

DOI: 10.18721/JPM.13309  
УДК 53.023, 57.023, 57.087.1

## РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НОВОГО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ

**М.Е. Соболев<sup>1</sup>, А.Л. Горелик<sup>2</sup>, О.Л. Власова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Национальный медицинский исследовательский центр психиатрии и неврологии  
им. В.М. Бехтерева, Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье представлена разработанная авторами физико-математическая модель, позволяющая анализировать амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) электроэнцефалограмм (ЭЭГ) головного мозга человека. Предлагаемый метод обработки ЭЭГ, в отличие от применявшегося ранее, основан на аппроксимации АЧХ уравнением, которое содержит набор коэффициентов, удобных для сравнения данных, полученных от разных испытуемых и, как установлено, обладающих диагностической значимостью. Ранее для оценок использовалось лишь отношение частота/амплитуда либо обратное ему. Полученные результаты указывают на возможность дифференциации пациентов различных нервно-психических профилей по значениям параметрических показателей, получаемых при аппроксимации АЧХ ЭЭГ.

**Ключевые слова:** количественная ЭЭГ, амплитудно-частотная характеристика, математический анализ ЭЭГ, шизофрения, деменция

**Ссылка при цитировании:** Соболев М.Е., Горелик А.Л., Власова О.Л. Разработка и применение нового физико-математического метода анализа количественных электроэнцефалограмм // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 3. С. 119–129. DOI: 10.18721/JPM.13309

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## A NOVEL PHYSICO-MATHEMATICAL TECHNIQUE OF ANALYZING THE QUANTITATIVE ELECTROENCEPHALOGRAMS: DEVELOPMENT AND APPLICATION

**M.E. Sobolev<sup>1</sup>, A.L. Gorelik<sup>2</sup>, O.L. Vlasova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> V.M. Bekhterev National Medical Research Center for Psychiatry and Neurology,  
St. Petersburg, Russian Federation

The article presents a physical and mathematical model developed by the authors. The model allows analyzing the amplitude-frequency characteristic (AFC) of electroencephalograms (EEG) of a human brain. The proposed method of EEG processing, in contrast to the previously used one, is based on approximating the AFC by an equation that contains a set of coefficients. This method is convenient for comparing data obtained from different subjects and, as found, has diagnostic significance. Previously, only the frequency / amplitude ratio or its inverse was used for evaluations. The results achieved indicate the possibility of differentiating patients of various neuropsychic profiles according to the values of the parametric indicators obtained by approximating the EEG amplitude-frequency response.

**Keywords:** quantitative EEG, amplitude-frequency characteristic, EEG mathematical analysis, schizophrenia, dementia

**Citation:** Sobolev M.E., Gorelik A.L., Vlasova O.L. A novel physico-mathematical technique of analyzing the quantitative electroencephalograms: development and application, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (3) (2020) 119–129. DOI: 10.18721/JPM.13309

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## Введение

В настоящее время в биомедицинских приложениях доля междисциплинарных исследований неуклонно растет. Одним из направлений, где такой подход необходим, является применение современных компьютерных технологий и методов математической обработки данных при нейрофизиологических исследованиях. Объектами изучения выступают нейродинамические процессы, происходящие в мозгах животных, относящихся к разным типам и классам, а также в мозге человека. Исследователи пытаются понять механизмы функционирования нервной системы и психики, работая с отдельными нейронами, популяциями клеток, срезами мозга и головным мозгом в целом, а также с их компьютерными моделями.

Электроэнцефалография (ЭЭГ) – это неинвазивный метод исследования функционального состояния головного мозга, широко применяемый в научных исследованиях и в клинической практике наряду с магнитно-резонансной томографией (МРТ), позитронно-эмиссионной томографией (ПЭТ), компьютерной томографией (КТ). Электроэнцефалография представляет собой запись биоэлектрических сигналов головного мозга, снимаемых с поверхности кожи головы при помощи электродов, установленных специальным образом, путем измерения разности потенциалов между точками приложения электродов и референтными точками [1]. Получаемые при электроэнцефалографии графические изображения, отражающие зарегистрированные разности потенциалов, носят название электроэнцефалограммы.

Записи ЭЭГ отражают синхронную синхронную активность популяций нейронов. Электрическое возбуждение нейронов создает внеклеточное напряжение, которое

позволяет противоположным концам нейрона (дендритам и аксонам) иметь различный заряд. Общая цель исследования ЭЭГ состоит в интерпретации изменений в измеряемых сигналах как отражение изменений активности определенных областей мозга. Идентификация этих областей мозга представляет собой серьезную проблему, поскольку измерения на поверхности кожи головы отражают сумму сигналов, пришедших из различных пространственно-разнесенных областей мозга. Ввиду наличия циклов нейронной активности, измеренное напряжение колеблется между положительным и отрицательным, и скорость этого цикла отражает частоту сигнала.

