассматривалась. Существовали разработки по частным вопросам возникновения электрического поля в литосфере, атмосфере, водоемах, в биологических структурах и т.д.

Актуальность выше рассмотренной проблемы подтверждается тем, что в течение последних 30 лет научные организации мира провели крупные симпозиумы, конференции и конгрессы, посвященные задачам исследования электромагнитных свойств окружающей среды и взаимодействия электрических и магнитных полей компонентов биосферы с внешними электромагнитными полями космических и земных источников. Особенно были выделены задачи биоиндикации последствий воздействия космических, земных и антропогенных источников электромагнитного поля на биосферу в целом и человека в частности.

Результатом этих мероприятий явилось развитие многообразных и многоцелевых исследований в области электромагнетизма неионизирующих излучений в окружающей среде, электромагнитных свойств физико-химических и биологических систем. Определены пути решения сложных проблем взаимодействия Земли и Космоса, литосферы и гидросферы, живых и неживых компонентов нашей планеты.

За последнее десятилетие появились научные разработки, в которых показана конкретная значимость влияния электромагнитных флуктуаций, вызванных внешними (космическими) и внутренними (собственно, земными — литосферными, гидродинамическими и биолого-химическими) источниками возмущения поля. Появилась новая аппаратура для измерения слабых электромагнитных сигналов в ультранизкочастотном диапазоне колебаний, учет которых оказывается исключительно важным в интерпретации планетных и локальных геофизических процессов и явлений. Прямыми экспериментами была доказана и высокая биоактивность этих сигналов.

3. Аспекты прикладного внедрения результатов фундаментальных исследований

Электромагнитные методы исследования окружающей среды особенно широко стали внедряться на акваториях океанов, морей и внутриконтинентальных водоемов. Это продиктовано актуальными задачами практического использования электрических и магнитных эффектов в воде.

Как и физико-химические факторы среды, электромагнитное поле является объективным природным фактором, играющим существенную роль в формировании абиотических условий в воде и влияющим на протекание процессов в биосфере. В природных экосистемах все без исключения физико-биологические процессы сопровождаются электрическими и частично магнитными явлениями и находятся в то же время под воздействием внешних электромагнитных излучений. Вся эволюция экологических условий

на Земле протекала под воздействием как внешнего, так и внутреннего электромагнитного поля, которое с момента наступления эпохи технического прогресса в сфере человеческой деятельности изменило ее естественный ход. Поэтому электромагнитные поля природных объектов в свою очередь являются методическим средством, инструментом исследования динамики экологических условий окружающей среды, а также мерой техногенного последствия разрушения природных целостных экосистем. Исследование изменчивости электромагнитных полей экосистем дает объективную информацию о причинах структурной перестройки их в процессе эволюции, а также не исключает возможности оценить короткопериодные внешние антропоферные воздействия. Относительная слабость природных излучений по сравнению с техногенными источниками их искажения и возмущения до сих пор существенно затрудняли их изучение и выделение из общего спектра флуктуации. Но современное электрофизическое оборудование и приборы для научных изысканий позволяют скрупулезно исследовать тончайшие механизмы электромагнитного взаимодействия вещества и внешних физических полей среды.

В настоящей книге рассматриваются вопросы электрогенеза экосистем на примере крупных и мелких пресноводных озер и морских акваторий. В озерах, как в зеркале, отражается вся созидательная и разрушительная деятельность человека. Лимнические системы могут быть источником информации о том, где и на какой стадии идет активное вмешательство людей в преобразование окружающей среды. Кроме того, анализируются проблемы сухопутных животных и человека, подвергающихся действию **НЭМИ** повсеместно и непрерывно.

ЧАСТЬ IV. АНТРОПОСФЕРА И НЕИОНИЗИРУЮЩЕЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

1. СОВРЕМЕННОЕ ОСОЗНАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ РОЛИ ТЕХНОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

2. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ УЯЗВИМОСТЬ ВОДОЕМОВ И ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ ВОДНЫХ ОРГАНИЗМОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

3. БИОГЕОЦЕНОЗЫ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ, ФАКТОРЫ РИСКА В ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИИ НАСЕЛЕНИЯ

Назначение Ч. IV.

В IV части представлен опыт выявления экосистемных показателей действия техногенных источников электромагнитных полей неионизирующего излучения.

Иными словами, это прикладная часть книги, в которой обобщен авторский опыт практического использования новых методов в различных аспектах защиты природной среды от технических источников загрязнения. Это связано как с подготовкой научных основ контроля и рационального потребления водных ресурсов, так и разработками промышленного и оборонного назначения, использующими электрофизические характеристики среды. Оно определяется новыми принципами и методическими возможностями при внедрении экологического мониторинга акваторий, который может осуществляться как в научно-поисковых, так и охранительно-контрольных целях, используя основное свое преимущество — оперативность измерения и оценки состояния объекта. Такой мониторинг в озерах, подверженных загрязнению, позволил дать оценку их экологического состояния и показать роль электрокинетических явлений в снижении самоочищающей способности водной среды.

