

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

---

**Ванина П.Ю., Князева М.А., Цветков Р.В.**

## **ФИЗИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ**

Учебное пособие

Санкт-Петербург  
2026

2026 УДК 574  
ББК 20.1

*Ванина П.Ю., Физическая экология: учеб. пособие / П.Ю. Ванина, М.А. Князева, Цветков Р.В.. – СПб., 2026. – 155 с.*

Учебное пособие разработано для студентов, обучающихся по направлению «Техническая физика», профиль «Физическая и биомедицинская электроника», и посвящено ключевым вопросам физической экологии. Пособие может быть использовано как дополнительное для курсов «Органическая химия», «Биохимия» и «Взаимодействие физических полей с живыми организмами».

Особое внимание уделяется физическим механизмам функционирования биосферы, а также средообразующей роли биоты и принципам биотической регуляции окружающей среды. В издании проанализированы масштабы антропогенного воздействия на сушу и современные изменения продуктивных территорий.

Пособие направлено на формирование у будущих инженеров-физиков целостного представления о Земле как о сложной физико-химической и биологической системе, что необходимо для профессиональной деятельности в области природопользования и экологической безопасности.

© Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого, 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА 1. Планета Земля	7
1.1. Планетарные характеристики Земли	7
1.2. Глубинное строение Земли	10
1.3. Магнитное поле и радиационный пояс Земли	14
1.4. Земная атмосфера	17
1.5. Контрольные вопросы к Главе 1:	20
ГЛАВА 2. Геохронология. Периодизация геологической истории	21
2.1. Относительная геохронология	21
2.2. Биостратиграфические методы	24
2.3. Абсолютная геохронология	26
2.4. Стратиграфическая и геохронологическая шкалы	32
2.5. Контрольные вопросы к Главе 2:	37
ГЛАВА 3. Вертикальные размеры современной биосферы	37
3.1. Границы биосферы	37
3.2. Фотосинтез, первичная продукция и распределение биомассы	40
3.3. Примеры “экстремальной жизни”	44
3.4. Контрольные вопросы к Главе 3:	48
ГЛАВА 4. Эволюция атмосферного кислорода, образование “озонового щита”	49
4.1. Временная последовательность главных событий истории жизни на Земле	49
4.2. Озоновый слой	52
4.3. Контрольные вопросы к Главе 4:	57
ГЛАВА 5. Климат на Земле. Система «Солнце-Земля-космос».	58
5.1. История климата	58
5.2. Климатические переменные-заменители в палеоклиматологии	60
5.3. Определение возраста льда в ледяных ядрах и получение сведений о палеотемпературах	61
5.4. Исследование антарктических ледяных ядер	64
5.5. Циклы Миланковича	65
5.6. Энергетический баланс Земли	69
5.7. Контрольные вопросы к Главе 5:	71
ГЛАВА 6. Круговорот воды и углерода на Земле	71
6.1. Круговорот воды на Земле или гидрологический цикл	71
6.2. Круговорот углерода на Земле	74
6.3. Контрольные вопросы к Главе 6:	78
ГЛАВА 7. Средообразующая роль биоты Земли и «биотическая регуляция»	79
7.1. Средообразующая роль биоты Земли	79
7.2. Биотическая регуляция окружающей среды	81
7.3. Контрольные вопросы к Главе 7:	87

ГЛАВА 8. Народонаселение мира, и динамика мировой экономической системы.	87
8.1. Плотность населения стран мира .....	87
8.2. Динамика роста численности населения .....	89
8.3. Демография народонаселения в эпоху новейшей истории .....	94
8.4. Демографический пререход.....	97
8.5. Демографический импульс .....	100
8.6. Динамика мировой экономической системы .....	103
8.7. Контрольные вопросы к Главе 8: .....	113
ГЛАВА 9. Сельскохозяйственные земли и площадь суши, нарушенной деятельностью человека	114
9.1 Продуктивные территории, сельскохозяйственные земли.....	114
9.2 Суша, нарушенная деятельностью человека.....	120
9.3 Контрольные вопросы к Главе 9: .....	124
ГЛАВА 10. Проблема распределения и потребления воды в мире	124
10.1 Распределение водных ресурсов .....	124
10.2 Потребление воды в мире .....	127
10.3 Водный стресс .....	132
ГЛАВА 11. Состояние лесов мира.	134
11.1. Распределение лесов в мире .....	134
11.2. Динамика освоения леса человечеством в эпоху новейшей истории	137
11.3. Модель освоения лесных территорий в странах мира .....	140
11.4. Деградация лесных территорий.....	145
11.5. Контрольные вопросы к Главе 11: .....	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	150
ЛИТЕРАТУРА	151

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема взаимодействия общества с природой и влияния деятельности человека на окружающую среду вызывает все больший интерес и озабоченность у всего человечества. В основе сегодняшнего развития экологической науки лежат факторы, связанные с научно-технической революцией.

Экологическому образованию и просвещению в настоящее время принадлежит ведущая роль в обеспечении устойчивого развития. Важным его звеном является экономика. Знание экологии позволяет сформировать комплексное мировоззрение, которое будет основано на знании законов взаимодействия общества и биосферы.

Каждый человек в наши дни имеет какое-то представление об экологии. Само понятие «экология» используется сегодня при обсуждении различных объектов как природной, так и социальной важности. Говорят об экологии растений и животных, об экологии человека и общества, об экологии города и культуры, употребляют даже словосочетания «плохая экология» или «хорошая экология».

Таким образом, нетрудно заметить, что об экологии говорят тогда, когда хотят обратить внимание на условия существования и развития чего-нибудь. Так, например, к экологическим вопросам теперь относят причины и следствия исчезновения отдельных видов растений и животных, загрязнения природной среды, ухудшения качества жизни людей и т.д. Однако само понятие «экология» не сразу приобрело такой универсальный смысл.

С одной стороны, экология – наука достаточно молодая, но с другой стороны, экология приобрела практический интерес еще на заре развития человечества. В примитивном обществе каждый человек, для того чтобы выжить, должен был иметь определенные знания об окружающей его среде, т.е. о том, где можно было найти съедобное растение, а где – лекарственное, в каких местах водятся те или иные животные и т.д. Можно сказать, что цивилизация возникла тогда, когда человек научился использовать огонь и

другие средства и орудия, позволявшие ему изменять среду своего обитания. Древние люди умели ладить с природой, уважали и обожествляли ее.

Таким образом, можно заключить, что:

**Экология** – (от греч. oikos – жилище, местопребывание и logos - наука) – это биологическая наука, изучающая организацию и функционирование надорганизменных систем различных уровней: популяций, сообществ, экосистем и биосферы в целом. Еще экологию определяют также как науку, исследующую закономерности жизнедеятельности организмов (в любых ее проявлениях, на всех уровнях) в их естественной среде обитания, с учетом изменений, которые вносит в среду своей деятельностью человек.

Следовательно, основным **содержанием** современной экологии становится исследование взаимоотношений организмов со средой и изучение жизни биологических макросистем более высокого ранга: экосистем, биосферы, их продуктивность и энергетика.

Отсюда следует, что **объектом** исследования экологии являются биологические макросистемы (популяции, сообщества и экосистемы), а **предметом** - взаимодействия и взаимосвязи живых организмов между собой и с окружающей средой.

Главная теоретическая и практическая задача экологии заключается в том, чтобы выявить законы процессов освоения среды различными сообществами и научиться управлять ими в условиях неизбежной индустриализации и урбанизации нашей планеты.

*Изучение в экологии происходит на различных уровнях:*

- 1) *организменный* уровень ведёт изучение отдельных организмов;
- 2) *популяционно-видовой*, изучение на уровне вида и популяции;
- 3) *биотический* (биоценотический) – изучение на уровне биоценозов (совокупности популяций);
- 4) *биосферный* – изучение на уровне биосферы в целом.

**Основная цель** экологии – изучение проблемы выживания живых организмов в окружающей среде.

### **Задачи экологии:**

- 1) Разработка теории и методов оценки устойчивости экосистем на всех уровнях организации.
- 2) Исследование проблем популяционной экологии и сохранение биологического разнообразия в природе
- 3) Изучение и прогнозирование различных изменений в биосфере под влиянием природных и антропогенных факторов.
- 4) Оценка и динамика запаса природных ресурсов и экологические последствия их потребления в мире.
- 5) Разработка и совершенствование методов управления качеством окружающей среды.

В настоящее время **основными методами** экологии являются:

- 1) *Полевые наблюдения.* Они позволяют получить конкретные сведения о состоянии отдельных видов и популяций, определить их роли в существовании определённых экосистем, а также антропогенное влияние и т.д.
- 2) *Эксперименты в природных условиях.* Данный метод дает возможность промоделировать ту или иную ситуацию, а также, что немаловажно, последствия её развития для конкретных сообществ организмов.
- 3) *Математическое моделирование* процессов и ситуаций, которые могут встретиться в популяциях и экосистемах с помощью вычислительной техники. Эта методика позволяет провести уже не качественную, а количественную оценку изучаемых процессов и явлений.

В чем же заключается **ценность экологического образования** в наше время? Во-первых, экологическое образование, безусловно, дает научные знания в области экологии. А во-вторых, что намного важнее, оно является важным фактором экологического воспитания будущих специалистов. Что это фактически значит? Это значит, что в процессе обучения прививается то, что называют экологической культурой, т.е. способность бережного отношения к

природным богатствам и др. Иными словами, у специалистов, в нашем случае инженерно-технического профиля, должно сформироваться экологическое сознание и мышление, суть которого в том, что человек - часть природы и сохранение природы – это сохранение полноценной жизни человека.

В настоящее время можно с уверенностью утверждать, что взаимоотношения человека с природой развивается стихийно, т.е. не имеет четкого плана, подразумевающего продумывание последствий подобного взаимодействия. Это, в свою очередь, означает только одно, что как любое стихийное бедствие подобное развитие представляет опасность для существования не только отдельных объектов в нашем мире, такие как города, страны и т.д., но и для всего человечества.

Если подумать логически, то объяснить это очень легко тем, что человек тесно связан с живой природой: в частности, происхождением, материальными и духовными потребностями. Но в отличие от других организмов на нашей планете, эти связи имеют огромные масштабы, что может привести к практически полному вовлечению живого покрова планеты (т.е. биосферы) в жизнеобеспечение современного общества, а это, как вы понимаете, поставит человечество на грань экологической катастрофы.

Человек, благодаря данному ему природой разуму, стремится обеспечить себе «комфортные» условия среды, стремится быть независимым от ее физических факторов. Например, от климата, от нехватки пищи, избавиться от вредных для него животных и растений. Поэтому, человек, прежде всего, отличается от других видов тем, что взаимодействует с природой через создаваемую им культуру, которая передается из поколения в поколение, в частности трудовой и духовный опыт. Но, как уже было сказано ранее – развитие это носит стихийный характер.

Чтобы это оастновить необходимы знания о том, как ими управлять и, в случае с экологией, логично, что эти знания должны быть у большей части общества, а это возможно лишь через всеобщее экологическое образование людей начиная со школы и заканчивая вузом.

# ГЛАВА 1. Планета Земля

## 1.1. Планетарные характеристики Земли

**Земля** – это третья от Солнца планета Солнечной системы (Рис. 1), единственная планета, на которой известна жизнь, дом человечества. Земля принадлежит к планетам земной группы и является крупнейшей из этих планет в Солнечной системе. Землю иногда называют миром, латинским названием Терра или греческим - Гея.

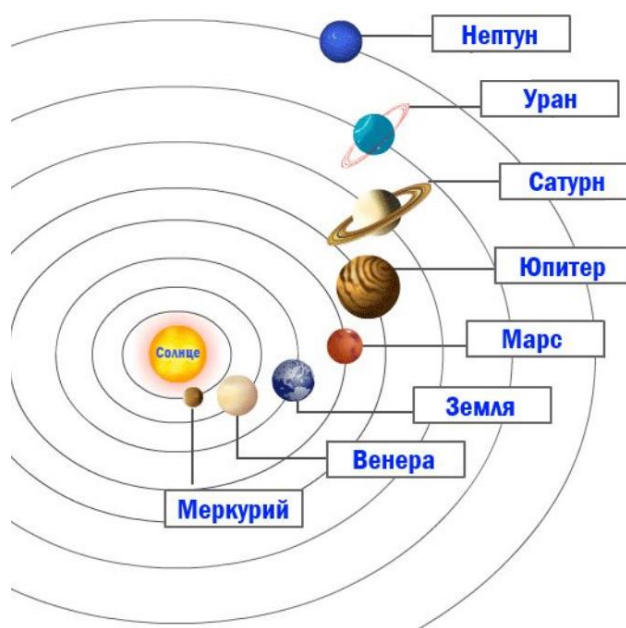


Рис.1. Схематическое изображение Солнечной системы с указанием названий основных планет.

Земля является объектом исследования значительного количества наук о Земле. Например, изучение Земли как небесного тела принадлежит к области астрономии, строение и состав Земли изучает геология, состояние атмосферы - метеорология, совокупность проявлений жизни на планете - биология. География дает описание особенностей рельефа поверхности планеты - океанов, морей, озер и гор, материков и островов, гор и долин, а также различных общественных образований, таких как: города и села, государства, экономические районы и т.д.

Ни для кого не секрет, что Земля вращается вокруг звезды Солнце по эллиптической орбите (очень близкой к круговой). Ее средняя скорость

достигает 29765 м/с, в среднем за период она проходит расстояние 149 600 000 км, что примерно равно 365,24 суток.

Земля имеет спутник - Луну, которая вращается вокруг Солнца на среднем расстоянии 384 400 км. Наклон земной оси к плоскости эклиптики составляет 66° 33'22". Эклиптика – это большой круг небесной сферы, по которому происходит видимое с Земли годичное движение Солнца относительно звёзд.

Период обращения нашей планеты вокруг своей оси составляет 23 ч 56 мин 4,1 с, что вызывает смену дня и ночи, а наклон оси и обращение вокруг Солнца - смену времен года, соответственно.

Форма Земли – геоид, благодаря чему ее радиус сильно различается в зависимости от места измерения: например, средний радиус составляет 6371,032 км, экваториальный, в свою очередь - 6378,16 км, а полярный - 6356,777 км.

Площадь поверхности земного шара 510 млн км<sup>2</sup>, объем - 1,083 1012 км<sup>3</sup>, средняя плотность - 5518 кг/м<sup>3</sup>. Масса Земли составляет 5976.1021 кг.

Земля имеет магнитное и тесно связанное с ним электрическое поля. Гравитационное поле Земли обуславливает ее близкую к сферической форму, а также существование атмосферы.

По современным научным представлениям Земля образовалась около 4,7 млрд лет назад из рассеянного в протосолнечной системе газового вещества. В результате разделения вещества Земли, под действием своего гравитационного поля, и в условиях разогрева земных недр возникли и развились геосферы. Геосферы – это различные по химическому составу, агрегатному состоянию и физическим свойствам оболочки Земли. К ним относятся: ядро (в центре), мантия, земная кора, гидросфера, атмосфера, магнитосфера.

В составе Земли преобладает небольшое количество элементов таблицы Менделеева, а именно: железо, которое составляет ~ 34,6%, кислород – 29,5%, кремний – 15,2%, и, наконец, магний – 12,7% [1].

Земная кора, мантия и внутренняя часть ядра являются твердыми (только внешняя часть ядра считается жидкой). Логично, что от поверхности Земли к её центру возрастают давление, плотность и температура. К примеру, в центре планеты давление составит  $3.6 \cdot 10^{11}$  Па, а плотность примерно  $12,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, температура же находится в диапазоне от 5000 до 6000 °С.

Как уже было сказано ранее форма Земли – это, безусловно, идеализация, с помощью которой пытаются описать форму планеты. И в зависимости от цели описания используют различные **модели формы Земли** (Рис. 2). В связи с чем существуют различные приближения, позволяющие описать форму Земли подходящим образом. Рассмотрим некоторые из них.

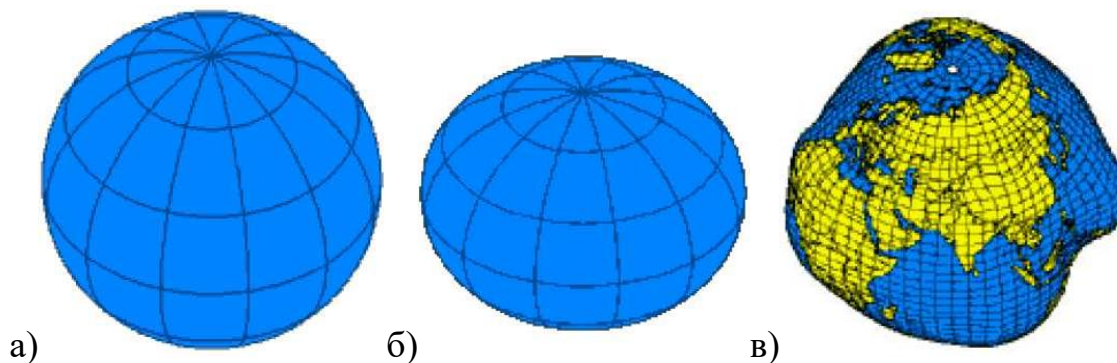


Рис. 2. Модели формы Земли: а) сфера, б) эллипсоид вращения, в) геоид.

Наиболее грубая форма описания фигуры Земли при первом приближении – это, конечно же, **сфера** (Рис. 2, а). Для большинства проблем общего землеведения этого приближения представляется достаточным, чтобы использовать в описании или исследовании некоторых географических процессов. В таком случае отвергают любую уплощённость планеты в районе полюсов как несущественное замечание. В данном приближении Земля имеет одну ось вращения и экваториальную плоскость, т.е. плоскость симметрии и плоскости симметрии меридианов, что характерно отличает ее от бесконечности множеств симметрии идеальной сферы. Горизонтальная структура географической оболочки характеризуется определенной поясностью и определенной симметрией относительно экватора.

При большем приближении форму Земли уже приравнивают к **эллипсоиду вращения** (Рис. 2, б). Эта модель, характеризуется выраженной

осью симметрии, экваториальной плоскостью симметрии и меридиональными плоскостями. Данное приближение используется, например, в геодезии для вычисления координат, построения картографических сетей, расчетов и т.д. В данном случае разница полуосей такого эллипсоида составляет всего 21 км, большая ось - 6378,160 км, малая - 6356,777 км и эксцентриситет -  $1/298$ .

Поскольку экваториальное сечение Земли также является эллипсом с разностью длин полуосей в 200 м и эксцентриситетом  $1/30000$ , то третьей моделью выступает уже **трехосный эллипсоид**. Несмотря на существование данного приближения, стоит отметить, что в географических исследованиях эта модель почти не используется, она лишь свидетельствует о сложном внутреннем строении планеты.

Наконец четвертым приближением является форма **геоида** (Рис. 2, в). Геоид - это эквипотенциальная поверхность, которая совпадает со средним уровнем Мирового океана, т.е. это совокупность геометрических точек пространства, которые имеют одинаковый потенциал силы тяжести. Естественно такая поверхность имеет неправильную сложную форму, т.е. не является плоскостью. Уровневая поверхность в каждой точке перпендикулярна к отвесу (т.е. силе тяжести). Практическое значение и важность этой модели состоит в том, что только с помощью отвеса, уровня, нивелира и других геодезических приборов можно проследить положение уровневых поверхностей, т.е. в нашем случае, геоида.

## 1.2. Глубинное строение Земли

Земля состоит из ряда **сферических оболочек**, вложенных одна в другую и различающихся по плотности и упругим свойствам. Очевидно, что слои Земли были определены косвенно с помощью измерения времени распространения преломленных и отраженных сейсмических волн; однако, надежно установлены четыре границы раздела вещества внутри Земли (Рис. 3).

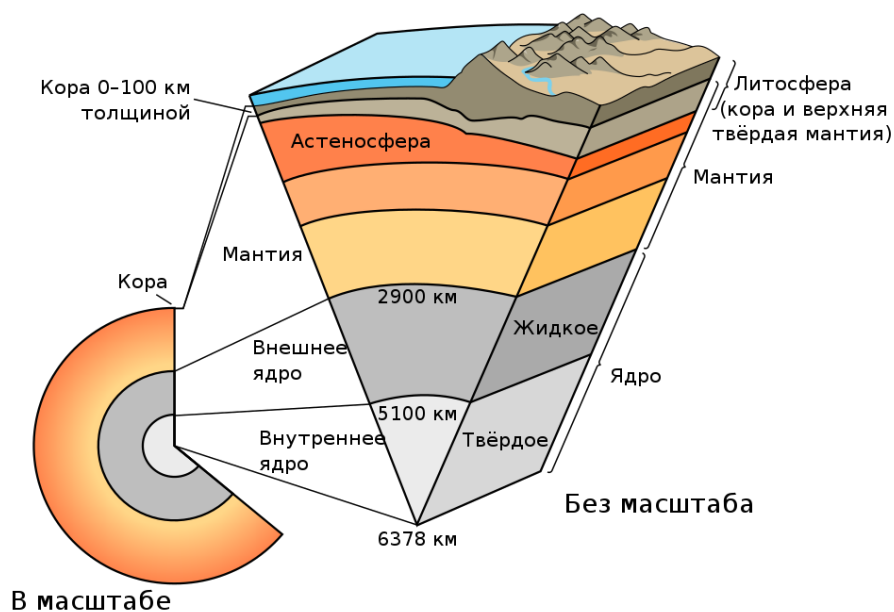


Рис. 3. Глубинное строение Земли с указанием названий оболочек.

Во-первых, это **земная кора**, которая является твердой оболочкой, однако, очень тонкая относительно размеров Земли (всего 70-75 км на суше и 5-7 км под океаном), таким образом занимает она менее 1% объема планеты. Самый верхний слой континентальной коры состоит в основном (не повсеместно) из осадочных пород, т.е. это известняки, песчаники и глины. Их размер достигает до 25 км в глубоких впадинах. Однако толщина осадочного слоя сильно разнится в зависимости от местоположения: например, в океанической коре этот осадочный слой имеет толщину всего в несколько сотен метров и подстилается базальтовым слоем.

Под земной корой находится **мантия**, на которую приходится основной объем Земли (66,3%). Твердые и хрупкие литосферные плиты могут «скользить», как по смазке из астеносферы. От верхней мантии земная кора отделяется, так называемой границей Мохо или Мохоровичича (**граница М**), которая под океанами лежит на глубинах 5–15 км, под континентами — 25–70 км. В этой зоне скорость распространения сейсмических волн резко возрастает к поверхности Земли. Однако природа этого явления до сих пор остается предметом научных споров.

Далее в верхней части мантии на глубине 100-120 км под материками и 50-60 км под океанами начинается, так называемая **астеносфера** – это слой

толщиной 50-80 км под океанами и до 200 км и более под континентами. Еще ниже находится плотное **ядро** (внешнее – жидкое, внутреннее – твердое).

В химическом составе Земли (Рис. 4), преобладают следующие элементы: первые по процентному содержанию идут железо (37,04%) и кислород (28,50%), затем следует кремний (14,47%), магний (11,03%), никель (2,96%), кальций (1,38%), алюминий (1,22%), сера (1,44%) и прочие 1,96% [1].

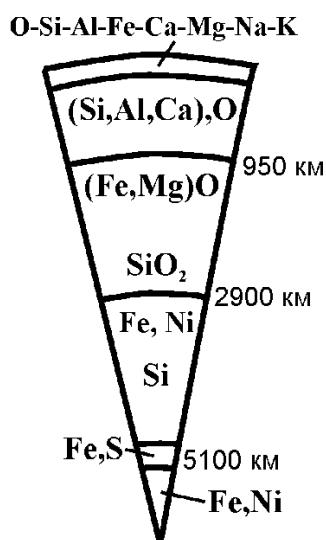


Рис. 4. Химический состав геосфер Земли (по А.Е. Ферсману) [2].

Таким образом, в Земле наиболее распространены четыре элемента: O, Fe, Si, и Mg, фактически на их долю приходится более 91% состава массы Земли. В свою очередь, менее распространенными остаются Ni, S, Ca и Al они образуют вторую группу элементов. На оставшиеся химические элементы периодической таблицы Д.И. Менделеева приходится менее 1% массы Земли. Примечательно, что углерода, являющегося основой жизни, в земной коре всего 0,1 %.

Стоит отметить, что наиболее распространённые породообразующие минералы земной коры практически полностью состоят из оксидов, а суммарное содержание хлора, серы и фтора в породах обычно составляет менее 1 %. Основными оксидами являются кремнезём (SiO<sub>2</sub> - 59,71 %), глинозём (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 15,41 %), и другие. Природа всех основных вулканических пород связана с кремнеземом. Оливин (Mg,Fe)<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>] очень широко

распространён в мантии, входит в магматические породы, и вообще является одним из самых распространённых на Земле минералов.

Рассмотрим теперь коротко **рельеф дна мирового океана и тектонику литосферных плит**. Решающий вклад в современную геологическую теорию тектоники литосферных плит внесли несколько открытий [3]. Во-первых, это *выявление грандиозной системы срединно-океанических хребтов и гигантских поперечных, т.н. трансформных, разломов, их пересекающих*. Общая протяженность хребтов около 60 000 км. Во-вторых, *обнаружение и расшифровка линейных магнитных аномалий океанического дна*. Подобное открытие позволило объяснить механизм и время их образования. В-третьих, это *установление места и глубины гипоцентров (т.е. очагов) землетрясений в горных породах*. И, наконец, в-четвертых, это развитие, т.н. *палеомагнитного метода*. Данный метод основан на изучении древней остаточной намагниченности горных пород. Это, в свою очередь, дает возможность выявить перемещение континентов относительно магнитных полюсов Земли.

Первым, кто изложил концепцию тектоники литосферных плит в общем виде, был метеоролог из Германии Альфред Вегенер, выступивший в 1912 г. с публичной лекцией «Перемещение континентов» во Франкфурте-на- Майне и сразу же подвергшийся яростной критике со стороны геофизиков и геологов [4]. А. Вегенер впервые высказал свою идею о существовании единого материка Пангея 200 миллионов лет назад и его последующего распада. Борьба с идеями А. Вегенера продолжалась до конца 60-х годов XX века, после чего перестройка взглядов геологов за рубежом была завершена, но не в России, где этой идее упорно сопротивлялись до последних лет. Следует отметить, что еще за 150 лет до А. Вегенера М.В. Ломоносов, обратил внимание на сходство очертаний материков в Атлантическом океане и высказал мысль о том, что материки, которые находятся по обе стороны Атлантического океана, могли в прошлом быть вместе.

Реально же от направления движения плит зависят те процессы, которые происходят на границе между плитами. Плиты могут отодвигаться друг от

друга, сталкиваться друг с другом или происходит горизонтальное смещение плит относительно друг друга (Рис. 5).

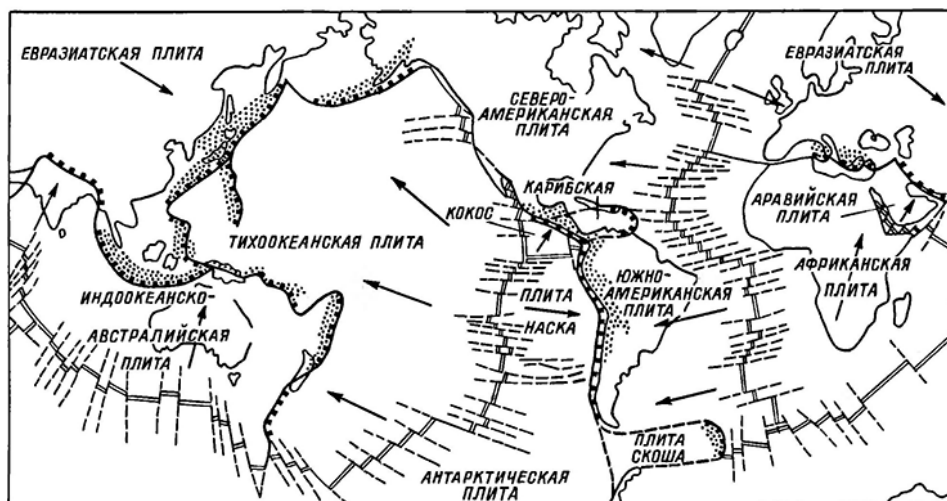


Рис. 6. Главные литосферные плиты [5, 6].

### 1.3. Магнитное поле и радиационный пояс Земли

Широко известно, что магнитное поле Земли приводится в действие сердцем планеты. Не забываем, что в его центре твердое внутреннее ядро, окруженное жидким внешним ядром, причем чем глубже, тем выше его температура. Считается, что горячее железо поднимается во внешнем ядре, затем охлаждается и вновь тонет. Получившиеся конвекционные потоки в сочетании с вращением Земли создают так называемую «геодинамику», которая и питает магнитное поле. Также стоит отметить существенное «сползание» магнитного северного полюса (Рис. 7): он сдвинулся на север

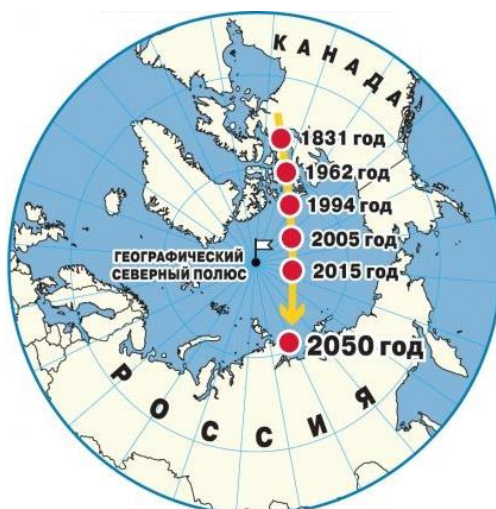


Рис. 7. Дрейф северного магнитного полюса.

более чем на 1100 км с начала 19-го века, когда исследователи впервые обнаружили его точно. На данный момент, он фактически движется еще быстрее, по оценкам ученых, полюс мигрирует на север примерно на 65 км в год, а не на 15 км, как это было в начале 20-го века.

На расстояниях менее 6-7 радиусов Земли магнитное поле можно считать почти дипольным, сферически симметричным и не зависящим от долготы (Рис. 8, а) [7]. На совсем малых расстояниях от Земли поле несколько искажается под влиянием магнитных аномалий: Бразильской, Южноатлантической, Северной и др.

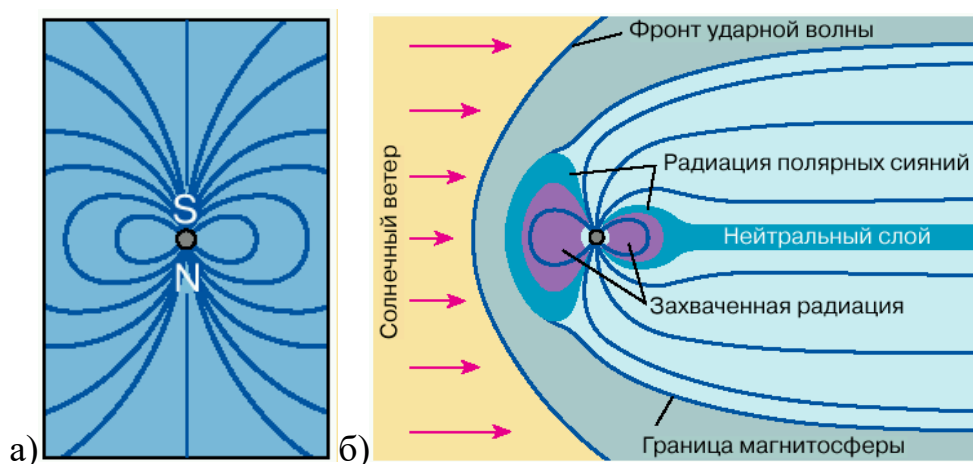


Рис. 8. Схематическое изображение магнитного поля: а) - дипольное магнитное поле, б) - магнитное поле Земли, трансформированное потоком солнечного ветра (меридиональная плоскость).

На расстояниях же более 6-7 радиусов Земли магнитное поле существенно искажено солнечным ветром (Рис. 8, б). Напомню, что солнечный ветер – это поток супер-ионизированных частиц (в основном гелиево-водородной плазмы). Скорость его истечения в окружающее космическое пространство из солнечной короны варьируется от 300-1200 км/с. От Солнца до Земли этот поток долетает за 2-3 суток. В то время как, например, солнечный свет, представляющий поток фотонов, летящих со скоростью света 299 792 458 м/с, достигает Земли уже за 8 минут 16 секунд.

Обратите внимание на (Рис. 8, б). Здесь представлена картина пространства, занимаемого магнитным полем Земли и называемого магнитосферой. Магнитосфера сильно сплюснута со стороны Солнца и очень

вытянута с противоположной (то есть «ночной»). Хвост земной магнитосферы простирается вплоть до траектории Луны. Именно в вытянутой части магнитосферы иногда случаются разрывы магнитных силовых линий, и именно через них солнечный ветер прорывается внутрь магнитосферы. Магнитное поле защищает атмосферу от солнечного ветра, ведь именно эти частицы, способны захватывать и уносить с собой молекулы газовой оболочки планеты. Предполагают, что именно таким образом растерял свою атмосферу Марс, не имеющий магнитного поля.

**Радиационный пояс Земли** (или РПЗ) – это область ближайшего околоземного космического пространства (окружающего Землю в виде кольца), в которой сосредоточены огромные потоки протонов и электронов, захваченных дипольным магнитным полем Земли. РПЗ был открыт американскими и советскими учеными в 1957-1958 годах (Рис. 9)[7].

Качественно РПЗ можно объяснить следующим образом. Дипольное магнитное поле Земли - это набор вложенных друг в друга магнитных оболочек. Его структура напоминает луковицу или кочан капусты. Магнитную оболочку можно определить, как замкнутую поверхность, сотканную из магнитных силовых линий. Чем ближе оболочка к центру диполя, тем больше напряженность магнитного поля и импульс, необходимый заряженной частице, чтобы проникнуть извне к этой оболочке.

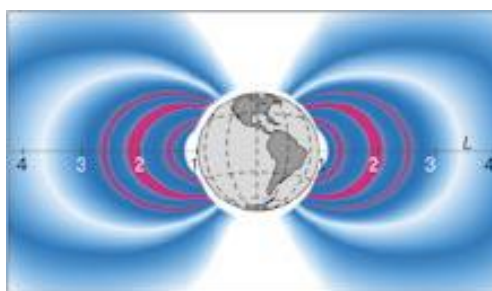


Рис. 9. Меридиональное сечение радиационного пояса Земли. Оболочки  $L = 1-3$  – внутренняя часть пояса;  $L = 3,5-7$  – внешняя часть.

Таким образом, N-я оболочка характеризуется импульсом частицы  $P_N$ . Если же начальный импульс частицы меньше, чем  $P_N$ , то магнитное поле ее отразит, и частица вернется в космическое пространство. Если же эта частица

каким-то образом окажется на N-й оболочке, то покинуть ее она уже не сможет. Такая захваченная частица останется в ловушке, пока не рассеется или не потеряет энергию при столкновении с остаточной атмосферой.

В 2012 году были обнаружены две гигантские полосы радиации, известные как пояса Ван Аллена, окружающие Землю. Внутренний пояс располагается внутри плазмосферы, в плоскости геомагнитного экватора это высоты от 1000 км над поверхностью Земли и примерно до 13000 км. Выше 13000 км и примерно до 65000 км располагается внешний радиационный пояс Земли.

31 августа 2012 года, на солнце вспыхнул гигантский протуберанец, посылая частицы и ударную волну, которая пролетела вблизи Земли. Это событие, возможно, было одной из причин появления третьего радиационного пояса вокруг Земли несколько дней спустя. Это изображение гигантского протуберанца до его извержения было получено Обсерваторией солнечной динамики НАСА. Примерно в это же время неожиданно, зонды Ван Аллена обнаружили новый радиационный пояс, окружающий Землю, третий, состоящий из электронов сверхвысоких энергий, встроенных во внешний пояс Ван Аллена, примерно на высоте 19,100–22,300 км над поверхностью планеты. Это устойчивое кольцо космического излучения, очевидно, образовалось в сентябре и длилось более четырех недель.

#### **1.4. Земная атмосфера**

Формирование химического состава атмосферы началось еще около четырех миллиардов лет назад. Изначально атмосфера состояла лишь из легких газов – гелия и водорода. По мнению ученых исходными предпосылками создания газовой оболочки вокруг Земли стали извержения вулканов, которые вместе с лавой выбрасывали огромное количество газов. В дальнейшем начался газообмен с водными пространствами, с живыми организмами, с продуктами их деятельности. Состав воздуха постепенно

менялся и в современном виде зафиксировался только несколько миллионов лет назад.

Главные же составляющие атмосферы – это азот (около 79%) и кислород (20%). Оставшийся процент (1%) приходится на следующие газы: аргон, неон, гелий, метан, углекислый газ, водород, криптон, ксенон, озон, аммиак, двуокиси серы и азота, закись азота и окись углерода. Кроме того, в воздухе содержится водяной пар и твердые частицы (это и пыльца растений, и пыль, и кристаллики соли, и примеси аэрозолей, и много другое) [8]. В последнее время ученые отмечают не качественное, а количественное изменение некоторых ингредиентов воздуха. И причина тому – человек и его деятельность.

Рассмотрим из каких слоев состоит наша атмосфера (Рис. 10)?

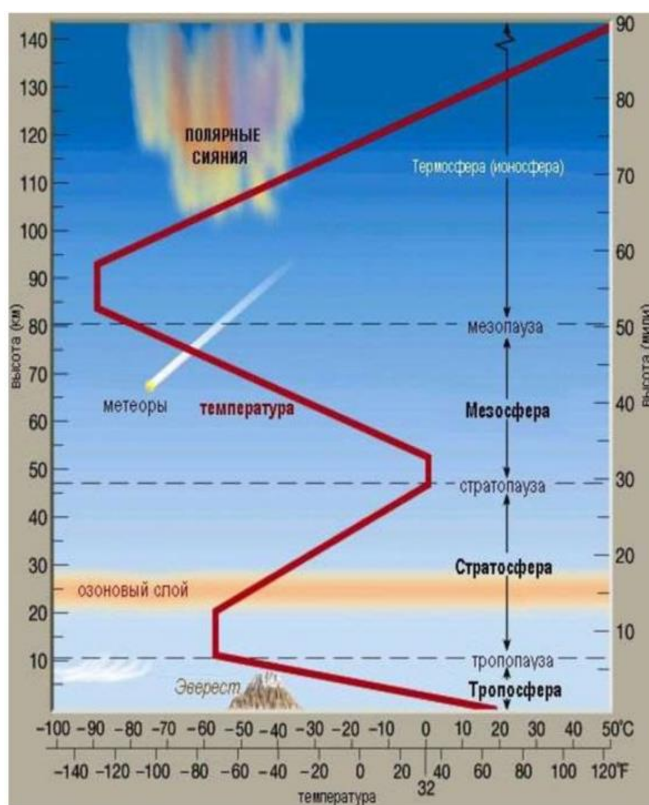


Рис. 10. Строение атмосферы Земли.

Первый слой от поверхности Земли – это **тропосфера**. Её верхняя граница до 8 - 15 км. Температура падает от +15 °С на поверхности до – 65 – - 70 °С на границе. Ее высота варьируется на экваторе – до 15 км, на полюсах – до 8 км. Также стоит отметить, что в тропосфере содержится

основная масса атмосферы, например, здесь находится почти весь водяной пар и формируются облака, имеет место погода. Источником тепла в тропосфере является земная поверхность. Также для данного слоя характерна сильная турбулентность.

Далее идет **тропопауза** – это граничный слой между тропосферой и стратосферой. Находится он на высоте ~17 км. Для него характерны сильные ветры до 400 км/час.

Следом идет уже упомянутая **стратосфера**. Ее границы от 17 до 50 (55) км. В данном слое температура растет от (-70 – -50) °С до (+10 – +30) °С. Температура стратосферы повышается с высотой благодаря возрастанию интенсивности солнечного УФ. Озоновый слой (ОЗ) поглощает солнечные УФ излучение с длиной волны  $\lambda < 300$  нм. Водяного пара в стратосфере ничтожно малое количество. Поэтому в стратосфере формируется только один вид облаков – это т.н. перламутровые облака. Их можно увидеть только зимой в высоких широтах. В условиях полярного дня (т.е. летом) в слое озона воздух прогревается, но несмотря на это, за счет того, что практически отсутствует вертикальная конвекция, почти нет и турбулентности. Однако резко меняется характер атмосферной циркуляции зимой - начинают преобладать западные ветры над северным полушарием, в это время над теплым летним южным полушарием преобладают восточные ветры.

Следующий слой – это **мезосфера**. Ее высота от 50 - 55км до 70 - 90км. Температура падает от 0 – + 30 °С до -70 – -90 °С. Сразу отметим, что данный слой расположен выше уровня высот, доступных самолетам и ниже тех, где летают спутники. Поэтому для его исследования используют ракеты – зонды. По этой же причине он является наименее изученным слоем атмосферы. По причине сильного падения температуры в данном слое имеет место сильная турбулентность. А также наблюдаются специфические явления, такие как “серебристые облака” и “спрайты”. Спрайт – это вид электрических разрядов холодной плазмы, бьющей в мезосфере и термосфере. Давление воздуха в этом

слое в 200 раз меньше, чем у поверхности земли. Именно здесь сгорает (испаряется) большинство метеоритов.

Далее идет **термосфера**. Ее высота от 70 - 90 км до 500 - 800 км. Температура растёт от  $-70 - -90$  °С до  $+1000$  °С. Различают две части данного слоя - *ионосфера* и *экзосфера*, переходящая в земную корону. В этом слое происходит ионизация потоком солнечного излучения рентгеновского и ультрафиолетового диапазонов. В ионосфере на высотах 300 - 750 км средняя плотность частиц  $10^{-8} - 10^{-10}$  г/м<sup>3</sup>, а на высотах 100 - 400 км находятся ионы  $O^+$ ,  $NO^+$  и  $e^-$  - электроны, их содержание составляет  $10^{15} - 10^{16}$  частиц/см<sup>3</sup>. Благодаря чему, в ионосфере электропроводность выше, чем у поверхности земли в  $10^{12}$  раз. Здесь радиоволны длиной более 20 м отражаются электронными слоями небольшой концентрации уже на высотах 70-80 км. А средние и короткие волны отражаются вышележащими слоями ионосферы.

И последний слой – это **экзосфера**. Она находится от 800 - 1000 км над поверхностью Земли. Температура здесь растёт и достигает  $2000^\circ$ . На высотах более 800 км, главными элементами атмосферы становятся гелий и водород. В верхней атмосфере важнейшим эффектом для жителей планеты является поглощение атмосферой УФ, рентгена и потока заряженных солнечных частиц. Эти «излучения» Солнца не только нагревают верхнюю атмосферу, но и меняют ее молекулярный и ионный состав.

### 1.5. Контрольные вопросы к Главе 1:

- 1) Назовите определение «экологии».
- 2) На каких уровнях происходит изучение в экологии?
- 3) Перечислите критерии классификации экологии и соответствующие им классы.
- 4) Назовите ученого, классифицировавшего современную экологию на теоретическую и прикладную.
- 5) Перечислите в порядке удаления от Солнца планеты Солнечной системы.

- б) Укажите слои глубинного строения Земли в порядке глубины залегания каждого, начиная от поверхности.
- 7) Какие задачи решает наука экология?
- 8) Перечислите химические элементы, присутствующие в составе Земли.
- 9) О чем гласит теория А. Вегенера?
- 10) Что такое радиационный пояс Земли?
- 11) Перечислите слои земной атмосферы в порядке их удаления от поверхности Земли.

## **ГЛАВА 2. Геохронология. Периодизация геологической истории**

### **2.1. Относительная геохронология**

Ученые разделяют историю Земли на продолжительные промежутки времени. Разделение это условное, относительное, поскольку резких разграничений между ними не существует. На рубеже соседних эр, периодов, эонов происходили крупные геологические преобразования: активная вулканическая деятельность, горообразование, перераспределение моря и суши, смена климата, флоры и фауны. Название этих промежутков времени происходит чаще всего от названия местности, где впервые были обнаружены органические остатки растений и животных этой эпохи. Учение о последовательности формирования и возрасте горных пород называется геохронологией. **Геохронология** – это шкала геологического времени, показывающая последовательность и соподчинённость этапов развития земной коры и органического мира Земли. Геохронологическая шкала базируется на абсолютном летоисчислении в тыс. или млн. лет, расчет которого основан на знании скорости распада радиоактивных элементов. Соответственно, различаются методы относительной и методы абсолютной геохронологии.