Электроэнцефалография относится к высокочувствительным методам, имеющим разрешение до десятков миллисекунд. Метод позволяет наблюдать различные биоэлектрические процессы в динамике, что недоступно для исследования другими методами. Кроме того, ЭЭГ дает возможность увидеть отклик такой сверхсложной биологической системы, как головной мозг, на различные раздражители. Но для адекватной записи электроэнцефалограмм и последующей ее грамотной интерпретации необходим качественный усилитель, ввиду того, что амплитуда измеряемого сигнала мала: она составляет от единиц до нескольких десятков милливольт.

Выделяют несколько диапазонов частот в биоэлектрическом сигнале головного мозга [2]: дельта (0,5 – 4 Гц), тета (4 – 8 Гц), альфа (8 – 13 Гц), бета (13 – 30 Гц) и гамма (более 30 Гц). На рис. 1 видно, что в измеряемом сигнале содержатся все эти ритмы, которые находятся между собой в некотором соотношении. Однако это соотношение меняется в зависимости от различных функциональных состояний головного мозга.

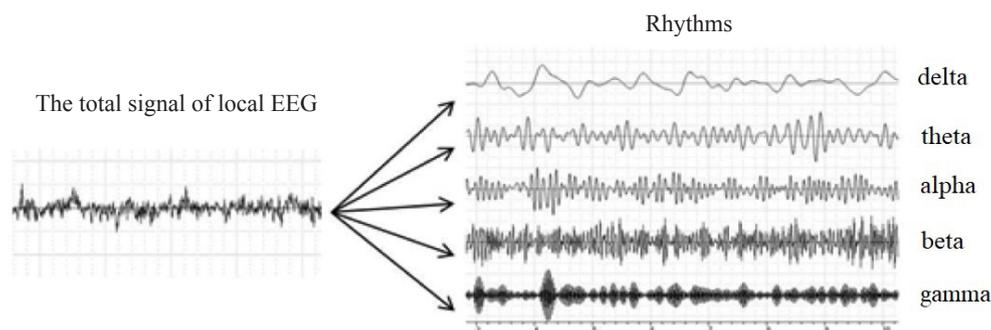


Рис. 1. Суммарный сигнал локальной ЭЭГ (the total signal of local EEG) и ритмы (rhythms) головного мозга человека, выделяемые на ЭЭГ: дельта (delta), тета (theta), альфа (alpha), бета (beta), гамма (gamma) [3]

Для количественного исследования электроэнцефалограмм разработаны различные методы анализа: с применением коэффициентов кросс-корреляции, коэффициентов когерентности, метод вызванных потенциалов и др. Также применяются различные способы исследования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) биоэлектрического сигнала головного мозга, один из которых рассматривается в данной статье.

Метод вызванных потенциалов (ВП) — это реакция электрической активности головного мозга на внешний раздражитель. С помощью этого метода исследуют такие свойства мозга, как возбудимость и восприимчивость к стимулу [4]. Амплитуда и задержка отклика при исследовании ВП-сигналов ЭЭГ содержат ценную информацию о функциональных возможностях мозга в различных условиях и в разных целевых группах. Например, увеличение временной задержки может быть связано с наличием синдрома дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ) у детей [5], старением [6], легкой степенью когнитивных нарушений [7], а также с различными психотическими состояниями [8].

Энергетический спектральный анализ [9] вызванных потенциалов — это один из наиболее успешно применяемых методов по идентификации биомаркеров. Кроме того, он может дать важную информацию о частотном составе колебаний ЭЭГ. Обычно спектральные оценки вычисляются для дис-

кретных частот (например, 8,5 — 10,0 Гц, т. е. для нижней полосы альфа-ритма). Для данной частоты сигнала ЭЭГ среднеквадратичная амплитуда или мощность (квадрат амплитуды) используются для количественного определения ее вклада в измеренный сигнал.

К сожалению, спектральный анализ не предоставляет информации в динамике, т. е. о том, когда со временем происходят сдвиги частот. Для решения этой проблемы применяются различные методы частотно-временного анализа, в том числе кратковременное преобразование Фурье и вейвлет-анализ, который приобрел популярность в последние годы, благодаря появившейся возможности точно преобразовывать формы сигналов ЭЭГ в определенные временные и частотные компоненты. При таком подходе сигналы ЭЭГ рассматриваются как сдвинутые и масштабированные версии конкретной математической функции (вейвлета), а не как композиция синусоидальных волн с различными частотами, как при преобразованиях Фурье. Было установлено, что спектральная мощность альфа-волн в покое и пиковая частота альфа-ритма могут быть снижены у пациентов с психотическими расстройствами [10]. Это может быть связано с тем фактом, что снижение мощности альфа-волн коррелирует с негативными симптомами при шизофрении.