Эти результаты учтены при подготовке регламентирующих документов по улучшению экологической обстановки на озерах.

Исходя из данной предпосылки, в разделе рассмотрены:

- оценка устойчивости экосистем к техногенному электромагнетизму;
- электрическое поле гетерогенных водных масс, содержащих искусственные примеси;

- способ контроля качества воды по её электрофизическим показателям;
- экологическое состояние озер северо-западного региона России по результатам электрометрического контроля;
- техногенные источники формирования стационарных и флуктуирующих электрических полей в воде;
- системы защиты природных и промышленных объектов от излучения;
- экологическое нормирование и учет роли электромагнитных факторов;
- современные требования к обеспечению фундаментальной изученности воздействия электромагнитной среды обитания на природу и человека

Данная часть призвана как бы нацеливать студента — эколога к выбору будущей практической направленности в той или иной области контроля природной и техногенной среды — вода и водные ресурсы, охрана биогенной части экосистем, совместимость источников естественной и техногенной генерации электромагнитных полей в биосфере, разработка новых параметров по учету электромагнитных факторов в практике создания новых энергосистем и т.д.

Правительство Санкт-Петербурга
Комитет по науке и высшей школе

ДИПЛОМ

II степени

Победителю конкурса учебных и научных изданий
вузов и ссузов Санкт-Петербурга в номинации
«Лучшее научное издание»

Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет
Александров В.В.

«Экологическая роль электромагнетизма»

Председатель Комитета
по науке и высшей школе
А.Д. Викторов

26 октября 2007 г.





МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ЭКОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ
ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ,
АССОЦИИРОВАННАЯ С ДОО ООН



ДИПЛОМ

Присуждается
монографии

«Экологическая роль
электромагнетизма»

(автор Александров В.В.)

за победу в конкурсе

«Лучшая книга-2006»

в номинации

«Электромагнитные проблемы экологии».

Президент МАНЭБ

г. Санкт-Петербург



О.Н. Русак

Книги – это корабли мысли, странствующие по волнам
времени и бережно несущие свой драгоценный груз
от поколения к поколению.

Ф. Бэкон

МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ЭКОЛОГИИ
И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ



АЛЕКСАНДРОВ
ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ

награжден медалью

имени М. В. Ломоносова

Председатель награжденной
комиссии

Рег. № 000105 / 153



Секретарь награжденной
комиссии

М.П.

22 февраля 2002 года

МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ЭКОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ
ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Решением
Президиума МАНЭБ
№ 158 от 22.11.2007 года

ALEXANDROV
Vladimir Vladimirovich

награжден медалью
имени М. В. Ломоносова

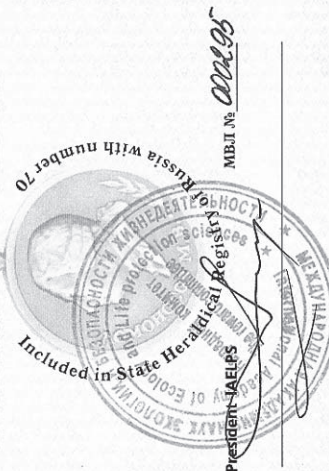


INTERNATIONAL ACADEMY
OF ECOLOGY & LIFE PROTECTION
SCIENCES

Under the resolution
of IAELPS, dated 22.11.2007

ALEXANDROV
Vladimir Vladimirovich

decorated by
LOMONOSOV'S MEDAL



The World Medal of Freedom



- Two-inch diameter medal struck from a hand-crafted die
- Created by a renowned medal artisan, whose previous craftings have included accolades for presidents, royalty, government officials, celebrities, international dignitaries, and exceptional achievers
- Only struck and conferred in a limited batch of 50
- Finished in a radiant gold
- Engraved on the reverse with the recipient's name and year of selection
- Presented with a fine neck ribbon and jeweler's display case
- Includes an 8.5 x 11 inch Citation of Honor Certificate, hand inscribed with the recipient's name and chosen citation, signed and sealed by the ABL president

© American Biographical Institute

The American Biographical Institute
proudly nominates
Prof. Vladimir Vladimirovich Alexandrov

to receive

The World Medal of Freedom

a global distinction,
extremely limited in number and
selection.

American Biographical Institute
2005

Научное издание

АЛЕКСАНДРОВ Владимир Владимирович

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Компьютерная верстка *С.В. Горячевой*
Дизайн обложки *Т.М. Ивановой*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 — научная и производственная литература

Подписано в печать 14.07.2010. Формат 60×90/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 46,25.+вкл. 4,0. Уч.-изд. л. 46,25.+вкл. 4,0. Тираж 100. Заказ 6059b.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.
Издательство Политехнического университета,
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.
Адрес университета и издательства:
195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29.