Методы относительной геохронологии – совокупность подходов к определению относительного возраста горных пород, которые лишь фиксируют последовательность образования горных пород друг относительно друга. Эти методы базируются на нескольких простых принципах.

1) *Принцип суперпозиции.* В 1669 г. Николо Стено сформулировал принцип суперпозиции, гласящий, «что в ненарушенном залегании каждый вышележащий слой моложе нижележащего». Важно подчеркнуть, что в определении подчёркивается применимость принципа только в условиях ненарушенного залегания слоев. Метод определения последовательности образования слоёв, базирующийся на принципе Стено, часто называют стратиграфическим. **Стратиграфия** – раздел геологии, занимающийся изучением последовательности образования и разделением толщ осадочных, вулканогенно-осадочных и метаморфических пород, составляющих земную кору.

2) *Принцип пересечений.* Принцип пересечений сформулирован Джеймсом Хаттоном. Этот принцип гласит, что любое тело, пересекающее толщу слоев, моложе этих слоев.

3) Нужно отметить и ещё один важный принцип, гласящий, что время преобразования или деформации пород моложе, чем возраст образования этих пород.

Рассмотрим использование этих принципов на примере толщ осадочных пород, прорванных несколькими секущими магматическими телами (Рис. 11). Последовательность событий следующая. Первоначально происходило накопление осадочных толщ нижнего слоя (1), затем, последовательно накопление вышележащих слоев (2, 3, 4, 5), каждый из которых моложе нижележащего. Накопление осадочных пород в подавляющем большинстве случаев происходит в форме горизонтально ориентированных слоев, так первоначально залегали и сформированные слои (1-5).

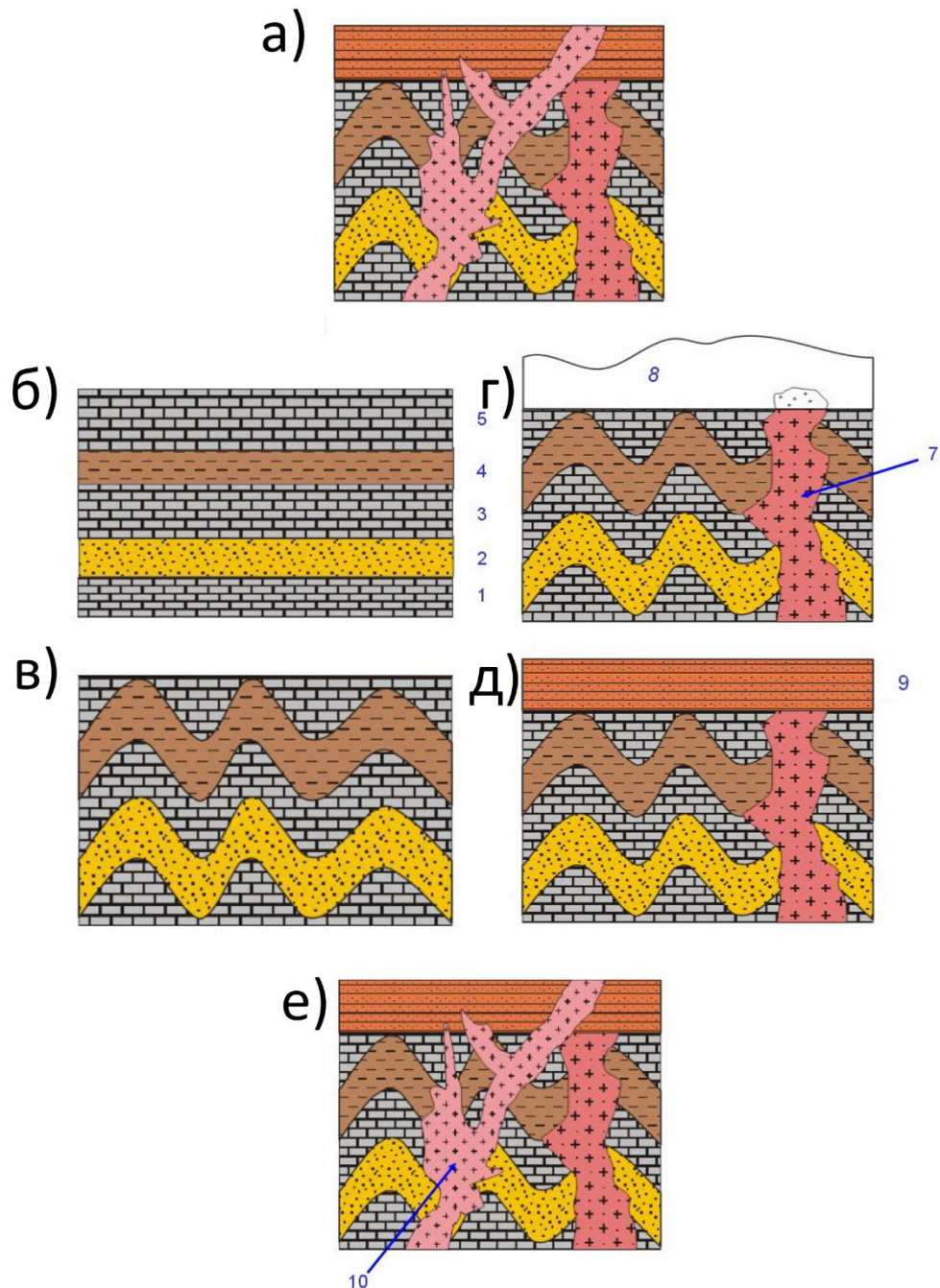


Рис. 11 Визуализация последовательности событий при формировании конгломерата горных пород: а – совокупность пород; б – последовательное накопление горизонтально лежащих слоев (1 - 5); в – деформация слоев (б); г – внедрение тела магматических пород (7) и размыв верхнего слоя (8); д – накопление верхнего слоя (9); е – внедрение магматического слоя (10). Позднее эти толщи были деформированы (б), и в них внедрилось тело магматических пород (7). Затем, вновь горизонтально, началось накопление вышележащего слоя, залегающего и на внедрившемся магматическом теле.

При этом, учитывая, что образующийся слой лежит на выровненной горизонтальной поверхности, очевидно, что его накоплению предшествовало выравнивание территории – её размыв (8). Вслед за размывом территории накопился следующий слой (9). Наиболее молодым образованием является магматическое тело 10. Стоит подчеркнуть, что, рассматривая историю геологического развития территории, разрез которой изображён на Рис. 11, мы пользовались исключительно относительным временем, определяя лишь последовательность образования тел.

## 2.2. Биостратиграфические методы

Ещё одна большая группа методов относительной геохронологии – **биостратиграфические методы**. Эти методы основаны на изучении окаменелостей – ископаемых остатков организмов, заключённых в слоях горных пород: в разновозрастных слоях пород встречаются разные комплексы остатков организмов, характеризующие развитие флоры и фауны в ту или иную геологическую эпоху. В основе методов лежит принцип, сформулированный Уильямом Смитом: разновозрастные осадки содержат одни и те же или близкие остатки ископаемых организмов. Этот принцип дополняется ещё одним важным положением, согласно которому ископаемые флоры и фауны сменяют друг друга в определённом порядке. Таким образом, в основе всех биостратиграфических методов лежит положение о непрерывности и необратимости изменения органического мира – закон эволюции Чарльза Дарвина. Каждый отрезок геологического времени характеризуется определёнными представителями флоры и фауны. Определение возраста толщ горных пород сводится к сравнению найденных в них ископаемых с данными о времени существования этих организмов в геологической истории. В качестве грубой аналогии сущности метода можно привести всем известные методы определения возраста в археологии: если при раскопках обнаружены только каменные орудия труда, то культура относится к каменному веку, присутствие бронзовых орудий даёт основание для её отнесения к бронзовому веку и т.п.

Среди биостратиграфических методов долгое время оставался важнейшим метод руководящих форм. Руководящими формами называют остатки вымерших организмов соответствующие следующим критериям:

- эти организмы существовали короткий промежуток времени,
- были распространены на значительной территории,
- их окаменелости часто встречаются и легко определяются.

При определении возраста среди найденных в изучаемом слое ископаемых выбираются наиболее для него характерные, затем они сопоставляются с атласами руководящих форм, описывающими, какому интервалу времени свойственны те или иные формы. Первый из таких атласов был создан ещё в середине XIX века палеонтологом Г. Бронном.

На сегодняшний день основным в биостратиграфии является метод анализа органических комплексов. При применении этого метода вывод об относительном возрасте строится на сведениях обо всём комплексе окаменелостей, а не на находках единичных руководящих форм, что значительно повышает точность.

В ходе геологических исследований стоят задачи не только разделения толщ по возрасту и отнесения их к какому-либо интервалу геологической истории, но и сопоставления, т.е. корреляции – удалённых друг от друга одновозрастных толщ. Наиболее простым методом выявления одновозрастных толщ является прослеживание слоёв на местности от одного обнажения к другому. Очевидно, что этот метод эффективен только в условиях хорошей обнажённости. Более универсальным является биостратиграфический метод сопоставления характера органических остатков в удалённых разрезах – одновозрастные слои обладают одинаковым комплексом окаменелостей. Этот метод позволяет проводить региональную и глобальную корреляцию разрезов. Принципиальная модель использования окаменелостей для корреляции удалённых разрезов отражена на Рис. 12. Одновозрастными являются слои, содержащие одинаковый комплекс окаменелостей.

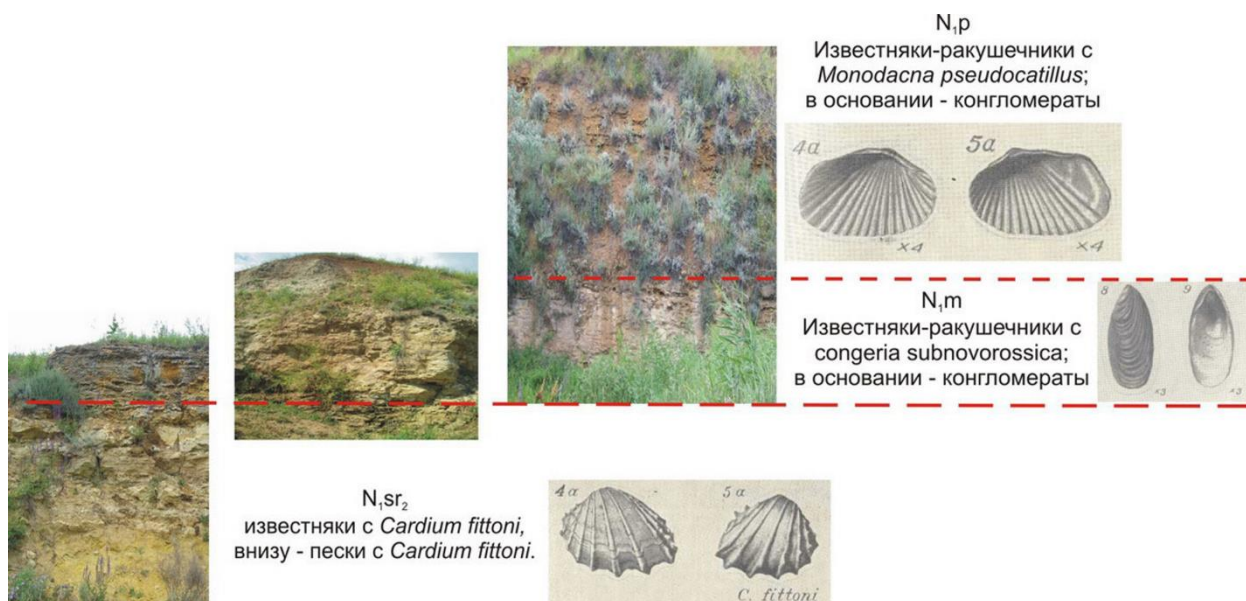


Рис.12 Визуализация использования руководящих форм для корреляции удаленных разрезов

### 2.3. Абсолютная геохронология

#### 1. Методы изотопной геохронологии

Методы абсолютной геохронологии позволяют определить возраст геологических объектов и событий в единицах времени. Среди этих методов наиболее распространены методы изотопной геохронологии, основанные на подсчёте времени распада радиоактивных изотопов, заключенных в минералах (или, например, в остатках древесины или в окаменелых костях животных). Сущность данной группы методов заключена в следующем. В состав некоторых минералов входят радиоактивные изотопы. С момента образования такого минерала в нём протекает процесс радиоактивного распада изотопов, сопровождающийся накоплением продуктов распада. Распад радиоактивных изотопов протекает самопроизвольно, с постоянной скоростью, не зависящей от внешних факторов; количество радиоактивных изотопов убывает в соответствии с экспоненциальным законом. Принимая во внимания постоянство скорости распада, для определения возраста достаточно установить количество оставшегося в минерале радиоактивного

изотопа и количество образовавшегося при его распаде стабильного изотопа.

Эта зависимость описывается главным уравнением геохронологии:

$$t = 1/\lambda \ln(N_k/N_t + 1),$$

где  $N_k$  – число изотопов продуктов распада;  $N_t$  – число радиоактивных изотопов не распавшихся по прошествии времени  $t$ ;  $\lambda$  – постоянная распада – доля распавшихся ядер данного изотопа за единицу времени (является известной для каждого изотопа величиной).

Для определения возраста используются многие радиоактивные изотопы:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{147}\text{Sm}$  и др. Названия изотопно-геохронологических методов обычно образуются из названий радиоактивных изотопов и конечных продуктов их распада: уран-свинцовый, калий-аргоновый и т.д. Результаты определения возраста геологических объектов выражаются в значениях Международной системы единиц (СИ): Ма и Ga. Эта аббревиатура означает, соответственно, «млн. лет» и «млрд. лет» (от лат. *Mega anna* – млн. лет, *Giga anna* – млрд. лет).

Рассмотрим определение возраста рубидий-стронциевым изохронным методом. В результате распада радиоактивного изотопа  $^{87}\text{Rb}$  происходит образование нерадиоактивного продукта распада –  $^{87}\text{Sr}$  (постоянная распада составляет  $1,42^{10-11}\text{лет}^{-1}$ ). Применение изохронного метода предполагает анализ нескольких образцов, взятых из одного и того же геологического объекта, что повышает точность определения возраста и позволяет рассчитать исходный изотопный состав стронция (используемый для определения условий формирования породы). В ходе лабораторных исследований определяются содержания  $^{87}\text{Rb}$  и  $^{87}\text{Sr}$ , при этом содержание последнего складывается из суммы стронция, изначально содержащегося в минерале ( $^{87}\text{Sr}$ )<sub>0</sub>, и стронция, возникшего в процессе радиоактивного распада  $^{87}\text{Rb}$  за период существования минерала:

$$(^{87}\text{Sr})_t = (^{87}\text{Sr})_0 + (^{87}\text{Rb})_t \times [\exp(\lambda \times t) - 1]$$

На практике измеряются не содержания указанных изотопов, а их отношения к стабильному изотопу  $^{86}\text{Sr}$ , что даёт более точные результаты. Вследствие этого уравнение приобретает вид:

$$\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_t = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_0 + \left(\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}\right)_t \times [\exp(\lambda \times t) - 1]$$

В полученном уравнении имеются два неизвестных: время  $t$  и начальное отношение изотопов стронция. Для решения задачи анализируются несколько образцов, результаты наносятся в виде точек на график в координатах  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  –  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ . Примеры полученных графиков представлены на Рис. 13.

В случае корректно отобранных проб все точки ложатся вдоль одной прямой – **изохроны** (следовательно, имеют один и тот же возраст). Возраст анализируемых образцов рассчитывается по величине угла наклона изохроны, а начальное стронциевое отношение определяется по пересечению изохроной оси  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ .

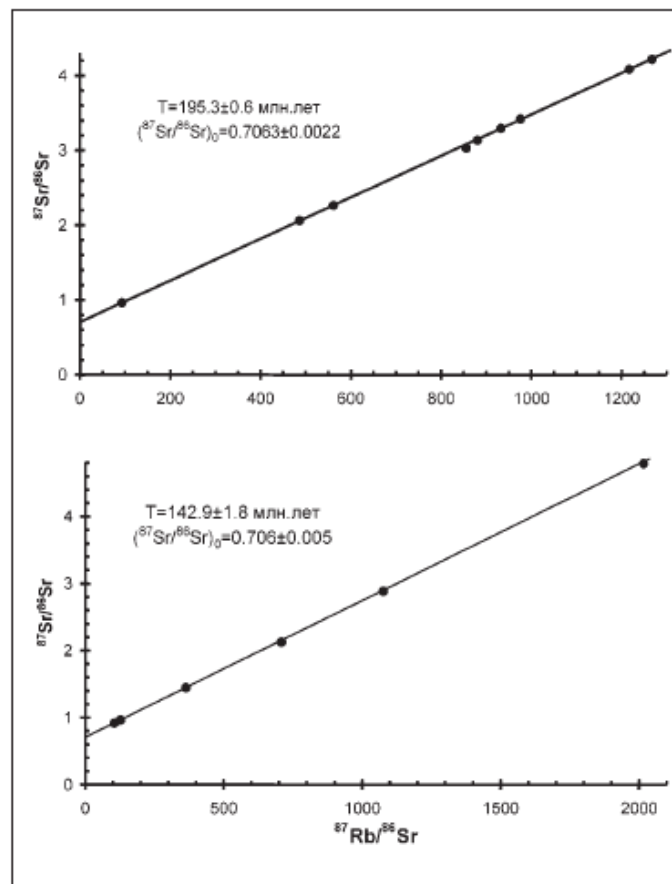


Рис 13 Пример изохрон, полученных в рамках рубидий-стронцевого метода

В случае если на графике точки не ложатся на одну линию можно говорить о некорректности подбора проб. Во избежание этого необходимо соблюдать следующие главные условия:

- образцы должны отбираться из одного геологического объекта (т.е. быть заведомо одновозрастными);
- в исследуемых породах не должно быть признаков наложенных преобразований, которые могли привести к перераспределению изотопов;
- образцы должны обладать одинаковым изотопным составом стронция во время возникновения (недопустимо использование различных пород при построении одной изохроны).

В настоящее время наиболее точным считается самарий – неодимовый метод, принятый в качестве стандарта, с которым сравниваются данные других методов. Это связано с тем, что в силу геохимических особенностей данные элементы наименее подвержены влиянию наложенных процессов, часто значительно искажающих или сводящих на нет результаты определения возраста. Метод основан на распаде изотопа  $^{147}\text{Sm}$  с образованием в качестве конечного продукта распада  $^{144}\text{Nd}$ .

Калий – аргонный метод основан на распаде радиоактивного изотопа  $^{40}\text{K}$ . Этот метод давно и широко используется для определения возраста всех генетических типов горных пород. Он наиболее эффективен при определении времени формирования осадочных пород и минералов, например, глауконита (Глауконит — минерал, водный алюмосиликат железа, кремнезема и оксида калия непостоянного состава). Применительно к магматическим и особенно метаморфическим породам, затронутым наложенными изменениями, этот метод часто даёт «омоложенные» датировки, что связано с потерей подвижного аргона.

Радиоуглеродный метод основан на распаде изотопа  $^{14}\text{C}$ , образующегося в верхних слоях атмосферы в результате воздействия космического излучения на атмосферные газы (азот, аргон, кислород). В последствии  $^{14}\text{C}$ , как и нерадиоактивный изотоп углерода, образует углекислый газ  $\text{CO}_2$ , и в его

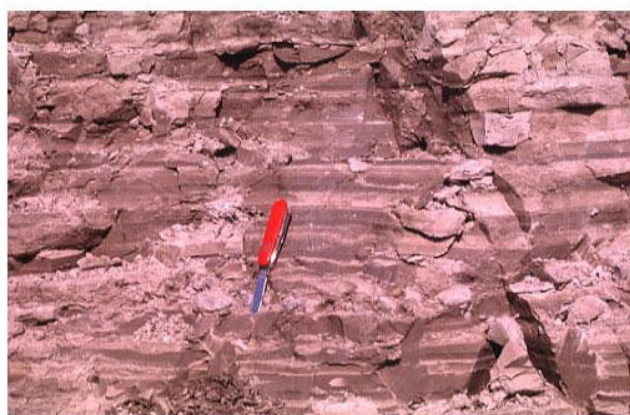
составе вовлекается в фотосинтез, оказываясь таким образом в составе растений и, далее, пищевой цепочке передается животным. В гидросферу  $^{14}\text{C}$  попадает в результате обмена  $\text{CO}_2$  между атмосферой и Мировым океаном, далее он оказывается в костях и карбонатных раковинах водных обитателей. Интенсивное перемешивание воздушных масс в атмосфере и активное участие углерода в глобальном круговороте химических элементов приводит к выравниванию концентраций  $^{14}\text{C}$  в атмосфере, гидросфере и биосфере. Для живых организмов равновесное состояние достигается при удельной активности  $^{14}\text{C}$ , составляющей  $13,56 \pm 0,07$  распадов в минуту на 1 грамм углерода. Если организм умирает, то прекращается поступление  $^{14}\text{C}$ ; в результате радиоактивного распада (перехода в нерадиоактивный  $^{14}\text{N}$ ) удельная активность  $^{14}\text{C}$  уменьшается. Измерив значение активности в пробе и сопоставив её со значением удельной активности в живой ткани, несложно рассчитать время прекращения жизнедеятельности организма по конкретной формуле.

Радиоуглеродное датирование позволяет определять возраст образцов, содержащих углерод (кости, зубы, раковины, древесина, уголь и т. д.) возрастом до 70 тыс. лет. Это определяет его использование в четвертичной геологии (Четвертичная геология — раздел геологии, изучающий четвертичную систему и соответствующий ей период истории Земли, который начался примерно 2,6 млн лет назад и продолжается до сих пор) и, особенно, в археологии.

В завершение рассмотрения методов изотопной геологии следует отметить, что, несмотря на получение «абсолютных», выраженных в годах, датировок, мы имеем дело с модельным возрастом – полученные результаты неизбежно содержат некоторую ошибку и, не стоит забывать, что продолжительность астрономического года в ходе длительной геологической истории менялась.

2. Сезонно-климатические методы.

Ещё одна группа методов абсолютной геохронологии представлена сезонно-климатическими методами. Примером такого метода служит **варвохронология** – метод абсолютной геохронологии, основанный на подсчёте годовых слоёв в «ленточных» отложениях приледниковых озёр. Для приледниковых озёр характерными отложениями служат так называемые «ленточные глины» - чётко слоистые осадки, состоящие из большого числа параллельных лент. Каждая лента – результат годового цикла осадконакопления в условиях озёр, находящихся большую часть года в замерзшем состоянии. Она всегда состоит из двух слоёв (Рис. 14). Верхний – зимний – слой представлен глинами темного цвета (за счёт обогащения органикой), образованного под ледяным покровом; нижний – летний – сложен более грубозернистыми светлоокрашенными осадками (в основном тонкими песками или глинистыми отложениями), образованными за счёт приносимого в озеро талыми ледниковыми водами материала. Каждая пара таких слоёв соответствует 1 году.



Обладают правильной сезонной слоистостью с чередованием *песчаных* (весенних и летних) и *глинистых, обогащённых органикой*, (осенних и зимних) прослоев

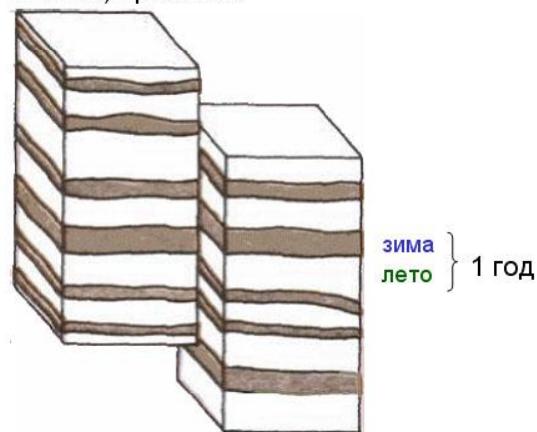


Рис. 14 Изображение годовых слоёв в «ленточных» отложениях приледниковых озёр

Изучение ритмичности ленточных глин позволяет не только определять абсолютный возраст, но и проводить корреляцию расположенных неподалёку друг от друга разрезов, сопоставляя мощности слоёв.

На сходном принципе основан и подсчёт годовых слоёв в осадках соляных озёр, где летом, за счёт повышения испарения, происходит активное осаждение солей.

К недостаткам сезонно-климатических методов следует отнести их неуниверсальность.

## **2.4. Стратиграфическая и геохронологическая шкалы**

Оперируя категорией относительного времени необходимо иметь универсальную шкалу периодизации истории. Так, применительно к истории человечества, мы употребляем выражения «до нашей эры», «в эпоху Возрождения», «в XX веке» и т.п., относя какое-либо событие или предмет материальной культуры к определённому временному интервалу. Аналогичный подход принят и в геологии, для этих целей разработаны Международная геохронологическая шкала и Международная стратиграфическая шкала.

Основную информацию о геологической истории Земли несут слои горных пород, в которых, как на страницах каменной летописи, запечатлены происходившие на планете изменения и эволюция органического мира (последняя «запечатлена» в комплексах окаменелостей, содержащихся в разновозрастных слоях). Слои горных пород, занимающие определённое положение в общей последовательности напластований и выделяемые на основании присущих им особенностей (чаще - комплекса ископаемых), являются стратиграфическими подразделениями. Горные породы, слагающие стратиграфические подразделения, формировались на протяжении определённого интервала геологического времени, и, следовательно, отражают эволюцию земной коры и органического мира за этот промежуток времени.

**Стратиграфическая шкала** – шкала, показывающая последовательность и соподчинённость стратиграфических подразделений, слагающих земную кору и отражающих пройденные землёй этапы исторического развития. Объектом стратиграфической шкалы являются слои

горных пород. Основа современной стратиграфической шкалы была разработана ещё в первой половине XIX века и была принята в 1881 г. на II сессии Международного геологического конгресса в Болонье. Позднее стратиграфическая шкала была дополнена геохронологической шкалой.

**Геохронологическая шкала** – шкала относительного геологического времени, показывающая последовательность и соподчинённость основных этапов геологической истории Земли и развития жизни на ней. Объектом геохронологической шкалы является геологическое время.

Шкала геологического времени (или **геохронометрическая шкала**) представляет собой последовательный ряд датировок нижних границ общих стратиграфических подразделений, выраженных в единицах времени (чаще в миллионах лет) и вычисленных с помощью методов абсолютного датирования. Объектом геохронологической шкалы служат геохронологические подразделения – интервалы геологического времени, в течение которого образовались горные породы, входящие в состав данного стратиграфического подразделения.

Всем стратиграфическим подразделениям соответствуют подразделения геохронологической шкалы.

Таблица №1. Сопоставление стратиграфических и геохронологических подразделений

<b>Стратиграфические подразделения</b>	<b>Геохронологические подразделения</b>
акротема	акрон
эонотема	эон
эратема (группа)	эра
система	период
отдел	эпоха
ярус	век
зона	фаза

При этом практически все стратиграфические подразделения ранга эонотема - система имеют единые общепринятые международные наименования.

Наиболее крупными стратиграфическими подразделениями являются акротемы и эонотемы. Архейскую и протерозойскую акротемы объединяют под названием «докембрий» (т.е. толщи пород, накопившиеся до кембрийского периода (около 540 млн лет назад) – первого периода фанерозоя) или «криптозой». Рубежом докембрия и фанерозоя служит появление в слоях горных пород остатков скелетных организмов. В докембрии органические остатки редки, поскольку мягкие ткани быстро разрушаются, не успев захорониться. Сам термин «криптозой» образован при слиянии корней слов «криптос» - скрытый и «зоэ» - жизнь. При разделении докембрийских толщ на дробные стратиграфические подразделения важнейшую роль имеют методы изотопной геохронологии, поскольку органические остатки редки или вообще отсутствуют, определяются с трудом и, главное, не подвержены быстрой эволюции (однотипные комплексы микрофауны остаются неизменными на протяжении огромных интервалов времени, что не позволяет разделять толщи по этому признаку).

Эонотемы включают в свой состав эратемы. Эратема, или группа – это отложения, образовавшиеся в течение эры; продолжительность эр в фанерозое составляет первые сотни миллионов лет. Эратемы отражают крупные этапы развития Земли и органического мира. Границы между эратемами соответствуют переломным рубежам в истории развития органического мира. В фанерозое выделяют три эратемы: палеозойскую, мезозойскую и кайнозойскую.

Эратемы, в свою очередь, включают в свой состав системы. Система – это отложения, образовавшиеся в течение периода; длительность периодов составляет десятки миллионов лет. Одна система от другой отличается комплексами фауны и флоры на уровне надсемейств, семейств и родов. В фанерозое выделяются 12 систем: кембрийская, ордовикская, силурийская,

девонская, каменноугольная (карбоновая), пермская, триасовая, юрская, меловая, палеогеновая, неогеновая и четвертичная (антропогеновая). Названия большинства систем происходят от географических названий тех местностей, где они были впервые установлены. Для каждой системы на геологических картах приняты определенный цвет, являющийся международным, и индекс, образованный начальной буквой латинского названия системы.

Отдел - часть системы, соответствующая отложениям, образовавшимся в течение одной эпохи; длительность эпох обычно составляет первые десятки миллионов лет. Отличия между отделами проявляются в различии фауны и флоры на уровне родов или групп. Названия отделов даны по положению их в системе: нижний, средний, верхний или только нижний и верхний; эпохи соответственно называют ранней, средней, поздней.

В составе отдела выделяются ярусы. Ярус – отложения, образовавшиеся в течение века; продолжительность веков составляет несколько миллионов лет.

Наряду с основными подразделениями стратиграфической и геохронологической шкал применяются региональные и местные подразделения. К региональным стратиграфическим подразделениям относятся горизонт и лона. Горизонт – основное региональное подразделение стратиграфической шкалы, объединяющее разновозрастные отложения, характеризующиеся определенным комплексом литологических и палеонтологических признаков. Горизонтам присваиваются географические названия, соответствующие местам, где они наиболее хорошо представлены и изучены. Геохронологическим эквивалентом служит время. Например, хапровский горизонт, распространённый на побережье Таганрогского залива Азовского моря, соответствует толще речных песков, сформировавшихся в конце неогенового периода. Стратотип (наиболее представительный разрез стратиграфического горизонта, являющийся его эталоном) этого горизонта расположен у ст. Хапры. Стоит добавить, что термин «горизонт», употребляемый без географического названия, понимается как слой или пачка

слоёв, выделяемых на основании каких-либо особенностей (палеонтологических или литологических), то есть является обозначением свободного пользования.

Лона является частью горизонта выделяемой по комплексу фауны и флоры, характерному для данного региона, и отражает определенную фазу развития органического мира данного региона. Геохронологическим эквивалентом лоны является время.

Местные стратиграфические подразделения представляют собой толщи пород, выделяемые по ряду признаков, в основном по литологическому или петрографическому составу (петрология – наука о структуре, минералогических и химических особенностях горных пород; литология – наука, изучающая состав, структуру, происхождение и изменение осадочных пород). Границы местных стратиграфических подразделений часто не совпадают с границами подразделений единой стратиграфической шкалы.

Комплекс – самое крупное местное стратиграфическое подразделение. Комплекс имеет очень большую мощность, сложный состав горных пород, сформированных в течение какого-то крупного этапа развития территории. Комплексу присваивается географическое название по характерному месту его развития. Чаще всего комплексы выделяются при разделении видоизмененных толщ.

Серия охватывает достаточно мощную и сложную по составу толщу горных пород, для которых имеются какие-то общие признаки: сходные условия образования, преобладание определенных типов горных пород, близкая степень деформаций и метаморфизма и т.д. Серии обычно соответствуют единому крупному циклу развития территории.

Основной единицей из местных стратиграфических подразделений представляет собой является свита. Свита представляет собой толщу пород, образованных в определенной физико-географической обстановке и занимающих установленное стратиграфическое положение в разрезе. Главные особенности свиты - наличие устойчивых литологических признаков на всей

площади ее распространения и четкая выраженность границ. Свое название свита получает по географическому местонахождению стратотипа.

## 2.5. Контрольные вопросы к Главе 2:

- 1) Что такое «геохронология»?
- 2) Перечислите принципы, на которых базируются методы геохронологии.
- 3) Что такое «руководящие формы»?
- 4) Чем отличается абсолютная геохронология от относительной?
- 5) Для каких материалов подходит радиоуглеродный метод датирования?
- 6) Что обозначают Ma и Ga в контексте единиц измерения времени?

## ГЛАВА 3. Вертикальные размеры современной биосферы

### 3.1 Границы биосферы

Структура биосферы. Биосфера включает в себя:

- аэробiosферу — нижнюю часть атмосферы;
- гидробиосферу — всю гидросферу;
- литобиосферу — верхние горизонты литосферы (твердой земной оболочки).

**Верхняя граница биосферы** теоретически определяется озоновым слоем [9]. Для небиосферы (часть биосферы, где живые организмы встречаются в настоящее время) – это нижняя граница озонового слоя (~ 20 км), ослабляющего до приемлемого уровня губительное космическое ультрафиолетовое излучение, а для палеобиосферы (древние биосферы) – это верхняя граница того же слоя (~ 60 км), ибо кислород в атмосфере Земли есть результат преимущественно жизнедеятельности растительности (так же, как и другие газы в соответствующей мере). В большинстве случаев в качестве верхней теоретической границы биосферы указывают озоновый слой без

уточнения его границ, что вполне приемлемо, если не обсуждать разницу между нео- и палеобиосферой. Иначе следует учитывать, что озоновый экран образовался всего лишь около 600 млн лет назад, после чего организмы смогли выйти на сушу.

Практически же максимальная высота над уровнем моря, на которой может существовать живой организм, ограничена уровнем, до которого сохраняются положительные температуры и могут жить хлорофиллосодержащие растения-продуценты (это 6,2 км в Гималаях). Выше, до «линии снегов», обитают лишь пауки, ногохвостки и некоторые клещи, питающиеся зернами растительной пыльцы, спорами растений, микроорганизмами и другими органическими частицами, заносимыми ветром. Еще выше живые организмы могут попадаться лишь случайно.

На высотах 7,5-8 км критически низкого для абсолютного большинства организмов значения достигает другой абиотический фактор – абсолютное атмосферное давление. Наиболее зависимы от величины давления птицы и летающие насекомые, преимущественно занимающие нижнюю зону (0-1 км), хотя отдельные виды птиц (такие как орлы, кондоры) могут постоянно жить и на высотах 4-5 км.

**Нижняя граница** существования активной жизни традиционно определяется дном океана – это 11 022 м (максимальная глубина Марианской впадины) и глубиной литосферы, характеризующейся температурой 100 °С (около 6 км, по данным сверхглубокого бурения на Кольском полуострове). В основном жизнь в литосфере распространена лишь на несколько метров вглубь, ограничиваясь почвенным слоем. Однако по отдельным трещинам и пещерам она распространяется на сотни метров, достигая глубин 3-4 км.

Возможно, пределы биосферы намного шире, так как в гидротермах дна океана на глубинах около 3 км при температуре 250 °С обнаружены организмы. Теоретически на глубинах 25 км относительно уровня моря должна иметь место критическая температура 460 °С, при которой при любом

давлении вода существует только в виде пара, а следовательно, жизнь невозможна.

Осадочные породы, практически все претерпевшие переработку живыми организмами, определяют нижнюю границу былых биосфер, которая тем не менее не опускается на материках ниже самых больших глубин океана.

Одна из характерных особенностей нашей планеты заключается в следующем. Если выразить графически рельеф материков и дна океанов в качестве различных ступеней общего рельефа Земли, получается гипсографическая (от греч. *gipsos* - высота, *grapfo* - пишу) кривая земного шара (Рис. 15). Эта кривая получается, если по оси ординат отложить высоты (вверх от начала координат) и глубины (вниз от начала координат), а по оси абсцисс - площади, занятые определёнными высотами и глубинами. Ее анализ показывает, что 80% рельефа Земли приходится на пространство морского дна, невысоких равнин суши и шельфа, а также высоких выровненных поверхностей.

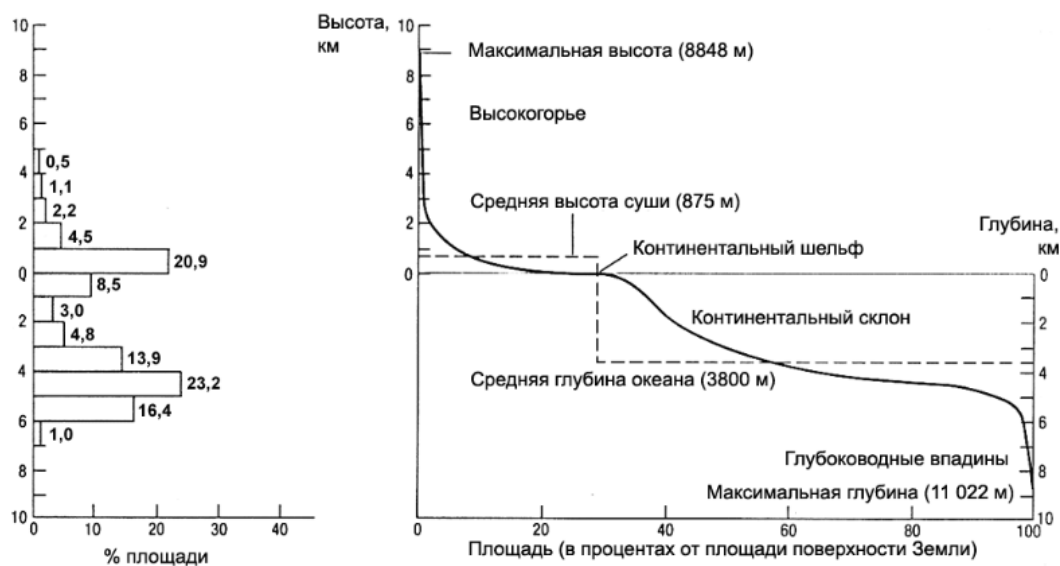


Рис. 15. Гипсографическая кривая земного шара (жирная линия) и обобщенный профиль дна океана (пунктирная линия).

## 3.2 Фотосинтез, первичная продукция и распределение биомассы

Способность окислять воду с выделением молекулярного кислорода за счет энергии поглощенного солнечного света - одно из важнейших эволюционных достижений живой природы на Земле [10]. Фотоокисление воды растениями привело к появлению в атмосфере значительных количеств молекулярного кислорода (21%), включение которого в окислительно-восстановительные метаболические реакции (например, дыхание) привело к аэробному метаболизму. Появление молекулярного кислорода в атмосфере привело к формированию озонового экрана, защищающего земную поверхность от жесткого ультрафиолетового излучения (озон  $O_3$  образуется результате фотодиссоциации кислорода  $O_2$ ).

Фотосинтез был открыт более 200 лет назад именно по способности растений выделять кислород при освещении. Прямые экспериментальные доказательства (полученные методом масс-спектрометрии) того, что кислород при фотосинтезе освобождается именно из воды, были получены в 1941 г. независимо в СССР и в США (А. П. Виноградов и Р. В. Тейс). Было показано, что отношение  $^{18}O/^{16}O$  в кислороде, выделяющемся при фотосинтезе, соответствует соотношению этих изотопов в воде, а не в диоксиде углерода. Фотосинтез — это окислительно-восстановительный процесс, в котором вода окисляется до  $O_2$ , а углекислый газ  $CO_2$  восстанавливается до углеводов  $C_6H_{12}O_6$ . Также установлено [11], что:

- а) варьирование изотопного состава кислорода, входящего в состав  $CO_2$ , не влияло на изотопный состав кислорода в синтезированной органике;
- б) состав кислорода в синтезированной органике можно произвольно изменять путем изменения доли изотопа  $^{18}O$  в молекуле воды.

**Первичная продукция** – величина, характеризующая прирост количества органического вещества, образованного за определенное время автотрофными организмами (зелёными растениями или цианобактериями) из простых неорганических компонентов. Поскольку источником углерода для

автотрофных организмов служит как правило углекислый газ  $\text{CO}_2$ , то первичную продукцию чаще всего оценивают в углеродных единицах (масса углерода С, связанного за определенное время наземной растительностью или фитопланктоном). В случае фитопланктона, характеризующегося высокой скоростью образования органического вещества в расчете на единицу биомассы, первичную продукцию оценивают для небольших промежутков времени, чаще всего для суток. Если же речь идет о наземной растительности, у которой скорость образования органического вещества в расчёте на единицу биомассы, существенно меньше, первичную продукцию оценивают за год, или за вегетационный сезон.

Различают “валовую первичную продукцию” (Gross Primary Production - GPP) и “чистую первичную продукцию” (Net Primary Production - NPP). Валовая продукция – это общее количество органического вещества GPP, образованного продуцентами, а чистая продукция NPP – это валовая продукция GPP за вычетом затрат продуцентов на дыхание ( $R$  – траты на дыхание):  $NPP = GPP - R$ . Реальный прирост массы продуцентов NPP – это чистая первичная продукция. Именно эта масса может использоваться консументами (т.е. потребителями) в трофической цепи.

Понятие первичной продукции применимо не только в отношении фотоавтотрофных организмов (т.е. использующих свет в качестве источника энергии), но и хемоавтотрофов (организмов, которые создают органическое вещество за счет энергии, которую они получают в окислительно-восстановительных реакциях с простыми веществами). К хемосинтезу способны только некоторые прокариоты и их роль в современной биосфере незначительна. Наиболее известный пример – это гидротермальные экосистемы, существующие на большой глубине на дне океана, где через трещины коры выходят горячие воды, богатые восстановленными соединениями.

Согласно усредненным данным центральные районы океана очень бедны фитопланктоном, в то время как районы высоких широт более

продуктивны. Для суши характерна иная ситуация: здесь наиболее продуктивны экосистемы тропических лесов.

Исходя из обобщенных данных [12], общая чистая первичная продукция всего океана составляет около 60 млрд тонн углерода в год, хотя разброс оценок, приведенных разными авторами, очень широк — от 35 до 100 млрд тонн. Для всей суши чистая первичная продукция за год оценивается подобной величине - 57 млрд тонн (при разбросе оценок разных авторов - от 48 до 65 млрд тонн). Таким образом, на единицу площади первичная продукция суши существенно выше, чем океана. Основные факторы, ограничивающие первичную продукцию суши - это недостаток влаги (пустыни в центральных частях континентов) и низкие температуры (в высокогорьях и высоких широтах). Принципиально разной для суши и океана оказывается продуктивность единицы биомассы. При примерно равной суммарной величине чистой первичной продукции, средняя биомасса самих продуцентов на суше составляет около 800 млрд т углерода, а в океане - только около 2 млрд т. Таким образом, скорость образования нового вещества в расчете на единицу биомассы в океане в сотни раз выше, чем на суше.

Исследование распределения биомассы на Земле является ключом к пониманию структуры и динамики биосферы. Однако глобальное количественное представление о том, как биомасса различных *таксонов* (группа в классификации, состоящая из дискретных объектов, объединяемых на основании общих свойств и признаков) соотносится друг с другом, все еще отсутствует. Оценка общей биомассы биосферы дает  $\approx 550$  гигатонн углерода (Гт С) биомассы, распределенной по всем царствам жизни (Рис. 16).

Установлено, что царства жизни концентрируются в разных местах на планете. Растения в основном – наземные ( $\approx 450$  Гт С, доминирующее царство), тогда как животные ( $\approx 2$  Гт С) – в основном морские, а бактерии ( $\approx 70$  Гт С) и археи ( $\approx 7$  Гт С) находятся преимущественно в глубоких подземных средах. Показано, что наземная биомасса примерно на два порядка выше, чем

морская, оценка которой в общей сложности  $\approx 6$  Гт С (вдвое выше, чем предыдущая оценочная величина).