Шизофрения относится к тяжелым психическим заболеваниям, которое поражает примерно 1% населения. Поскольку это

инвалидизирующее расстройство имеет гетерогенную генетическую и нейробиологическую основу, было проведено множество испытаний для выявления его биомаркеров с целью его ранней диагностики. Биомаркеры, наиболее часто используемые при шизофрении, связаны с нейроиммунной и нейроэндокринной системами, метаболизмом, различными нейротрансмиттерными системами и нейротрофическими факторами. Количественная электроэнцефалография также привлекалась для определения возможных биомаркеров, но таких исследований крайне мало. Одно из них [11] посвящено применению тета-фазовой гамма-амплитудной связи в качестве доказательного инструмента для выявления шизофрении.

Российские ученые сравнили различные показатели альфа-ритма в электроэнцефалограммах здоровых испытуемых с соответствующими показателями у больных артериальной гипертензией [12]. Были зарегистрированы более низкие значения амплитуды и частоты у больных гипертонией, по сравнению с таковыми у здоровых испытуемых. Указывается на увеличение частотно-амплитудного отношения в лобных, теменных и затылочных отведениях у больных лиц, в то время как в височных отведениях изменений обнаружено не было.

Некоторые цереброваскулярные и сердечно-сосудистые заболевания ассоциируются с возникновением деменции. Нейропсихологический профиль больных с такими нарушениями [13] зависит от локализации и глубины сосудистого повреждения головного мозга, а также от типов цереброваскулярных патологий. Довольно часто такие патологии поражают лобные доли, из-за чего у пациентов начинает снижаться мотивация и ухудшается контроль над выполняемыми действиями. Помимо этого, наблюдаются такие симптомы, как забывчивость и растерянность. Было сообщено [14] об увеличении спектральной мощности в дельта-диапазоне, пропорциональном повреждению сердечно-сосудистой системы, и о снижении

мощности альфа-ритма у больных испытуемых. Кроме того, упоминается, что отношение мощности тета-частоты к мощности альфа-частоты может служить надежным маркером для оценки индивидуальной степени повреждения головного мозга при сердечно-сосудистых заболеваниях.

В данной статье предложена новая математическая модель, адекватно описывающая амплитудно-частотную характеристику ЭЭГ.

Найдено статистическое распределение значений коэффициентов, определяемых при аппроксимации АЧХ ЭЭГ, полученных при обследовании здоровых испытуемых, и проведено сравнение полученных параметров между группами здоровых людей и страдающих шизофренией и возрастной сосудистой деменцией.

### Материалы и методы

Электроэнцефалограммы испытуемых были получены в отделении функциональной диагностики Национального медицинского исследовательского центра психиатрии и неврологии им. В.М. Бехтерева (Санкт-Петербург) с 2010 по 2018 годы. Запись проходила на электроэнцефалографе «Телепат 104». Электроды располагались в соответствии с международной системой «10 – 20» (рис. 2) [15].

На данном рисунке были применены следующие обозначения и сокращения для отведений и анатомических структур: Nasion – переносица, Inion – затылочный бугор, Vertex – макушка, Preauricular point – наружный слуховой проход, F – frontalis (лобная), C – centralis (область центральной борозды), T – temporalis (височная), P – parietalis (теменная), O – occipitalis (затылочная), A – auricula (мочка уха); электроды в левом полушарии обозначены нечетными индексами, а в правом – четными.

Частота дискретизации электроэнцефалографа составляла 250 Гц. Были использованы шлем из силиконовых тяжей и мостиковые хлорсеребряные неполяризующиеся электроды.