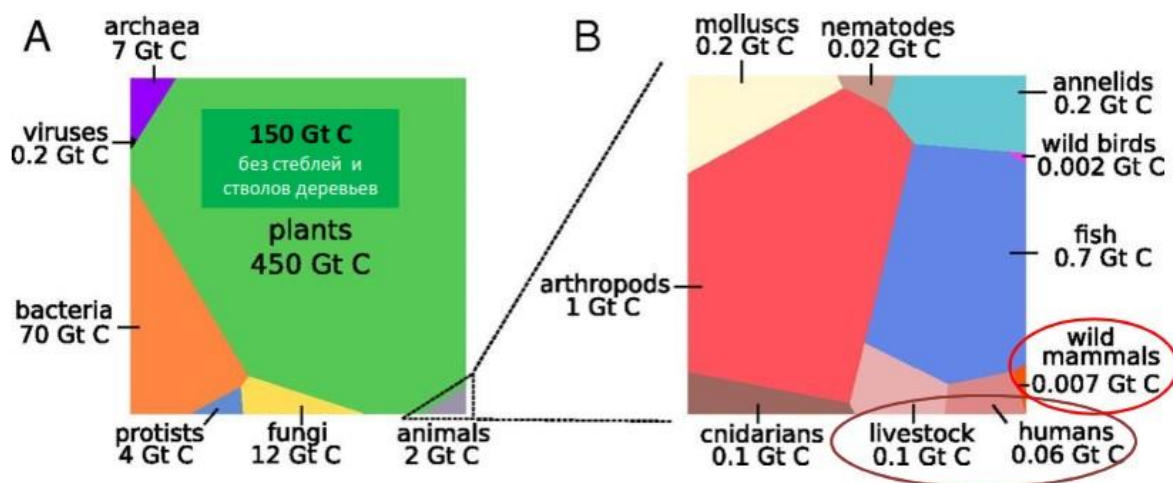


Рис. 16. Глобальное распределение биомассы (значения даны в гигатоннах углерода – Gt C).

Анализ показывает, что в глобальной морской пирамиде биомасса консументов (потребителей), больше, чем биомасса продуцентов. Необходимо при этом заметить, что биомасса людей на порядок выше, чем биомасса всех вместе взятых диких млекопитающих.

Распределение биомассы в разных средах и трофических режимах представляет собой следующее (Рис. 17).

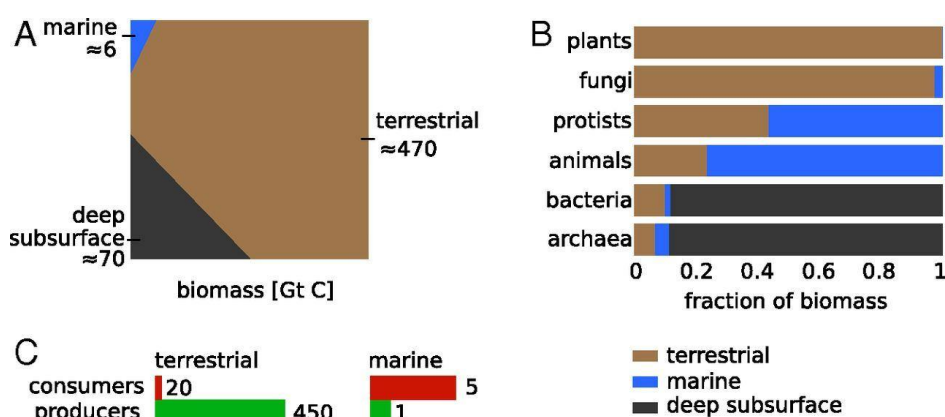


Рис. 17. Распределение биомассы в разных средах и трофических режимах [12].

Рисунок (А) представляет абсолютную биомассу с помощью диаграммы, где площадь каждой клетки пропорциональна глобальной биомассе в каждой среде. Глубокие недра определялись [13] как морской донный осадок и океаническая кора, а также наземный субстрат глубже 8 м, исключая почву.

На рисунке (В) представлена доля биомассы каждого царства, сконцентрированной в наземной, морской или глубоководной среде. Для грибов и простейших не оценивалась биомасса, присутствующая в глубоких недрах из-за нехватки данных.

И раздел (С) представляет распределение биомассы между производителями (автотрофы, в основном фотосинтетические) и потребителями (гетеротрофы без глубоких недр) в наземной и морской среде. Размер полос соответствует количеству биомассы каждого трофического режима.

### 3.3 Примеры “экстремальной жизни”

Необходимым условием существования жизни является наличие воды в жидком состоянии. На глубине 25 км в мантии Земли температура может достигать критического значения, когда вода не существует в жидком состоянии ни при каком давлении, а только в виде пара. Для жизни всех высших гетеротрофных организмов необходима биомасса, создаваемая с помощью фотосинтеза. Бактерии и археи могут использовать хемосинтез, при котором источником энергии для синтеза органических веществ из  $\text{CO}_2$  служат реакции окисления неорганических соединений. На больших глубинах, в тех местах, где расходятся континенты, из морского дна бьют горячие источники, например, т.н. «черные курильщики» (Рис. 18) [14].

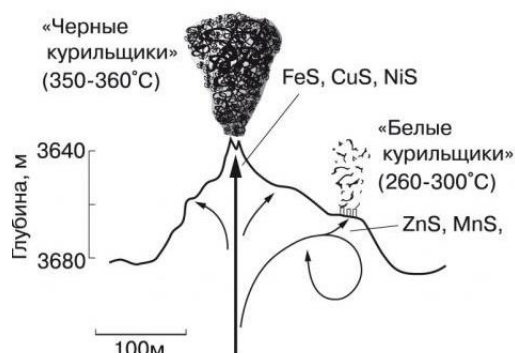


Рис. 18. Схематическое изображение горячих источников, т.н. «черных и белых курильщиков».

На данный момент найдено около 150 «черных курильщиков», самые известные из них расположены на участке Срединно-океанического хребта в северной части Атлантического океана. Морская вода проникает вглубь Земли через разломы и трещины в океанической коре, где нагревается теплом магмы, вступает в химическую реакцию с горными породами и затем вырывается к поверхности дна. Температура «дыма» достигает 350-400°C. «Дым» – взвесь соединений серы с железом, медью и цинком. Горячий раствор при контакте с холодной водой океана охлаждается и приводит к осаждению минералов; постепенно вокруг «дымящего» источника наращиваются твердые минеральные стенки.

Известны также *белые и серые курильщики*. Они отличаются химическим составом и температурой «дыма»: самые холодные - белые курильщики (их температура составляет 100-200°C), температура серых достигает 250-300°C. В воде этих источников растворены минеральные вещества, в том числе сероводород  $H_2S$ . В местах, где такая вода приходит в соприкосновение с холодной морской водой, содержащей кислород, могут расти бактерии, окисляющие сероводород или серу. Бактерии служат пищей для моллюсков, ракообразных, червей.

Рассмотрим некоторые примеры живых организмов, использующих хемосинтез для создания необходимой биомассы. Одним из них являются *археи*. Они характеризуются отсутствием ядра, их ДНК представляет собой кольцевую молекулу. У большинства архей метаболизм происходит без участия кислорода (т.н. анаэробные археи). Являются экстремофилами: например, гипертермофилы обнаружены в горячих источниках Йеллоустонского национального парка, а также близ глубоководных термальных «черных курильщиков» с температурой  $> 100$  °C; другие живут в холодной, соленой воде (например, Мертвое море) или кислотной среде, а также в пресноводных озерах под антарктическим льдом. В том числе они были обнаружены в самых различных местах, включая почву, океаны, болота.

Археи, по-видимому, не способны к паразитизму, однако часто они бывают симбиотами и комменсалами. Комменсализм – способ совместного существования двух разных видов живых организмов, при котором один из партнёров этой системы возлагает на другого регуляцию своих отношений с внешней средой, но не вступает с ним в тесные взаимоотношения. Некоторые представители являются метаногенами (т.е. образуют метан в процессе метаболизма) и обитают в пищеварительном тракте человека и жвачных, где очень многочисленны и помогают осуществлять пищеварение.

Еще одним примером может послужить один из представителей погонофор - группы морских беспозвоночных животных, обитающих в хитиновых трубках. Это *Рифтия* (*Riftia pachyptila*) прекрасно приспособилась к существованию в таких местах. У этого животного нет ни ротового, ни анального отверстия, зато оно обладает особым органом (трофосомой), в котором в качестве эндосимбионтов (микроорганизм, живущий внутри другого организма (хозяина) и приносящий ему пользу) растут бактерии, окисляющие сероводород. Из хитиновых трубок торчат красные жаберные лепестки, через которые в кровь проникают и сероводород, и углекислый газ. Таким образом, на больших морских глубинах, куда не проникает свет, в непосредственной близости от горячих источников существует экосистема, в которой продукция биомассы основана не на фотосинтезе, а на хемосинтезе.

В Марианской впадине на глубине свыше 10,5 километров обитают гигантские амебы – *ксенофиофоры* (*Xenophyophore*), размер которых превышает 10 см (до 20 см). Ксенофиофоры перерабатывают отложения на дне, покрытом илистыми отложениями, обеспечивая тем самым среду обитания для других организмов. Исследования показали, что в местах с большим количеством ксенофиофор обитает в 3–4 раза больше ракообразных, иглокожих и моллюсков, чем в областях, где нет этих одноклеточных. Эти амебы могут накапливать в своей клетке свинец, уран и ртуть. Они хорошо приспособлены к жизни в условиях темноты, низкой температуры и высокого давления на больших глубинах. Ксенофиофоры не являются единственными

организмами, обнаруженными на предельных глубинах. Камера зафиксировала также сверхглубоководных медуз.

В декабре 2014 года в Марианской впадине на глубине 8143 м была снята на видео *самая глубоководная рыба* в мире. Рекордсменка принадлежит к новой ранее неизвестной разновидности морских слизней (лат. Liparidae). Внешне новый вид сильно отличается от других морских слизней. В отличие от привычных глубоководных монстров с жуткими зубами в несколько рядов и замысловатыми формами, этот вид почти прозрачного белого цвета, с плавниками и заостренным, сужающимся к концу, хвостом. Рыба имеет 15 см в длину, по обоим бокам головы расположены короткие и широкие веерообразные плавники. Они предназначены не только для плавания, но и для поиска еды. На них, как предполагают учёные, расположены вкусовые рецепторы, которые пробуют на вкус донный ил и определяют наличие в нем живности. Обнаружив добычу, морской слизень ввинчивается в ил и съедает её. Присутствие морского слизня подтолкнуло исследователей к мысли, что глубины Марианской впадины населены гораздо гуще, чем считалось ранее. Большинство экспедиций исследуют бездну Челленджера, самую глубокую точку Марианской впадины. Ландшафт там плоский и безжизненный. В этот раз экспедиция решила исследовать края бездны, и обнаружила там весьма оживлённую жизнедеятельность. Анализ ДНК и 3D-сканирование структур скелета и тканей подтвердили, что действительно найден новый вид рыб. За 3 года ученым удалось собрать еще 37 образцов на глубине от 5900 до 8000 м. К слову, недавно обнаруженная рыба является самой глубоководной из когда-либо пойманных.

Семейство морских слизней предпочитает селиться в нижних слоях океанических вод. Ими населены практически все глубоководные впадины, причем в Японской и желобе Кермадек есть свои эндемические виды этой рыбы. Глубина их обитания 5900-7.500 м. Тем не менее, морские биологи предполагают, что есть глубина, ниже которой рыба жить не может. Причина в том, что глубже 8200 м тело рыбы прекращает вырабатывать вещество

осмолит, которое обеспечивает клеткам защиту от огромного давления воды. Чем глубже живет рыба, тем больше концентрация осмолита в её теле. Но организм рыбы теоретически не может вырабатывать столько этого вещества, чтобы жить ниже отметки 8200 м. Глубже давление просто раздавит ее на клеточном уровне. Новый вид морского слизня живет как раз на этой границе.

Последний пример экстремофилов – *щелочная тилапия* (*Alcolaria alcalica*). В длину она достигает 11,6 см. Встречаются они при температуре в интервале 30-32 °С; питаются в основном водорослями, а также рачками и личинками двукрылых. Средой их обитания является Озеро Натрон (Lake Natron) на севере Танзании: его температура достигает 60°С, а щелочной показатель находится в интервале рН 9-10,5. Озеро получило свое название по натриту (или декагидрат карбоната натрия)  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . В озеро натрит попадает с вулканической пылью из Восточно-Африканской рифтовой долины (Dangerously Saline Red Lake Natron in Tanzania). Цвет вод варьируется от оранжевого до красного и розового в результате жизнедеятельности бактерий и других микроорганизмов. Удивительно, но это озеро является местом обитания для фламинго, которые гнездятся здесь и питаются красными водорослями, несмотря на щелочную воду. Это безопасное место для размножения этих птиц, поскольку эту недружественную местность не посещают хищники.

Кроме того, существуют виды, которые прекрасно способны жить вблизи озера Натрон, не сталкиваясь с неизбежной гибелью - в частности, существуют экстремофильные рыбы, бактерии и особый тип водорослей, который процветает в богатых щелочью водах. Озеро также является одним из самых больших мест гнездования малых фламинго Северной Африки.

### **3.4 Контрольные вопросы к Главе 3:**

- 1) Какова высота верхней границы биосферы?
- 2) Что такое гипсографическая кривая земного шара?
- 3) Определите понятия GPP, NPP, R.

4) В чем состоит главное отличие "черных, серых и белых курильщиков"?

5) Приведите примеры видов «экстремальной» жизни с указанием условий обитания.

## **ГЛАВА 4. Эволюция атмосферного кислорода, образование “озонового щита”**

### **4.1 Временная последовательность главных событий истории жизни на Земле**

Как Вы уже знаете, в земной коре содержится  $10^{19}$  тонн =  $10^{10}$  Гигатонн (Гт)  $O_2$ , а это значит, что ~ 47% массы земной коры составляет связанный кислород. В свою очередь в современной атмосфере содержится ~ 106 Гт (Гигатонн)  $O_2$ , т.е. ~ 21% от объема атмосферы - свободный кислород. В современной биосфере практически весь кислород, образовавшийся в результате фотосинтеза наземной растительности и океанического фитопланктона, расходуется на дыхание бактерий, грибов, животных, разлагающих органическое вещество (т.е. имеет место практически замкнутый круговорот). Однако для того, чтобы кислород начал накапливаться в атмосфере, часть синтезированной органики должна выводиться из круговорота, а именно захораниваться в осадочных породах.

В истории атмосферного кислорода имеют значение несколько его пороговых величин. На Земле, лишенной фотосинтеза, кислород образуется в атмосфере за счет фотодиссоциации молекул воды. Его содержание, по расчетам Г. Юри, не может превышать 0,1 % от современного (точка Юри) и автоматически держится на этом уровне [15]. При таком содержании кислорода может существовать только анаэробная жизнь. Появление молекулярного кислорода за счет фотосинтеза сделало возможным для живых клеток процесс дыхания, который представляет намного более эффективный путь высвобождения энергии, чем анаэробное брожение.

С точки зрения важна величина 1 % содержания кислорода от современного уровня – это так называемая точка Пастера. Существует целый ряд микроорганизмов, способных переключать свой энергетический обмен с дыхания на брожение и обратно при колебаниях кислорода ниже или выше точки Пастера. Есть предположения, что в раннем и среднем протерозое подобное переключение долгое время служило регулятором содержания  $O_2$ , так как при повышении его концентрации кислород начинал интенсивно расходоваться на дыхание. Вместе с тем жизнь получила возможность распространиться почти до поверхности водоемов, так как ультрафиолетовые лучи за счет слабого озонового экрана могли теперь проникать на глубины не более метра.

Третье пороговое содержание  $O_2$  (точка Беркнера-Маршалла) соответствует 10 % от современного. Оно определяет такую сформированность озонового экрана, при которой потоки жестких ультрафиолетовых солнечных лучей уже не достигают земной поверхности и не препятствуют развитию жизни.

По расчетам 60-х годов, точка Пастера была перейдена менее 1 млрд лет назад, а точка Беркнера-Маршалла – к концу третьего периода Палеозойской эры (~ 420 млн. лет назад), что обеспечило возможность выхода жизни на сушу. Современные исследования заставляют предполагать более раннее развитие событий. По некоторым данным, переход точки Пастера мог произойти уже 2,5 млрд. лет назад, а 10-процентное содержание кислорода было достигнуто уже в период 1,8–2,0 млрд. лет от современности.

Таким образом, на протяжении более двух миллиардов лет биосфера формировалась исключительно деятельностью прокариотов (безъядерные живые одноклеточные организмы), а именно цианобактерий. Они полностью изменили геохимическую обстановку на Земле: сформировали кислородную атмосферу, очистили ее от токсических вулканических газов, связали и перевели в карбонатные породы огромное количество  $CO_2$ , изменили солевой

состав океана и сформировали громадные месторождения железных руд, фосфоритов и других ископаемых.

Первоначально существовала простая модель двухступенчатой эволюции атмосферы (Рис. 19, а) [15]. Заключалась она в следующем. В архее появились фотосинтетики, которые выделяли кислород (кислородный фотосинтез). За счет их деятельности океан и атмосфера локально обогащались кислородом, однако доминирующими оставались анаэробные процессы. На границе архея и протерозоя (это ~ 2,4–2,3 млрд. лет назад) происходит выброс кислорода в атмосферу, вследствие чего уровень кислорода быстро (в геологическом масштабе) устанавливается примерно на уровне 1% от современного (PAL — Present Atmosphere Level) и уже не изменяется на протяжении всего протерозоя.

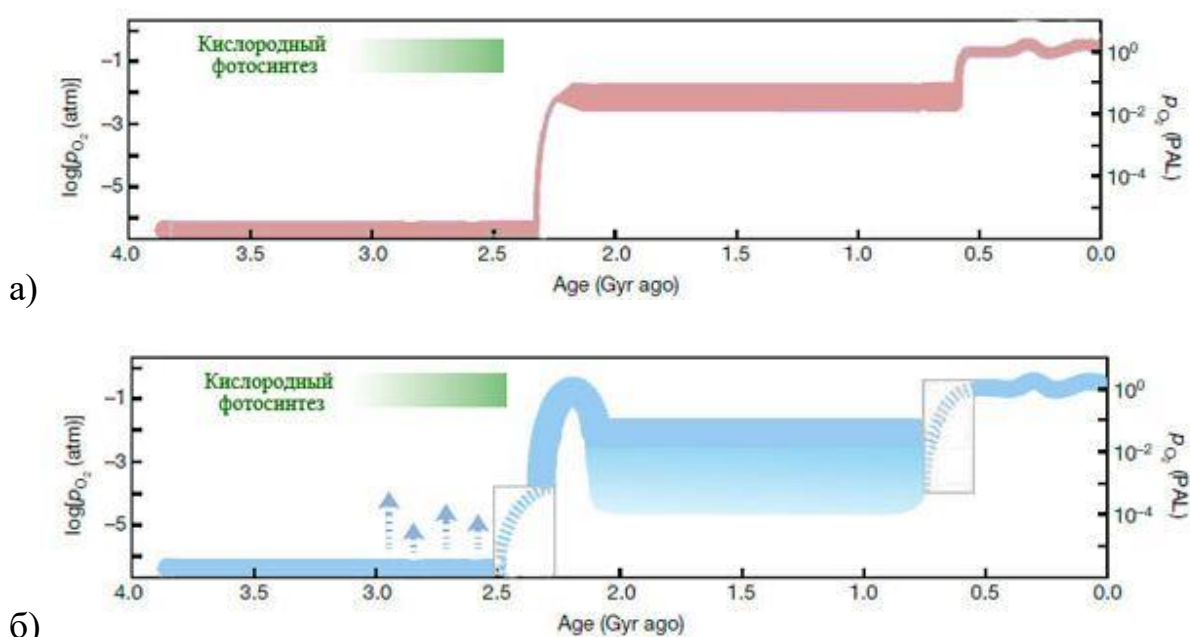


Рис. 19. Изменение содержания кислорода в атмосфере Земли с течением времени а) первоначальная модель, б) современная.

Затем начинается процесс окисления металлов в земной коре (в основном речь идет о железе) и таким образом свободный кислород уходит из атмосферы. Далее, уже в позднем протерозое (~ 800–600 млн. лет назад) уровень кислорода повышается снова, поскольку все железо к этому времени уже окислилось. И повышение уровня кислорода дает толчок развитию уже многоклеточной жизни.

Однако более поздние исследования показали несовершенство существующей модели (Рис. 19, б). Например, организмы-фотосинтетики существовали с самых ранних архейских времен, т.е. кислородный фотосинтез присутствовал. Это значит свободный кислород – “побочная продукция” их метаболизма – мог накапливаться локально (голубые стрелки на схеме), однако масштаб раннего фотосинтеза пока оценить не удастся. Весь этот кислород уходил как на окисление синтезированной органики, так и других объектов, в частности, вулканических газов. Изменения в характере вулканизма на планете начались еще в позднем архее и были связаны с формированием и стабилизацией континентальных плит. В результате этих геологических процессов баланс поступления кислорода и его изъятия резко нарушился: в атмосферу стал поступать свободный кислород. Стоит понимать, что эти взаимосвязанные процессы заняли значительное время, а не случились в конце архея одномоментно.

Таким образом, в течение протерозоя уровень кислорода в атмосфере и океане менялся, временами на порядок, но в среднем оставался низким. Глубокие слои океана оставались бескислородными. И только лишь в конце протерозоя произошло насыщение океана кислородом. Однако причина этого, второго кислородного скачка до сих пор остается загадкой.

## 4.2 Озоновый слой

К числу наиболее важных характеристик атмосферы Земли, имеющих существенное значение, относится наличие в ней озонового слоя, который резко (примерно в 6500 раз) ослабляет часть (с длиной волны  $\lambda < 320$  нм) ультрафиолетового спектра ( $10 < \lambda < 400$  нм) электромагнитного излучения Солнца, крайне опасную для всего живого на Земле.

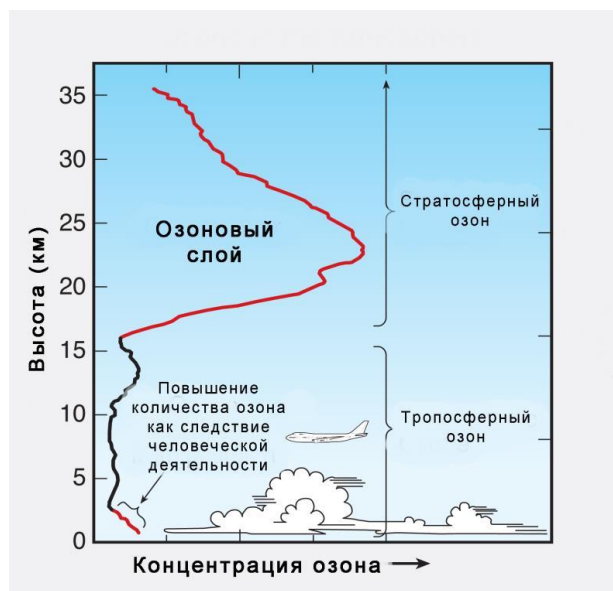


Рис. 20. Распределение озонового слоя по высоте.

**Атмосферный озон** образует сферический слой толщиной около 90 км над поверхностью Земли (Рис. 20), причем озон в нем распределен неравномерно. Больше всего этого газа сосредоточено на высоте 26-27 км в тропиках, на высоте 20-21 км – в средних широтах и на высоте 15-17 км – в полярных областях.

Озона в современной атмосфере не более одной трехмиллионной от остальных газов, однако, повторюсь, его роль чрезвычайно велика: он задерживает жесткое ультрафиолетовое излучение (коротковолновую часть солнечного спектра), разрушающее белки и нуклеиновые кислоты. До появления свободного кислорода и озонового слоя в атмосфере жизнь могла существовать только в воде.

Все дело в молекулярных механизмах биологического действия УФ-излучения. А именно происходит изменение структуры и функции ДНК, фотоинактивация белков и повреждение биомембран, возможно также увеличение скорости мутагенеза. Нуклеиновые кислоты и белки непосредственно поглощают фотоны УФ-излучения, поскольку пик поглощения для нуклеиновых кислот составляет ~ 260 нм, а для белков ~ 280 нм.

Наряду с этим под действием жесткого УФ-излучения в живой клетке образуются свободные радикалы (т.е. положительно заряженные ионы, на

внешней электронной оболочке которых имеется неспаренный одиночный электрон, обладающие очень высокой химической активностью). Свободные радикалы активно разрушают молекулы белков и нуклеиновых кислот. И, наконец, в нижних слоях тропосферы озон является опасным загрязнителем; его максимальная концентрация в тропосфере приходится на высоту  $\sim 1$  км. Озон является одним из компонентов смога (фотохимически индуцированного тумана, smog = smoke + fog), образующегося под действием УФ-излучения в сложных цепных реакциях с участием оксидов азота и свободных радикалов типа  $\text{NO}_x$  ( $x = 0, 1, 2$ ). Смог образуется только в результате выбросов загрязняющих веществ транспортом и промышленными установками. Например, выхлоп автомобилей содержит летучие органические соединения, которые, вступая в реакцию с  $\text{NO}_2$ , под действием УФ-излучения и дают озон.

Различают ближнее ультрафиолетовое излучение (УФ) ( $c 200 < \lambda < 400$  нм) и дальнее, или вакуумное ( $c 10 < \lambda < 200$  нм). По биологическому эффекту в диапазоне ближнего УФ выделяют три области:

- УФ-А с  $320 \text{ нм} < \lambda < 400 \text{ нм}$ ;
- УФ-В с  $290 \text{ нм} < \lambda < 320 \text{ нм}$ ;
- УФ-С с  $200 \text{ нм} < \lambda < 290 \text{ нм}$ .

Область УФ-А примыкает к «фиолетовому концу» области видимого света, имеет незначительный отрицательный эффект, но положительно воздействует на все живое. Под его действием в кожном покрове вырабатывается витамин D, играющий ключевую роль в кальциевом обмене организма человека. Загар и пигментация кожи также связаны с излучением этого диапазона.

Область УФ-В при малых дозах облучения также способствует загару, активизирует обмен веществ, улучшает общее состояние человека; однако при больших дозах (особенно при пиках  $\lambda = 297, 240\text{-}260$  нм) вызывает тяжелые последствия – солнечные ожоги и ряд иных расстройств вплоть до фотоканцерогенеза – возникновения злокачественных новообразований в коже (меланомы и саркомы).

Излучение области УФ-С особенно вредно для живых организмов. Оно активно воздействует на нуклеиновые кислоты и белки, умерщвляет живые клетки, обладает выраженным бактерицидным действием.

В спектре солнечного света, достигающего поверхности Земли, наряду с видимым светом и инфракрасным излучением присутствует только УФ-А и сильно ослабленное УФ-В (Рис. 21). Излучение в диапазоне УФ-В задерживается озоном, в диапазоне УФ-С – кислородом, а в диапазоне дальнего УФ – и иными газами. Происходит это следующим образом.

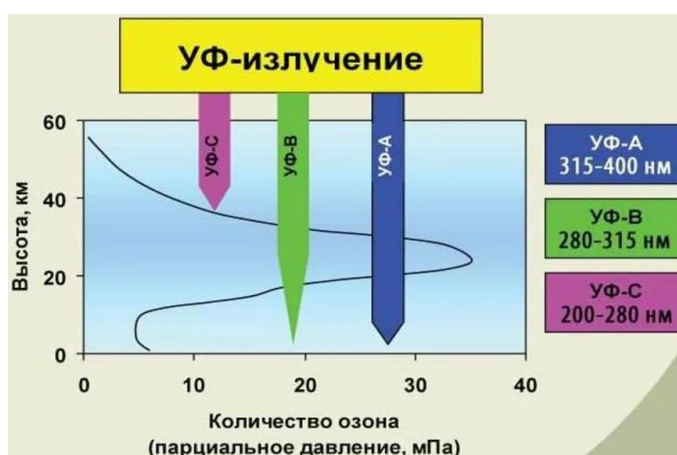


Рис. 21. Прохождение УФ-излучения через озоновый слой.

Стратосферный озон формируется под воздействием солнечного ультрафиолетового излучения из молекул кислорода, которые составляют 21% атмосферы. Сначала под воздействием солнечных лучей молекула кислорода ( $O_2$ ) распадается на два атома кислорода:  $O_2 + h\nu \rightarrow O + O$  ( $\lambda \leq 242$  нм). Затем каждый атом объединяется с молекулой кислорода, образуя молекулу озона ( $O_3$ ):  $O + O_2 \rightarrow O_3$ . Под воздействием солнечного излучения молекула озона также может распадаться на атом и молекулу кислорода, а также на две молекулы кислорода при взаимодействии с атомом кислорода:  $O_3 + h\nu \rightarrow O + O_2$  ( $\lambda \leq 380$  нм) и  $O + O_3 \rightarrow O_2 + O_2$ . Эти две реакции происходят непрерывно. В результате, больше всего озона образуется в стратосфере тропического пояса, так как уровень солнечного излучения там выше, чем в тропосфере и на других широтах. Образование стратосферного озона и его разрушение во время этих реакций уравнивают друг друга. Некоторое количество стратосферного озона переносится в тропосферу и увеличивает содержание

озона у поверхности земли, особенно в труднодоступных и незагрязненных уголках земного шара.

У поверхности земли озон образуется за счет химических реакций с участием природных веществ и веществ из промышленных источников. При образовании озона в химических реакциях участвуют, прежде всего, углеводород и оксиды азота с участием солнечного излучения. Сжигание топлива – основной источник загрязнения при образовании тропосферного озона. Наземное образование озона не влияет значительно на количество стратосферного озона. Концентрация приземного озона настолько низка, что перемещение озона с поверхности земли к стратосфере незначительно. Как и в стратосфере, в тропосфере озон разрушается в результате естественных химических реакций и реакций, вызванных химическими веществами, произведенными человеком. Кроме того, разрушение тропосферного озона происходит за счет реакций с почвами и растениями.

Содержание озона в стратосфере и тропосфере определяется равновесием между химическими процессами, которые образуют или разрушают озон. Баланс определяется количеством веществ, вступающих в реакцию и тем, как скорость или эффективность различных реакций изменяется в зависимости от интенсивности солнечного излучения, времени нахождения в атмосфере, температуры и других факторов. С изменением в определенном месте атмосферных условий, способствующих озonoобразующим реакциям, содержание озона увеличивается. Если же изменяющиеся условия вызывают реакции, разрушающие озон, его содержание уменьшается. Равновесие между реакциями образования и разрушения, в соединении с атмосферным движением воздуха, определяет общее распределение озона по сезонам.

Кроме приведенных выше реакций образования и разрушения озона, в стратосфере озон вступает в реакцию с множеством природных и созданных человеком химических веществ. Во время каждой реакции молекула озона разрушается и образуется другое химическое соединение. В основном

разрушают озон химически активные вещества, содержащие хлор и бром. Это активные вещества, образованные при химических превращениях галогеносодержащих веществ. Самыми активными из этих веществ являются оксид хлора (ClO) и оксид брома (BrO), а также атомы хлора и брома (Cl и Br). Эти вещества участвуют в трех основных реакционных циклах, разрушающих озон: ClO + O и Cl + O<sub>3</sub>. Конечный результат состоит в превращении молекулы озона и атома кислорода в две молекулы кислорода. В каждом цикле хлор выступает в качестве катализатора, так как ClO и Cl восстанавливаются после реакции, т.е. один атом хлора участвует во многих циклах, разрушающих молекулы озона. В обычных стратосферных условиях на средних и малых широтах, один атом хлора может разрушить сотни молекул озона до того, как произойдет реакция с другим веществом, прерывающая описанный каталитический цикл.

Солнечное излучение необходимо для завершения и поддержания всех циклов разрушения озона. В данном случае оно необходимо потому, что атом кислорода образуется только под воздействием ультрафиолетового солнечного излучения. Данные реакции очень важны в стратосфере тропических и средних широт, где солнечное излучение наиболее интенсивно.

Содержание атмосферного озона регулируется множеством реакций, как образующих, так и разрушающих озон. Каталитические реакции с атомами хлора и брома – лишь одна группа озоноразрушающих реакций. Активные соединения водорода и азота, например, вовлечены в другие каталитические озоноразрушающие реакции, также происходящие в стратосфере. Эти реакции происходят естественно в стратосфере, но влияют не так сильно, как реакции с галогенами.

### **4.3 Контрольные вопросы к Главе 4:**

1) Поясните чем примечательны так называемые точки Юри, Пастера и Беркнера-Маршала.

2) В чем состоит главное отличие современной теории изменения содержания кислорода в атмосфере Земли с течением времени?

3) На какие диапазоны длины волны делится ближний УФ по действию на живые организмы? Каково это действие?

4) Какие реакции входят в механизмы образования и разрушения озона в атмосфере?

## **ГЛАВА 5. Климат на Земле. Система «Солнце-Земля-космос».**

### **5.1. История климата**

Понятие климата включает средние значения метеорологических параметров за определённый промежуток времени (~ 30 лет), относящиеся к определённому географическому региону, а также типичные пределы изменчивости этих параметров. На климат Земли влияет большое количество факторов, вот, например, самые фундаментальные из них:

- тектоника и вулканическая деятельность;
- планетарная отражающая способность;
- газовый состав атмосферы;
- планетарные параметры Земли;
- океанические течения;
- влияние солнечной активности на климат;
- перемена положения полюсов магнитного поля Земли.

Научными исследованиями доказано, что на протяжении геологической истории климат Земли был подвержен неоднократным изменениям, о чем свидетельствуют многочисленные данные геологии, геохимии, археологии, палеонтологии и климатологии. В силу того, что в процессе эволюции планеты менялись многие ее параметры, неизбежно происходили изменения теплооборота, влагооборота и атмосферной циркуляции, а также географических факторов климата. При этом в космических масштабах климатические условия на Земле можно считать стабильными.

С момента своего возникновения океан на Земле существовал всегда, он ни разу не испарился полностью, так же как ни разу не превратился целиком в лед, что подтверждают все найденные до сих пор геологические отложения. Уже это позволяет сделать вывод о том, что температура на нашей планете никогда не была ниже точки замерзания воды и выше точки ее кипения. В реальности же этот диапазон температуры был значительно уже, что подтверждают следы жизнедеятельности организмов в самых древних найденных породах. Это была не просто жизнедеятельность, а непрерывное поступательное развитие, т.е. существование жизни в благоприятных условиях. Поэтому средняя температура на поверхности Земли должна была быть значительно ниже 100 °С, так как при длительном сохранении высокой температуры, порядка, например, 50 °С, произошла бы пастеризация – большая часть организмов была бы уничтожена при длительном воздействии тепла. В то же время расчеты показывают, что при средней температуре у поверхности Земли 5 °С и ниже весьма вероятно быстрое распространение ледников на больших пространствах планеты. Таким образом, учитывая тот факт, что ледники сами создают благоприятные условия для своего развития, при столь низкой температуре на поверхности, планета могла бы оледенеть полностью, а это было бы необратимым изменением.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод об узости диапазона колебаний температуры у поверхности Земли, особенно в сравнении с тем диапазоном температуры, который встречается на самой Земле, в ближайшем космосе и в Солнечной системе. Например, температура от поверхности к ядру быстро возрастает, достигая нескольких тысяч градусов, температура в ближнем космосе приближается к абсолютному нулю, составляя около –270 °С. Температура поверхности Солнца равна 6000 °С, а в его недрах она достигает миллионов градусов. Поэтому колебания температуры на поверхности Земли в сравнении с приведенными были ничтожными за миллиарды лет ее существования, и, следовательно, климат планеты при взгляде на нее извне надо признать исключительно стабильным. При этом

стабильность колебаний в очень узком диапазоне сохранялась на протяжении огромного отрезка времени, практически в течение всей жизни планеты.

Однако с точки зрения существования биосферы и, в первую очередь, человека, приходится говорить не только о больших, но и о грандиозных изменениях климата, которые сопровождались сильным изменением Земли. Вся история климата показывает, что климатическая система настолько мобильна в геологических масштабах времени, что она не раз меняла свою структуру при изменении средней температуры на поверхности в пределах  $5 \div 10$  °С. При этом, всегда изменялись биологические системы, но в целом шло поступательное развитие биосферы, т.е. климат при всех своих изменениях не был препятствием для поступательного развития биосферы, а возможно, что определенные климатические эпизоды даже ускоряли эволюцию на Земле.

## **5.2. Климатические переменные-заменители в палеоклиматологии**

Надежная регистрация климатических параметров началась с 1860-х гг., поэтому для более раннего прошлого используют данные, получаемые косвенно с помощью климатических переменных-заменителей (climate proxies). Климатические переменные-заменители, применяемые в палеоклиматологии, отражают физические характеристики климата прошлого. Список объектов, из которых могут быть получены климатические переменные-заменители, включает в себя ледовые колонки (керны), керны донных осадков из океанов и озер, древесные кольца, зерна ископаемой пыльцы, материалы из буровых скважин, кораллы, известковые спелеообразования сталактитов и сталагмитов и др. Количественно климатические изменения можно восстановить, например, с помощью соотношения стабильных изотопов водорода и кислорода, содержащихся в ледовых кернах и донных отложениях. Газовый состав пузырьков в ледяных кернах сохраняет образцы древней атмосферы Земли и может быть исследован непосредственно. Для получения наиболее надежных результатов используют

систематические кросспроверки данных, полученных с помощью различных методов. Стоит отметить, что основной массив палеоданных относится к Северному полушарию.

### **5.3. Определение возраста льда в ледяных кернах и получение сведений о палеотемпературах**

Природная вода представляет собой многокомпонентную смесь изотопологов – молекул, различающиеся только по изотопному составу атомов, из которых они состоят. Обычная вода на 99,7 мол. % состоит из «легкой» воды  $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ , оставшиеся 0,3 мол. % представлены изотопными разновидностями молекул воды (изотопологами):  $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$  – 0,2%;  $^1\text{HD}^{16}\text{O}$  <0,01%, где D – дейтерий. Давление паров различных по изотопному составу молекул обратно пропорционально массе молекул. Это значит, что пар обогащается легкими  $^{16}\text{O}$  и H, а остаточная вода - тяжелыми  $^{18}\text{O}$  и D. Таким образом, когда вода испаряется из океана, она в основном состоит из более легких изотопов, и если испаренная вода никогда не вернется в океан (из-за её замерзания в ледниках) то соотношение изотопов будет постоянно изменяться, пока ледники не растают. Это было подтверждено лабораторными экспериментами и исследованием полярного льда; который имеет более высокое соотношение более легких изотопов.

Исследование ледяных кернов из ледовых щитов Гренландии и Антарктиды началось еще с 1950-х гг. В верхней части ледяной толщи, отложившейся за последние несколько тысяч лет, определяют абсолютный возраст льда, подсчитывая годовые слои, каждый из которых состоит из зимних и летних отложений, различающихся по структуре, плотности и запыленности. Также возраст льда помогают определить и маркирующие горизонты, хранящие следы глобальных событий, таких как: крупные вулканические извержения, ядерные взрывы в атмосфере (последний такой слой во льдах Арктики образовался в результате Чернобыльской аварии). Для датирования более древнего льда приходится использовать численное моделирование его растекания. Исходными данными при расчетах служат

скорость накопления снега, температура и вязкость льда, скорость его движения и рельеф ложа.

Другие способы датировки с помощью ледяных кернов включают геохимию, исследование слоев вулканического пепла, электропроводность, также используют численные модели. Например, существует возможность определения палеотемператур воздуха по ледовым кернам. Как вы уже знаете, снег над Антарктидой состоит в основном из молекул  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  (99,7%), а также молекул, содержащих гораздо более редкие стабильные изотопы водорода и кислорода:  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  (0,2%) и  $\text{HD}^{16}\text{O}$  (0,01%). Изотопный состав отложенного снега зависит от температуры его формирования. В первую очередь при снижении температуры конденсируется вода  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  (содержащая тяжелый изотоп  $^{18}\text{O}$ ), в то время как для активной конденсации молекул  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  с более легким изотопом кислорода требуются еще более холодные условия. Например, в Восточной Антарктиде понижение относительного содержания изотопа  $^{16}\text{O}$ , а именно отклонение от концентрации в стандартной «средней» морской воде на 1 ‰ (промилле) соответствует похолоданию на 1,5 °C, а уменьшение содержания D на 6 ‰ понижению температуры на 1 °C.

Выпавший снег накапливается на поверхности, спрессовывается и постепенно превращается в лед. Измерения содержания стабильных изотопов в образцах льда проводятся с помощью масспектрометра с разрешением 0,1 ‰.

Рассчитывается величина  $\delta[\text{‰}] = (R_{\text{обр}}/R_{\text{ст}} - 1) \times 1000$ , где  $R_{\text{обр}}$  – отношение изотопов в исследуемом образце, а  $R_{\text{ст}}$  – их отношение в некотором стандарте. Например, стандарт VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) определяет изотопный состав глубинной воды Мирового океана, а стандарт SLAP (Standard Light Antarctic Precipitation) определяет изотопный состав природной воды из Антарктики.

Для кислорода  $^{18}\text{O}$  эмпирическое уравнение связи между среднегодовыми температурами у поверхности ( $t$ ) и величиной  $\delta$  имеет следующий вид:  $\delta^{18}\text{O} = 0.7t - 13.6$  [‰] (Рис. 22). Величины  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в

промилле – это содержание тяжелых изотопов водорода и кислорода во льду из ледников относительно  $^{16}\text{O}$  (стоит отметить, что значения этих величин отрицательные). Именно величины  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  используются для оценки палеоклиматических температур поверхности земли в высоких и средних широтах.

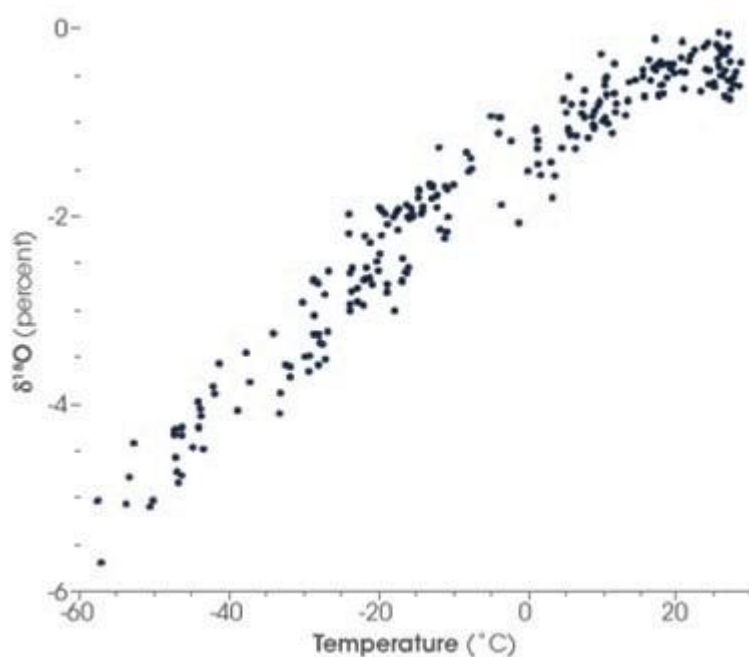


Рис. 22 Связь доли изотопа кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  в годовых осадках со средней годовой температурой

Наиболее холодные участки в таких местах, как Антарктида и Гренландия, обеднены тяжелым  $^{18}\text{O}$ , в сравнении с водой океана. Изменение содержания тяжелых изотопов по сравнению с наиболее распространенными изотопами, собственно, отражают изменения температуры. Годовой цикл в  $\delta^{18}\text{O}$  связан с локальными или региональными изменениями температуры и является очень надежным индикатором сезонного температурного цикла. На Рис. 23 показано, как относительное содержание изотопов кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  коррелирует с локальной температурой в течение нескольких лет в начале 1990-х годов.

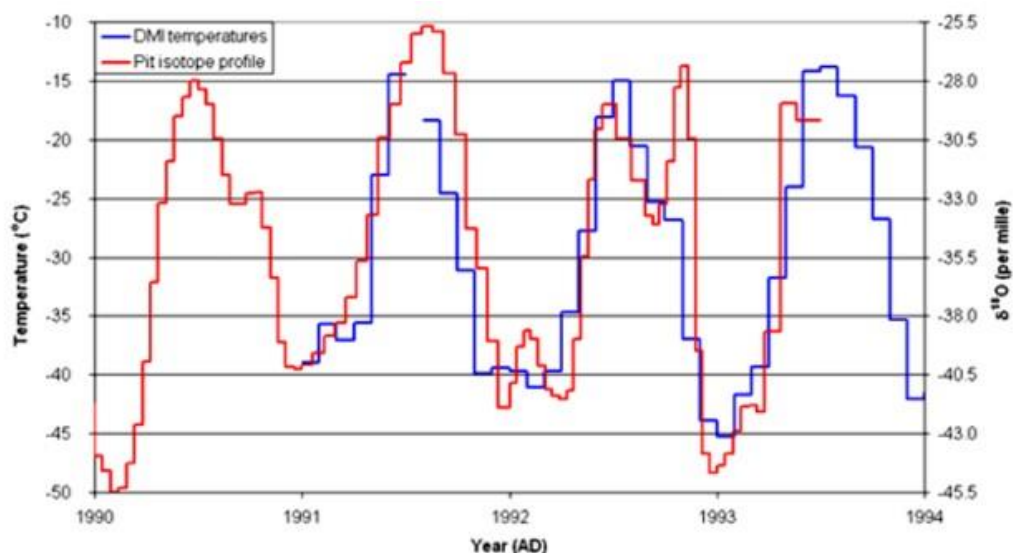


Рис. 23 Корреляция относительного содержания изотопов кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  с локальной температурой

#### 5.4. Исследование антарктических ледяных кернов

В этом разделе представлены сведения об исследовании двух образцов арктических кернов. На Рис. 24 представлен ледовый керн GISP2 (Greenland Ice Sheet Project 2) длиной 19 см, полученный с глубины 1855 метров. Изображение получено US National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA. На рисунке четко различаются годовые слои (летние слои указаны стрелками).

#### Годовые слои в ледовом керне

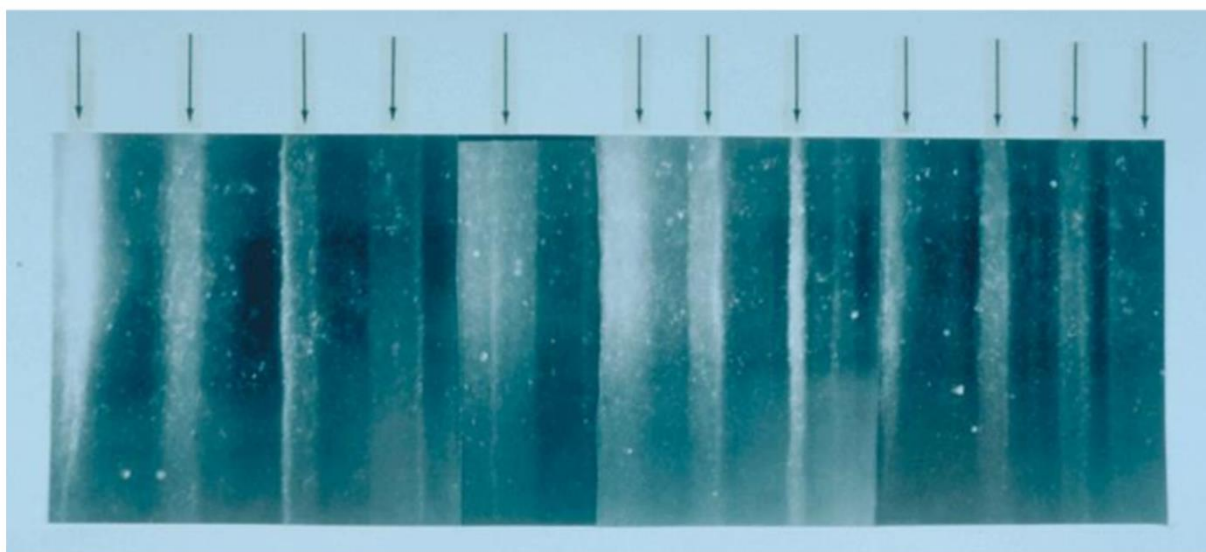


Рис. 24 Фотография ледового керна GISP2

В ледовых кернах может присутствовать пыль, содержащая уран. Именно распад урана был использован для радиометрического датирования кернов купола С в Антарктиде. Ледяной керн, охватывающий период времени 740 тыс. лет, был получен на куполе С (Dome C) в Восточной Антарктике, примерно в 500 км от станции «Восток» (EPICA European Project for Ice Coring in Antarctica). Данные по относительному содержанию дейтерия в этом керне, позволили прийти к нескольким важным заключениям об изменениях температуры за 740 тыс. лет.:

1. Данные, полученные на куполе С для последних 420 тыс. лет, очень близки к уже известным для этого периода по керну со станции «Восток». Таким образом получено независимое подтверждение реконструированной ранее динамики климата во времени.
2. Установлена сильная положительная корреляция изменения содержания дейтерия во всем ледовом керне (за 740 тыс. лет) с динамикой долей изотопа кислорода  $^{18}\text{O}$  относительно обычного  $^{16}\text{O}$  в морских донных осадках.
3. Для временного промежутка, соответствующего керну с купола С, отмечена смена типа динамики температуры, подтвержденная данными по содержанию  $^{18}\text{O}$  в донных осадках. А именно, за последние 430 тыс. лет основными были циклы по 100 тыс. лет, причем короткие межледниковые периоды сменялись длительными ледниковыми, в то время как для предшествующих 300 тыс. лет были характерны колебания с периодичностью в 40 тыс. лет. При этом межледниковые периоды были менее теплыми, но на каждый из них приходилась большая часть цикла (в отличие от последних 420 тыс. лет), а общая продолжительность была меньше.

## 5.5. Циклы Миланковича

Земля пережила несколько ледниковых периодов в эпоху плейстоцена (период от 2,6 млн до 11 700 лет назад). В течение тысячелетий в одно и то же время даже более умеренные регионы земного шара были покрыты ледниками

и ледяными щитами. Оледенение могло доходить до 40 параллели, а ледники занимали до 30% поверхности Земли. Чтобы определить, почему Земля переживает такие огромные изменения климата, климатолог Милутин Миланкович сравнил данные об изменениях параметров орбиты Земли с хронологией ледниковых периодов во время плейстоцена. Он изучил данные за последние 600 000 лет и вычислил, как изменяется солнечное излучение из-за изменения параметров орбиты Земли. Таким образом, он смог связать меньшее количество солнечного света и тепла в высоких северных широтах с предыдущими европейскими ледниковыми периодами.

Технический прогресс позволил геологам изучать керны глубоководных отложений, которые содержали климатические данные за миллионы лет. Эти климатические данные показывают удивительные периодические изменения, которые коррелируют с графиками, известными сейчас как **циклы Миланковича**. Если рассматривать только астрономические факторы, то охлаждение и потепление во время ледникового и межледникового периодов намного сильнее, чем можно ожидать. Изменение температуры в ту или иную сторону, также усиливаются за счет других факторов. Это значит, что существует четкая связь между формой орбиты Земли и естественным изменением климата. Таким образом, согласно теории Миланковича существует три различных позиционных цикла с различной продолжительностью, которые влияют на климат Земли: эксцентриситет орбиты Земли, изменение осевого наклона планеты и круговые колебания ее оси.

Миланкович утверждал, что из-за уменьшения солнечного излучения, зимний снег не тает летом в некоторых регионах. Этот оставшийся снег усиливает отражательную способность поверхности Земли, возвращая солнечные лучи обратно в космос, что приводит к дальнейшему охлаждению, создавая положительную обратную связь. Задача Миланковича состояла в том, чтобы понять, что происходит, когда три цикла совпадают и как они работают вместе, влияя на количество солнечного излучения, полученного Землей.

Основываясь на своих расчетах, Миланкович создал теорию, согласно которой эти циклы вызывают колебания в количестве полученного солнечного света, достигающие более чем двадцать процентов для северных широт. В своем докладе 1941 года «Канон инсоляции и проблема ледникового периода» он предположил, что это стало причиной подъема и падения больших континентальных ледниковых щитов.

### 1. Эксцентricность земной орбиты

Земля вращается вокруг Солнца по эллиптической орбите. Эллиптичность является мерой формы овала и определяется отношением малой оси (длина короткой оси эллипса) к большой оси (длина длинной оси эллипса). Идеальный круг, в котором два фокуса сходятся в центре, имеет эллиптичность 0 (низкий эксцентриситет), а сильно продолговатый эллипс, выглядящий почти как прямая линия, имеет эксцентриситет около 1 (высокий эксцентриситет). Земная орбита слегка меняет свой эксцентриситет за 96 000 лет почти с 0 до 0,07 и обратно. Когда у орбиты Земли более высокий эксцентриситет, поверхность планеты получает на 20–30 процентов больше солнечного излучения в перигелий (самое короткое расстояние между Землей и Солнцем), чем в афелий (самое дальнее расстояние). Когда же у орбиты Земли низкий эксцентриситет, разница в количестве солнечного излучения в перигелий и афелий, очень мала (Рис. 25).

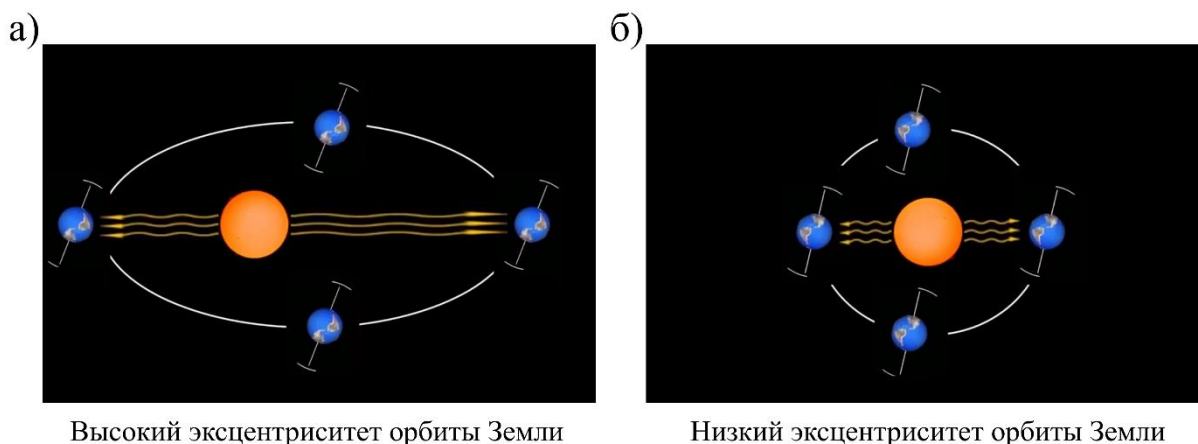


Рис. 25 Визуализация разницы между поступающим на Землю излучением при низком и высоком эксцентриситете земной орбиты

Сегодня эксцентриситет орбиты Земли составляет 0,017. В перигелий (около 3 января) земная поверхность получает на 6% больше солнечного излучения, чем в афелий, который происходит 4 июля или около этой даты.

## 2. Изменение наклона оси Земли

Другой позиционный цикл связан с изменением наклона оси Земли. Почти неизменный наклон земной оси по отношению к плоскости эклиптики (плоскость обращения Земли вокруг Солнца) и вращение Земли вокруг Солнца являются причиной наличия времен года. Незначительные изменения наклона оси влияют на количество солнечного излучения, попадающего в определенные места на Земле. Однако приблизительно каждые 41 000 лет наклон земной оси колеблется между значениями 22,1 и 24,5 градуса. Когда ось Земли слегка наклонена, количество солнечного излучения не сильно меняется между летом и зимой для большей части земной поверхности, поэтому времена года сменяются и проходят мягче; увеличение наклона оси создает более экстремальные сезоны – более жаркое лето и более холодные зимы. На сегодняшний день наклон Земли составляет 23,5 градуса и имеет тенденцию к уменьшению, что может заложить основу для более умеренных сезонов.

## 3. Прецессия земной оси

Земля слегка колеблется при вращении вокруг своей оси. Это колебание, известное как прецессия, происходит главным образом из-за гравитации Солнца и Луны. Осевая прецессия в астрономии – это гравитационно-индуцированное, медленное и непрерывное изменение ориентации оси вращения. Она похожа на прецессию крутящегося волчка, когда его вершина описывает круг (что особенно заметно при замедлении вращения). Земная ось также совершает похожие круги, и приблизительно за 26000 лет она описывает полный круг. В течение последних нескольких тысяч лет, ось Земли была направлена на Полярную звезду, что позволяло нам легко отыскать ночью Север. Но постепенное прецессионное колебание Земли приведет к тому, что

Полярная звезда перестанет точно указывать на Север. Около 5000 лет назад ось Земли была направлена больше на другую звезду, называемую Тубан, и примерно через 12 000 лет ось пойдет немного дальше вокруг своего прецессионного круга и укажет на Вегу, которая станет следующей Северной звездой (Рис. 26).

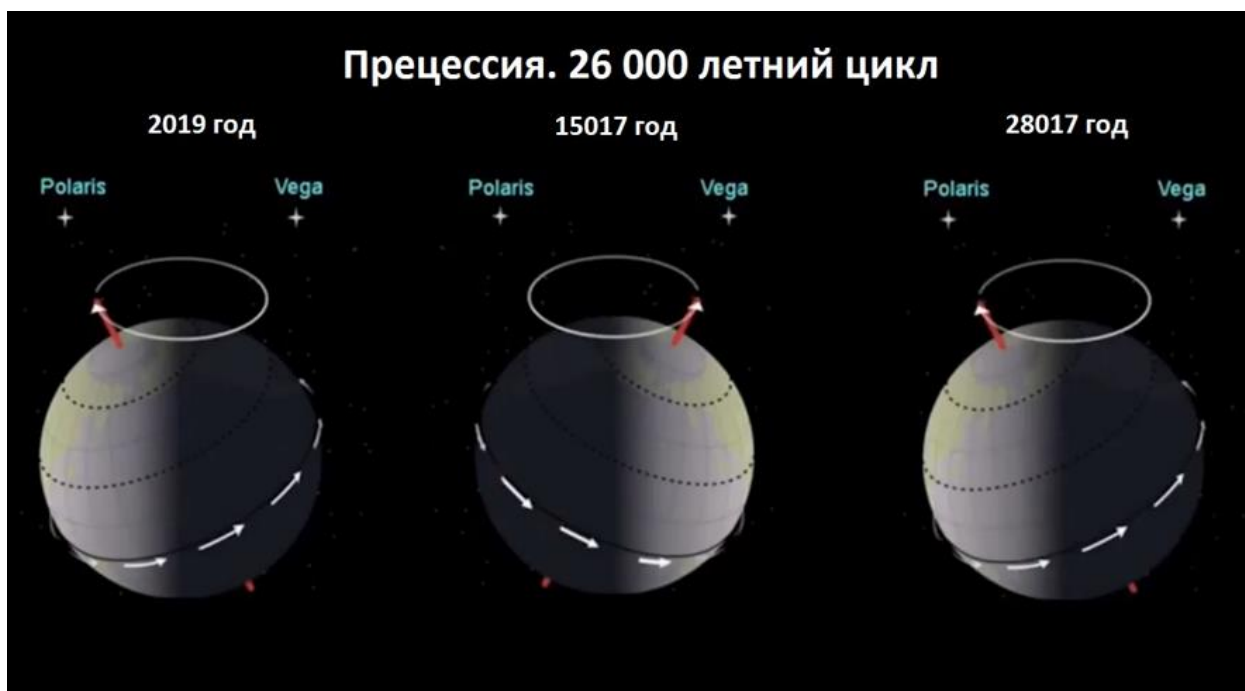


Рис. 26 Визуализация цикла прецессии земной орбиты

## 5.6. Энергетический баланс Земли

Климатическая система развивается во времени под влиянием собственной внутренней динамики и вследствие изменений внешних факторов, которые влияют на климат (так называемые «воздействия»). Внешние воздействия включают природные явления, а также вызванные человеком изменения в составе атмосферы.

Солнечная радиация питает климатическую систему. Существует три основных способа изменить радиационный баланс Земли:

- 1) путем изменения входящей солнечной радиации (например, путем изменения орбиты Земли или самого Солнца);
- 2) путем изменения доли отраженной солнечной радиации (называемой «альбедо»; например, изменениями в облачном покрове, атмосферных частицах или растительности);

- 3) путем изменения длинноволнового излучения Земли обратно в космос (например, путем изменения концентрации парниковых газов).

Климат, в свою очередь, реагирует непосредственно на такие изменения, а также косвенно, с помощью различных механизмов обратной связи.

Согласно оценкам годового и глобального среднего энергетического баланса Земли в долгосрочной перспективе существует равновесие между количеством поступающей и выделяемой обратно солнечной радиации, поглощаемой Землей и атмосферой. Около половины поступающего солнечного излучения поглощается поверхностью Земли. Эта энергия передается в атмосферу путем нагревания воздуха в контакте с поверхностью, суммарного испарения и длинноволнового излучения, которое поглощается облаками и парниковыми газами. Атмосфера в свою очередь излучает длинноволновую энергию обратно на Землю, а также в космос. Таким образом, в атмосфере поглощается примерно 25% солнечного излучения. В данном случае поглотителями являются всего два компонента:

- озон, поглощающий УФ излучение в стратосфере;
- водяной пар и другие газы, поглощающие в тропосфере излучение в ближней инфракрасной области спектра.

Наряду с этим, 25% излучения претерпевает обратное рассеяние в космос за счет рассеяния облаками (данный процесс характеризуется высокой изменчивостью во времени и пространстве) и атмосферными газами. В итоге на поверхность поступает лишь 50% исходного солнечного излучения.

На Земле уже имеют место поверхностные эффекты, благодаря которым поглощается еще 45% исходного излучения. Оставшиеся 5% – это отраженное обратно в космос излучение. Альбедо колеблется в широких пределах для различных поверхностей:

- Глубокий океан – 7% (в зависимости от угла солнца)
- Влажный, темный грунт – 10%
- Лес – 15%
- Пастбища – 20%

- Почвы пустынь – 30%
- Сухой светлый песок – 35%
- Свежий снег – 80%

В итоге имеет место комбинированный эффект поверхности и атмосферы. Общее планетарное альbedo составляет ~ 30%, а общее поглощение – 70%. Таким образом, поверхность Земли поглощает в 2,5 раза больше солнечного излучения, чем тропосфера.

### **5.7. Контрольные вопросы к Главе 5:**

- 1) Перечислите факторы, влияющие на земной климат.
- 2) Какие переменные-заменители могут содержаться в ледяных ядрах?
- 3) Из каких изотопологов состоит вода на Земле?
- 4) Перечислите параметры орбиты Земли, которые влияют на климат.
- 5) Назовите определение понятия «альbedo». Какая поверхность Земли характеризуется наибольшим и наименьшим альbedo?

## **ГЛАВА 6. Круговорот воды и углерода на Земле**

### **6.1 Круговорот воды на Земле или гидрологический цикл**

Как вы все знаете, на земле вода существует в трех агрегатных состояниях: жидком, твердом и газообразном. Без воды невозможно существование живых организмов. В любом организме вода является средой, в которой происходят химические реакции, без которых не могут существовать живые организмы. Вода является самым ценным и самым необходимым ресурсом для жизнедеятельности живых организмов.

Постоянный обмен влагой между гидросферой, атмосферой и земной поверхностью, состоит из нескольких процессов: испарение, передвижение и конденсация водяного пара в атмосфере, а также выпадение осадков и стока.

Данный процесс получил название круговорота воды в природе (или гидрологического цикла) (Рис. 27) [16].

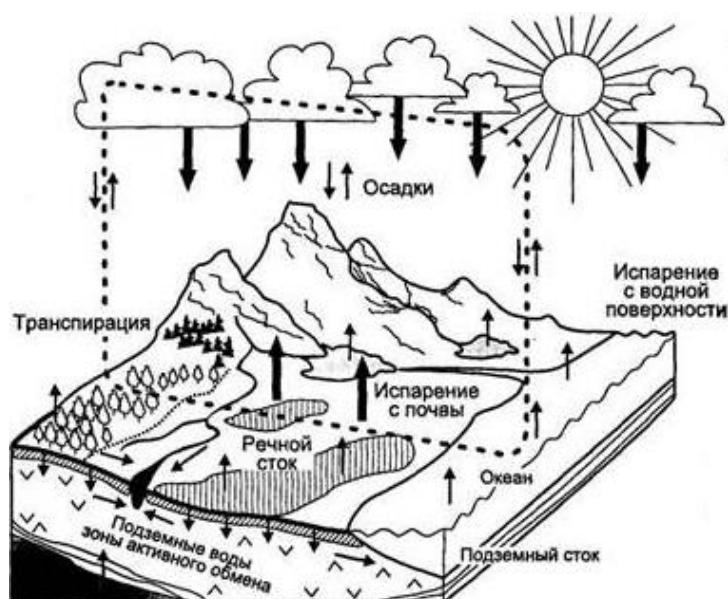


Рис. 27. Схема гидрологического цикла [16].

Атмосферные осадки частично испаряются, частично образуют временные и постоянные водоемы, а частично — просачиваются в землю и образуют подземные воды.

Круговорот воды происходит под влиянием солнечной радиации и сил тяжести. Каким же образом это происходит [17]? Солнце нагревает воду в океанах и морях, и она испаряется, преобразуясь в водяной пар. Параллельный процесс происходит и на суше: вода испаряется с нагретой Солнцем поверхности Земли или испаряется растениями в результате транспирации. В процессе адвекции (перемещение воздуха в горизонтальном направлении и перенос вместе с ним его свойств: температуры, влажности и др.) водяной пар перемещается с воздушными массами, пока в конце концов не оказывается в зоне с низкой температурой. Это вызывает конденсацию влаги в облаках. Облака продолжают перемещаться вместе с воздухом, в то время как сконденсированные капельки воды в них перемешиваются, слипаются и растут в размерах. В итоге вода выпадает в виде осадков над сушей или океаном; при этом океан испаряет больше влаги в атмосферу, чем приобретает от осадков, а суша — наоборот, получает с осадками больше, чем с неё испаряется.

Некоторые осадки выпадают в виде снега или града, дождя со снегом, и могут накапливаться в ледяных шапках и ледниках, которые хранят замороженную воду в течение от нескольких месяцев до десятков тысяч лет. Но даже в таком виде незначительный обмен льдов с атмосферой сохраняется, т.е. действует сублимация (переход вещества из твёрдого состояния сразу в газообразное, минуя стадию плавления). В то время, когда температура в зоне отложений повышается, начинается таяние, и вода активно исходит из этих источников.

Большая же часть воды возвращается из атмосферы в виде дождя. Часть выпавших осадков перехватывается листвой растений, не достигнув почвы. Попав на сушу, вода перетекает по земле в виде рек, двигаясь к океанам. Часть из этой воды впитывается в грунт в результате инфильтрации, проникает глубоко в землю и пополняет водоносные горизонты грунтовых вод (осадочная горная порода, представленная одним или несколькими переслаивающимися подземными слоями горных пород с различной степенью водопроницаемости). Стоит отметить, что они также аккумулируют в себе пресную воду в течение длительного времени.

Под землёй, как и на её поверхности, тоже существует движение водяных масс, и вода движется, меняя своё местоположение. Грунтовые воды обмениваются водой с поверхностью в виде родников и артезианских скважин (т.н. разгрузка грунтовых вод). Эта, а также небольшая часть впитавшейся в землю, но не достигшей уровня водоносных горизонтов воды, попадает назад в поверхностные водные объекты и океан. Доля воды отводится из почвы, опять же, растениями. И, в результате, со временем вода возвращается в океан, чтобы продолжить круговорот.

Различают **два вида циклов воды в природе**. *Большой* заключается в том, что вода, которая испарилась над поверхностью суши или океана, опять выпадает на сушу в виде атмосферных осадков и распределяется по трем основным направлениям: одна часть идет на поверхностный сток; вторая часть просачивается в грунт (подземный сток), а третья часть испаряется в

атмосферу. В малом (океанический) же цикле водяной пар, образовавшийся над поверхностью океана, конденсируется и выпадает в виде осадков снова в океан. Кроме того, различают местный, или внутриматериковый, круговорот, при котором испарившаяся с поверхности суши вода выпадает на сушу в виде атмосферных осадков. Для замкнутых межгорных котловин характерен внутренний круговорот влаги. В конце концов, осадки в процессе движения опять достигают Мирового океана.

## 6.2 Круговорот углерода на Земле

Углерод является важнейшим химическим элементом органических веществ всех типов. Круговорот углерода в биосфере представляет собой сложную цепочку реакций. Это циклическое перемещение данного элемента между живыми существами и неорганическим миром (Рис. 28) [18]. При этом углерод переходит из воздушной и водной среды в организмы растений и животных, а затем снова поступает в воздух, воду и почву, где становится доступным для последующего использования. В связи с тем, что углерод крайне необходим для поддержания всех жизненных форм, вмешательство в циркуляцию этого химического элемента оказывает влияние на численность и разнообразие живых организмов, существующих на Земле [18].

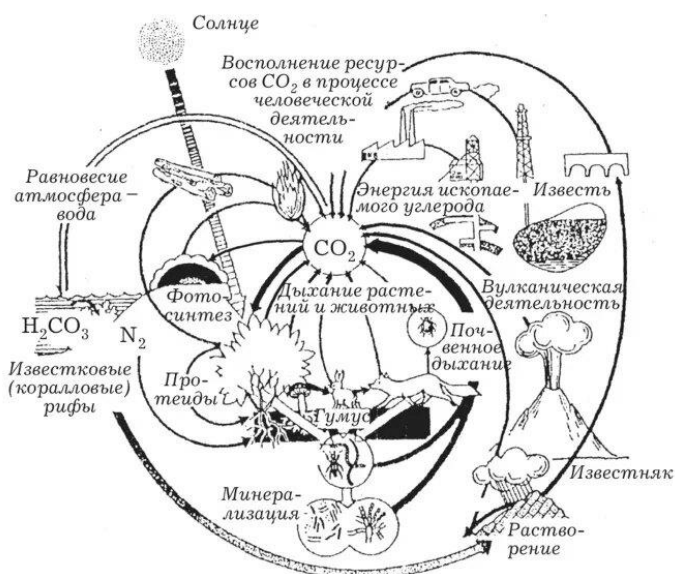


Рис. 28. Круговорот углерода в биосфере.

Источником углерода является атмосферный воздух, где этот элемент присутствует в форме диоксида углерода (углекислого газа). Также углекислый газ в растворенном виде (в качестве слабой угольной кислоты) имеется в водах пресных и соленых водоемов. Кальций соединяется с данной кислотой, образуя минералы – карбонаты (известняк). Общая масса растворенных и осадочных углеродсодержащих соединений равна примерно 1,8 трлн. тонн. Концентрация связанного углерода в атмосферном воздухе в виде углекислого газа составляет 0,03% от массы воздуха на уровне моря, в абсолютных величинах это составляет примерно 750 млрд. тонн. Оценить содержание углерода в живых организмах даже ориентировочно не представляется возможным из-за их многочисленности и широкого распространения на Земле.

Элементарный углерод находится в движении постоянно. Процесс круговорота углерода начинается внутри экосистем путем потребления зелеными растениями  $\text{CO}_2$  из воздушной и водной среды при фотосинтезе. В ходе фотосинтеза диоксид углерода превращается в простые сахара, которые при дыхании растений расщепляются, отдавая организмам энергию, а часть  $\text{CO}_2$  снова выделяется в атмосферу. Определенная доля углерода поступает затем с фитомассой к микроорганизмам и растительноядным животным.

Все аэробные организмы участвуют в выведении углерода в среду экосистем при дыхании и брожении, когда углерод органических веществ трансформируется в углекислый газ с выделением энергии для жизнедеятельности организмов. Также углерод возвращается в атмосферу при разложении тел животных, питающихся растениями. Затем углерод повторно используется растениями в виде углекислого газа для фотосинтеза.

Таким образом циркуляция углерода тесно связана с круговоротом кислорода, это означает, что двумя важнейшими биологическими процессами являются фотосинтез и дыхание, именно они определяют циркуляцию углерода в биосфере [18]. Стоит отметить, что цикл круговорота углерода не является полностью замкнутым. На баланс углерода в планетарных масштабах

вливают геологические процессы. При накоплении в таких ископаемых, как нефть, уголь, газ, известняк, др., углерод исключается из круговорота в биосфере.

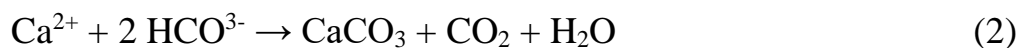
Таким образом, *глобальный круговорот углерода* можно разделить на две части – т.н. *быструю и медленную* (или геологическую). Первая – это быстрая часть описана выше. Характерные времена для быстрой части углеродного цикла (в основном, фотосинтез-дыхание) - порядка года (в некоторых процессах - дни или несколько лет).

Длительной (или геологической) составляющей углеродного цикла соответствуют времена порядка миллионов и сотен миллионов лет. В данном цикле есть 5 основных реакций, собственно составляющих геологический круговорот углерода: выветривание карбонатов  $\text{CaCO}_3$  и силикатов  $\text{CaSiO}_3$ , образование карбонатов в океане, одновременное выветривание силикатов и образование карбонатов, а также метаморфический / магматический распад карбонатов.

Начнем описание **выветривания карбонатов  $\text{CaCO}_3$**  с определения процесса: выветривание – это совокупность процессов физического и химического разрушения горных пород и минералов, из которых они состоят. В почве при взаимодействии диоксида углерода  $\text{CO}_2$  и воды образуется угольная кислота:



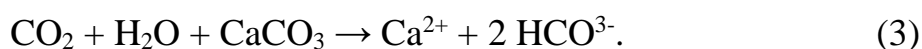
Угольная кислота растворяет карбонаты почвы  $\text{CaCO}_3$  (кальцит) и  $\text{MgCO}_3$ , в результате кальций и магний оказываются в растворе в виде ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ :  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$  ;  $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ . Речным стоком все компоненты выветривания выносятся в океан, где ионы кальция, магния и бикарбоната используются организмами, строящими известковые скелеты (из кальцита и арагонита  $\text{CaCO}_3$ , магнезита  $\text{MgCO}_3$  и доломита  $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ ):



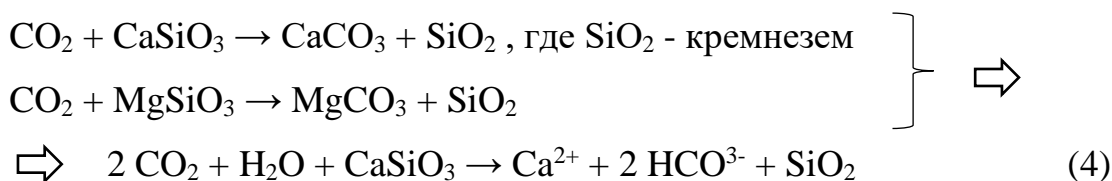
Когда эти организмы (кокколитофориды, фораминиферы и др.) отмирают, их скелеты опускаются на дно, захораниваются и образуют

отложения осадочных карбонатных пород. Из круговорота выводится примерно половина ионов бикарбоната, для связи которых найдутся катионы кальция и магния (фактически концентрации  $[Ca^{2+}]$  и  $[Mg^{2+}]$  являются лимитирующим фактором). Другая половина в конце концов превращается в диоксид углерода по цепочке реакций (1).

Атмосферный углекислый газ, связанный в ходе химического выветривания карбонатов, при повторном их образовании (это цепочка превращений (2)) возвращается во внешнюю среду (т.е. в океан, а затем в атмосферу). В итоге процесс выветривания выглядит следующим образом:



Химическое **выветривание силикатов** выглядит немного иначе. Силикаты в природе встречаются в виде минералов  $CaSiO_3$  или  $MgSiO_3$ . Процесс их выветривания связан с образованием карбонатов ( $CaCO_3$  и  $MgCO_3$ ), при этом расходуются ионы бикарбоната угольной кислоты (которая образуется в почве при взаимодействии  $CO_2$  с водой, о чем сказано выше):



Таким образом выветривание силикатов (в отличие от карбонатов) приводит к изъятию  $CO_2$  из атмосферы. За полмиллиона лет (по некоторым расчетам даже за 300 тыс лет) весь атмосферный углерод мог бы оказаться связанным в осадочных породах, если бы не шел обратный процесс.

И последний процесс – это конечно же возвращение  $CO_2$  из осадочных пород в атмосферу путем **метаморфического или магматического распада карбонатов**.

Океаническая кора вместе с осадочными породами, содержащими карбонаты и кремнезем, сдвигается под материки (т.н. процесс субдукции), где в условиях огромного давления испытывают разогрев и перекристаллизацию (возможно и плавление). В ходе данных преобразований идут реакции, по своему направлению противоположные приведенным выше:



Фактически представленные реакции реализуются в трех основных геологических процессах, в результате которых  $\text{CO}_2$  поступает в атмосферу:

1) Вулканизм: (например, сюда входит дегазация магмы, образующейся в коре и мантии). В частности, в настоящее время вулканы выпускают от 100 до 400 млн тонн углекислого газа в год. Для сравнения, промышленность выпускает около 30 млрд тонн углекислого газа в год (например, за счет сжигания ископаемого топлива), а это примерно в 300 раз больше, чем продуктивность всех вулканов Земли.

2) Образование и осаждение карбоната кальция в известковых скелетах морских организмов – это, фактически часть биологического насоса углерода в океане ( $2 \text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ), которая приводит к выделению  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

3) Метаморфизм, т.е. преобразование различных литосферных пород под действием давления и температуры вследствие того, что океаническая кора вместе с осадочными породами сдвигается под материка. В данном случае идут реакции (5), в которых происходит выделение  $\text{CO}_2$ . В реальности поступление углекислого газа в атмосферу, происходящее посредством трех данных процессов, уравнивается: во-первых, связыванием  $\text{CO}_2$  при выветривании силикатных минералов (это реакция (4) и  $\text{CO}_2 + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$ ), и, во-вторых, захоронением углерода в осадочных породах в составе органического вещества и карбонатов (в их число входят известняки  $\text{CaCO}_3$ , доломиты  $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ , т.е. те соединения, которые образовались в результате перекристаллизации скелетов морских организмов, связанные с ионами бикарбоната, который образуется в процессе выветривания (3) и (4)).

### 6.3 Контрольные вопросы к Главе 6:

1) Какие процессы включает в себя гидрологический цикл в природе?

2) В чем заключается океанический гидрологический цикл? Чем он отличается от большого гидрологического цикла?

3) Все аэробные организмы участвуют в выведении углерода в среду экосистем в ходе этих двух процессов, когда углерод органических веществ трансформируется в углекислый газ с выделением энергии для жизнедеятельности организмов. О каких процессах идет речь?

4) Назовите из каких частей состоит глобальный круговорот углерода на Земле? Каковы характерные времена для каждой из них?

5) Из каких пяти компонент состоит геологический круговорот углерода?

## **ГЛАВА 7. Средообразующая роль биоты Земли и «биотическая регуляция»**

### **7.1 Средообразующая роль биоты Земли**

Эволюция биосферы свидетельствует о том, что при любом воздействии на нее – природном или антропогенном - ее саморегуляция обеспечивается за счет сохранения биологического разнообразия. Откуда становится очевидно, что экологические условия – это продукт взаимодействия биоты и окружающей среды. В случае нарушения экологической обстановки на всех экосистемных уровнях, вплоть до глобального, только правильная оценка этого взаимодействия позволяет разработать правильные методологические подходы для ее сохранения или даже улучшения.

В процессе исследования проблемы биологической регуляции окружающей среды, ученые отметили, что в настоящее время в экологии известны две основные **концепции взаимодействия биоты и окружающей среды** [19].

Согласно первой концепции - **традиционной** - окружающая среда пригодна для жизни в силу уникальных условий на поверхности Земли, а естественная биота только приспосабливается к любой окружающей среде.

Это происходит благодаря главному свойству жизни, а именно способности к эволюции и непрерывной адаптации к меняющимся условиям среды. При этом составлять земную биоту могут любые виды организмов, которые способны адаптироваться к окружающей среде и производить наибольшее количество потомков.

Согласно этой традиционной концепции, изменение окружающей среды под воздействием человека — это всего лишь определенный этап естественного эволюционного процесса, т.е. превращения биосферы в новую глобальную биосистему. А природное биоразнообразие - фактически генетический ресурс человека, который следует сохранять лишь в заповедниках, зоопарках и генных банках. Однако в таком случае безостановочный экономический рост возможен лишь за счет непрерывного расширения использования ресурсов биосферы.

Однако, по мнению авторов [19], в традиционной концепции практически игнорируются серьезные моменты: в частности, экологические ограничения на численность популяций биологических видов (в том числе человека), а также причины образования естественных сообществ и их среды обитания. Благодаря этому, существует вторая концепция.

Во **второй концепции** основная роль отводится биотической регуляции окружающей среды. Биота Земли рассматривается как единственный механизм для создания пригодных для жизни условий окружающей среды, как в локальных, так и глобальных масштабах. В случае прекращения регулирующего воздействия биоты, физически неустойчивая окружающая среда быстро перейдет в устойчивое состояние, как, скажем, на Марсе или Венере, где жизнь невозможна. Однако стоит иметь в виду, что в данном случае «быстро» означает в геологических масштабах, т.е. примерно за 10 тыс. лет. Как уже было сказано, в данной концепции главным свойством жизни считается способность видов к поддержанию тех условий окружающей среды, которые пригодны для существования биоты на любом экосистемном уровне, а не способность к непрерывной адаптации к изменяющимся условиям среды.

Биотическая регуляция окружающей среды возможна только в результате самосогласованного взаимодействия между организмами и средой. Этот процесс можно представить как согласованность клеток и органов внутри многоклеточного организма.

Однако стоит отметить, что в данном случае работу по обеспечению поддержания окружающей среды могут выполнять виды с оптимальной, а не с максимальной численностью. Именно они образуют сообщества и составляют земную биоту, которая как раз обеспечивает необходимые условия, а именно:

- стационарность численности особей,
- регулярность популяционных колебаний видов, а также
- предотвращают популяционные взрывы, разрушающие сообщества.

Переход любого вида к максимальному количеству потомков, относится к генетическому отклонению от нормы, и они немедленно вытесняются из популяции. Поэтому в таких случаях сразу включается механизм отбора, а именно - конкурентное взаимодействие однородных сообществ. При переходе окружающей среды в новое состояние (например, изменение восстановительной атмосферы на окислительную) обязательно происходит существенная перестройка биоты. Однако стоит обратить внимание, что перестройка осуществляется таким образом, что биота не теряет своей способности предотвращать переход среды в состояние, непригодное для существования любой биоты. Это связано с тем, что существует несколько условий окружающей среды, пригодных для жизни, а эволюционирующая биота способна перебирать все приемлемые для жизни условия.

## **7.2 Биотическая регуляция окружающей среды**

Жизнь на Земле существует около 4 млрд лет, причем альтернативность вышеописанных концепций сохраняется на протяжении всего этого периода. Однако за этот период изменился диапазон условий, пригодных для жизни, от локальных до глобальных масштабов. Это значит, что жизнь все это время

изменяла окружающую среду в благоприятном для себя направлении, т.е. **биотическая регуляция среды** имела место с самого момента возникновения жизни. Ее существование доказывается рядом факторов [19].

Во-первых, выбросы неорганического углерода из земных недр в атмосферу с огромной точностью соответствуют содержанию органического углерода в осадочных породах. Этот факт обеспечивает практически постоянное содержание неорганического углерода в атмосфере в течение сотен миллионов лет.

Следующие три примера отчасти уже были детально разобраны в предыдущей теме. В первую очередь это относится к круговороту углерода, который полностью контролируется биотой. Напомню, что действие "биологического насоса" обеспечивает поглощение океаном углекислого газа атмосферы. Если иметь в виду, что в океане находится 98% планетного  $\text{CO}_2$ , а в атмосфере - 2%, то важнейшая роль этого процесса очевидна.

Поэтому в качестве второго доказательства, или примера можно привести тот факт, что концентрация биогенных элементов (таких как C, N, P,  $\text{O}_2$ ) в океане сформирована и поддерживается биотой. Об этом свидетельствует соотношение этих элементов C/N/P/ $\text{O}_2$ , совпадающее с таковым при синтезе органического вещества.

В-третьих, незатронутая деятельностью человека биота океана поглощает избыток диоксида углерода, выбрасываемого в атмосферу человеком, т. е. действует в соответствии с отрицательными обратными связями, в то время как измененная человеком биота суши утратила эту способность.

В-четвертых, биотой океана поддерживается концентрация диоксида углерода в океане в три раза меньше, чем если бы ее воздействие отсутствовало, так как потеря органического углерода океаном в атмосферу, как вы помните из предыдущей темы, компенсируется поступлением в океан органического углерода.

Пятый пример связан с гидрологическим циклом на суше, где растения являются главной его частью. В частности, речь идет о таком явлении, как транспирация. Напомню, что транспирация – это физиологический процесс испарения воды растением через лист. Установлено, что в потоке влаги в атмосферу над сушей доминирующей составляющей является именно транспирационный поток через листья растений, составляющий до 90%. Получается, что в растениях накапливается в среднем менее 1% поглощаемой ими из почвы воды, а 99% возвращаются в атмосферу в процессе транспирации через устьица. Растения обладают целым рядом механизмов, позволяющим им контролировать этот процесс и при необходимости удерживать влагу, это:

- сбрасывание листьев во время сезонных похолоданий или засухи,
- закрывание устьиц в засушливую погоду и в ночные часы, когда прекращается фотосинтез,
- запасание влаги в слизистых клетках и в клеточных стенках.

Растительная биота, общая листовая поверхность которой превышает площадь Мирового океана, служит инструментом удержания воды на суше, внося тем самым решающий вклад в процессы континентального влагооборота. Также стоит отметить, что ежегодный речной сток в океан точно соответствует доле осадков, приносимых с океана на сушу, таким образом, имеет место стабильность континентального влагооборота. Подразумевается постоянство массы задействованной в этом круговороте воды, а ядром поддерживающего его функционального механизма служит растительная биота. Также не стоит забывать о биоаэрозолях, которые продуцируются растениями, ведь на них также происходит конденсация водяного пара, что является дополнительным регулятором осадков.

Таким образом, можно сформулировать пятое доказательство – это факт определения биотой круговорота воды на суше. Поскольку 2/3 осадков связано с испарением воды на суше, в котором доминирующая роль принадлежит биоте.

Ярким примером в реальной жизни служат леса бассейна Амазонки, которые регулируют выпадающие над ними осадки. Хорошо известно, что транспирация источник значительной части осадков в Амазонии, однако, оставалось неясным, управляет ли транспирация лесов осадками или просто подчиняется сезонному циклу осадков. Доказано это было следующим образом [20]. При испарении воды с поверхности океана на границе раздела фаз вода-пар происходит изотопное фракционирование: пар оказывается обеднен дейтерием в сравнении с водой. Выше уже обсуждалось, что это происходит потому, что в состав пара легче переходят легкие молекулы воды, чем молекулы, содержащие тяжелый изотоп дейтерий. Таким образом, в процессе транспирации фракционирования не происходит и соотношение изотопов в составе пара то же, что и в почвенной влаге. Особенность дождевого леса Амазонии (исследовалась его южная часть, составляющая около 40% всех лесов бассейна Амазонки) состоит в том, что сезон дождей начинается за 2-3 месяца до того, как сезонные ветры начнут приносить влажный воздух с океана.

Недавнее исследование [20] показало, что в это время во влаге над амазонскими лесами содержится относительно много дейтерия, что доказывает происхождение этой части влаги за счет транспирации. При этом больше всего дейтерия становится над амазонской сельвой тогда, когда появляется новая листва и, соответственно, усиливается транспирация.

Вернемся к биотической регуляции. Она исключает адаптацию, и наоборот [19]. Адаптационные процессы связаны со способностью выживания организмов в определенных условиях, а если условия не меняются - нет и адаптации. При отсутствии адаптации биоты к искаженным условиям среды, разрушение биотической регуляции обратимо. После прекращения воздействия антропогенного возмущения (т.е. воздействие оказанное на окружающую среду человеком) происходит восстановление первоначальной биоты, а она, в свою очередь, обладает правильной информацией о

нормальных условиях среды и способах их регуляции путем, т.н. сукцессионных процессов.

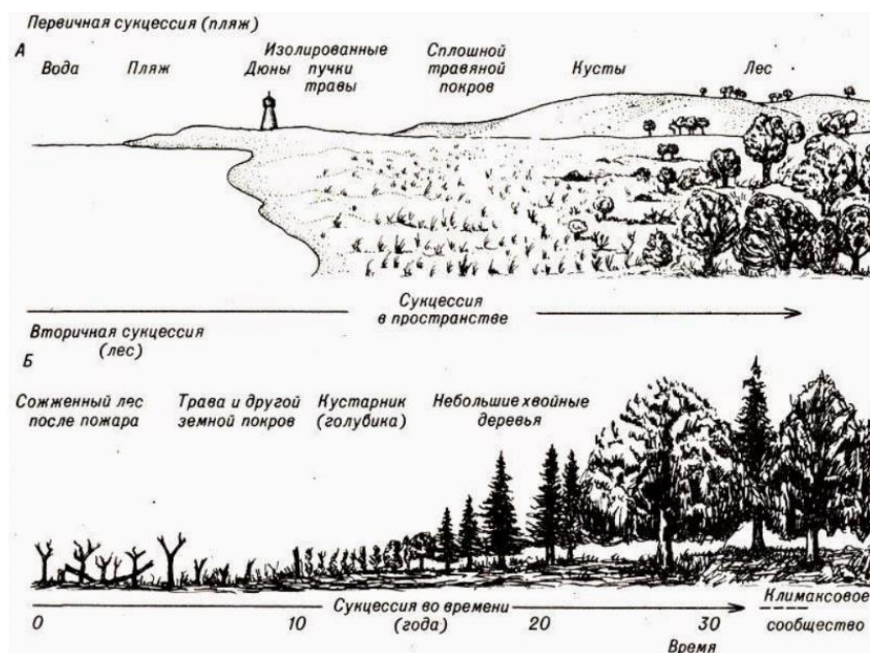


Рис. 29. Схема сукцессии.