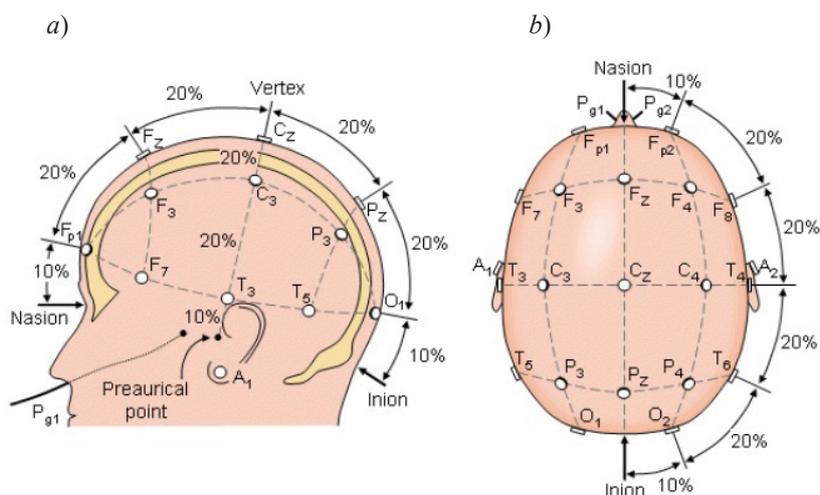


Рис. 2. Международная система расположения электродов «10 – 20» [15]; показан череп человека в двух проекциях (а и б) и характерные точки на нем: переносица (Nasion), макушка (Vertex) и затылочный бугор (Inion); см. также пояснения в тексте

В данной статье были исследованы три группы испытуемых: условно здоровые (норма), больные шизофренией и пациенты с возрастной сосудистой деменцией. Группа «норма» состояла из условно здоровых испытуемых и включала семнадцать человек возрастом от 20 до 64 лет (трое мужчин и четырнадцать женщин). В группу «шизофрения» входило девять больных шизофренией возрастом от 22 до 49 лет (четверо мужчин и пять женщин). Группа «возрастная сосудистая деменция» включала семнадцать человек возрастом от 54 до 80 лет (шестеро мужчин и одиннадцать женщин), страдающих возрастными цереброваскулярными нарушениями головного мозга с выраженным когнитивным снижением.

Записи ЭЭГ исследовались в программе WinEEG версии 2.90.53, в усредненном монтаже, по 16 отведениям, или каналам (Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6). Фильтр высоких частот был выставлен на значение 0,5 Гц, фильтр низких частот – на 50 Гц, с режекторным фильтром на 50 Гц. Эпоха анализа составляла 5 с. Для изучения были выбраны безартефактные участки записи в покое с закрытыми глазами, т. е. в так называемом состоянии спокойного бодрствования. Для каждого испытуемого было получено около 45 различных значений амплитуд и частот. Анализ коэффици-

ентов проводился с помощью программы MagicPlot версии 2.7.2. Для статистического анализа применялся *t*-критерий Стьюдента.

Для количественного анализа электроэнцефалограмм была разработана физико-математическая модель, отражающая зависимость между амплитудой и частотой биоэлектрического сигнала головного мозга, которая описывается следующей формулой:

$$A(f) = af + b + a_1 \exp[-(f - f_0)^2 \ln 2 / \sigma^2], \quad (1)$$

где  $A$ ,  $B$ , – амплитуда волны;  $f$ , Гц, – частота волны;  $a$ ,  $b$ ,  $a_1$ ,  $f_0$ ,  $\sigma$  – числовые коэффициенты в разных единицах измерения:  $a$  – В/Гц;  $b$ ,  $a_1$  – В;  $f_0$ ,  $\sigma$  – Гц.

Формула (1) была выведена эмпирически, путем аппроксимации амплитудно-частотной зависимости. Ее особенность состоит в наилучшем описании, т. е. дающем минимальную погрешность отклонения от указанной зависимости. Ранее для вычисления амплитудно-частотной характеристики исследователи использовали просто отношение амплитуды к частоте или обратное отношение, что, безусловно, удобно для простой оценки в силу простоты, но такое действие не имеет под собой физического основания. Формула (1) усложняет вычисления, но отра-

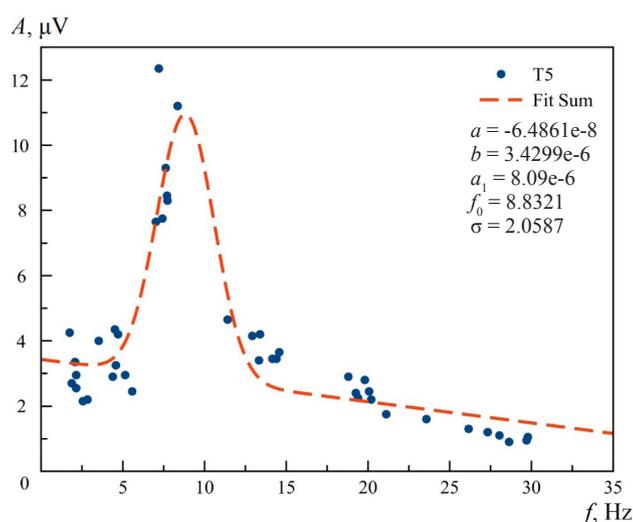


Рис. 3. Пример аппроксимации (пунктирная линия) экспериментальной амплитудно-частотной характеристики (точки) по отведению Т5 для одного из испытуемых группы «норма»; приведены значения получаемых параметров

жает поведение кривой измеряемого сигнала, следовательно, наилучшим образом выражает график функции зависимости амплитуды от частоты. Из этих соображений значения амплитуд и частот по каждому отведению, получаемые из электроэнцефалограмм для каждого испытуемого, аппроксимировались формулой (1). Биофизическая природа предлагаемой зависимости, несомненно, представляет интерес и может составить предмет отдельного исследования. Однако эта задача выходит за рамки настоящей работы.