Сукцессия – это процесс восстановления растительного покрова и естественного сообщества видов организмов после любых возмущений или после полного локального уничтожения биоты (Рис. 29). Данный процесс можно сравнить с процессом эмбрионального развития организма, поскольку в процессе сукцессии наблюдаются характерные последовательные стадии смены доминантных видов. И это происходит до тех пор, пока не установится определенное сообщество, сохраняющее постоянство распределения видов в течение неограниченно долгого времени в отсутствие внешних возмущений.

Это установившееся распределение видов называется климаксовым сообществом. Подобно процессу эмбрионального развития, процесс сукцессии характеризуется строго определенным временем полного восстановления климаксового сообщества. В бореальных лесах (это леса, расположенные севернее  $60^\circ$  северной широты и южнее  $60^\circ$  южной широты) это время составляет около 150 лет [21].

При восстановлении климаксового растительного покрова после его нарушения происходит существенное изменение локального химического состава окружающей среды, при котором концентрации многих биогенных

элементов изменяются в десятки и сотни раз [22]. При этом виды, определяющие сукцессионные изменения в окружающей их среде, меняют эту среду в благоприятном направлении для климаксовых видов и неблагоприятном направлении для самих себя. Такие виды могут быть названы ремонтными видами. Например, к ремонтным видам хвойных климаксовых лесов относятся береза, осина, ольха, ягодные растения (малина, брусника), съедобные грибы и большинство передвигающихся животных, которые питаются растительными ремонтными видами.

Сукцессию невозможно остановить в стационарном устойчивом состоянии какой-либо ее стадии подобно тому, как невозможно остановить развитие эмбриона. С помощью внешних возмущений возможно лишь торможение сукцессионного процесса. Существует пороговая величина возмущения, выше которого торможение сукцессионного процесса сменяется его разрушением. После прекращения такого возмущения сукцессия начинается с начальной стадии.

Если не происходит периодических возвращений к климаксовому состоянию, то теряется столь необходимая информация, например, об оптимальной для климаксовых видов окружающей среде, поддерживаемой климаксовыми видами и о последовательных стадиях сукцессионного приближения к этой среде. В тех случаях, когда для завершения стадий сукцессионного процесса требуется большой период, огромное влияние могут оказывать периодические изменения климата, т.е. бури, засухи, пожары, часто случайные изменения. Так, например, обычный пожар может вернуть систему в начальное состояние.

Таким образом, биотическая регуляция окружающей среды — это механизм управления окружающей средой, основанный на отобранных в процессе эволюции видах, содержащих необходимую для управления средой генетическую информацию.

Возможность выживания человечества состоит в восстановлении естественной биоты на территориях, достаточных для сохранения ее

способности к регуляции окружающей среды в глобальных масштабах. Главной экологической задачей человечества должно считаться сохранение и восстановление естественной биоты суши на Земле, которое должно сопровождаться полным прекращением дальнейшего освоения естественной биоты океана. Человек, став мощным геологическим фактором, оказывает глобальное воздействие на биосферу. Однако не стоит забывать, что биосфера, со своей стороны, через свои экологические законы, которые человек вынужден соблюдать, чтобы выжить, в том числе и закон биотической регуляции окружающей среды, также воздействует на человека.

### **7.3 Контрольные вопросы к Главе 7:**

- 1) Какие существуют концепции взаимодействия биоты и окружающей среды? В чем их главные отличия?
- 2) Что такое биотическая регуляция?
- 3) Приведите минимум 3 доказательства существования биотической регуляции.
- 4) Поясните термин сукцессия.
- 5) Существует ли способ ускорить процесс сукцессии или полностью остановить его в стабильном состоянии?

## **ГЛАВА 8. Народонаселение мира, и динамика мировой экономической системы.**

### **8.1. Плотность населения стран мира**

В данном разделе представлена информация о численности и распределении населения в мире. Один из подходов к оценке данных о распределении людей по всему миру – создание альтернативной карты мира, не исходя из площади территории страны, а в соответствии с количеством проживающего населения. Этот подход проиллюстрирован на Рис.30: на нем показано географическое представление мира, где размеры стран изображены не в соответствии с распределением земель, а в соответствии с распределением

людей. Эти данные соответствуют 2018 году. Карта состоит из квадратов, один квадрат эквивалентен полмиллиону человек населения страны. Например, получается, что 11,5 миллионов бельгийцев представлены 23 квадратами; 49,5 миллиона колумбийцев представлены 99 квадратами, и т.д.



Рис. 30 Географическое представление мира, построенное в соответствии с количеством населения.

В итоге общая численность населения мира в 7,633 миллиарда человек в 2018 году представлена общей суммой в 15 266 квадратов на данной карте.

Поскольку здесь показан размер населения, а не размер территории, можно заметить существенные различия, сравнивая его со стандартной географической картой, с которой мы наиболее знакомы. Например, на этой карте небольшие страны с высокой плотностью населения увеличиваются в размерах по сравнению с их изображениями на стандартной карте мира, к которым мы привыкли – посмотрите на Бангладеш, Тайвань или Нидерланды. При этом большие страны с небольшим населением, в свою очередь, уменьшаются в размерах (Канада, Монголия, Австралия, Россия).

Как уже было сказано, наше понимание мира часто формируется географическими картами. Но это ничего не говорит нам о том, где в мире живут люди. Чтобы понять это, нужно взглянуть на карту плотности населения (Рис. 31). Здесь мы видим количество людей на квадратный километр по всему миру. Во всем мире средняя плотность населения составляет 25 человек на км<sup>2</sup>, однако среди стран существуют очень большие различия.

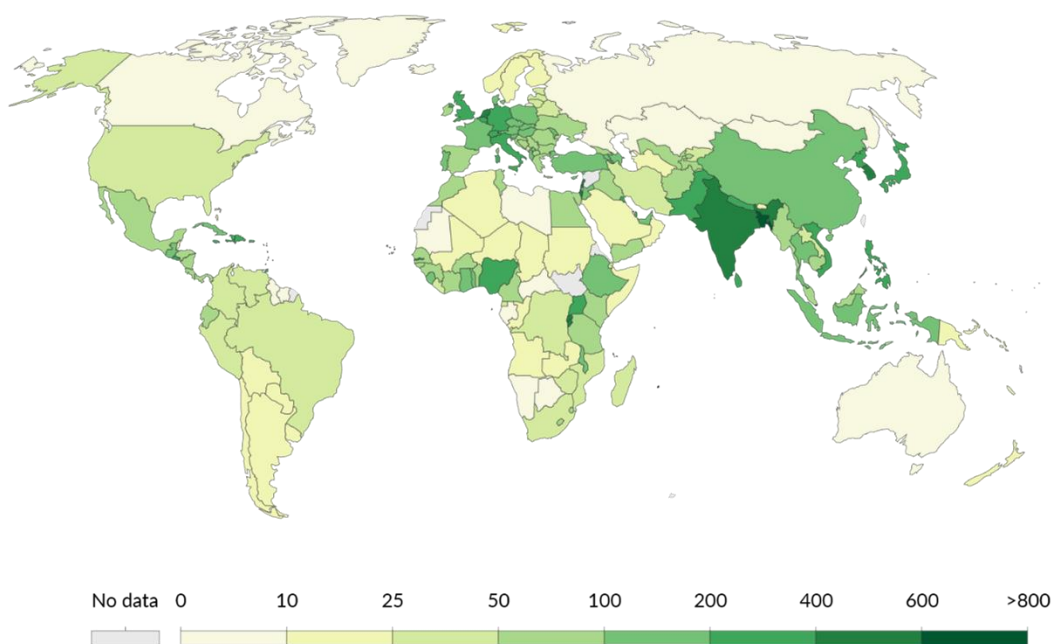


Рис. 31 Плотность населения стран мира (представлены результаты на момент 2017 года).

Например, во многих малых островных или изолированных государствах мира проживает большое количество людей. Макао, Монако, Сингапур, Гонконг и Гибралтар – пять самых густонаселенных из них. К примеру, в Сингапуре это число составляет почти 8000 человек на км<sup>2</sup>, что в 200 раз плотнее, чем в США, и в 2000 раз больше, чем в Австралии. Из более крупных стран Бангладеш является наиболее густонаселенным: это 1252 человека на квадратный километр; что почти в три раза плотнее, чем у его соседа – Индии. За ним следуют Ливан (595), Южная Корея (528), Нидерланды (508) и Руанда (495 на км<sup>2</sup>), которые завершают пятерку лидеров. К наименее населенным странам относятся Гренландия, где всего менее 0,2 человека на км<sup>2</sup>, за ней следуют Монголия, Намибия, Австралия и Исландия.

## 8.2. Динамика роста численности населения

В этом разделе будут рассмотрены сведения о том, каким образом мировой рост населения изменялся с течением времени. Диаграмма (Рис. 32) показывает рост числа людей, живущих на нашей планете за последние 12 000 лет. Рост, действительно потрясающий – население мира сегодня в 1860 раз больше, чем 12 тысячелетий назад, когда население мира составляло около 4

миллионов человек – на данный момент это всего лишь половина нынешнего населения Лондона.

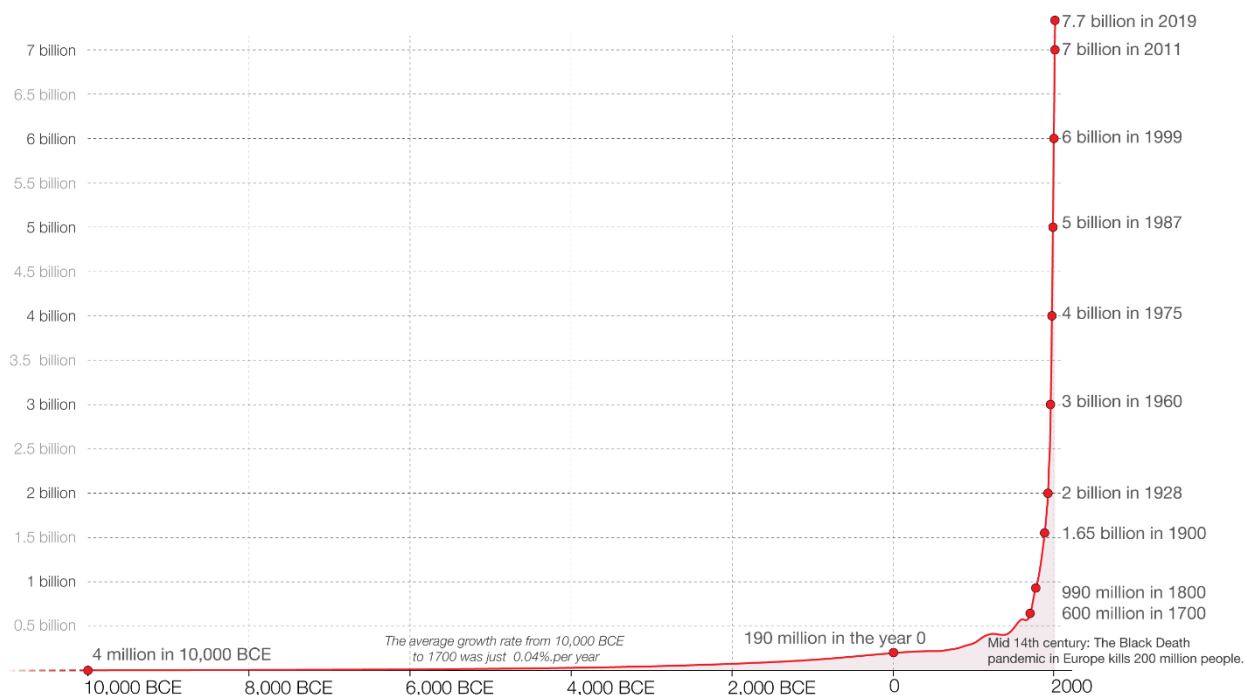


Рис. 32 Рост численности населения за последние 12000 лет.

Что поразительно в этом графике, так это то, что почти весь этот рост произошел совсем недавно. Исторические демографы подсчитали, что около 1800 года население мира составляло всего около 1 миллиарда человек. Это означает, что в среднем население росло очень медленно за это долгое время с 10 000 до н.э. до 1700 (всего на 0,04% в год). После 1800 года это коренным образом изменилось: население мира составляло около 1 миллиарда в 1800 году и с тех пор увеличилось в 7 раз. В общей сложности на нашей планете когда-либо жили около 108 миллиардов человек. Это означает, что сегодня численность населения составляет 6,5% от общего числа когда-либо рожденных людей.

По итогам вышесказанного очевидно, что темпы роста населения мира изменялись. График (Рис. 33) показывает, что глобальный прирост населения достиг пика в 1962 и 1963 годах с ежегодным приростом 2,2%; но с тех пор рост населения мира сократился вдвое. Последние полвека, начиная с 1960-х гг, темп роста численности населения снижается. Например, ООН прогнозирует, что этот спад продолжится и в ближайшие десятилетия.

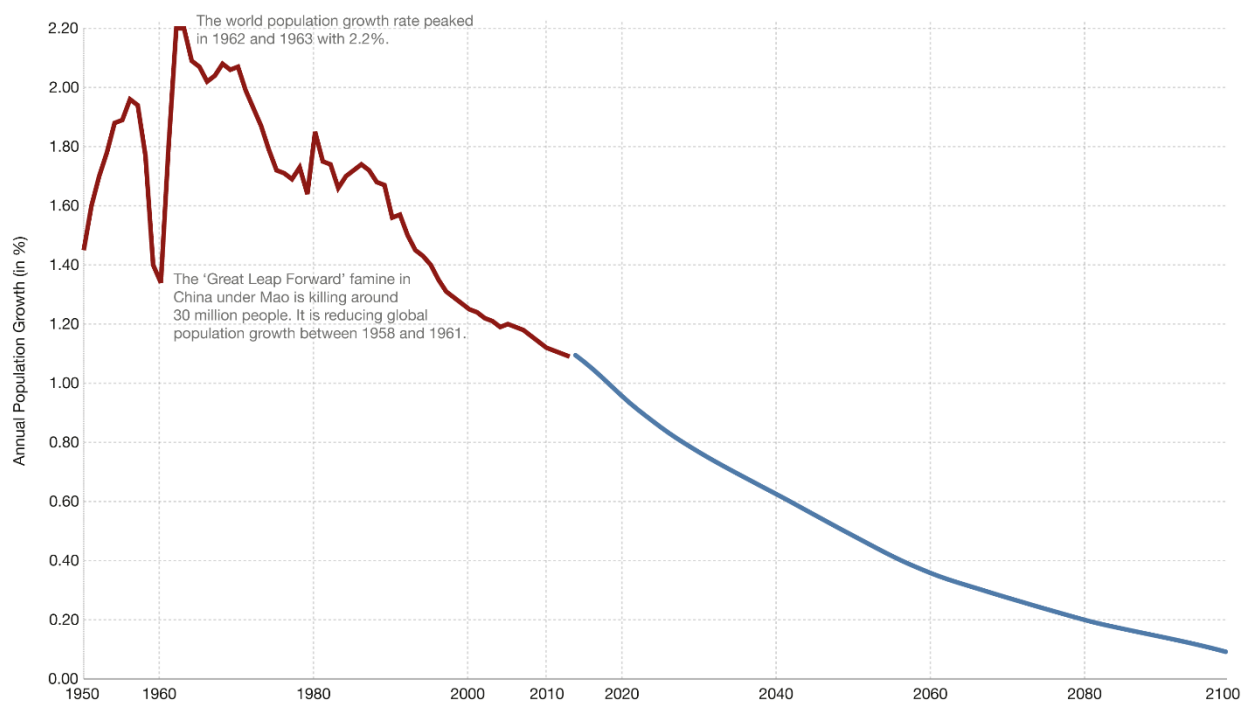


Рис. 33 Годовой прирост населения мира.

Как рост населения изменился по всему миру? Есть две метрики, которые мы можем использовать для этой оценки:

- (1) «Естественный прирост населения»: это изменение в населении, определяемое только рождением и смертью, т.е. миграционные потоки не учитываются.
- (2) Темпы роста населения: это изменение численности населения, определяемое по рождаемости, смерти и миграционным потокам.

Иллюстрации темпа роста населения и естественного прироста населения приведены на Рис. 34.

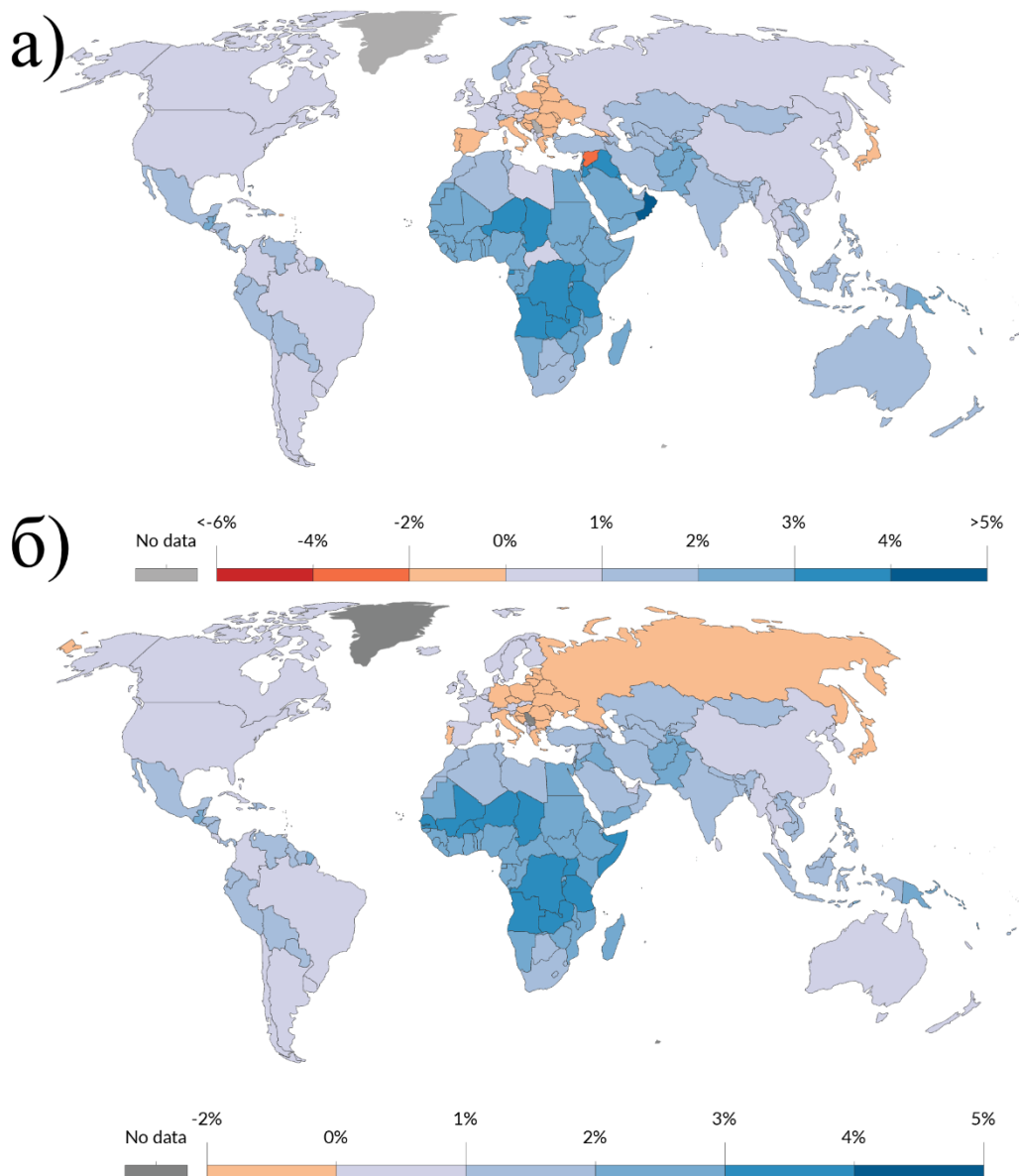


Рис. 34 Темпы роста населения мира: с учетом рождаемости, смертности и миграционных потоков (а); с учетом лишь рождаемости и смертности.

На представленных картах видно, что в некоторых странах сегодня естественный прирост населения (не считая миграции) отрицателен: число смертей превышает количество рождений. Однако, если посмотреть на цифры за прошлые годы, можно с уверенностью сказать, что это новое явление: до 1970-х годов стран с отрицательным естественным приростом населения не было. Таким образом тот факт, что во всем мире рост населения замедляется, неоспорим.

В целом, нужно отметить, что темпы роста в большинстве стран снижались уже с 1960-х годов. Тем не менее есть существенные различия между странами и регионами. К примеру, несмотря на то что темпы роста в Западной Европе в настоящее время близки к нулю, темпы роста в странах Африки к югу от Сахары остаются выше 3%, то есть все еще выше, чем пиковые темпы роста, зафиксированные в мире в начале 1960-х годов. Более того, во многих случаях наблюдаются значительные расхождения и в темпах роста. Например, в то время как в 1960 году в Индии и Нигерии были одинаковые темпы роста (около 1,7%), в последующие годы они пошли совершенно разными путями, и в настоящее время численность населения растет очень разными темпами (а это около 1,26% для Индии и целых с 2,67% для Нигерии).

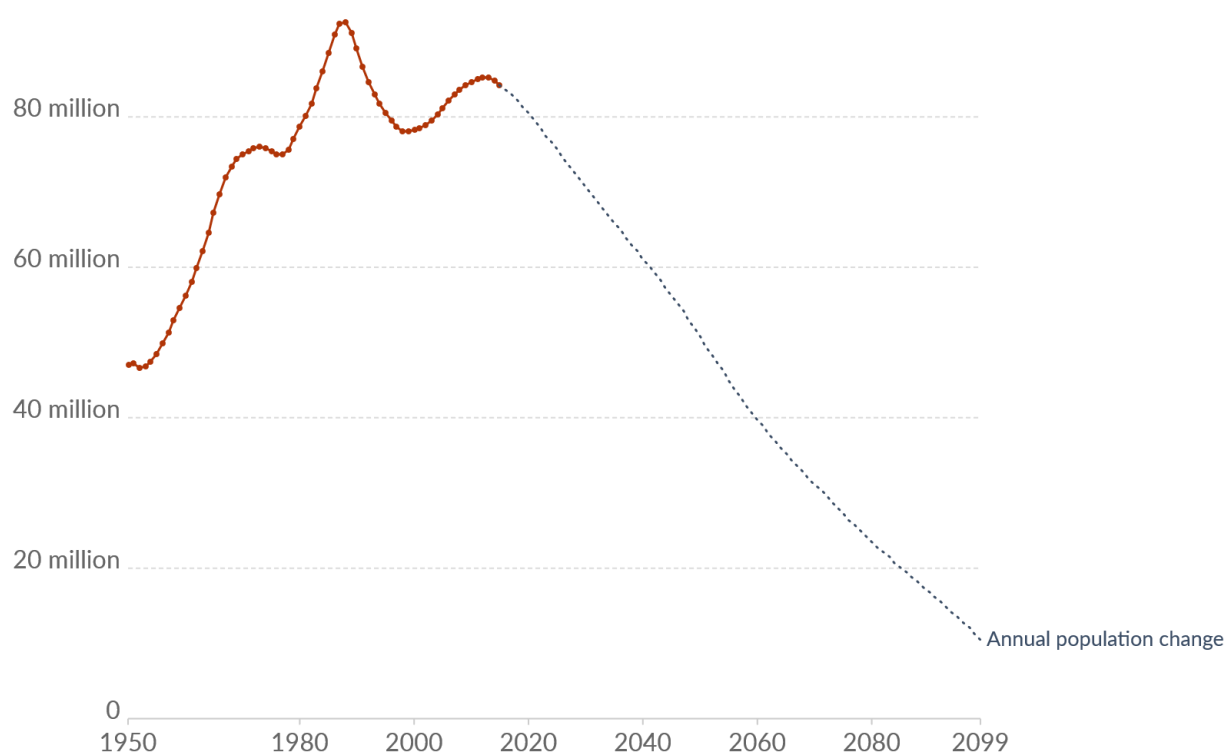


Рис. 35 Оценка абсолютного изменения численности населения.

А теперь посмотрите, каким образом соотносятся указанные темпы роста с абсолютными значениями изменений численности в год. Этот график (Рис. 35), собственно, показывает ежегодный рост населения Земли с 1950 года по сегодняшний день, а также прогноз этого прироста до конца этого столетия.

Как вы видите, абсолютный прирост населения в год достиг своего пика в конце 1980-х годов и составил более 90 миллионов человек в год. Подобные высокие значения сохранялись до настоящего времени, однако сейчас, по оценкам ООН мир ожидает сокращение ежегодного прироста примерно на 1 миллион каждый год.

### 8.3. Демография народонаселения в эпоху новейшей истории

Как было сказано ранее, в 1950 году численность населения составляла 2,5 миллиарда человек. В 2019 году их насчитывалось уже 7,7 миллиарда. К концу столетия ООН ожидает, что население мира составит 11,2 миллиарда человек. На рисунке (Рис. 36) представлена визуализация популяционной пирамиды, которая поможет нам понять эту огромную глобальную трансформацию.

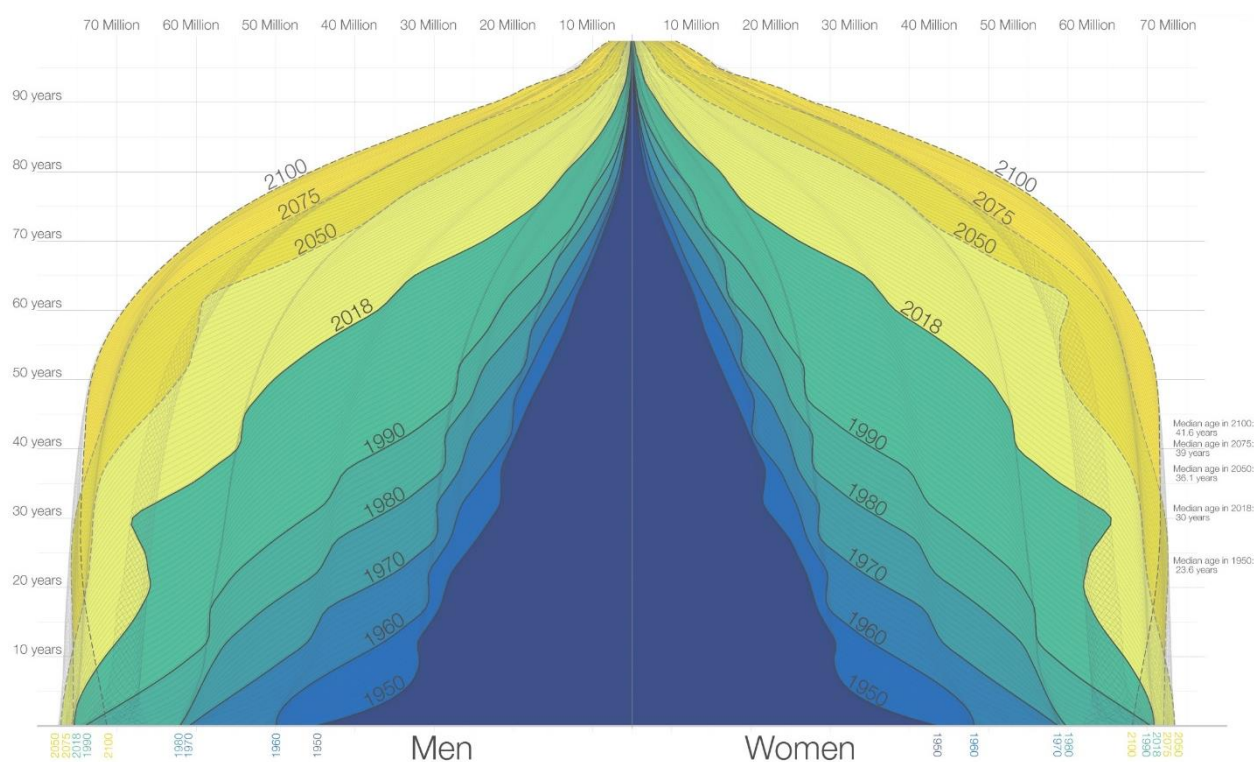


Рис. 36 Визуализация популяционной пирамиды.

Вообще, популяционные пирамиды визуализируют демографическую структуру населения. Ширина представляет размер населения данного возраста; статистические данные женской половины населения представлены справа от центра пирамиды, а мужской – слева. Нижний слой представляет количество новорожденных, чем старше население, тем выше

репрезентующая их информация расположена на пирамиде. Представленная таким образом структура населения с высокими показателями смертности напоминала пирамиду – так этот знаменитый тип визуализации получил свое название. Темным синим цветом выделена пирамида, которая представляет структуру мирового населения в 1950 году. Два фактора были ответственны за форму данной пирамиды в 1950 году: во-первых, растущее число рождений, которое расширило базовый слой пирамиды населения, а, во-вторых, постоянно высокий риск смерти на протяжении всей жизни (в частности, это видно по сужению пирамиды к вершине). Т.е. в это время было много новорожденных относительно количества людей в более старшем возрасте. Например, сужение пирамиды чуть выше основания свидетельствует о том, что более 1 из 5 детей 1950 года рождения умерли до достижения пятилетнего возраста.

Через оттенки синего и зеленого эта же визуализация показывает структуру населения за последние десятилетия до 2018 года. Вы видите, что в каждое последующее десятилетие пирамида населения была толще, чем раньше, это значит, что в каждое десятилетие к населению мира добавлялось больше людей всех возрастов. Если посмотреть на зеленую пирамиду 2018 года, то можно заметить, что сужение над основанием гораздо менее сильное, чем в 1950 году; таким образом, уровень детской смертности снизился с 1 к 5 в 1950 году до менее 1 к 20 в настоящее время.

Сравнивая 1950 и 2018 годы, можно заметить, что число рожденных детей увеличилось – с 97 миллионов в 1950 году до 143 миллионов сегодня – и, как уже было сказано, в то же время снизилась смертность детей. Если сейчас сравнить основание пирамиды в 2018 году с прогнозом на 2100 год, то заметно, что ближайшие десятилетия ни коим образом не будут напоминать прошлое: согласно прогнозам, в конце этого столетия будет рождено меньше детей, чем сегодня. Основа будущей структуры населения более узкая (если увидите, то у основания она прорисована пунктиром).

Выходит, что мы находимся на переломном этапе мировой истории народонаселения. Между 1950 и сегодняшним днем происходило постепенное расширение всей пирамиды, в частности, увеличивалось количество детей, что было главной причиной увеличения населения мира. Однако отныне это не расширение основания пирамиды, а, так сказать, «пополнение» населения над базой: на диаграмме можно увидеть, что по прогнозам количество детей едва увеличится, а затем начнет уменьшаться, однако увеличится количество людей трудоспособного возраста и престарелого возраста, притом очень существенно. Поскольку глобальное здоровье улучшается, а смертность падает, ожидается, что живущие сегодня люди будут жить дольше, чем любое поколение до нас.

Вообще, на уровне страны за пиком рождаемости часто следует время, когда страна получает, т.н. «демографический дивиденд», когда доля зависимого молодого поколения падает, а доля населения в трудоспособном возрасте увеличивается. Это то сейчас и происходит в глобальном масштабе. Например, в 1950 году на каждого ребенка в возрасте до 15 лет приходилось 1.8 человека трудоспособного возраста (от 15 до 64 лет); сегодня их 2.5; и к концу века будет 3.4. Более богатые страны уже извлекли выгоду из этого перехода, однако, у него есть и другая сторона: в последние десятилетия и в настоящее время они уже сталкиваются с демографической проблемой растущей доли пенсионеров, которые не вносят свой вклад в рынок труда. А в ближайшие десятилетия это будут уже более бедные страны, которые смогут извлечь выгоду из этого демографического дивиденда.

Изменение с 1950 года по сегодняшний день и прогнозы до 2100 года показывают, что население мира становится здоровее. Когда вершина пирамиды становится шире и выглядит не так, как пирамида, а вместо этого становится более, так скажем похоже на квадрат, это как раз и значит, что население живет в более молодом возрасте с очень низким риском смерти и умирает в старости. Демографическая структура здорового населения на

заключительном этапе демографического перехода – это квадрат, которую мы и видим для всего мира на 2100 год.

#### **8.4. Демографический пререход**

Давайте разберемся почему все-таки быстрый рост населения является временным явлением?

Рост населения определяется показателями рождаемости и смертности, и в каждой стране произошли очень существенные изменения в обоих параметрах. Однако снижение показателей смертности и показателей рождаемости само по себе не может объяснить, почему население увеличивается. Если бы они произошли в одно и то же время, темпы роста населения не изменились бы при этом переходе. Здесь важно время, за которое изменяются смертность и рождаемость.

Модель, которая объясняет, почему происходит быстрый рост населения, называется «демографическим переходом». Именно она показана схематически на Рис. 37. Это, надо сказать, красивая и простая модель, которая описывает наблюдаемую закономерность в странах по всему миру и является одним из главных достижений демографии. Фактически, демографический переход представляет собой последовательность из пяти этапов:

1) Этап 1: это высокая смертность и высокий уровень рождаемости.

В течение длительного времени, предшествующего быстрому росту населения, уровень рождаемости среди населения высок, но, поскольку уровень смертности также высок, мы не наблюдаем или наблюдаем очень небольшой рост населения.

Это описывает реальность на протяжении большей части нашей истории. В течение многих тысячелетий общества во всем мире оставались на первом этапе, что свидетельствует о долгосрочной перспективе крайне медленного роста населения. На этом этапе популяционная пирамида является широкой у основания, но поскольку уровень смертности высок во всех возрастах - и риск смерти особенно высок для детей - пирамида становится намного уже к вершине.

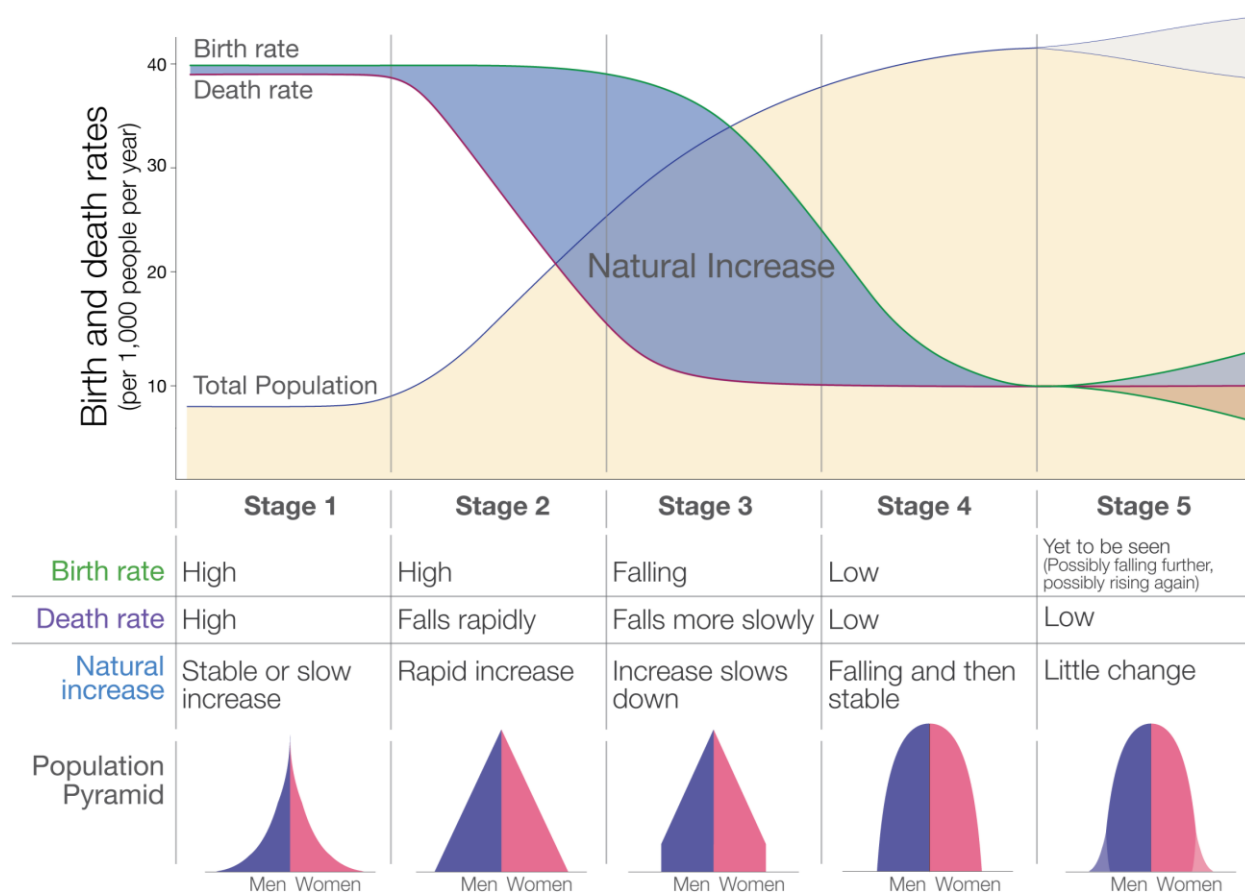


Рис. 37 Визуализация этапов демографического перехода.

2) Этап 2: смертность падает, но рождаемость все еще высока.

На втором этапе здоровье населения постепенно начинает улучшаться, и уровень смертности начинает падать. Поскольку здоровье населения уже улучшилось, но рождаемость все еще остается такой же высокой, как и раньше, это этап перехода, на котором численность населения начинает быстро расти. Исторически сложилось, что это исключительное время, когда большая семья со многими (прошу заметить, выжившими) детьми является обычной.

3) Этап 3: низкая смертность и падение рождаемости.

Позднее рождаемость начинает падать, и, следовательно, темпы роста населения также начинают снижаться. Почему уровень рождаемости падает – это вопрос отдельный вопрос. Однако главная мысль заключается в следующем: когда смертность детей не так высока, как это было раньше, родители приспосабливаются к более здоровой среде и предпочитают иметь меньше детей; в экономике происходят структурные изменения, которые

делают детей менее экономически ценными; и, соответственно, женщины имеют меньше детей, чем раньше.

4) Этап 4: низкая смертность и низкая рождаемость.

Быстрый рост населения заканчивается на 4-й стадии, поскольку уровень рождаемости падает до уровня, аналогичного уже низкому уровню смертности. Пирамида населения теперь имеет форму квадрата; поскольку уровень смертности в молодом возрасте сейчас очень низок, молодые слои в пирамиде сейчас очень похожи по размеру, и только в пожилом возрасте они очень быстро уменьшаются.

5) Этап 5: низкая смертность и некоторые признаки повышения рождаемости.

Демографический переход описывает изменения в ходе социально-экономической модернизации. То есть это то, что происходит на очень высоком уровне развития, и по сути не является вопросом, на который можно с уверенностью ответить, поскольку лишь немногие общества достигли этой стадии. Однако существуют некоторые убедительные доказательства, что при очень высоких уровнях развития рождаемость снова растет. Конечно показатели рождаемости не достигнут тех высот, что были ранее, но вполне могут достичь 2х детей на одну женщину.

Какой именно уровень рождаемости будет достигнут, имеет решающее значение для вопроса о том, что произойдет с ростом населения в долгосрочной перспективе. Если коэффициент рождаемости останется ниже 2 детей на женщину, то в долгосрочной перспективе мы увидим уменьшение численности населения. Если уровень рождаемости действительно превысит 2 ребенка на женщину, то мы, соответственно, увидим медленный долгосрочный рост численности населения. Если бы рождаемость шла в ногу со смертностью, мы бы вообще не увидели прироста населения. Демографический переход происходит через синхронизацию двух фундаментальных демографических изменений: снижение уровня смертности, сопровождающееся снижением уровня рождаемости. Это именно

то снижение уровня смертности, сопровождаемое снижением рождаемости, что мы наблюдаем с большой регулярностью и оно не зависит от культуры или религии населения.

На диаграмме (Рис. 38) представлены эмпирические данные о демографическом переходе для пяти совершенно разных стран Европы, Латинской Америки, Африки и Азии. Во всех странах наблюдается характер демографического перехода: сначала снижение смертности, который, в свою очередь, начинает демографический бум, а затем снижение рождаемости, которое завершает демографический бум, таким образом, популяционный бум – это временное событие.

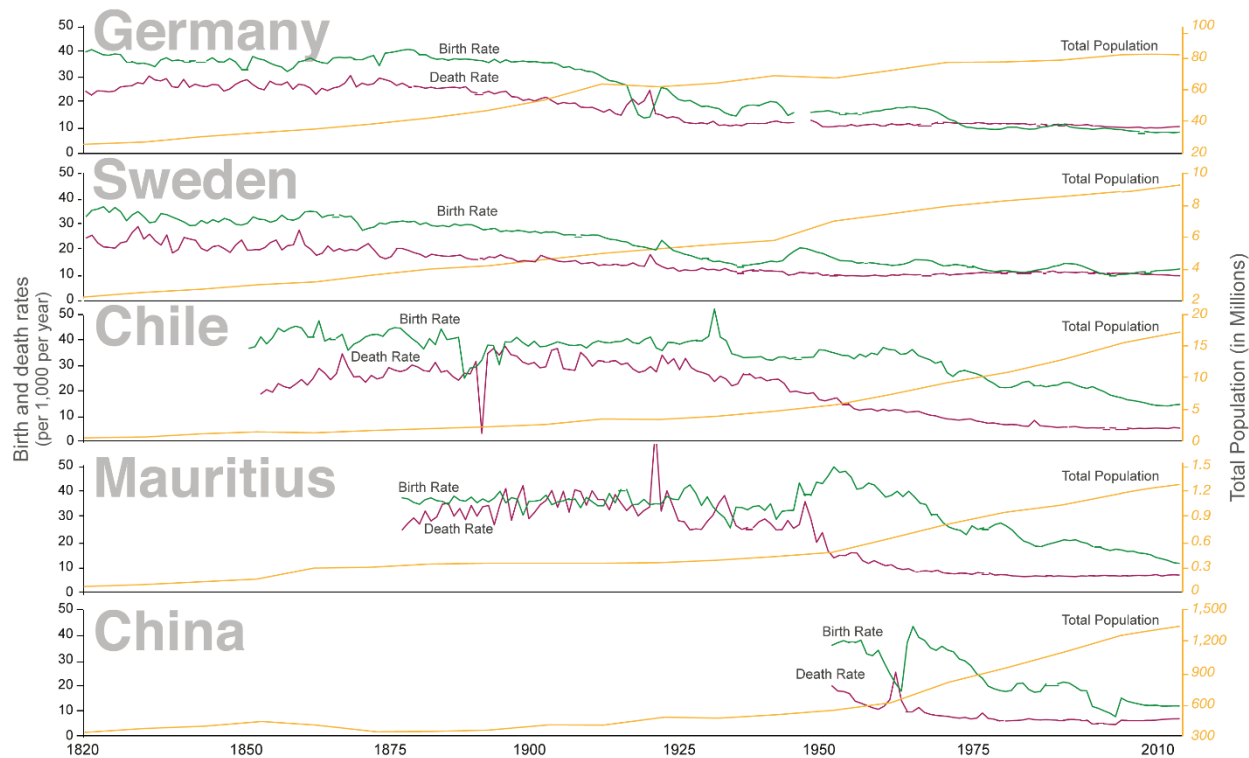


Рис. 38 Эмпирические данные о демографическом переходе для Германии, Швеции, Чили, Маврикий и Китая.

В прошлом численность населения оставалась неизменной из-за высокой смертности, теперь же страна за страной движется в мир, в котором население находится в состоянии застоя из-за низкой рождаемости.

### 8.5. Демографический импульс

Однако, возникает закономерный вопрос: если число детей не растет, то почему население все еще увеличивается?