### Результаты и их обсуждение

В начале этого раздела представлены результаты обследования группы «норма». Пример аппроксимации амплитудно-частотной характеристики, полученной для одного из испытуемых по отведению Т5, приведен на рис. 3. АЧХ ЭЭГ по другим каналам для каждого испытуемого из группы «норма» имела аналогичный вид.

Ввиду того, что не было обнаружено существенных различий в значениях коэффициентов между каналами в каждой из трех исследуемых групп, анализ данных по каждому параметру проводился по всем отведениям одновременно (без разделения на отведения). В результате для группы «норма» были полу-

чены статистические распределения значений коэффициентов (рис. 4). Видно, что значение пиковой частоты  $f_0$  лежит в альфа-диапазоне и тем самым полученные данные согласуются с общепринятыми представлениями о том, что максимальная амплитуда альфа-волн возникает в состоянии пассивного бодрствования с закрытыми глазами (в состоянии покоя).

При сравнении полученных значений параметров между тремя исследуемыми группами были выявлены следующие различия (буквенные обозначения абзацев соответствуют литерам на рис. 5):

а) в коэффициенте  $a_1$  между группами «норма» и «возрастная сосудистая деменция» ( $p < 0,05$ ); в группах «шизофрения» и «возрастная сосудистая деменция» ( $p < 0,05$ );

б) в коэффициенте  $f_0$  между группами «норма» и «возрастная сосудистая деменция» ( $p < 0,05$ ); «шизофрения» и «возрастная сосудистая деменция» ( $p < 0,05$ ); «норма» и «шизофрения» ( $p < 0,20$ );

с) в коэффициенте  $\sigma$  между группами «норма» и «шизофрения» ( $p < 0,05$ ); «шизофрения» и «возрастная сосудистая деменция»  $p < 0,05$ .

Данные различия графически показаны на рис. 5. Других различий между коэффициентами обнаружено не было.

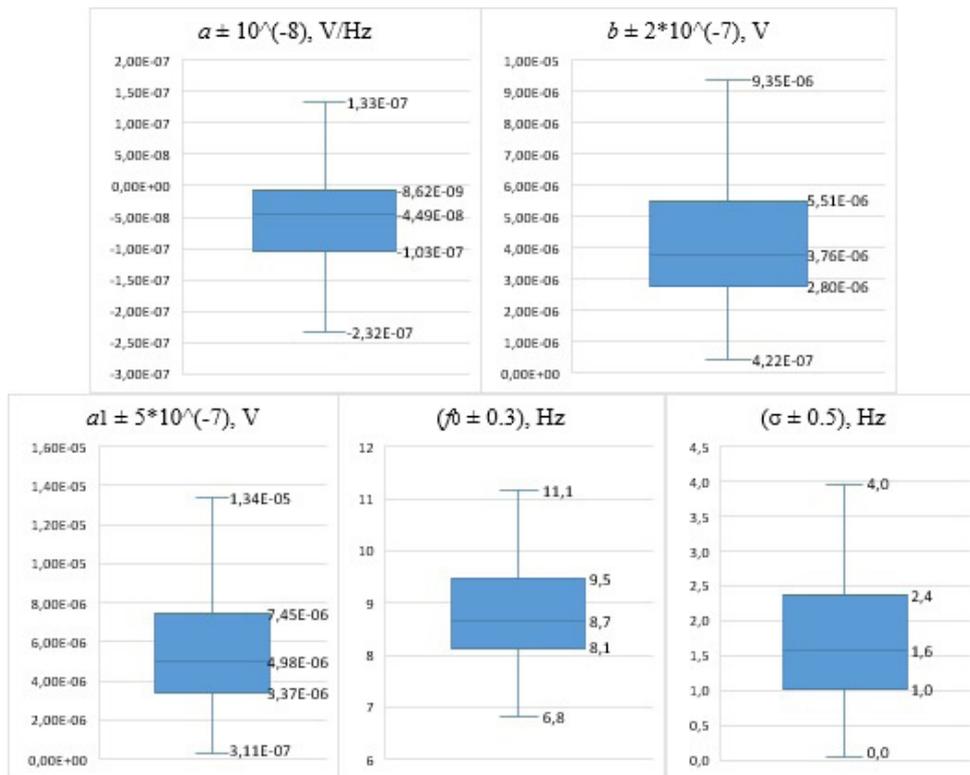


Рис. 4. Статистические распределения значений коэффициентов амплитудно-частотной зависимости (1) для испытуемых группы «норма»