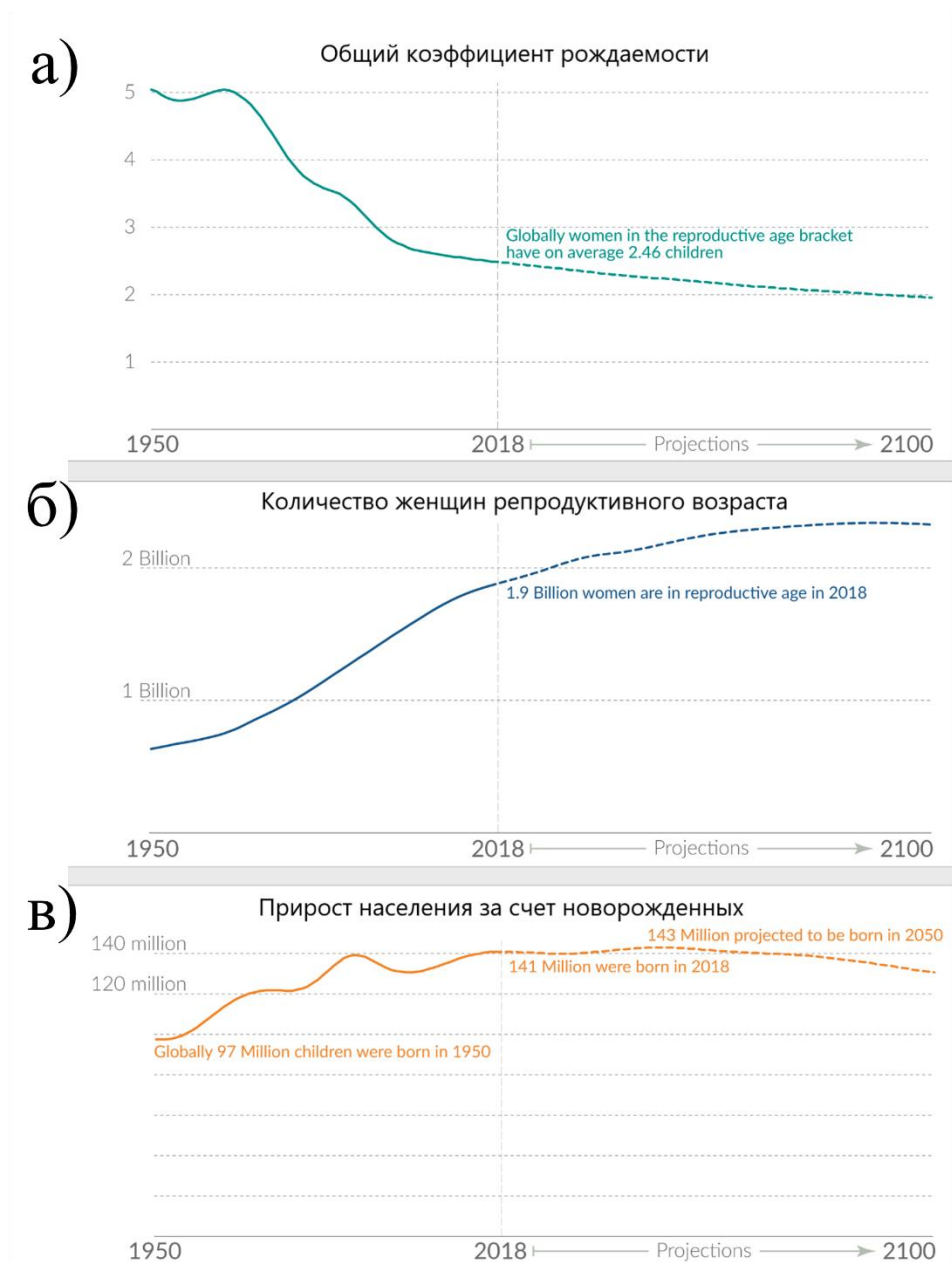


Рис. 39 Динамика факторов, влияющих на демографию: а – общий коэффициент рождаемости, б – количество женщин репродуктивного возраста, в – прирост населения засчет новорожденных.

Обратите внимание на график (Рис. 39, а) – в 1965 году у средней женщины на планете было 5 детей. Спустя 50 лет эта статистика, называемая общим уровнем рождаемости, упала до половины. Общий коэффициент рождаемости, при котором население заменяет себя от одного поколения к другому, называется коэффициентом рождаемости. Если бы ни один ребенок не умер до того, как он вырос, чтобы иметь детей, коэффициент воспроизводственной рождаемости был бы равен 2. Но поскольку некоторые дети умирают,

глобальный коэффициент воспроизводимой рождаемости в настоящее время составляет 2.3 и, следовательно, находится лишь немного ниже, чем фактический глобальный коэффициент рождаемости. Почему же тогда глобальный рост населения еще не заканчивается?

Число рождений на одну женщину в репродуктивном возрасте является лишь одним из двух факторов, которые имеют значение здесь. Второй - количество женщин в репродуктивной возрастной группе. Если в репродуктивном возрасте было мало женщин, число рождений будет низким, даже если коэффициент рождаемости высок. Временами, когда все большая доля женщин попадает в репродуктивную возрастную группу, население может продолжать расти, даже если уровень рождаемости падает. Это то, что демографы называют «демографическим импульсом», и это объясняет, почему число детей в мире не будет уменьшаться так же быстро, как уровень рождаемости. График (Рис.39, б) показывает, что рост населения за последние десятилетия привел к увеличению числа женщин в репродуктивном возрасте. В результате число рождений останется высоким, даже если рождаемость на одну женщину уменьшается. Этот сценарий проиллюстрирован на Рис.39, в. Согласно прогнозам ООН, эти два фактора уравновешивают друг друга, так что число рождений останется близко к текущему уровню в течение многих десятилетий. Прогнозируется также, что показатель рождаемости мало изменится в течение этого столетия. По прогнозам, в середине 21-го века данный показатель достигнет пика в 143 миллиона, а затем к 2100 году постепенно сократится до 131 миллиона.

Предстоящие десятилетия будут сильно отличаться от предыдущих. Хотя с 1950 года ежегодный показатель рождаемости увеличивался на 43 миллиона, мы сейчас близки к моменту в глобальной демографической истории, когда число детей в мире перестает расти.

Популяционный импульс является одним из важнейших факторов высокого роста населения. Но, конечно, также важно, что все мы сегодня живем намного

дольше, чем наши предки всего несколько поколений назад. Ожидаемая продолжительность жизни в два раза больше во всех регионах мира.

Во всем этом важно помнить, что это прогнозы, и то, как на самом деле будет развиваться будущее, будет зависеть от того, что мы делаем сегодня.

## **8.6. Динамика мировой экономической системы**

Главным показателем, характеризующим состояние мировой экономической системы, является валовой внутренний продукт (ВВП) экономики, а также он является мерой общего объема производства. Точнее, это денежная стоимость всех товаров и услуг, произведенных в стране или регионе за определенный период времени. Хотя определение ВВП является простым, точное его измерение на удивление трудное дело. А попытки провести сравнения во времени и за рубежом осложняются из-за разницы в цене, качестве и валютных курсах. Поэтому сейчас мы постараемся рассмотреть основы данных о ВВП и понять некоторые подводные камни, которые могут быть связаны с временными и пространственными сравнениями.

С точки зрения долгосрочной социальной истории мы знаем, что экономическое процветание и устойчивый экономический рост – это совсем недавнее достижение человечества. Поэтому мы рассмотрим это более недавнее время, а также изучим неравенство между различными регионами как в отношении неравных уровней благосостояния сегодня, так и в отношении неравных экономических отправных точек для выхода из нищеты, существовавшей до экономического роста.

Как мы уже поняли, экономическое процветание измеряется через ВВП на душу населения, то есть стоимость всех товаров и услуг, произведенных страной в течение одного года, деленная на численность населения страны. Экономический рост – это, фактически, мера изменения ВВП от года к году. Как вы убедитесь чуть позже, нынешний опыт экономического роста является абсолютным исключением в долгосрочной перспективе человеческой истории. Для начала проясним некоторые моменты истории мирового

экономического роста. И, в первую очередь, безусловно речь идет о периоде развития экономики до экономического роста. Точнее всего данный период можно описать так: в экономике до экономического роста уровень жизни определялся только численностью населения, т.е. не технический прогресс, а именно численность населения определяла уровень жизни.

Давайте рассмотрим динамику ВВП на душу населения на примере Великобритании (Рис. 40).

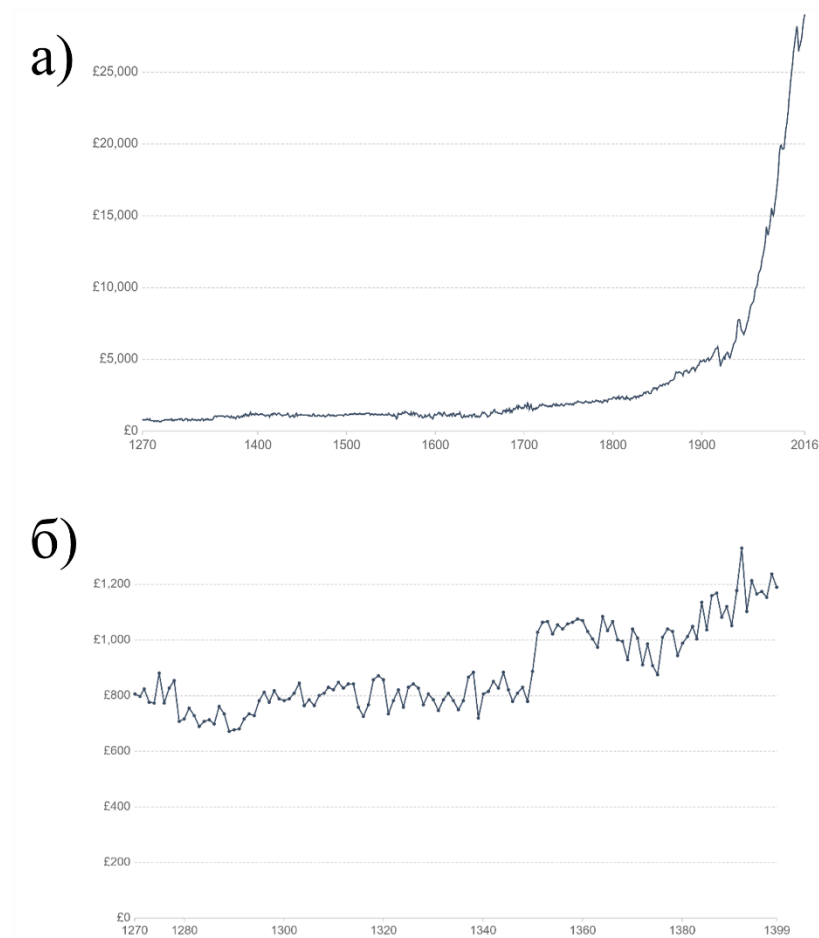


Рис. 40 Динамика ВВП Великобритании в диапазоне от 1270 г до 2016 г (а), и увеличенный фрагмент этой зависимости в диапазоне от 1270 г до 1400 г (б).

На зависимости на Рис.40, б можно заметить, что в начале XIV века уровень доходов значительно вырос. Доходы выросли примерно на треть всего за несколько лет. Это эффект, который чума оказала на доходы англичан. Чума убила почти половину населения Англии. Реально население уменьшилось с 8 миллионов до 4,3 миллиона за три года после 1348 года. Но тем, кто пережил эпидемию, впоследствии стало намного лучше, поскольку смерть соседа

пошла на пользу тем, кто выжил. Это произошло прежде всего потому, что теперь фермеры достигли более высокого урожая. В то время как до чумы фермерам приходилось использовать сельскохозяйственные угодья, которые были менее пригодны для ведения сельского хозяйства, после сокращения численности населения они могли заниматься сельским хозяйством в наиболее продуктивных районах острова. В течение очень долгого времени, когда человечество находилось в, так называемой ловушке мальтузианской экономики: рождаемость и смертность определяли доходы. Эту взаимосвязь дохода и населения легко проследить на графиках на Рис. 41, которые отображают численность населения по оси абсцисс в зависимости от общего объема ВВП (верхний график) и ВВП на душу населения (нижний график). Если обратить внимание на нижний график, легко можно заметить резкое повышение доходов, как раз связанное с резким уменьшением в половину численности населения после чумы.

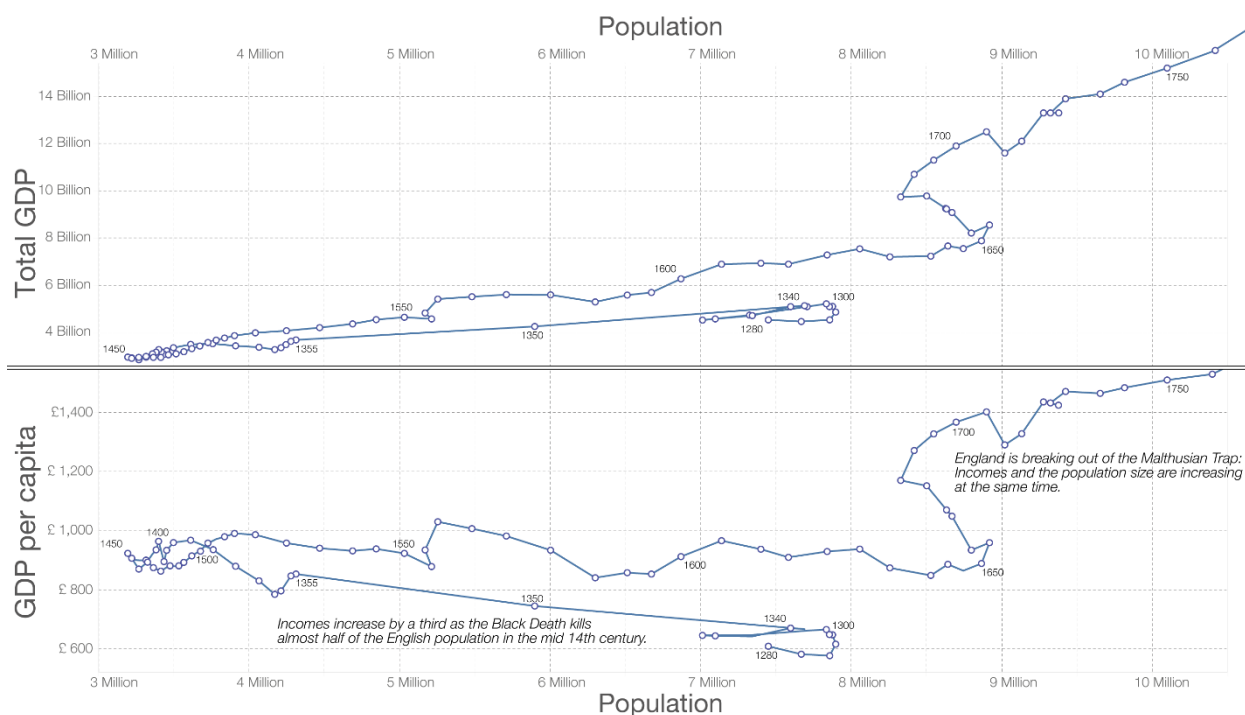


Рис. 41 Общий ВВП в зависимости от численности населения в Великобритании. После этого численность населения и доход на человека не увеличиваются примерно до 1500. В следующий период наблюдается рост экономики: общий ВВП увеличивается более чем на 280% с 1500 г до 1650 г, но это увеличение объема производства никак не повлияло на увеличение доходов на душу

населения, поскольку в то же самое время возрастала и общая численность населения Великобритании.

Только после 1650 года английская экономика вырывается из, т.н. мальтузианской ловушки, т.е. ВВП больше не определяется численностью населения. Мальтузианская ловушка – типичная для доиндустриальных обществ периодически повторяющаяся ситуация, в результате которой рост населения в конечном счёте обгоняет рост производства продуктов питания, ограниченного плодородием почвы (земельными ресурсами). Таким образом мы видим, что в период после 1650 г., что и население, и доход на душу населения растут, а не как было в прошлом – численность населения растёт, а ВВП на душу населения падает. Когда Томас Роберт Мальтус (англ. Thomas Robert Malthus, 1766 - 1834) выразил обеспокоенность по поводу роста населения в 1798 году, он ошибался относительно своего времени и будущего, но он действительно был прав в своем диагнозе динамики своего прошлого.

Мир до Мальтуса был мальтузианским, и рост населения был связан с ухудшением питания, ухудшением здоровья и снижением доходов. А вот мир после Мальтуса становился все менее мальтузианским. Чего Мальтус не предвидел, так это того, что рост производства в экономике будет со временем отделен от изменения численности населения, так что объем производства, доступный для всех, будет увеличиваться в течение длительного периода. Именно это процесс мы и можем наблюдать на нижнем графике в период после 1650 г.

Безусловно именно технологические инновации, которые повышают производительность, стали ключом к росту благосостояния и выходу из эпохи мальтузианской экономики, однако, и до 17 века (т.е. еще в эпоху до экономического роста) в истории были технологические прорывы. Например, ветряные мельницы, ирригационная техника, а также нетехнические новинки, особенно новые культуры из Нового Света. Но почему все эти улучшения не привели к устойчивому экономическому росту?

Ответ на это вопрос достаточно прост. То, что произошло в результате этих нововведений, действительно было увеличением производительности, а увеличение объема производства привело к росту благосостояния, однако этот эффект оказался совершенно недолговечным. Дело в том, что все усовершенствования технологий повысили уровень жизни лишь временно, однако вместе с тем увеличили численность населения на постоянной основе. В итоге технологические усовершенствования приводят к увеличению численности, но не благосостояния населения. В качестве подтверждения этого вывода взгляните на графики на Рис. 42. Они были получены учеными Ашраф и Галор в 2011 г при исследовании мальтузианской экономики теоретически и эмпирически в статье, опубликованной в *American Economic Review*. По оси абсцисс обоих графиков находится продуктивность сельскохозяйственных земель, которая измеряемая качеством почвы и климатом. На Рис. 42, а видно, что в регионах мира с низкой производительностью сельского хозяйства была очень низкая плотность населения. С другой стороны, регионы с самой высокой плотностью населения – это как раз регионы с очень плодородной землей.

График на Рис. 42, б, в свою очередь, показывает, что более высокая продуктивность земли, однако же, не имела значения для уровня жизни людей. Например, сельскохозяйственный сектор в Испании, Индии или Марокко был намного производительнее, чем в Финляндии, Египте и Норвегии, но их доход на душу населения был не самым высоким. Объясняется это просто – более продуктивные регионы были более густонаселенными, и люди там были вынуждены делиться с большим количеством соседей, что приводило к достаточно низкому общему уровню благосостояния.

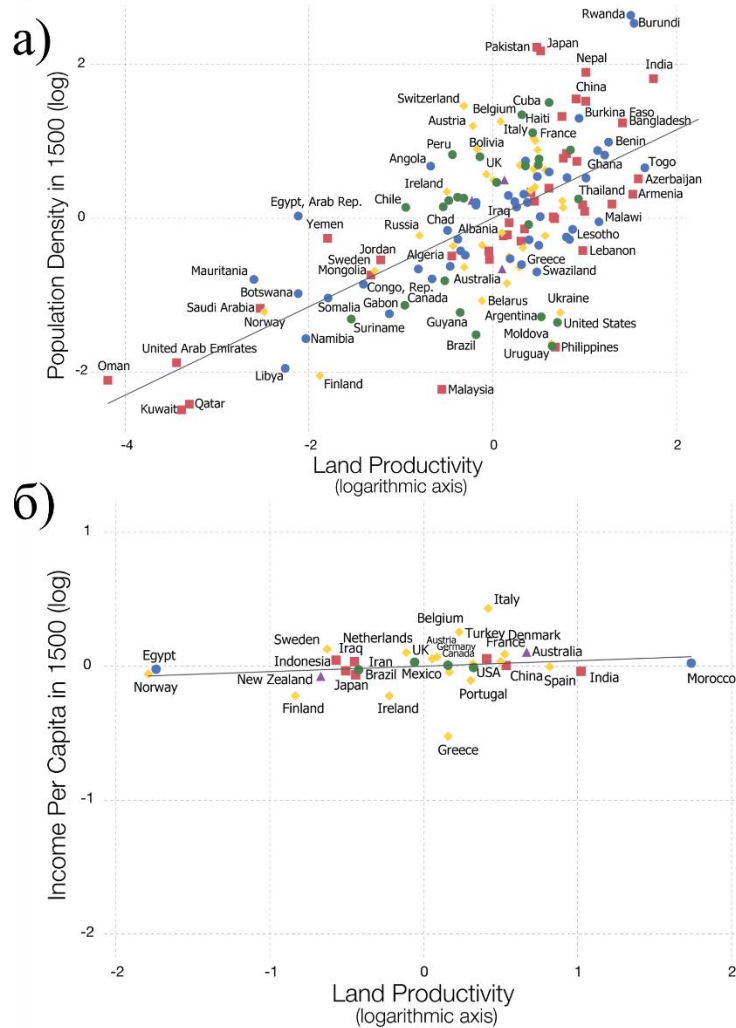


Рис. 42 Частичное влияние продуктивности земли на плотность населения в 1500 году н.э. (а); частичное влияние продуктивности земли на доход на душу населения в 1500 году н.э. (б).

Теперь давайте плавно перейдем к фазе экономического роста в долгосрочной перспективе. На Рис. 43 изображены два графика, которые представляют оценку экономического процветания в долгосрочной перспективе, как они были опубликованы базой данных Maddison Project в 2020 г. На графике на Рис. 43, а показана оценка ВВП на душу населения для некоторых отдельных стран, а на графике на Рис. 43, б та же оценка экономического роста различных регионов мира, но более детально рассмотрен период с 1820 г.

Если внимательно рассмотреть данные графики, то можно понять, что в среднем люди прошлого были во много раз беднее, чем мы сегодня. В 1820 году глобальный ВВП на душу населения, по оценкам, составлял около 1102

долларов в год, и это уже после того, как в некоторых регионах мира был достигнут некоторый экономический рост. За все сотни и даже тысячи лет до 1820 года средний ВВП на душу населения был еще ниже.

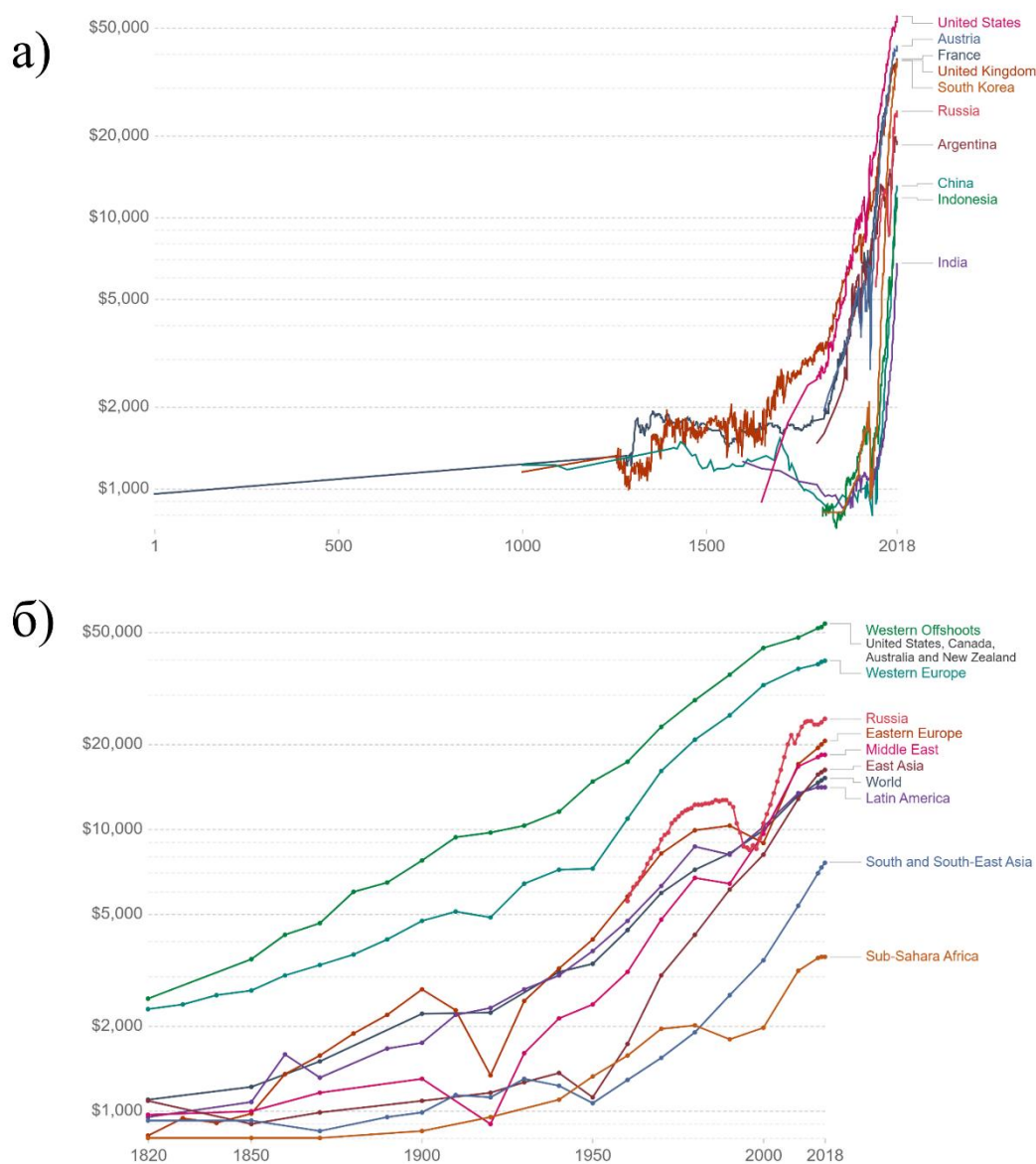


Рис. 43 Оценка экономического процветания в долгосрочной перспективе для различных стран мира в диапазоне от начала нашей эры до 2018 г (а) и увеличенный фрагмент этой зависимости в диапазоне от 1820 г до 2018 г (б).

Таким образом, экономический рост – совсем недавнее достижение человечества, которое отличает последние 10 или 20 поколений от всех их предков. В 2018 году средний ВВП на душу населения составлял 15212 долларов, что почти в 15 раз больше среднего показателя в прошлом. Если сравнить экономический рост каждого региона сегодня с любым более ранним временем, то можно заметить, что каждый отдельный регион богаче, чем

когда-либо прежде в своей истории. Однако этот рост не во всех регионах происходил одинаково быстро. Это привело к существенному неравенству во всем мире.

Теперь рассмотрим уже эпоху экономического роста, а точнее наше время, начиная с 1950 г. И начнем с главных вопросов: какие страны достигли экономического роста и какое это имеет значение? Строго говоря, в настоящее время в среднем человек в мире в настоящее время в 4.4 раза богаче, чем в 1950 году. Однако это только цифры и, конечно, хотелось бы понять, как на самом деле изменились доходы в странах по всему миру? Кто выиграл от экономического роста больше всего, а кто меньше всего? Зачем нам заботиться о росте доходов?

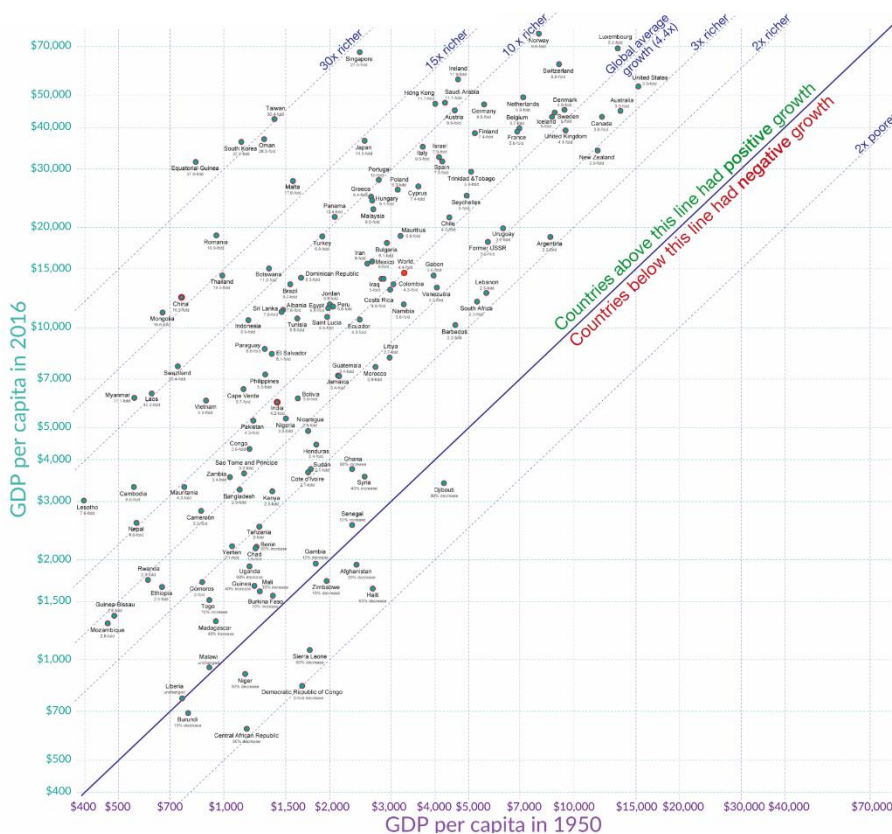


Рис. 44 Изменение ВВП различных стран мира с 1950 г по 2016 г.

На Рис. 44 изображена диаграмма, которая показывает уровень ВВП на душу населения в странах мира в период с 1950 по 2016 год. По вертикальной оси даны данные за 1950 году, а по горизонтальной оси – за 2016 год. Средний мировой показатель можно увидеть в середине графика. Получается, что доход среднестатистического человека в мире увеличился с 3300 долларов в 1950

году до 14 574 долларов в 2016 году. При этом здесь учитывается, что цены на товары и услуги со временем росли (а также присутствует поправка на инфляцию; в противном случае эти сравнения были бы бессмысленными).

Стоит остановить свое внимание на вопросе: каким все-таки образом доходы корректируются с учетом инфляции? Самый простой вариант – рассматривать изменение цены продукта, который обычно покупают все люди во все времена, например, буханку хлеба, и оценить изменения цены на этот продукт с течением времени. Если затем вы обнаружите, что цена на хлеб выросла вдвое за некий период времени, однако ваша заработная плата осталась на том же уровне (т.е. ваш доход остался тем же), тогда вы можете купить только половину этого количества хлеба из своего дохода, и ваш доход в хлебном эквиваленте уменьшится вдвое. В таком случае, уменьшение вашего дохода вдвое в хлебном эквиваленте – это ваш доход, скорректированный с учетом инфляции цен на хлеб. Однако, очевидно, что при измерении цен, полагаясь только на один продукт, возникает существенная проблема: вы можете в конечном итоге выбрать продукт, который не отражает изменения цен на все другие продукты и услуги, которыми пользуются потребители. Например, несмотря на то, что цена на хлеб могла увеличиться, цены на большинство других товаров могли снизиться. Таким образом, идея поправки на инфляцию для доходов состоит в том, чтобы полагаться не на один товар, а на набор товаров и услуг, который является характерным для потребления среднего домохозяйства. Если вы полагаетесь на характерный набор товаров, а не только на хлеб, это позволяет вам корректировать доходы не только на хлеб, но и на стоимость жизни в более широком смысле.

Итак, мы уже выяснили, что средний мировой доход вырос в 4.4 раза, однако, в то же время население мира увеличилось в 3 раза, с примерно 2.5 миллиардов до 7.5 миллиардов сегодня. Это означает, что если бы мировая экономика не росла, трехкратное увеличение населения мира означало бы, что в среднем каждый в мире был бы теперь в три раза беднее, чем в 1950 году.

Иными словами, среднее значение ВВП упало бы в мире до значения 1100 долларов. Однако экономический рост делает возможным то, что каждый может улучшить свое благосостояние, даже если количество людей, нуждающихся в обслуживании экономики, увеличивается.

Теперь вернемся к вопросу какие страны в настоящее время достигли экономического роста? Согласно данным Рис. 44, доходы в мире росли не везде. Если посмотреть на беднейшие страны мира сегодня, то можно увидеть, что эти страны не выделялись и в 1950 году; их доходы были такими же низкими, как доходы многих других стран мира. Однако на сегодняшний момент, в то время как экономика многих стран мира достигла высоких темпов роста, некоторые из них стагнировали примерно на своем уровне с 1950 года. Это те страны, которые остались в нижней части диаграммы. Таким образом, разница между стагнацией или даже упадком в одних местах и быстрым ростом в других ведет к резкому увеличению неравенства в мире, а именно: в настоящее время норвежцы в среднем более чем в 100 раз богаче, чем, например, жители Либерии, Бурунди и Центральноафриканской Республики. Неспособность обеспечить рост экономики и предоставление необходимых товаров и услуг является одной из крупнейших неудач последних десятилетий. Это означает, что население этих мест сейчас находится в гораздо худших условиях, чем люди в остальном мире: они менее здоровы и умирают раньше, их образование значительно хуже, и многие страдают от недоедания.

Тем не менее, экономический рост позволил большей части населения вырваться из условий прошлого, когда подобные условия существования были присущи всем на Земле. К числу данных стран относятся те, кто на диаграмме находится выше диагональной линии. Тайвань – один из самых ярких примеров. В 1950 году доход тайваньцев составлял 1400 долларов. К 2016 же году ВВП на душу населения на Тайване вырос до 42 300 долларов. Сейчас тайваньцы входят в число самых богатых людей мира, и в реальности в 30 раз богаче, чем они были в 1950 году. Трудно представить, что это значило в смысле условий жизни в стране. Возьмем только один пример. Каждый

шестой ребенок, родившийся на Тайване в 1950 году, умирал в возрасте до пяти лет (13%). Сегодня же уровень детской смертности снизился до полпроцента (1 ребенок из 200).

Можно посмотреть на это и с другой стороны, т.е. начать с самых богатых людей в прошлом. В 1950 году страной с самым высоким средним доходом была США с ВВП на душу населения в 15 241 доллар. Если же посмотреть на их доход сегодня, то можно обнаружить, что доход в самой богатой стране в 1950 году очень близок к среднему доходу среднего человека в мире сегодня (14 570 долларов). Сегодня средний человек на планете так же богат, как средний человек в самой богатой стране в 1950 году. И все те страны, у которых сегодня доход выше среднемирового, более благополучны, чем США в 1950 году, к ним можно отнести: Иран, Мексику, Болгарию и т.д. То же самое можно сказать и о здоровье во всем мире. Средняя продолжительность жизни в мире сегодня составляет 71 год, всего на 1 год меньше, чем средняя продолжительность жизни в самых лучших уголках мира в 1950 году.

### **8.7. Контрольные вопросы к Главе 8:**

- 1) В каком году был зафиксирован пик глобального роста населения?
- 2) Какие процессы влияют на темпы роста населения?
- 3) Перечислите и охарактеризуйте стадии демографического перехода.
- 4) Что такое «мальтузианская ловушка»?
- 5) Приведите пример, как можно скорректировать оценку доходов населения, учитывая инфляцию?

## **ГЛАВА 9. Сельскохозяйственные земли и площадь суши, нарушенной деятельностью человека**

### **9.1 Продуктивные территории, сельскохозяйственные земли**

Основное внимание в данной теме будет уделено использованию земель именно в сельском хозяйстве, однако также коротко остановимся и на других способах использования земли, в том числе, например, для населенных пунктов.

Сельское хозяйство является основным видом использования земли. Около половины пригодных для жизни земель в мире используется для сельского хозяйства. Экстенсивное землепользование (увеличение количества продукции без качественного роста, т.е. увеличения урожайности; чаще всего, за счет расширения посевных площадей) оказывает серьезное воздействие на окружающую среду Земли, поскольку сокращает количество дикой природы и угрожает биоразнообразию [23]. Уменьшить воздействие на окружающую среду, а также производить продукты питания с гораздо меньшими затратами позволит, в первую очередь, снижение потребления, т.н. ресурсоемких продуктов и повышение продуктивности земель.

Давайте рассмотрим, каким в настоящее время представляется глобальное землепользование для производства продуктов питания. На протяжении большей части истории человечества большая часть земли представляла собой дикую природу: леса, луга, кустарники и пр. Однако за последние несколько столетий данная ситуация резко изменилась: в большинстве своем дикие места были вытеснены, превратившись в сельскохозяйственные угодья. Если вернуться на 1000 лет назад, то, по оценкам ученых, всего 4 миллиона квадратных километров использовались для сельскохозяйственных нужд на тот момент, а это, в свою очередь, менее 4% пригодной для этих целей территории мира.

На Рис. 45 представлена гистограмма, показывающая распределение глобальной площади суши на 2023 год, а именно: 10% земного шара покрыто

ледниками, а еще 14% - это бесплодная земля, т.е. пустыни, пляжи, песчаные дюны, скалы, а также сухие солончаки (тип почвы, характеризующийся наличием в верхних слоях легкорастворимых солей в таких количествах, препятствующих развитию большинства растений, за исключением растений с высокой солестойкостью, которые также не образуют сомкнутого растительного покрова). В итоге остается только то, что мы называем «обитаемой землей», и, как уже было сказано, половина этой земли используется для сельского хозяйства. Сюда входят: только 38% поверхности Земли – это леса; 13% - кустарники и луга; 3% покрыто пресной водой; а оставшийся 1% - обратите внимание, это в действительности, гораздо меньше, чем многие думают - это застроенная городская территория, которая включает города, поселки, деревни, дороги и прочую человеческую инфраструктуру.

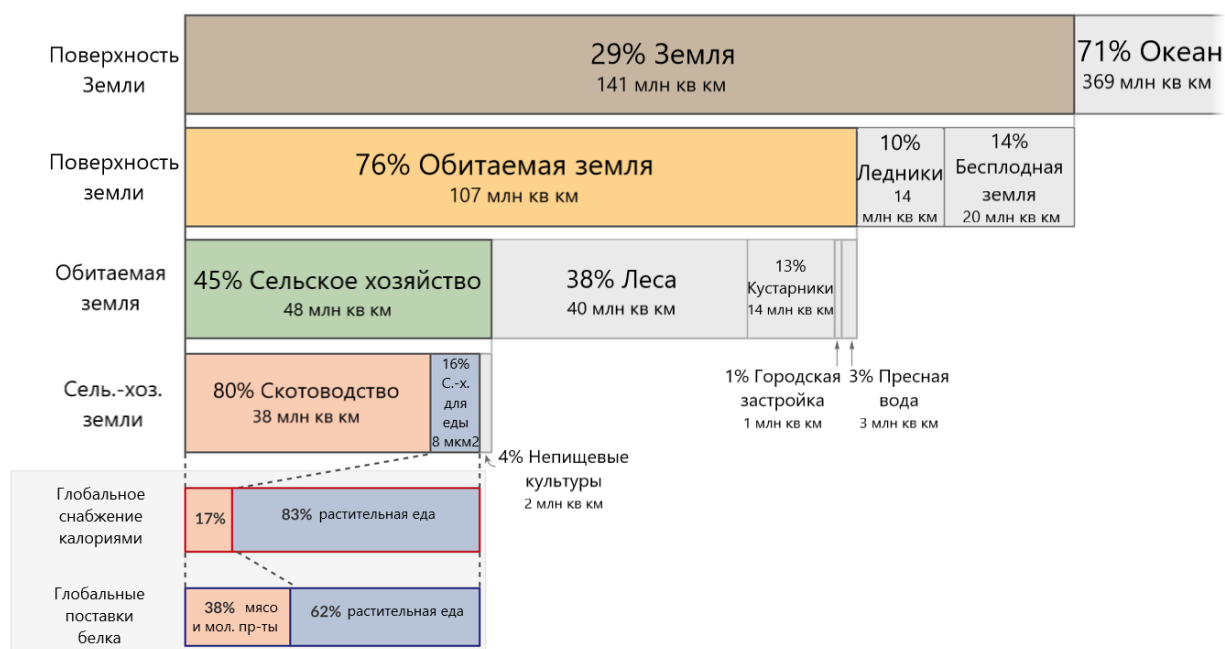


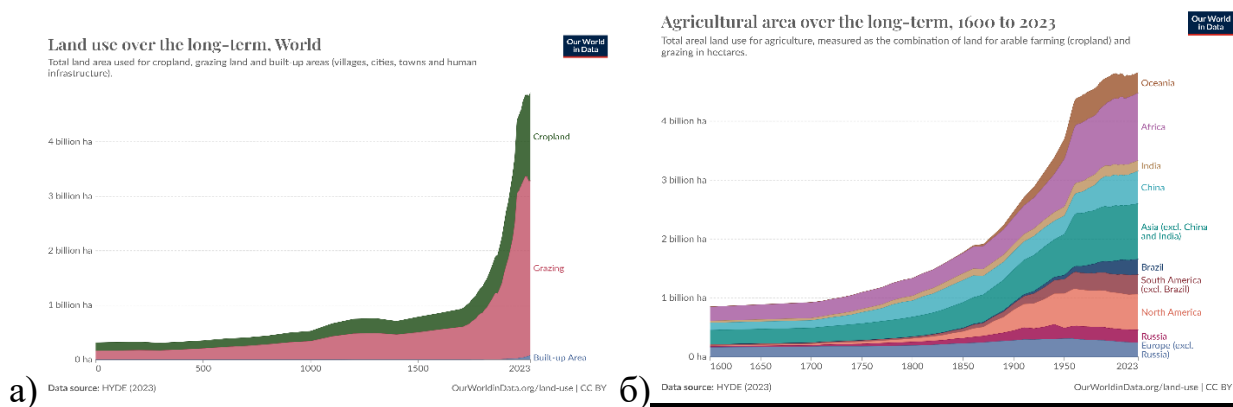
Рис. 45. Глобальное землепользование для производства продуктов питания [23].

Стоит отметить также, что распределение землепользования между животноводством и культурами, которые потребляют люди, тоже весьма неравномерное. Если объединить пастбища, используемые для выпаса скота, и земли, использующиеся для выращивания сельскохозяйственных культур на корм животным, то на домашний скот будет приходиться 80% сельскохозяйственных земель в мире! Причем, обратите внимание, хотя животноводство занимает большую часть сельскохозяйственных земель в

мире, тем не менее, оно производит всего 18% калорий и 38% всего белка, производимого в мире.

В то же время, расширение сельского хозяйства является одним из самых существенных воздействий человечества на окружающую среду. Именно оно изменило среду обитания многих видов и представляет собой один из самых серьезных факторов, влияющих на биоразнообразие: из 28000 видов, которые, по оценке Международного союза охраны природы, находятся под угрозой исчезновения, для 24000 из них сельское хозяйство внесено в список важнейших угроз. С другой стороны, каким образом можно сократить это влияние тоже известно, а именно: за счет изменений в питании, за счет замены части мяса растительными альтернативами, а также за счет технического прогресса. Урожайность сельскохозяйственных культур значительно выросла за последние десятилетия, а это означает, что существенно сокращено количество земель, используемых в сельскохозяйственном производстве: в глобальном масштабе, чтобы произвести такое же количество сельскохозяйственных культур, как, например, в 1961 году, в настоящее время необходимо только 30% тех же площадей, используемых в качестве сельскохозяйственных угодий.

Детальный процесс изменения, как общей площади используемых земель (Рис. 46, а), так и отдельно используемых под сельскохозяйственные угодья (Рис. 46, б), под пахотные земли (Рис. 46, в) и под пастбища (Рис. 46, г) в гектарах вплоть до 2023 года представлен на Рис. 46.