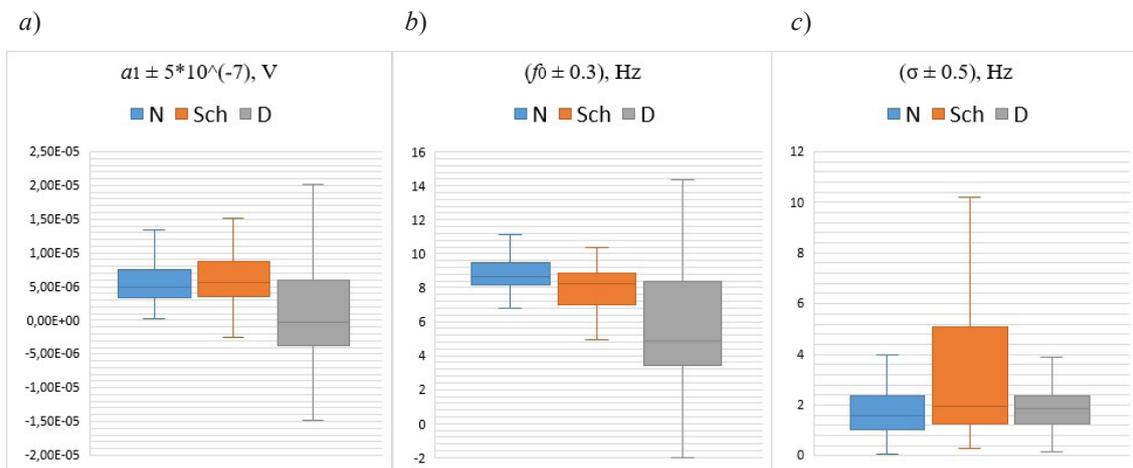


Рис. 5. Статистические распределения коэффициентов  $a_1(a)$ ,  $f_0(b)$  и  $\sigma(c)$  по всем отведениям для трех групп испытуемых: «норма» (N), «шизофрения» (Sch), «деменция» (D); наблюдаемые различия между представленными данными указаны в тексте

Таким образом было установлено, что для каждой из трех исследуемых групп существуют свои характерные особенности в поведении амплитудно-частотных характеристик, отличные от остальных групп. Так, для группы «шизофрения» характерными чертами

выступают несколько сниженная пиковая частота  $f_0$ , по сравнению с «нормой» (но все равно попадающая в верхний тета- и нижний альфа- диапазоны частот) и увеличенная полуширина на полувывсоте  $\sigma$ , по сравнению с аналогичными коэффициентами из двух

других групп. В то же время для группы «возрастная сосудистая деменция» отличительной особенностью являются отрицательное значение коэффициента  $a_1$  (т. е. прогиб пика кривой Гаусса вниз, а не вверх) и сниженное значение пиковой частоты  $f_0$ .

Следует отметить, что о различиях данных между группами необходимо судить по совокупности значений получаемых параметров, а не по одному отдельному значению параметра.

Анализ результатов проведенных исследований позволяет заключить, что с помощью предложенной математической модели (1) можно дифференцировать испытуемых на группы по профилям их заболеваний.

### Заключение

Электроэнцефалография известна как один из методов, применяющихся для диагностики различных нервно-психических расстройств. Данный метод позволяет практически мгновенно отследить изменения функционального состояния головного мозга благодаря высокому временному разрешению. При этом сама процедура обследования относится к неинвазивным и абсолютно безвредна для испытуемых, что отличает ее от ряда других методов исследования.

Сигналы электроэнцефалограммы представляют собой электрофизиологические

реакции, отражающие основные нейронные активности, которые зависят от физиологических состояний субъекта (например, эмоции, внимание и многие другие). Ключевыми параметрами, которые получают с помощью ЭЭГ, выступают амплитуда и частота измеряемого сигнала. Определение их на глаз сопряжено с серьезными ошибками, поэтому применяются различные программные пакеты и методы, позволяющие их вычислять. Помимо этого, в клинической практике важно знать различные проявления и биомаркеры тех или иных функциональных состояний головного мозга, которые можно выявить (в том числе) математическими методами анализа ЭЭГ.