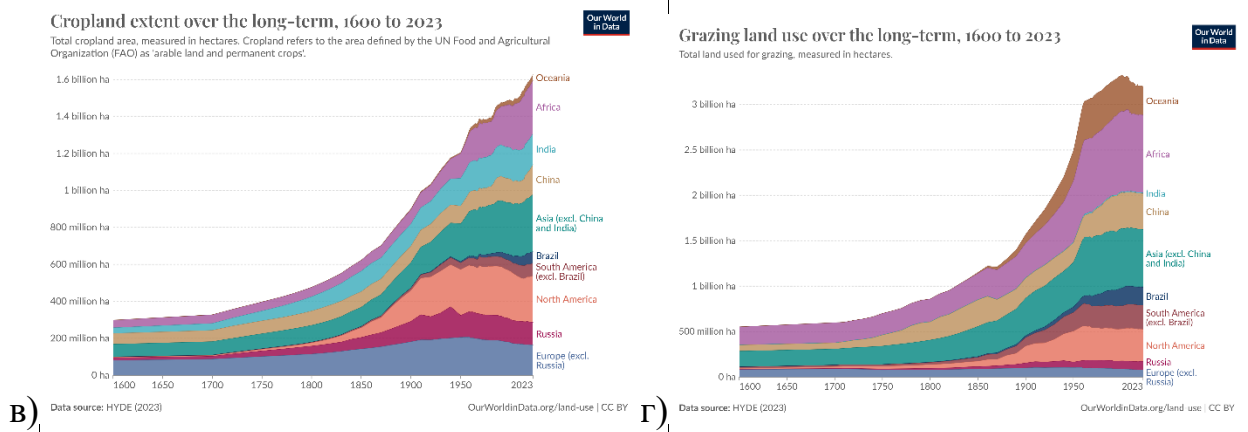


Рис. 46. Изменение глобального землепользования с 1600 по 2023 г. в гектарах  
 а) мирового, б) сельскохозяйственных угодий, в) пахотных земель, г) пастбищ.

Реально человек использует для сельского хозяйства примерно половину мировых пригодных для жизни земель, однако, давайте разберемся, какая часть общей площади земли используется для сельского хозяйства во всем мире? На карте на Рис. 47, а видно долю общей (как жилой, так и нежилой) земельной площади, используемой для сельского хозяйства.

Доля земель, используемых в разных странах для сельского хозяйства, сильно различается. Распределение составляет от менее десяти процентов, особенно в странах Африки к югу от Сахары и в Скандинавском регионе, до почти 80 процентов в большинстве регионов (включая Великобританию, Уругвай, Южную Африку, Нигерию и Саудовскую Аравию). Важно отметить, что этот показатель включает как земли, используемые для пахотных земель, так и пастбища для выпаса скота. Выходит, что доля земель, используемых для сельского хозяйства может занимать значительную часть земельной площади, даже в засушливых регионах, где экстенсивное земледелие невозможно.

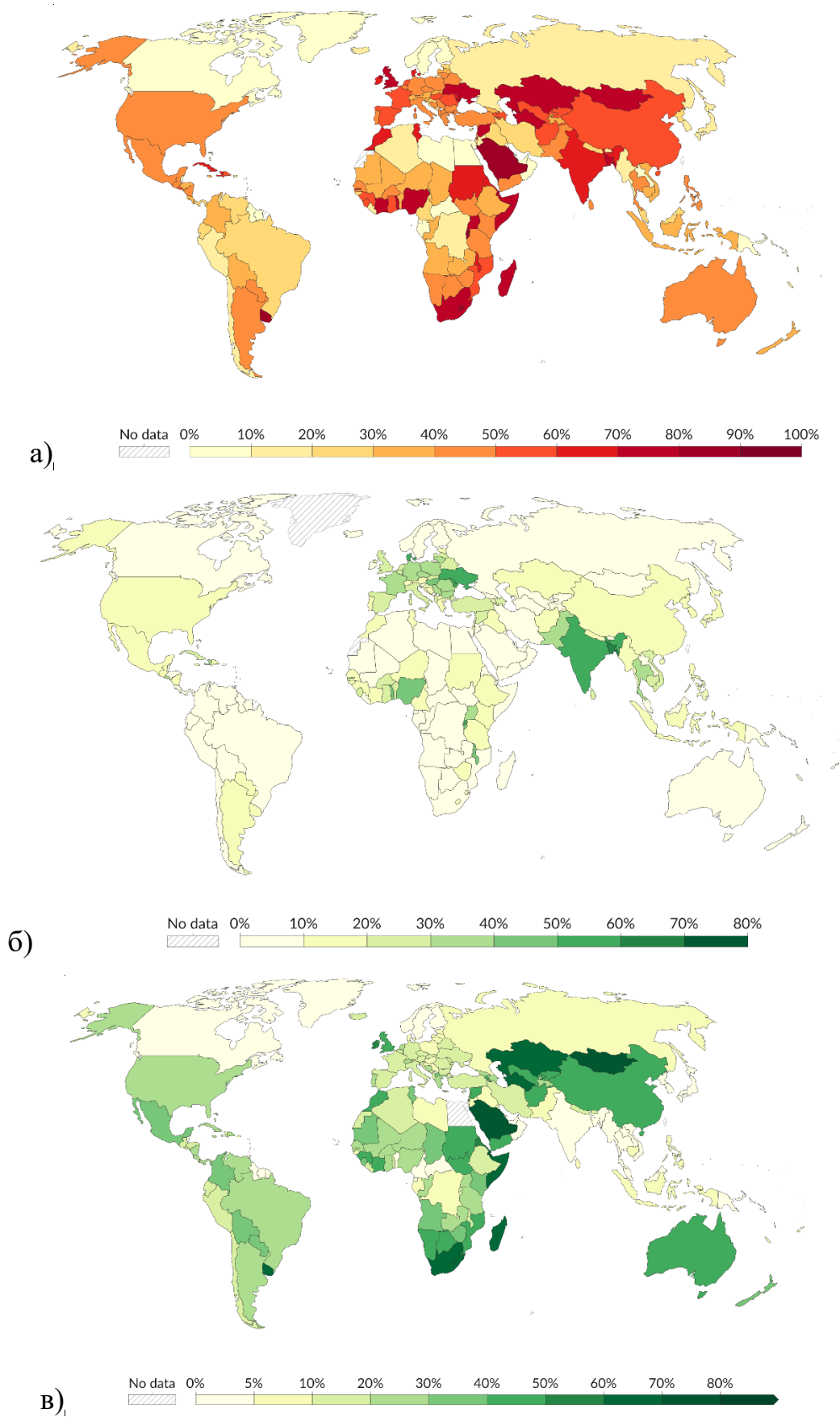


Рис. 47. Распределение земель на 2021 г., используемых для сельского хозяйства (а), для пахотных земель (б) и для постоянных пастбищ (в) менялось с течением времени во всем мире.

Однако, стоит отметить, что данное распределение изменялось с течением времени во всех уголках Земли. За последние несколько десятилетий в большинстве стран мира доля сельскохозяйственных земель медленно увеличивалась, тем не менее землепользование в Европе и Центральной Азии, особенно в зоне Европейского союза (ЕС), а также в Северной Америке постепенно сокращается.

Есть два основных вида использования сельскохозяйственных земель: пахотное земледелие (т.е. земли, предназначенные для выращивания сельскохозяйственных культур) (Рис. 47, б) и пастбища (включая луга и пастбища, используемые для выращивания скота) (Рис. 47, в).

В большинстве стран, как видно из сравнения Рис. 23, б и в, доля земель, используемых для выпаса скота много больше по сравнению с долей пахотных земель. В большинстве стран площадь пахотных земель зачастую составляет менее 20 процентов, а во многих даже менее 10 процентов. Однако, как и в любой сфере нашей жизни, есть существенные исключения. Например, страны Южной Азии и Европы отводят значительную часть своих земель под пахотное земледелие, а Индия, Бангладеш, Украина и Дания по данным 2021 года выделяют более половины общей площади под пахотные земли.

В отличие от земледелия, использование земель для животноводства в Европе и Южной Азии, в частности, составляет менее 20 %. Однако в большинстве континентальных стран пастбища составляют почти половину общей площади, например, в странах Центральной Азии, включая Монголию, Казахстан и Туркменистан, этот показатель может достигать 70 %. Стоит принять во внимание, что животноводство может осуществляться в самых различных климатических и экологических регионах (например, от разведения крупного рогатого скота в регионах с умеренным климатом до овцеводства в холмистой и полусухой местности). Это, в свою очередь, означает, что этот тип сельского хозяйства гораздо менее ограничен географически, чем пахотное земледелие.

## 9.2 Суша, нарушенная деятельностью человека

Биосфера постоянно изменяется под влиянием развития цивилизации. В начале XX века Владимир Иванович Вернадский сформулировал гипотезу ноосферы [24] как равновесной биосферы, преобразованной разумом человека. Однако в реальности развитие цивилизации в XX веке привели не к формированию гармоничной биосферы, а к превращению значительной ее части в техносферу, т.е. биосферу, нарушенную человеком.

В чем же заключается гипотеза ноосферы? По В.И. Вернадскому, «мысль человеческая» - планетарное явление, которое развивается в направлении поиска путей гармонизации отношений человека и природы путем регулирования основных круговоротов веществ [25]. Важной составляющей этой гипотезы является переход человека на автотрофное питание, т.е. происходит замена цепи «солнце - растение (животное) - человек» цепью «солнце - завод - человек». Производство искусственной пищи, по мнению Вернадского, должно было снять проблему голода и обеспечить продовольствием 30 млрд. человек. Однако на сегодняшний день данная гипотеза подвергается серьезной критике. Почему?

Во-первых, «мысль человеческая», к сожалению, развивается в направлении, противоположном прогнозу Вернадского. Она ищет отнюдь не пути гармонизации отношений Человека и Природы, а наоборот – разрабатывает все более изощренные технологии для эксплуатации природы.

Во-вторых, автотрофное питание человека невозможно в принципе, так как получать искусственную пищу человек не научился и, возможно, не научится никогда. Впрочем, если бы это все-таки стало возможным, то это все равно не помогло бы сделать гармоничными отношения человека и природы. Совсем наоборот – снятие продовольственного ограничения с роста численности населения привело бы к разрушению биосферы из-за превышения допустимых пределов потребления всех других ресурсов. К ним можно отнести, например: воду, энергоносители, минеральные вещества, биологическое разнообразие и т.д.

В-третьих, сама идея – заменить естественные процессы саморегуляции в биосфере системой искусственного управления является утопией. Системы с таким огромным количеством параметров, к числу которых относится биосфера, практически невозможно промоделировать. Что это значит? А это значит, что последствия крупных вмешательств человека в природу невозможно спрогнозировать, пример тому — трагедия Арала. (Речь идет о снижении уровня Аральского моря, когда из-за совокупности экологических, биологических, почвенных, климатических и социальных явлений, которые связаны с усыханием Аральского моря и образованием на его месте пустыни Аралкум).

Таким образом, человек может сохраниться только вместе с биосферой, встроив свою хозяйственную деятельность в биосферные циклы. Никита Николаевич Моисеев писал о возможности «коадаптации человека и биосферы» и формирования на этой основе ее некоего «квазиустойчивого состояния» [26]. (Никита Николаевич Моисеев, 1917 - 2000, советский и российский учёный в области общей механики и прикладной математики, академик Академии наук СССР и ВАСХНИЛ). При таком состоянии биосферы изменения круговоротов веществ не будут превышать пороговых значений, за которыми начинаются ее необратимые изменения.

В противовес гипотезе ноосферы В.И. Вернадского в современном мире сформировалась техносфера как часть биосферы, искалеченная нерациональным природопользованием. Понятие техносферы включает в себя все виды нарушений географических оболочек Земли и биосферы. Реальная доля ненарушенных экосистем продолжает уменьшаться, они занимают уже менее 2/3 суши планеты, а в Европе — всего 1/3.

Важнейшим видом ресурсов для человечества продолжают оставаться лесные ресурсы. Они составляют значительную долю биологических ресурсов Земли и относятся к категории возобновляемых, но исчерпаемых природных ресурсов. Лесные ресурсы характеризуются размерами лесной площади мира и запасами древесины [27].

В настоящее время зеленый покров планеты находится в опасности - его площадь значительно уменьшается; наибольших масштабов это достигло в южном поясе. Особенно быстро идет этот процесс в странах Центральной Америки, Карибского бассейна, Юго-Восточной Азии и Западной Африки. В таблице 1 приведены данные о площадях с разрушенными естественными экосистемами для всех континентов Земли, наглядно показывающие те гигантские изменения (в основном – в самых продуктивных экосистемах), которые произвел на суше человек.

Таблица №2. Площади суши с ненарушенными, частично нарушенными и нарушенными естественными экосистемами.

Континент	Общая площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Ненарушенная территория, %	Частично нарушенная территория, %	Нарушенная территория, %
Европа	8759,3	15,6	19,6	64,9
Азия	53311,6	43,5	27,0	29,5
Африка	33985,3	48,9	35,8	15,4
Сев. Америка	26179,9	56,3	18,8	24,9
Юж. Америка	20120,3	62,5	22,5	15,1
Австралия	8487,3	62,3	25,8	12,0
Антарктида	13209,0	100,0	0,0	0,0
Вся суша	162052,7	51,9	24,2	36,3
Вся суша <sup>1</sup>	134904,5	27,0	36,7	36,3
<sup>1</sup> Без учета ледяных, скальных и оголенных поверхностей.				

Принимались следующие критерии для классификации степени нарушенности экосистем: для ненарушенных территорий – наличие естественных растительных покровов (естественных экосистем) и очень низкая плотность населения – менее 10 человек на 1 км<sup>2</sup> и менее 1 человека на 1 км<sup>2</sup> в пустынях, полупустынях и тундре; для частично нарушенных территорий – наличие сменяемых или постоянных сельскохозяйственных земель, вторичной, но естественно восстанавливающейся растительности, повышенная плотность домашнего скота, превышающая возможности пастбищ, другие следы деятельности человека (например, вырубки леса) и невозможность отнесения к первому и третьему классам классификации. Критериями выделения нарушенных территорий служили: наличие постоянных сельскохозяйственных территорий и городских поселений, отсутствие естественной растительности, отличие существующей растительности от естественно присущей данному региону, проявления опустынивания и других видов постоянной деградации [28]. На основе этой классификации построена карта нарушений глобальной экосистемы человеком с разрешением 100 тыс. га.

Причины этого заключаются в следующем [27]:

а) расчистка земель для городских и транспортных нужд и для подсечно-огневого земледелия. Считается, что подсечно-огневая система свела 75% лесов Африки, 50% лесов Азии и 35% лесов Латинской Америки.

б) вырубка лесов с целью получения древесины и использования ее в качестве топлива. По данным ООН, 70% населения развивающихся стран для приготовления пищи и для обогрева жилища используют дрова. Энергетический кризис, прошедший в 70-х годах и приведший к повышению цен на нефть на мировом рынке, привел к интенсивному вырубанию лесов, прежде всего в Африке и Южной Азии.

в) возрастание экспорта тропической древесины из стран Азии, Африки и Латинской Америки в Японию, США и Западную Европу.

Проблема сохранения лесных богатств является глобальной, и решать ее необходимо при широком международном сотрудничестве, так как эта проблема не имеет государственных границ. Действуя в этом направлении, ООН приняла международный документ - «Всемирную стратегию охраны природы».

### **9.3 Контрольные вопросы к Главе 9:**

- 1) Какой процент поверхности суши, пригодной для жизни, приходится на сельскохозяйственные земли?
- 2) Какая деятельность человека является самой существенной в смысле воздействия человечества на окружающую среду? Почему?
- 3) Какие страны по данным 2021 года выделяют более половины общей площади под пахотные земли? А какие – под пастбища?
- 4) Что такое ноосфера и кто сформулировал данную гипотезу?
- 5) Какие доводы существуют в настоящее время, позволяющие опровергать данную гипотезу?
- 6) Какой континент лидирует по площади суши с нарушенными естественными экосистемами?
- 7) Каковы критерии для классификации степени нарушенности экосистем?

## **ГЛАВА 10. Проблема распределения и потребления воды в мире**

### **10.1 Распределение водных ресурсов**

За последние сто лет объем использования пресной воды во всем мире для сельского хозяйства, промышленности и городских нужд увеличился почти в шесть раз (Рис.48) [29]! Все это благодаря значительному росту численности населения, а также увеличению потребности мировой экономики в данном ресурсе. Выходит, что темпы использования пресной воды в мире

резко возросли, начиная с 1950-х годов. Хотя стоит отметить, что с 2000 года они начали стабилизироваться или, по крайней мере, замедляться.

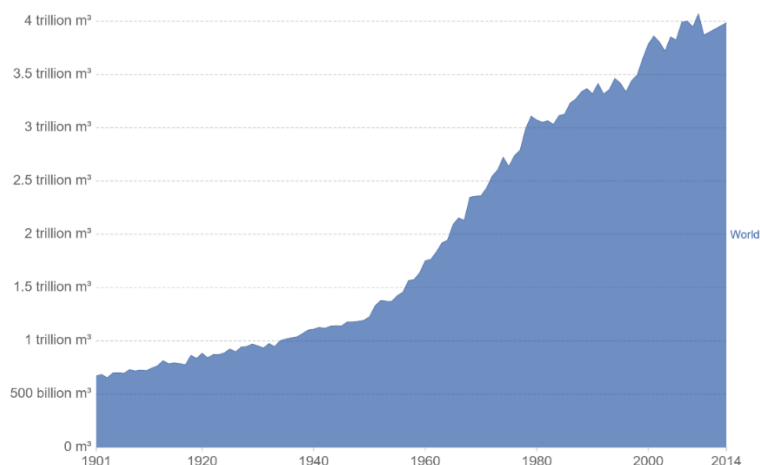


Рис. 48. Глобальное использование пресной воды, 1901 – 2014 гг [29].

Распределение потребления пресной воды по некоторым регионам мира представлено на Рис. 49. Здесь: страны OECD – ОЭСР или организация экономического сотрудничества и развития, в организацию входят 37 государств, в том числе большинство государств ЕС; страны BRICS – БРИКС, Бразилия, Россия, Индия, Китай и ЮАР; и остальной мир (ROW – rest of the world). Несмотря на то, что абсолютное потребление пресной воды за этот период увеличилось, распределение между этими группами стран существенно не изменилось за последнее столетие. Страны ОЭСР используют примерно 20-25 %, страны БРИКС используют самую большую долю - примерно 45 %, и на остальной мир приходится около 30 %.

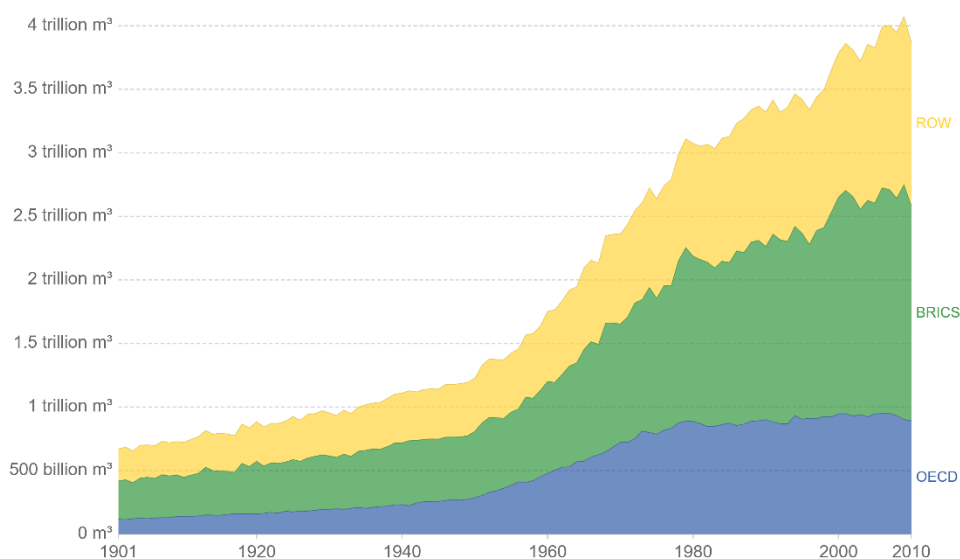


Рис. 49. Использование пресной воды по регионам, 1901-2010 гг [29].

Для того, чтобы поддерживать устойчивый уровень водных ресурсов, нормы водозабора должны быть ниже темпов восполнения запасов пресной воды. Возобновляемые внутренние – это внутренние реки и грунтовые воды, взятые в каждой отдельной стране.

Таким образом, возобновляемые внутренние ресурсы пресной воды являются важным показателем изобилия или дефицита данного ресурса. Если темпы забора пресной воды начинают превышать потоки возобновляемых источников, соответственно ресурсы начинают сокращаться. График на Рис. 50 показывает уровень возобновляемых внутренних ресурсов пресной воды на душу населения. Очевидно, что данный показатель зависит главным образом от двух факторов: общего количества возобновляемых ресурсов и численности населения. Потребление возобновляемых ресурсов на душу населения может существенно сократиться, если их общее количество резко сокращается. Это может произойти, например, в странах, где в течение года сильно меняется количество осадков, скажем, в сезоны муссонов. Точно так же, если общий уровень возобновляемых ресурсов останется неизменным, но показатель на душу населения вполне может уменьшиться, если население страны возрастет. На данном графике мы видим, ровно обратный процесс во многих странах – в результате увеличения численности населения возобновляемые ресурсы на душу населения сокращаются.

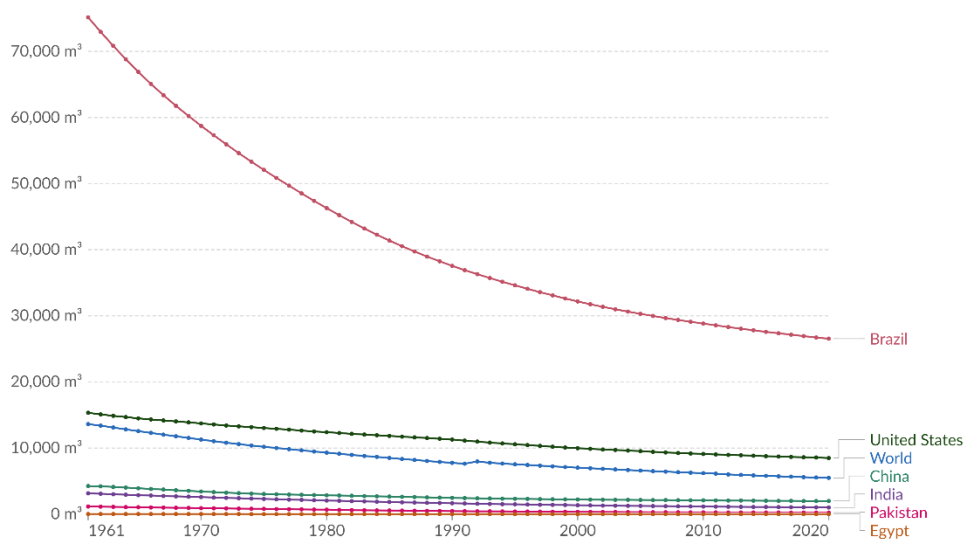


Рис. 50. Уровень возобновляемых внутренних ресурсов пресной воды на душу населения [29].

## 10.2 Потребление воды в мире

Мы уже говорили о сельском хозяйстве в ключе использования земель в Главе 9, теперь стоит сказать пару слов о нем с точки зрения использования пресной воды. Естественно, вода является важным вкладом в мировое сельское хозяйство. На карте на Рис. 51 показан общий объем забора пресной воды, используемой в сельском хозяйстве на 2015 г. для любых целей: для производства продовольственных культур, животноводства, биотоплива или производства других непродовольственных культур. В 2010 году Индия была крупнейшим в мире потребителем воды в сельском хозяйстве - почти 700 миллиардов м<sup>3</sup> в год. Потребление воды в сельском хозяйстве Индии быстро растет реально оно почти удвоилось за период с 1975 по 2010 год, поскольку ее население и общий спрос на продукты питания продолжают расти. Китай является вторым по величине потребителем в мире, объем которого в 2015 году составил около 385 миллиардов м<sup>3</sup>, хотя там данный показатель в недавнем прошлом практически стабилизировался.

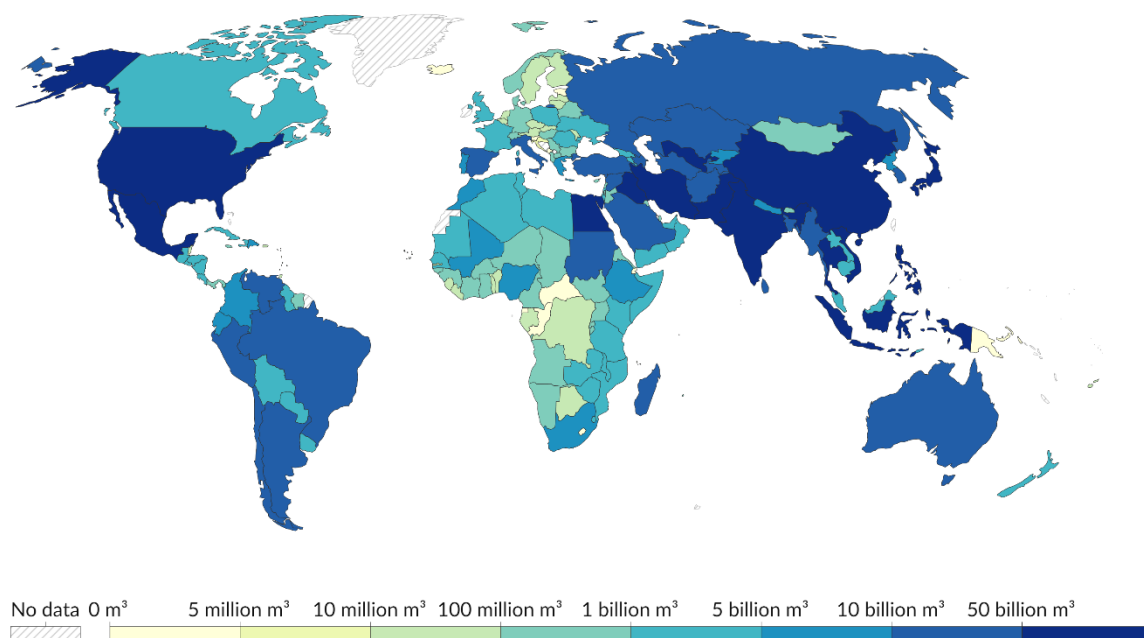


Рис. 51. Использование пресной воды в сельском хозяйстве, 2015 г [29].

С абсолютными показаниями разобрались, а каковы показатели использования пресной воды для сельскохозяйственных нужд по сравнению с промышленными и бытовыми источниками? В глобальном масштабе мы

используем около 70 % от всей используемой пресной воды для сельского хозяйства.

Однако эта доля значительно варьируется в зависимости от страны. Это легко можно оценить по Рис. 52, где отражен процент от общего объема используемой пресной воды, предназначенной только для сельского хозяйства на 2020 г. Легко заметить существенные различия по географическому признаку и по уровню доходов. Например, средний показатель использования воды в сельском хозяйстве для стран с низким уровнем дохода составляет 90 %, со средним уровнем дохода 79 % и всего 41 % для стран с высоким уровнем дохода. В частности, в ряде стран Южной Азии, Африки и Латинской Америки используется более 90 % используемой пресной воды именно для сельского хозяйства. Самый высокий показатель в Судане, который составляет 96 %. Северные страны, как правило, используют гораздо меньшую долю воды для сельского хозяйства; те же Германия и Нидерланды используют менее одного процента.

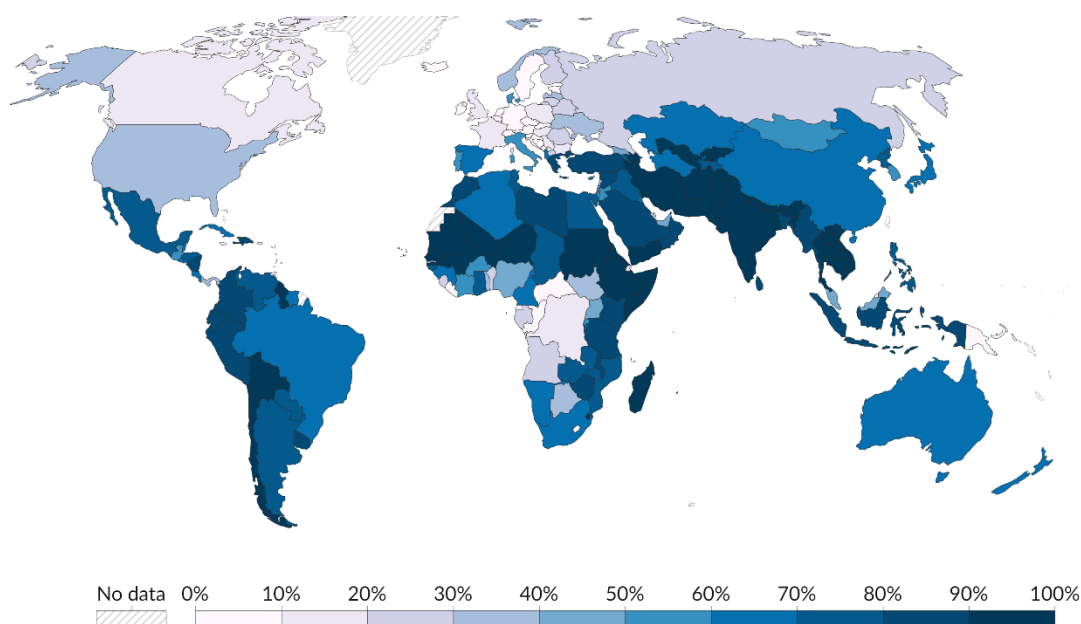


Рис. 52. Доля воды, используемой для сельского хозяйства, от общего показателя потребления пресной воды [29].

Теперь перейдем к использованию пресной воды в промышленности. В данной сфере вода используется в самых различных вариациях, включая разбавление, производство пара, промывку и охлаждение производственного

оборудования. В промышленности вода также используется в качестве охлаждающей воды для выработки энергии на ископаемых видах топлива и атомных электростанциях (производство гидроэлектроэнергии не входит в эту категорию) или в качестве сточных вод при определенных промышленных процессах.

На карте на Рис. 53 показано общее годовое использование воды в сфере промышленности. В мировом масштабе США является рекорсменом по использованию воды в промышленности, забирая более 300 миллиардов кубометров в год. Это значительно больше, чем даже в Китае, занимающим второе место со 140 миллиардами кубометров в год.

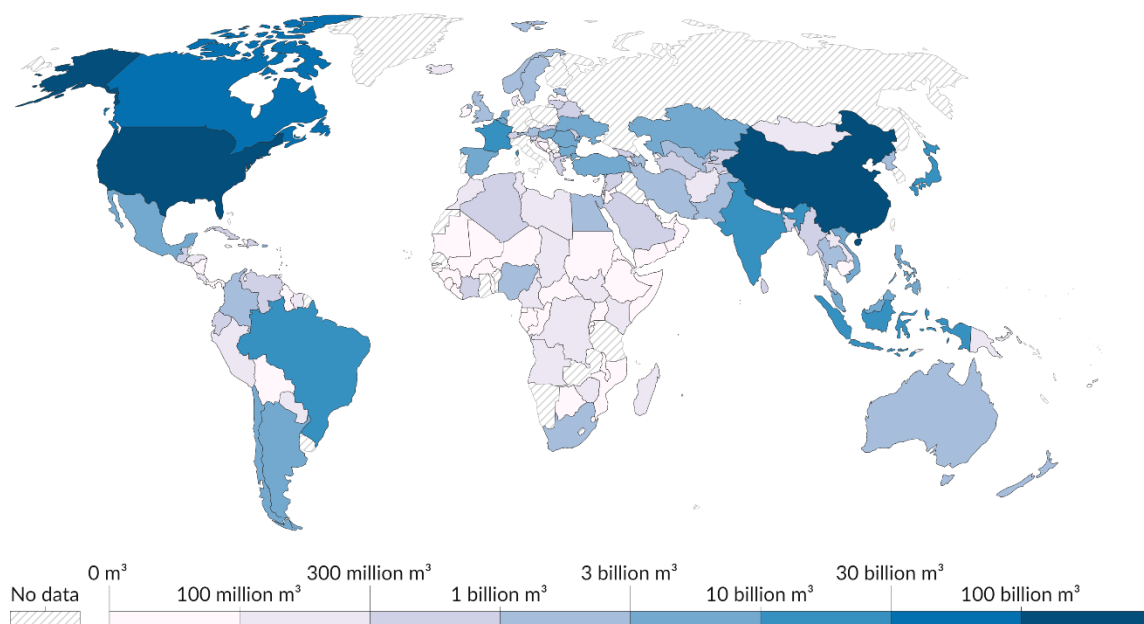


Рис. 53. Использование пресной воды в промышленности, 2015 г [29].

Большинство стран Северной и Южной Америки, Европы и Восточной Азии и Тихого океана ежегодно используют более одного миллиарда кубометров воды в промышленных целях. Данный показатель зачастую существенно ниже в странах Африки к югу от Сахары и в некоторых частях Южной Азии, где в большинстве случаев используется менее 500 млн м³.

Аналогично показателям использования пресной воды для сельского хозяйства, рассмотрим относительные показатели в сфере промышленности – речь идет о доле пресной воды, используемая в промышленности, относительно всей используемой пресной воды на страну в 2020 г. (Рис. 54).

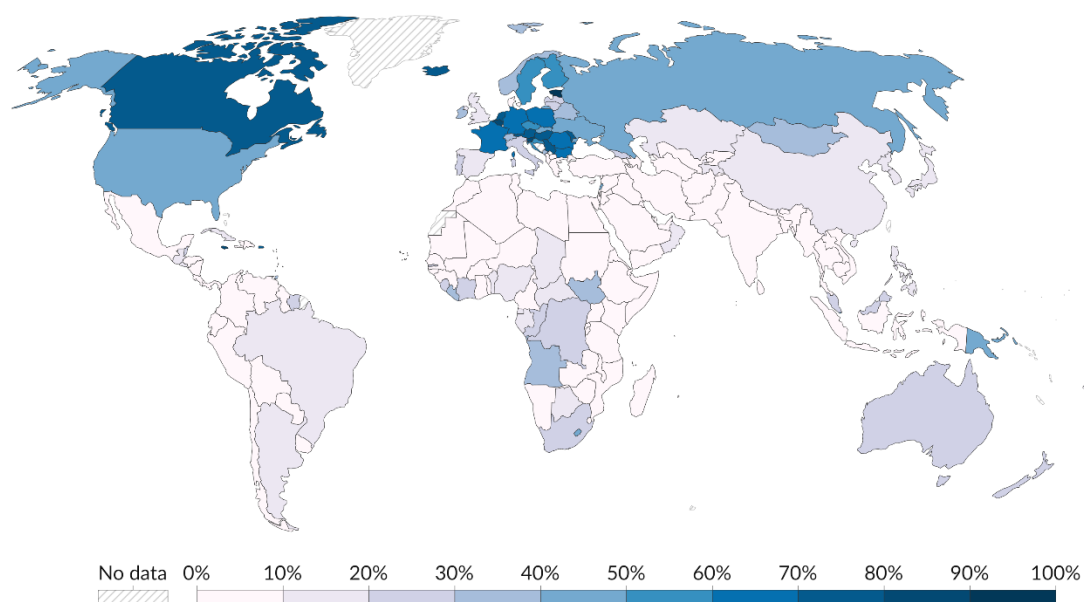


Рис. 54. Доля пресной воды, используемая в промышленности, 2020 г [29].

Во всем мире около 19 % в от общего объема используемой пресной воды применяется для промышленных целей. Данная диаграмма показывает доле пресной воды, используемая в промышленности, относительно всей используемой пресной воды (общее сельскохозяйственное, промышленное и бытовое использование) на страну.

В отличие от мирового распределения использования пресной воды для сельскохозяйственных нужд, доля пресной воды, используемой в промышленности имеет тенденцию преобладать в странах с высоким уровнем доходов (в среднем 17 %) и представляется совсем незначительной в странах с низким уровнем доходов (в среднем 2 процента). Например, Эстония использует огромную долю пресной воды именно для промышленных нужд - 96 %, доля в Центральной и Восточной Европе составляет около 70 %, 80 % - в Канаде; и примерно половина в США. В то же время в странах Африки к югу от Сахары данный показатель составляет менее 2 %.

Последняя глобальная категория использования пресной воды – использование для бытовых целей, т.е. для бытовых, домашних или общественных нужд. Обычно это наиболее «видимая» форма воды: вода, которую мы используем для питья, мытья, стирки и приготовления пищи. Распределение именно этой части воды показано на Рис. 55.

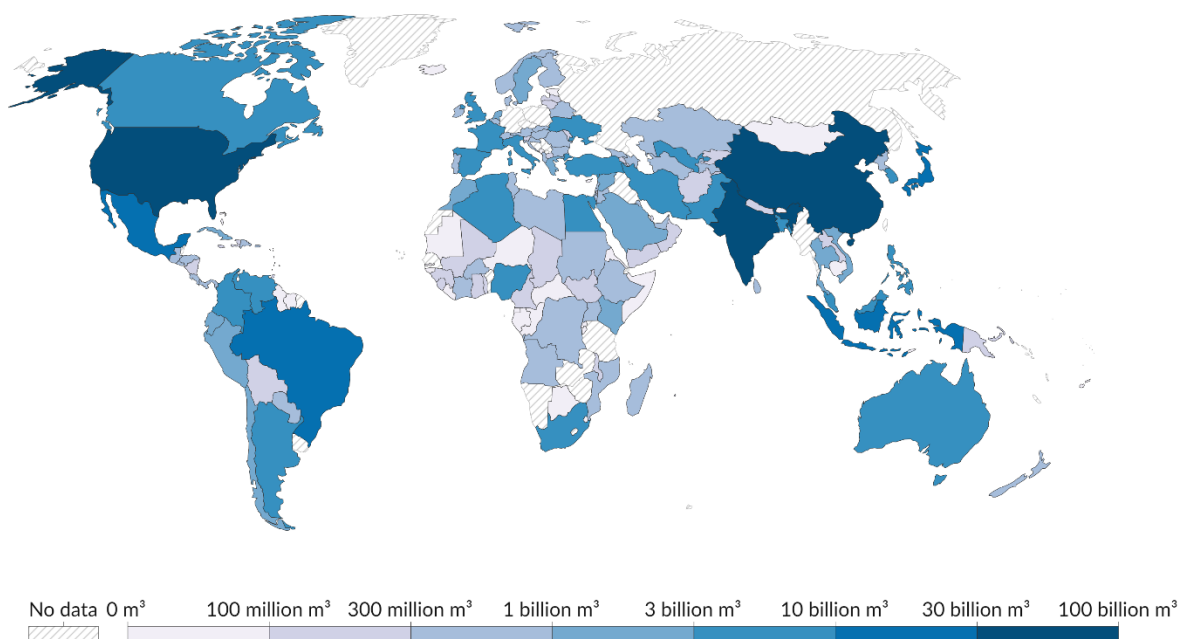


Рис. 55. Использование пресной воды для бытовых целей, 2015 г [29].

В Китае с самым большим населением внутренние потребности в воде превышают 70 миллиардов кубометров в год. Индия, следующая по численности населения, является третьей по уровню использования воды для бытовых нужд, а на втором месте – США, несмотря на гораздо меньшую численность населения, поскольку в данном случае достаточно велики потребности в воде на душу населения.

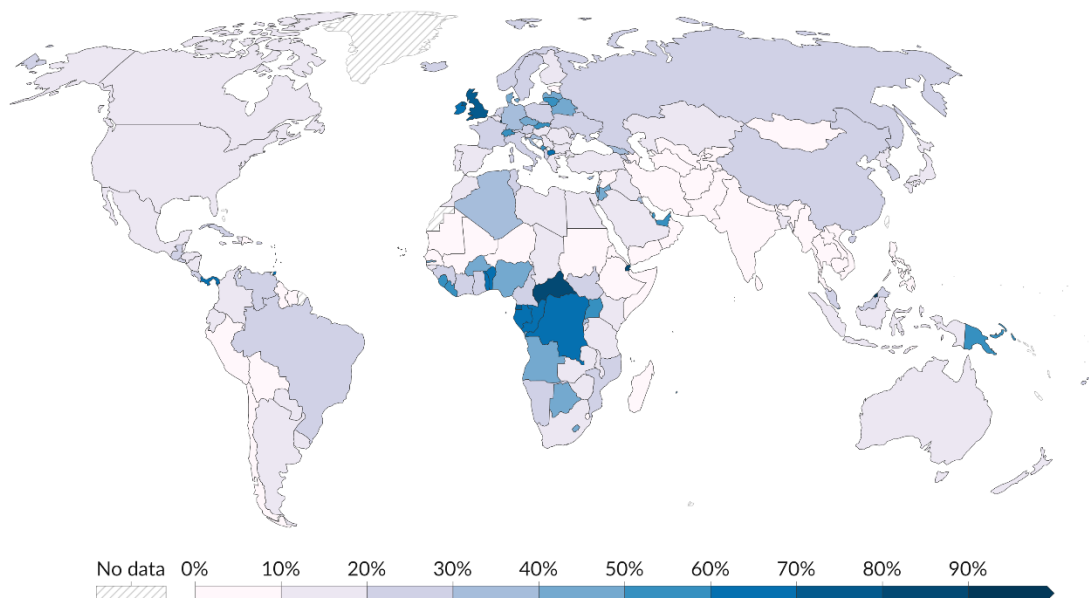


Рис. 56. Доля пресной воды, используемая в бытовых целях, 2020 г.

Несмотря на то, что данный вид расходы пресной воды является самым заметным для нас, внутренние потребности большинства стран в этой сфере

невелики по сравнению с использованием в сельском хозяйстве и промышленности. Реально в мире данный показатель составляет всего 11 процентов от общего расхода воды в мире. Именно этот показатель представлен на Рис. 56. Большинство стран используют менее 30 процентов для бытовых целей.

Однако доля пресной воды, используемой для бытовых нужд, в некоторых странах Африки к югу от Сахары может быть достаточно большой из-за очень малого процента использования на цели сельского хозяйства и промышленности. Также данный показатель может преобладать в некоторых странах Европы с большим количеством осадков, например, таких как Великобритания и Ирландия, где сельскохозяйственное производство часто в основном неорошаемое, а объем промышленного производства невелик.

### 10.3 Водный стресс

По мере роста мирового населения (а значит увеличения сельскохозяйственных, промышленных и бытовых потребностей в воде) и увеличения спроса на воду водный стресс и риск нехватки воды в настоящее время становятся общей проблемой. **Водный стресс** означает нехватку воды приемлемого для питьевых и хозяйственных нужд качества, а **водный кризис** – систематический недостаток безопасной для использования воды и систем канализации, приводящий к большому количеству вызванных дефицитом воды заболеваний людей и к разрушению природных ресурсов – деградации рек и пр. Этот факт еще более применим к конкретным регионам с меньшими водными ресурсами и / или большей численностью населения.

Водный стресс определяется на основе отношения использования пресной воды к возобновляемым ресурсам пресной воды. Водный стресс не означает, что страна испытывает нехватку воды, но дает представление о том, насколько она может быть близка к превышению возобновляемых ресурсов пресной воды. Если использование пресной воды превышает доступные ресурсы (т.е. превышает 100 процентов), то страна либо вынуждена добывать

воду ускоренными темпами, с которыми только могут пополняться водоносные горизонты (грунтовые воды), либо должна иметь возможность осуществлять опреснение соленой воды (преобразование морской воды в пресную с помощью процессов осмоса).

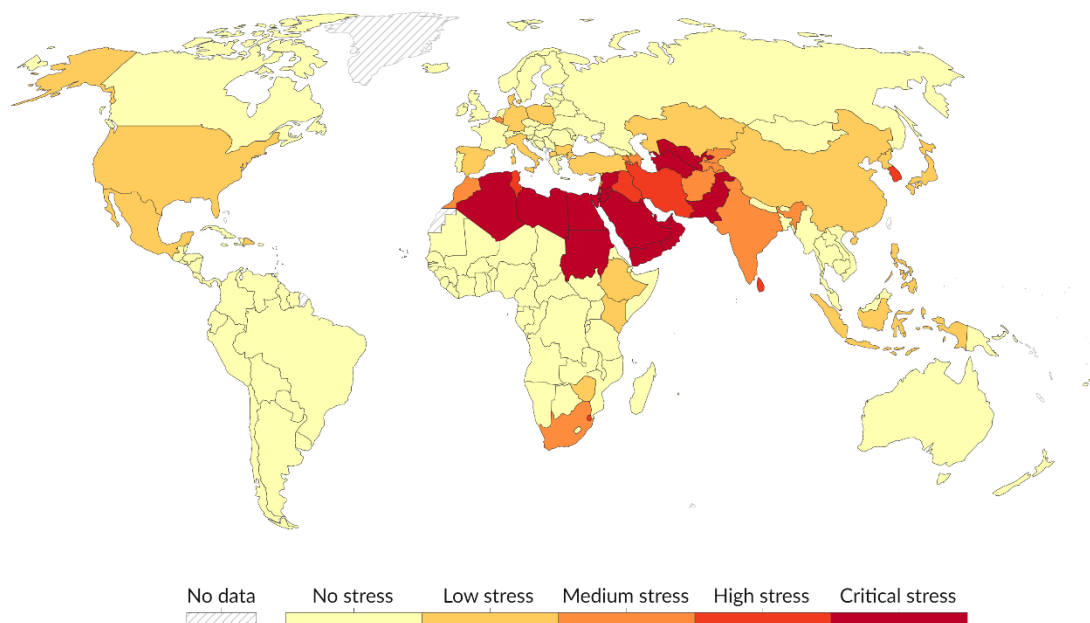


Рис. 57. Доля используемых пресноводных ресурсов, 2020 г.