В данной статье представлена разработанная авторами физико-математическая модель, аппроксимирующая амплитудно-частотную характеристику электроэнцефалограмм человека. Продемонстрированы различия в значениях получаемых коэффициентов между разными клиническими группами испытуемых. Установлено, что выбранные эмпирические параметры выступают не просто как «подгоночные», а обладают диагностической значимостью.

Таким образом показана практическая значимость предложенного метода для дифференциации нервно-психических расстройств у пациентов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jackson A.F., Bolger D.J.** The neurophysiological bases of EEG and EEG measurement: A review for the rest of us // *Psychophysiology*. 2014. Vol. 51. No. 11. Pp. 1061–1071.
2. **Guay S., de Beaumont L., Drisdelle B.L., Lina J.-M., Jolicoeur P.** Electrophysiological impact of multiple concussions in asymptomatic athletes: A re-analysis based on alpha activity during a visual-spatial attention task // *Neuropsychologia*. 2018. Vol. 108. 8 January. Pp. 42–49.
3. **Назаров А.И.** Сравнение частотных компонент электрокожной активности и ЭЭГ (качественный анализ) // *Экспериментальная психология*. 2017. Т. 10. № 2. С. 104–113.
4. **Başar E.** Brain oscillations in neuropsychiatric disease // *Dialogues in Clinical Neuroscience*. 2013. Vol. 15. No. 3. Pp. 291–300.
5. **De Pascalis V., Varriale V., Matteoli A.** Intelligence and P3 components of the event-related potential elicited during an auditory discrimination task with masking // *Intelligence*. 2008. Vol. 36. No. 1. Pp. 35–47.
6. **Fjell A.M., Rosquist H., Walhovd K.B.** Instability in the latency of P3a/P3b brain potentials and cognitive functioning in aging // *Neurobiology Aging*. 2009. Vol. 30. No. 12. Pp. 2065–2079.
7. **Laskaris N., Tarnanas I., Tsolaki M.N., Vlaikidis N., Karlovasitou A.K.** Improved detec-



tion of amnesic MCI by means of Discriminative Vector Quantization of Single-Trial cognitive ERP responses // *Journal of Neuroscientific Methods*. 2013. Vol. 212. No. 2. Pp. 344–354.

8. **Bodatsch M., Ruhrmann S., Wagner M., et al.** Prediction of psychosis by mismatch negativity // *Biological Psychiatry*. 2011. Vol. 69. No. 10. Pp. 959–966.

9. **Başar E., Guntekin B., Atagun I., TurpGolbaş B., Tulay E., Ozerdem A.** Brain's alpha activity is highly reduced in euthymic bipolar disorder patients // *Cognitive Neurodynamics*. 2012. Vol. 6. No. 1. Pp. 11–20.

10. **Murphy M., Öngür D.** Decreased peak alpha frequency and impaired visual evoked potentials in first episode psychosis // *NeuroImage: Clinical*. 2019. Vol. 22. P. 101693.

11. **Geun Hui Won, Jun Won Kim, Tae Young Choi, et al.** Theta-phase gamma-amplitude coupling as a neurophysiological marker in neuroleptic-naïve schizophrenia // *Psychiatry Research*. 2018. Vol. 260. February. Pp. 406–411.

12. **Курданова М.Х., Бесланев И.А., Курданова М.Х., Батырбекова Л.М.** Анализ амплитудно-частотных характеристик альфа-ритма головного мозга у больных артериальной гипертонией // *Тенденции развития науки и образования. Сб. научн. тр., по матер. XXIX междунар. научн.-практ. конф. 31 авг. 2017 г. Часть 3. Самара: Изд. НИЦ «Л-Журнал», 2017. С. 29–35.*

13. **Smith E.E.** Clinical presentations and epidemiology of vascular dementia // *Clinical Science*. 2017. Vol. 131. No. 11. Pp. 1059–1068.

14. **Moretti D.V., Miniussi C., Frisoni G., Zanetti O., Binetti G., Geroldi C., Galluzzi S., Rossini P.M.** Vascular damage and EEG markers in subjects with mild cognitive impairment // *Clinical Neurophysiology*. 2007. Vol. 118. No. 8. Pp. 1866–1876.

15. **Звёздочкина Н.В.** Исследование электрической активности головного мозга. Казань: Изд. Казан. ун-та, 2014. 59 с.

*Статья поступила в редакцию 04.04.2020, принята к публикации 28.05.2020.*

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**СОБОЛЕВ Максим Евгеньевич** — аспирант Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
m.e.sobolev@mail.ru

**ГОРЕЛИК Александр Леонидович** — кандидат медицинских наук, заведующий отделением функциональной диагностики Национального медицинского исследовательского центра психиатрии и неврологии им. В.М. Бехтерева, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

192019, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Бехтерева, 3  
gorelik\_a@mail.ru

**ВЛАСОВА Ольга Леонардовна** — доктор физико-математических наук, профессор, директор НОЦ «Фундаментальные основы медицинских и биомедицинских технологий» Высшей школы биомедицинских систем и технологии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
olvlasova@yandex.ru

## REFERENCES

1. **Jackson A.F., Bolger D.J.**, The neurophysiological bases of EEG and EEG measurement: A review for the rest of us, *Psychophysiology*. 51 (11) (2014) 1061–1071.
2. **Guay S., de Beaumont L., Drisdelle B.L., et al.**, Electrophysiological impact of multiple concussions in asymptomatic athletes: A re-analysis based on alpha activity during a visual-spatial attention task, *Neuropsychologia*. 108 (8 January) (2018) 42–49.
3. **Nazarov A.I.**, Comparison of the frequency components of electrodermal activity and EEG (qualitative analysis), *Experimental Psychology*. 10 (2) (2017) 104–113. (in Russian)
4. **Başar E.**, Brain oscillations in neuropsychiatric disease, *Dialogues in Clinical Neuroscience*. 15 (3) (2013) 291–300.
5. **De Pascalis V., Varriale V., Matteoli A.**, Intelligence and P3 components of the event-related potential elicited during an auditory discrimination task with masking, *Intelligence*. 36 (1) (2008) 35–47.
6. **Fjell A.M., Rosquist H., Walhovd K.B.**, Instability in the latency of P3a/P3b brain potentials and cognitive functioning in aging, *Neurobiology Aging*. 30 (12) (2009) 2065–2079.
7. **Laskaris N., Tarnanas I., Tsolaki M.N., et al.**, Improved detection of amnesic MCI by means of discriminative vector quantization of single-trial cognitive ERP responses, *Journal of Neuroscientific Methods*. 212 (2) (2013) 344–354.
8. **Bodatsch M., Ruhrmann S., Wagner M., et al.**, Prediction of psychosis by mismatch negativity, *Biological Psychiatry*. 69 (10) (2011) 959–966.
9. **Başar E., B. Guntekin B., Atagun I., et al.**, Brain’s alpha activity is highly reduced in euthymic bipolar disorder patients, *Cognitive Neurodynamics*. 6 (1) (2012) 11–20.
10. **Murphy M., Öngür D.**, Decreased peak alpha frequency and impaired visual evoked potentials in first episode psychosis, *NeuroImage: Clinical*. 22 (2019) 101693.
11. **Geun Hui Won, Jun Won Kim, Tae Young Choi, et al.**, Theta-phase gamma-amplitude coupling as a neurophysiological marker in neuroleptic-naïve schizophrenia, *Psychiatry Research*. 260 (February) (2018) 406–411.
12. **Kurdanova M.H., Beslaneev I.A., Kurdanova M.H., Batyrbekova L.M.**, Analiz amplitudno-chastotnykh kharakteristik alfa-ritma u bolnykh arterialnoy gipertoniyei [An analysis of the amplitude-frequency characteristics of the brain’s alpha rhythm in patients with arterial hypertension], *Tendentsii Razvitiya Nauki i Obrazovaniya* [“Trends in the Development of Science and Education”, a Collection of Scientific Papers on Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Research-to-Practice Conference, Part 3, August 31 2017, Samara] (2017) 29–35. (in Russian)
13. **Smith E.E.**, Clinical presentations and epidemiology of vascular dementia, *Clinical Science*. 131 (11) (2017) 1059–1068.
14. **Moretti D.V., Miniussi C., Frisoni G., et al.**, Vascular damage and EEG markers in subjects with mild cognitive impairment, *Clinical Neurophysiology*. 118 (8) (2007) 1866–1876.
15. **Zvyozdockina N.V.**, Isslyedovaniye elektricheskoy aktivnocty golovnogo mozga [Study of the brain electrical activity], University of Kazan Publishing, Kazan, 2014. (in Russian)

*Received 04.04.2020, accepted 28.05.2020.*

## THE AUTHORS

**SOBOLEV Maxim E.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

m.e.sobolev@mail.ru

**GORELIK Aleksandr L.**

*V.M. Bekhterev National Medical Research Center for Psychiatry and Neurology*

3 Bekhterev St., St. Petersburg, 192019, Russian Federation

gorelik\_a@mail.ru

**VLASOVA Olga L.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

olvlasova@yandex.ru