Рис. 57 может помочь оценить уровень водного стресса во всем мире. Здесь показан процент использования пресной воды от внутренних возобновляемых ресурсов стран. Существует классификация водного стресса: менее 10 процентов использования от ресурса означает, что у страны низкий уровень водного стресса; 10-20 процентов - стресс от низкого до среднего; 20-40 процентов от среднего до высокого; 40-80 % высокий стресс; а более 80 процентов - это чрезвычайно высокий стресс.

Если обратите внимание на карту, несколько стран Ближнего Востока, Северной Африки и Южной Азии имеют чрезвычайно высокий уровень водного стресса. Во многих странах, таких как Саудовская Аравия, Египет, Объединенные Арабские Эмираты, Сирия, Пакистан, Ливия, уровень потребления воды значительно превышает 100 % - это означает, что либо добыча воды из существующих источников водоносных горизонтов в этих странах находится не на достаточно устойчивом уровне, либо значительную долю воды производят в результате опреснения.

Большинство стран Южной Азии испытывают острую нехватку воды; от среднего до высокого в Восточной Азии, США и большей части Южной и Восточной Европы. Водный стресс в Северной Европе, Канаде, большей части Латинской Америки, странах Африки к югу от Сахары и Океании обычно низкий или средний.

## ГЛАВА 11. Состояние лесов мира.

### 11.1. Распределение лесов в мире

В этом разделе мы рассмотрим, как менялась площадь леса в хорде развития человечества. Как уже было сказано ранее, леса составляют немногим более трети пригодной для жилья площади суши. Реально площадь лесов в мире значительно сократилась из-за расширения сельского хозяйства – сегодня половина мировых пригодных для жизни земель используется для сельского хозяйства. В частности, площади, используемые для животноводства, равны по площади мировым лесам.

На Рис. 58 представлено глобальное распределение площади лесов в мире. Очевидно, что на Европу, где преобладают леса России, приходится самая большая доля мировых лесов. На их долю приходится четверть площади мировых лесов. Следом идет Южная Америка, на которую приходится пятая часть площади мировых лесов, и т.д.

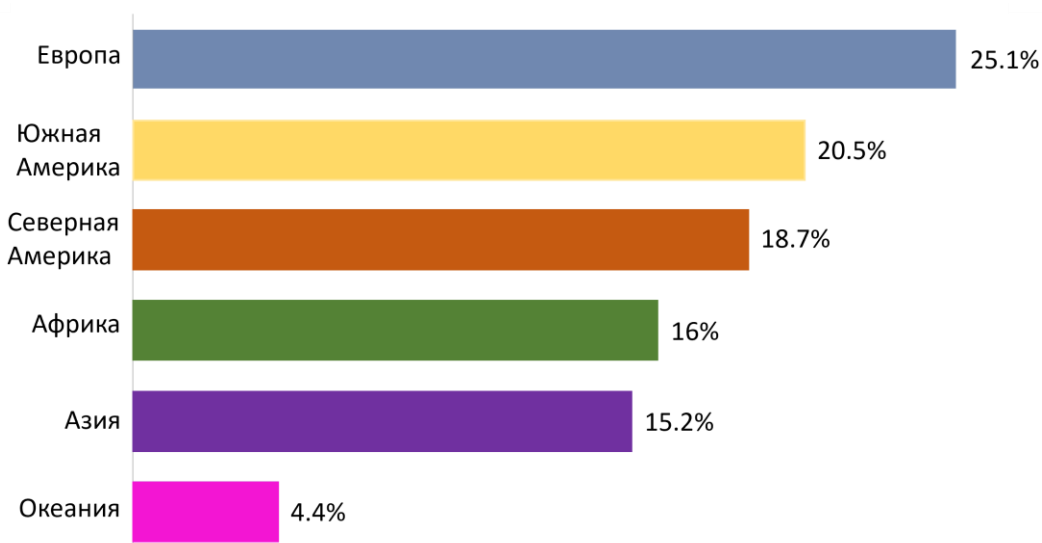


Рис. 58 Глобальное распределение лесов в мире.

На Рис. 59 представлена диаграмма, по которой можно оценить, как изменился покров земной поверхности за последние 10 000 лет. Это произошло вскоре после окончания последнего великого ледникового периода и по сегодняшний день. 10 000 лет назад 57% пригодной для жизни земли было покрыто лесами, что составляет ~6 миллиардов гектаров. В то же время, на протяжении последующих 5000 лет количество лесных территорий изменилось незначительно. На тот момент численность населения в мире составляла менее 50 миллионов человек. И несмотря на тот факт, что количество земли на человека, необходимое для производства достаточного количества пищи, было немалым (фактически, оно было намного больше, чем сегодня), в целом небольшая численность населения Земли означала, что людям не требовалось активно сокращать лесные территории, чтобы освободить место для выращивания продуктов питания и древесины для производства энергии.

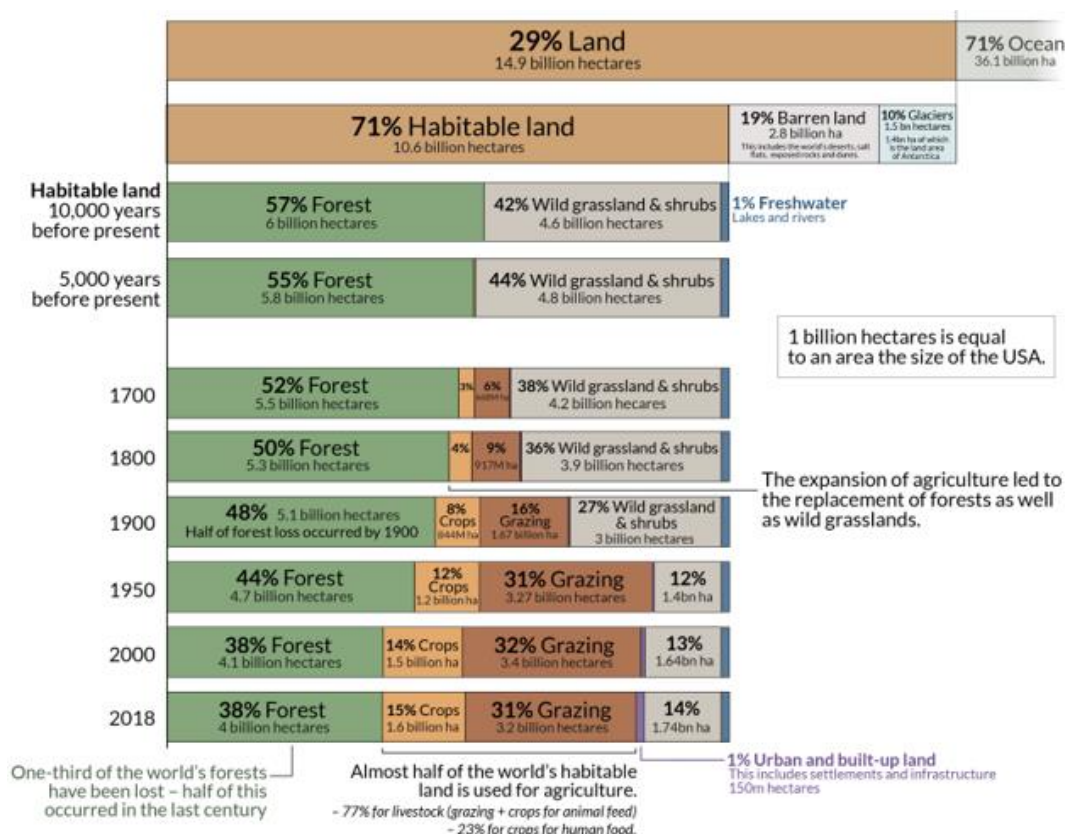


Рис. 59 Динамика изменения лесных территорий за последние 10000 лет.

На момент 1700 года (уровень ниже на диаграмме) мировое население увеличилось более чем в десять раз, до ~603 миллионов. Логично увеличилось количество земель, используемых для сельского хозяйства, т.е. для

выращивания сельскохозяйственных культур, а также пастбищ для домашнего скота. При этом можно заметить, что это расширение произошло не только за счет лесных, но и других видов территорий, таких как дикие луга и кустарники.

На рубеже 20-го века глобальная потеря лесов достигла середины: половина общей потери лесов пришлась на период с 8000 г. до н.э. по 1900 г.; в то время как другая половина произошла только в прошлом веке. Это подчеркивает два важных момента. Во-первых, очевидно, что вырубка лесов – не новая проблема: относительно небольшая численность населения в прошлом была способна привести к значительному исчезновению лесов. К 1900 году в мире насчитывалось около 1,65 миллиарда человек (это в пять раз меньше, чем сегодня), но большую часть предыдущего периода люди вырубали существенную лесную территорию. Даже при самом простом образе жизни по сравнению с сегодняшними стандартами влияние наших предков на душу населения было бы большим. Низкая продуктивность сельского хозяйства и использование древесины в качестве топлива приводило к тому, что большие площади земли приходилось расчищать для обеспечения элементарных запасов.

Во-вторых, можно оценить, насколько вырубка лесов ускорилась за последнее столетие. Всего за 100 лет мир потерял столько же лесов, сколько за предыдущие 9000 лет. Из диаграммы видно, что это было вызвано продолжающимся расширением земель под сельское хозяйство. К 1950 году сельскохозяйственных земель было почти столько же, сколько лесов – 43% пригодных для жилья земель. К 2018 году этот показатель увеличился до 46%, а леса сократились до 38%.

Исходя из наблюдений, можно заключить, что за время существования человечества мир потерял треть от площади лесов, однако это не значит, что дальнейшая вырубка лесов невозможна. Несмотря на то, что многие считают экологические проблемы (разрушение человечеством природы и экосистем в результате недавнего роста населения и увеличения потребления) присущими

периоду новейшей истории, это верно не для всех проблем. Так, это заявление не справедливо в отношении проблемы вырубки лесов. Люди вырубали деревья тысячелетиями.

## **11.2. Динамика освоения леса человечеством в эпоху новейшей истории**

Когда мы думаем о все большем вытеснении лесов со стороны современного населения, мы зачастую представляем себе огромные мегаполисы, однако, надеюсь вы помните из предыдущих тем, городские земли составляют всего 1% мировых пригодных для проживания земель. В действительности наибольшее влияние человечества на площади лесов проявляется в контексте производства еды, а не из-за освоения земель для жилья. Отсюда возникает главный вопрос: а можем ли мы каким-то образом положить конец нашей долгой истории вырубки лесов? Первое связанное с этим вопросом соображение: по прогнозам ООН, численность мирового населения будет продолжать расти и к 2100 году достигнет 10,8 миллиарда человек, и, как вы понимаете, это не означает ничего оптимистичного для будущего мировых лесов. Однако есть реальные причины полагать, что в этом столетии мы сможем положить конец вырубке лесов. Как вы уже знаете, мировой «пик вырубки лесов» пришелся на 80-е гг, и с тех пор данный показатель идет на убыль. Повышение урожайности приводит к падению спроса на сельскохозяйственные земли на душу населения, что мы, собственно, и видим на Рис. 60.

Фактически, мир, возможно, уже миновал «пик сельскохозяйственных земель», а с ростом технологических инноваций, таких как выращенное в лаборатории мясо и продукты-заменители, существует реальная возможность того, что мы сможем продолжать наслаждаться мясом или мясными продуктами, освобождая при этом огромные площади земли, которые используются для разведения скота. Получается, если человечество сможет воспользоваться этими нововведениями, станет возможно положить конец

вырубке лесов, т.е. будущее с большим количеством людей и большим количеством лесов вполне возможно.

Как мы уже с вами поняли, половина глобальной потери лесов произошла между 8000 г. до н.э. и 1900 г., другая половина была потеряна только в прошлом веке, а пик глобальной вырубке лесов пришелся на 1980-е годы. Давайте разберем чуть подробнее каковы причины такого явного ускорения темпов исчезновения лесов за последние несколько столетий. Для понимая сути данного вопроса, давайте посмотрим на последние 300 лет (Рис. 60).

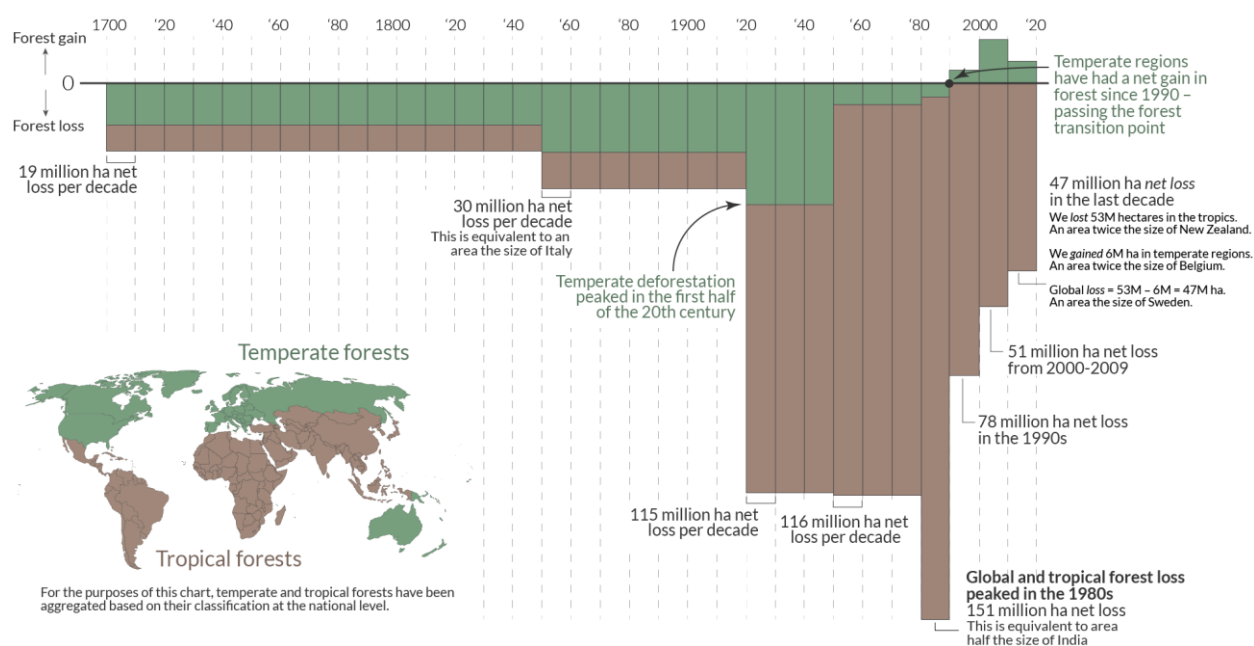


Рис. 60 Потери и прирост лесного покрова за последние 300 лет.

На данной диаграмме мы видим потери и прирост лесного покрова по десятилетиям. По горизонтальной оси – время с 1700 по 2020 год; по вертикальной оси – изменение лесного покрова за десятилетия. Чем больше столбик, тем больше изменение площади леса. В качестве единицы измерения площади на этом графике взят гектар (га), который эквивалентен 10 000 м<sup>2</sup>. Потеря лесных территорий показывает чистое изменение лесного покрова. На графике разделены показатели прироста и потерь лесного покрова умеренного пояса (бореальные и умеренные леса) – они показаны зеленым цветом, и тропических лесов (тропические и субтропические леса), которые отмечены

коричневым цветом, чтобы было проще понять где конкретно мир терял леса больше всего.

Как мы уже сказали, скорость исчезновения лесов сильно изменилась. С 1700 по 1850 год 19 миллионов гектаров очищалось каждое десятилетие. Для сравнения – это площадь примерно половины Германии. С 1850 по 1920 год потери были примерно на 50% выше – 30 миллионов гектаров за десятилетие - это все равно, что терять лесные массивы размером с Италию каждые 10 лет. В то время исчезали преимущественно леса умеренного пояса. Поскольку рост населения означал, что сегодняшние богатые страны Европы и Северной Америки нуждаются во все большем количестве ресурсов, таких как земля для сельского хозяйства, древесина для энергии и для строительства.

В 20-м веке спрос на сельскохозяйственные земли и энергию из древесины резко изменился. Темпы вырубki лесов ускорились. С 1920-х по 1980-е гг вырубka лесов за десятилетие увеличилась в четыре раза и составила почти 120 миллионов гектаров. В данном случае вырубka коснулась в основном тропических районов, поскольку страны Азии и Латинской Америки пошли по пути Европы и Северной Америки.

Глобальная же вырубka лесов, как уже не раз говорилось сегодня, достигла своего пика в 1980-х годах – за это десятилетие было потеряно 150 миллионов гектаров. Теперь главным местом вырубki лесов для пастбищ и пахотных земель стала бразильская Амазонка. С тех пор темпы вырубki лесов неуклонно снижались сначала до 78 миллионов гектаров в 1990-е годы, затем до 52 миллионов в начале 2000-х; и теперь 47 миллионов за последнее десятилетие. В итоге получается, что, страны, как правило, следуют предсказуемому развитию лесного покрова, которую можно представить в виде U-образной кривой, т.е. сначала они теряют леса по мере роста населения и увеличения спроса на сельскохозяйственные земли и топливо, но в конечном итоге они достигают определённой отметки, называемой «точка перехода лесов», когда они начинают восстанавливать больше лесов, чем теряют. В рамках этой глобальной тенденции происходит множество переходов через

данную точку как на местном, так и на национальном или региональном уровнях. На графике видно один из этих переходов - в 1990. Потеря лесов в регионах с умеренным климатом, показанная зеленой частью столбцов, достигла пика намного раньше, чем глобальная потеря лесов. В первой половине 20-го века леса умеренного пояса достигли своего пика потерь в 34 миллиона гектаров за десятилетие, а к 1990 году они прошли «точку перехода лесов», в итоге в течение последних 30 лет в регионах с умеренным климатом наблюдалось постоянное увеличение лесного покрова (столбцы теперь стали «положительными»). Площадь лесов умеренного пояса за последнее десятилетие увеличилась на 6 миллионов гектаров. Тропические леса в совокупности также прошли пик вырубki лесов в 1980-х годах, но они до сих пор не прошли переход к возобновлению лесов. Дело в том, что некоторые страны в этой группе все еще далеко не дошли до пика вырубki лесов, а это означает, что без согласованных усилий по защите этих лесов может пройти много десятилетий, прежде чем леса в этих странах приблизятся к точке перехода.

Какой вывод можно сделать из всего вышесказанного? История вырубki лесов печальна и в ней человечество потеряло не только различные красивые пейзажи, но и дикую природу, жившую на этих территориях. Однако тот факт, что переход к возобновлению лесов возможен, вселяет уверенность. На данный момент многие страны не только прекратили вырубку лесов, но и добились их существенного восстановления. Наше поколение сможет достичь того же в глобальном масштабе и положить конец 10 000-летней истории исчезновения лесов. Но для этого, необходимо понять, где и почему происходит вырубка леса; где страны находятся на переходном этапе; и что можно сделать, чтобы ускорить их продвижение к точке перехода.

### **11.3. Модель освоения лесных территорий в странах мира**

В глобальном масштабе вырубается около десяти миллионов гектаров леса каждый год. Около половины этой площади компенсируется возобновлением лесов, поэтому в целом потери леса составляют около пяти

миллионов гектаров каждый год. Почти вся вырубка лесов на данный момент (а именно 95%) происходит в тропиках, однако далеко не все эти земли предназначены для производства продукции для местных рынков. Около 14% вырубки лесов обусловлено потреблением жителей самых богатых стран мира, поскольку на этих землях производится ряд импортируемой продукции – говядина, растительные масла, какао, кофе и бумага.

На диаграмме на Рис. 61 отражены исторические данные о доле земель, покрытых лесом для различных стран. Сегодня во многих странах леса намного меньше, чем в прошлом. Почти половина Франции (точнее 47%) была засажена деревьями 1000 лет назад; сегодня это чуть менее одной трети (31,4%). То же самое можно сказать и о США, где еще в 1630 году 46% площади было покрыто лесами, против сегодняшних 34%. Или, например, 1000 лет назад 20% территории Шотландии было покрыто лесом, а к середине 18 века только 4% территории страны осталось засажено деревьями. Однако затем тенденция изменилась, и дело перешло от вырубки лесов к лесовозобновлению и уже за последние два столетия площадь лесов выросла и практически вернулась к уровню 1000 лет назад. Ситуация в Англии похожа: в конце 11 века 15% территории страны было засажено лесами, а к 19 веку площадь лесов сократилась до трети от того, что было раньше, однако именно в этот момент Англия достигла своего переходного периода, и с тех пор площадь лесов увеличились вдвое.

Таким образом можно заключить, что изменения лесного покрова последовательны во многих странах, и что самое главное, все они следуют «U-образной кривой», т.е. сначала они теряют много лесных территорий, но затем достигают т.н. «точки перехода лесов» и начинают его восстанавливать.

Лучше всего механизм данного явления можно понять с помощью с помощью так называемой «модели перехода лесов», изображенной на Рис. 62. Эта модель подразделяет изменение лесного покрова на четыре этапа, которые зависят от двух критериев: доля лесного покрова в конкретном регионе и

годовое изменение лесной территории (т.е. насколько быстро в регионе теряется или возобновляется лесной покров).

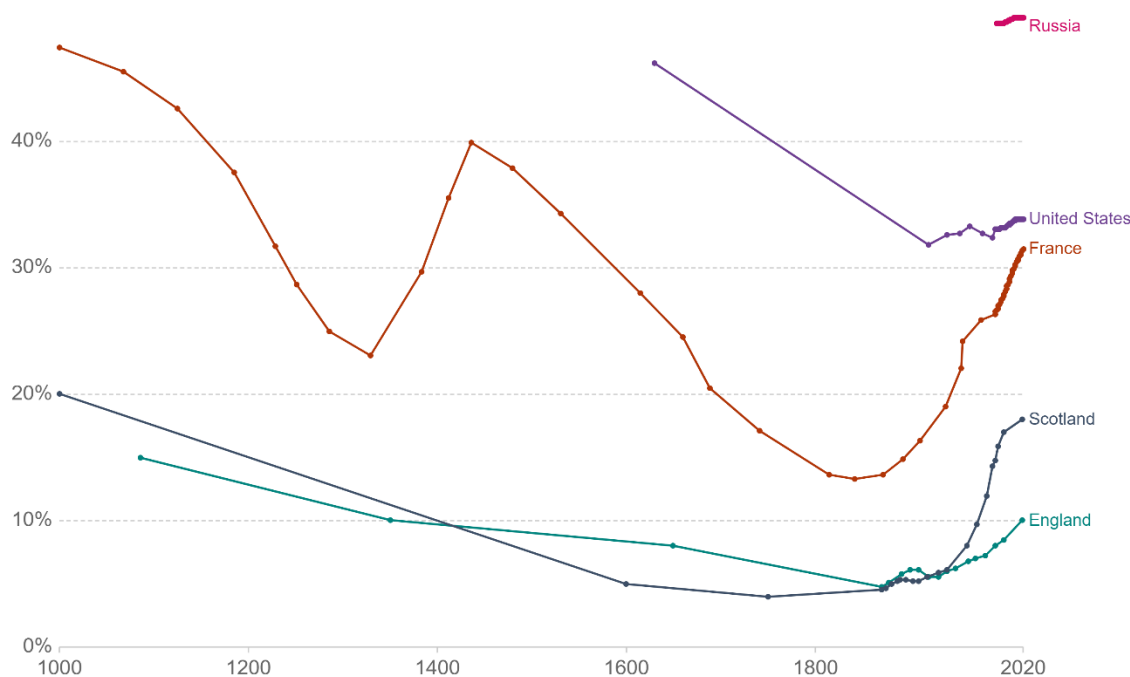


Рис. 61 Динамика доли лесных территорий в различных странах мира.

В рамках модели освоение лесных территорий конкретным государством происходит в четыре этапа. Первый этап – период, предшествующий переходу, который характеризуется наличием высокой доли лесных территорий и отсутствием или очень медленной потерей с течением времени. Страны на этом этапе могут терять небольшую часть леса каждый год, но это происходит очень медленно (менее 0,25% небольшой потерей). Второй этап – этап раннего перехода, когда лесные территории страны резко сокращаются. В это время лесной покров быстро уменьшается и ежегодная убыль леса высока.

Третий этап – период позднего перехода, когда темпы вырубki лесов снова начинают замедляться. На этом этапе страны по-прежнему ежегодно теряют леса, но уже более низкими темпами, чем раньше. В конце именно этого этапа страны приближаются к той самой «точке перехода».

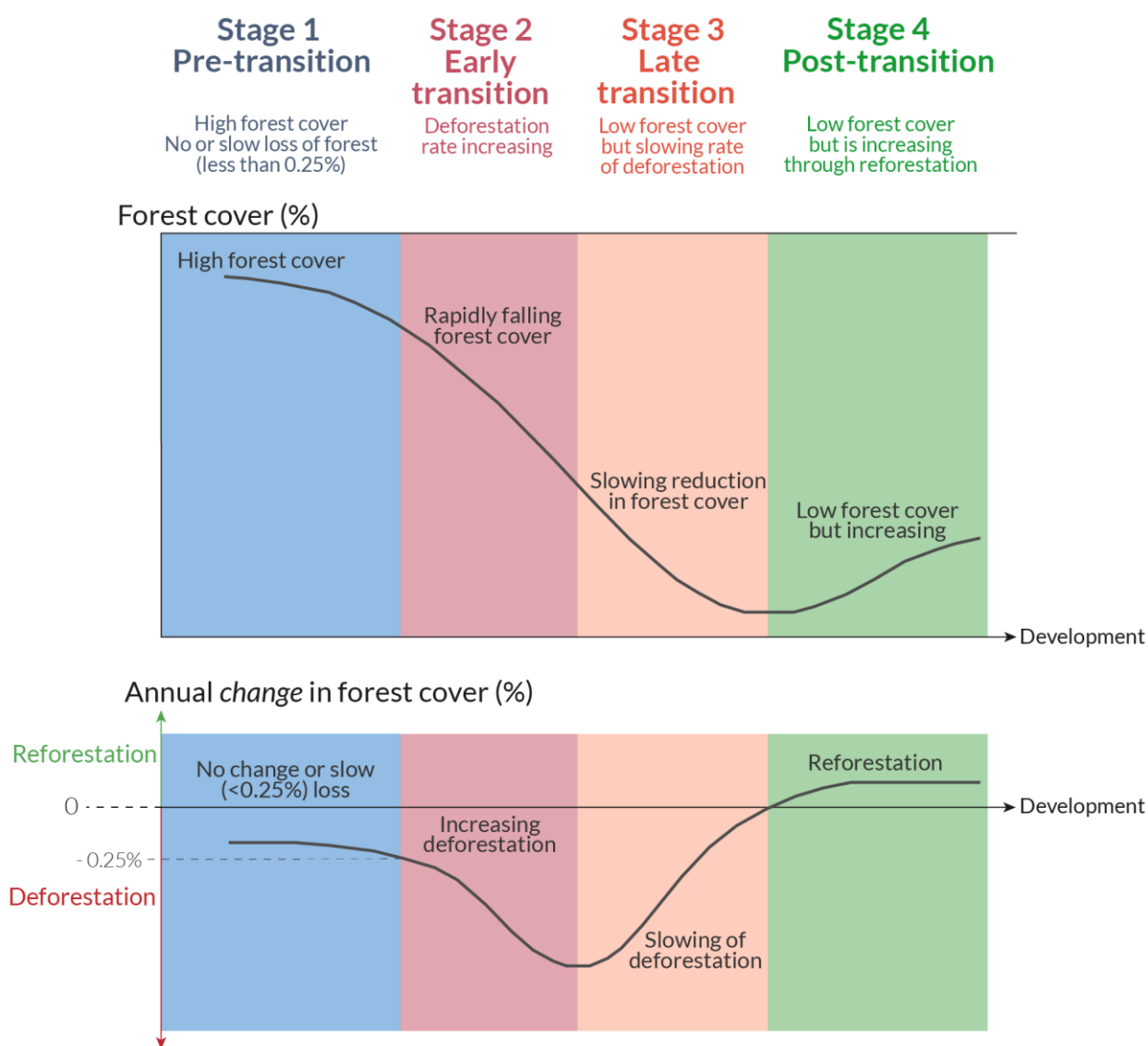


Рис. 62 Стадии демографического перехода.

Четвертый этап – постпереходная фаза, когда страны прошли «переходную точку» и теперь возобновляют лесные территории. В начале этой фазы площадь леса находится на самом низком уровне на графике, однако лесной покров, как уже было сказано, начинает постепенно увеличиваться, и, наконец, годовое изменение лесных территорий становится положительным.

В связи с вышеизложенным возникает вопрос: чем объясняется стремление стран потреблять, а потом возобновлять лесные территории? Человечество вырубает леса по двум основным причинам. Первая – это лесные ресурсы, которые нужны людям в виде древесины для топлива, в качестве строительных материалов или для бумажной промышленности. Вторая причина – это безусловно земля, т.е. жители используют занимаемую лесом

территорию для каких-либо других целей – сельскохозяйственных угодий в том числе для выращивания сельскохозяйственных культур, а также для пастбищ для разведения скота, или, например, для строительства дорог и городов. Спрос на оба этих продукта изначально увеличивается по мере роста населения и обогащения бедных, т.к. требуется все больше дров для приготовления пищи, больше домов для проживания и, что важно, больше еды. Тем не менее по мере того, как страны продолжают богатеть, этот спрос замедляется (как мы с вами уже знаем, темпы роста населения имеют тенденцию к замедлению). И теперь вместо того, чтобы использовать древесину в качестве топлива, человечество переключается на ископаемое топливо или, в перспективе, на возобновляемые источники и ядерную энергию. Урожайность сельскохозяйственных культур повышается, вследствие чего требуется меньше земли для сельского хозяйства.

Таким образом, переходный процесс с точки зрения глобальных лесных территорий имеет тенденцию идти по пути «развития», т.е. по мере того, как страна достигает экономического роста, она проходит все четыре этапа, рассмотренных ранее. Это объясняет исторические тенденции, которые мы наблюдаем в странах по всему миру сегодня. В богатых странах, таких как США, Франция и Великобритания, вырубка лесов ведется на протяжении долгого времени, но сейчас они уже прошли «точку перехода», и наибольшая вырубка лесов сегодня происходит именно в странах с низким и средним уровнями доходов.

Если определить, какие страны находятся сейчас на переходных этапах, можно будет понять, где в мире ожидается снижение, а где увеличение лесных территорий в ближайшие десятилетия. Логично предположить, что основная часть вырубки лесов в ближайшем будущем будет происходить в странах, находящихся на этапе, предшествующем переходу, или на раннем этапе перехода, т.е. на первом и втором этапе, рассмотренной переходной модели. На Рис. 63 представлена карта мира с оценкой этапа перехода для каждой страны. Большинство сегодняшних богатейших стран, т.е. вся Европа,

Северная Америка, Япония, Южная Корея и др., прошли переломный момент и теперь восстанавливают леса. Это также верно для стран с сильной экономикой, таких как Китай и Индия.

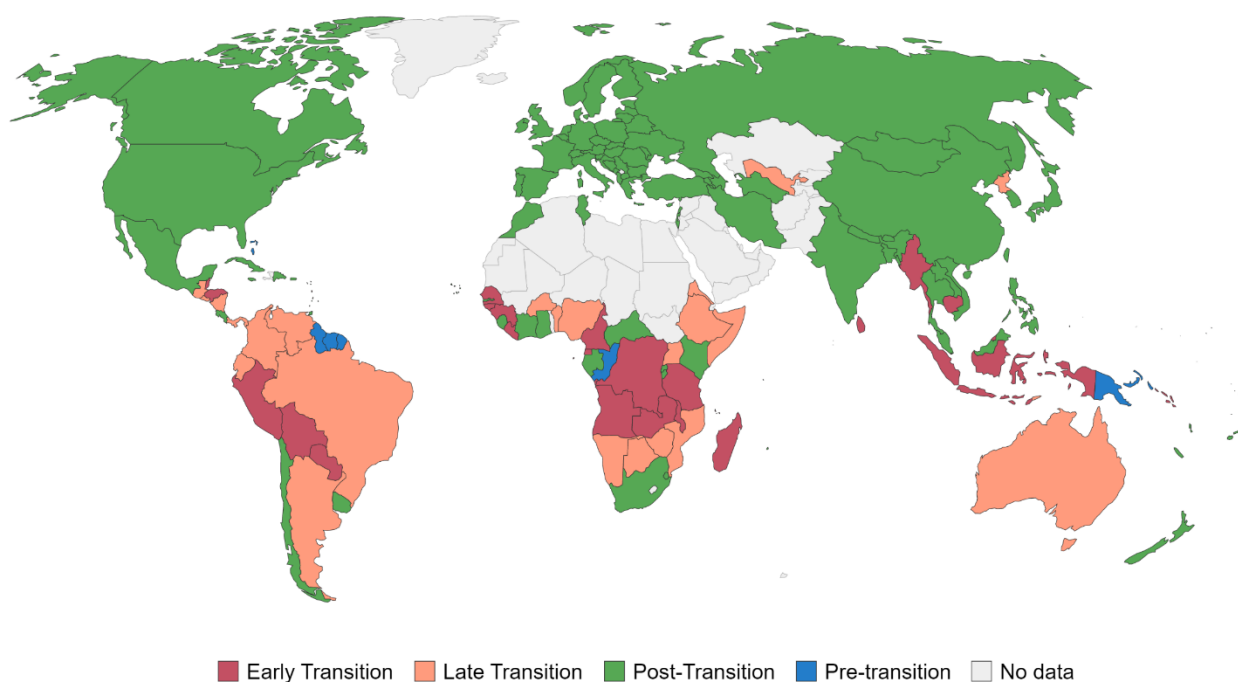


Рис. 63 Оценка стадии потребления лесных территорий в различных странах мира. В субтропических странах наблюдается смесь: многие страны с доходом выше среднего сейчас находятся на поздней стадии перехода. Бразилия, например, пережила период очень быстрой вырубке лесов в 1980-х и 90-х годах (этап 2), но темпы вырубке лесов уже замедлились, что означает, что сейчас она находится на поздней стадии перехода (3 этап). Такие страны, как Индонезия, Мьянма и Конго, находятся на ранней стадии перехода и быстро теряют леса. Некоторые из беднейших стран мира все еще находятся на этапе, предшествующем переходу.

#### 11.4. Деградация лесных территорий

Ранее речь шла о вырубке лесов в рамках потребления леса человечеством, однако существует также такое понятие как деградация лесов, из чего можно заключить, что не все потери лесов одинаковы. Так в чем же разница между вырубкой и деградацией лесов?

Ежегодно вырубается около 15 миллиардов деревьев. Это существенные цифры, и их важно отслеживать, поскольку потеря лесов оказывает ряд

негативных последствий, начиная от выбросов углерода и заканчивая исчезновением видов и утратой биоразнообразия. При всем этом внесение изменений в этот параметр, т.е. потеря лесов – сопряжено со своими проблемами. Проблема заключается в том, что до настоящего момента мы рассматривали все потери леса как равные. Предполагается, что расчистка первичных тропических лесов в Амазонии для выращивания соевых бобов сопоставима с вырубкой лесонасаждений в Великобритании. В то время как последние будут испытывать краткосрочное воздействие на окружающую среду, но в конечном итоге вырастут снова, когда вырубается первичный тропический лес, ее экосистема навсегда преобразует эту экосистему. Получается, уравнивание этих воздействий приводит к тому, что затрудняется расстановка приоритетов в усилиях по борьбе с вырубкой лесов. В итоге при принятии решения будет уделяться столько же внимания европейским лесозаготовкам, сколько уничтожению Амазонки. Другая проблема заключается в том, что данные о «потере деревьев» или «потере лесов», собранные с помощью спутниковых снимков, часто не соответствуют официальной статистике, сообщаемой правительствами в своих кадастрах землепользования. Это происходит потому, что последний учитывает только вырубку, т.е. замену лесной территории другим видом землепользования (например, пахотными землями). Получается, что эти данные не захватывают деревья, вырубленные в лесных насаждениях, поскольку земля по-прежнему остается засажена деревьями, несмотря на то что сейчас это совсем молодой лес.

Так в чем же разница между вырубкой и деградацией лесов? Вырубка – это полное удаление деревьев для преобразования лесной территории для другого землепользования, такое как сельское хозяйство, добыча полезных ископаемых или поселки и города. Это приводит к постоянному преобразованию лесной территории в альтернативное землепользование. В данном случае не ожидается, что деревья вырастут снова. Деградация же леса измеряется истончением лесного покрова, т.е. уменьшением плотности

деревьев в этом районе, но без изменения назначения земельной территории. Подобные изменения в лесу часто носят временный характер, и вполне можно ожидать, что они вырастут снова.

Исходя из этого можно определить пять причин, по которым происходит потеря лесных территорий. Первая причина – это вырубка лесов, вызванная необходимостью в сырье, которая представляет собой долгосрочное постоянное преобразование лесов в другие виды землепользования, такие как сельское хозяйство, горнодобывающую промышленность или энергетическую инфраструктуру. Вторая причина – урбанизация – это долгосрочное и постоянное преобразование лесов в города и городскую инфраструктуру, например, дороги. Третья причина – временное сельское хозяйство – это маломасштабное преобразование леса для ведения сельского хозяйства, которое позже забрасывается, чтобы леса снова росли. Это обычное явление для местных систем натурального земледелия, когда население вырубает лес, использует его для выращивания сельскохозяйственных культур, а затем переходит на другой участок земли. Четвертая причина – лесное хозяйство – это вырубка лесонасаждений для получения такой продукции, как древесина, бумага и целлюлоза. Эти леса периодически рубят и дают возможность вырасти заново. И пятая причина – это лесные пожары, которые временно уничтожают леса. Если земля не будет перекаленирована для других целей, в последующие годы леса могут снова вырасти.

Благодаря спутниковым снимкам можно легко получить представление о том, как выглядят вырубка и деградация сверху, с высоты птичьего полета. На Рис. 64 представлены их наглядные примеры.

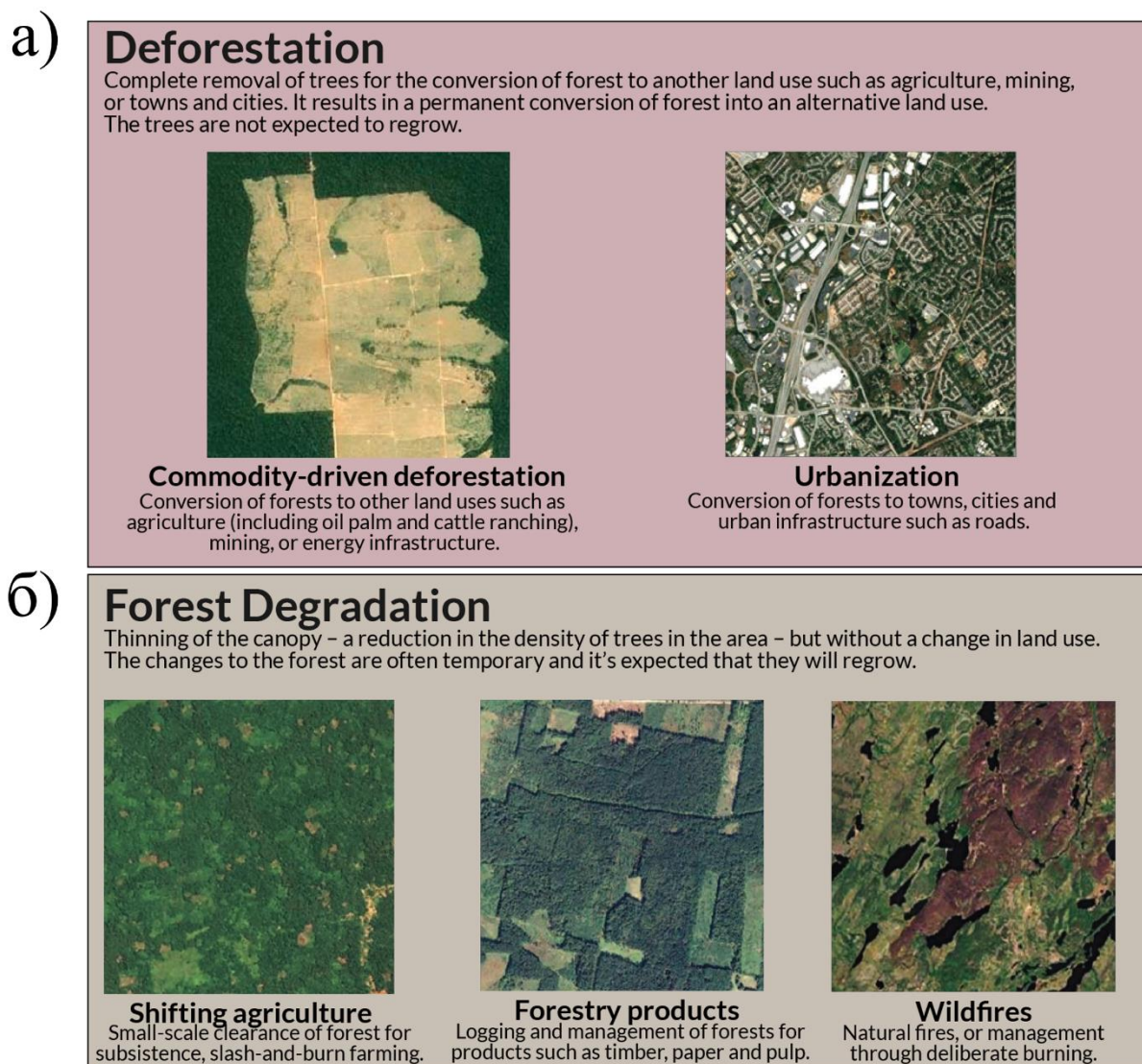


Рис. 64 Примеры спутниковых снимков, иллюстрирующие вырубку лесов (а) и деградацию (б).

На Рис. 64, а изображен спутниковый снимок, характерный при вырубке лесов и урбанизации: в этих случаях лесные территории полностью расчищаются и перекалываются для другого землепользования – ферму, участок добычи полезных ископаемых или город. Данное изменение является постоянным.

На Рис. 64, б представлен снимок, иллюстрирующий лесное хозяйство и результат лесного пожара, которые обычно приводят к деградации леса, т.е., как уже было сказано, лес испытывает кратковременные нарушения и, если оставить его в состоянии покоя на какое-то время, он может восстановиться.

Данное изменение является временным. Это почти всегда так, в частности, в отношении лесонасаждений в регионах с умеренным климатом – там они существуют давно и не заменяют существующие коренные леса. В тропиках некоторые виды лесного хозяйства можно классифицировать как вырубку, поскольку, когда основные тропические леса вырубают, их место занимают плантации с выращиваемыми культурами.

Временное сельское хозяйство обычно классифицируется как деградация, потому что земли часто остаются заброшенными, а леса естественным образом отрастают. Однако оно может стать связующим звеном между вырубкой и деградацией, в зависимости от временных рамок и постоянства этого метода ведения сельского хозяйства.

### **11.5. Контрольные вопросы к Главе 11:**

- 1) На каком континенте больше всего лесных территорий?
- 2) В каком регионе на сегодняшний день вырубят больше всего леса?
- 3) Когда был зафиксирован пик вырубки лесов?
- 4) В чем разница между деградацией лесных территорий и вырубкой?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное учебное пособие раскрывает ключевые аспекты физической экологии как дисциплины, изучающей фундаментальные законы функционирования биосферы и механизмы ее взаимодействия с антропогенной деятельностью.

В первых главах рассмотрены планетарные характеристики Земли, геохронология и эволюция атмосферы, которые сформировали условия для возникновения и развития жизни. Показана ключевая роль таких процессов, как насыщение атмосферы кислородом, формирование озонового щита и климатические циклы, обеспечивающие относительную устойчивость природной среды.

Особое внимание уделено механизмам саморегуляции биосферы — круговоротам воды и углерода, а также концепции биотической регуляции, согласно которой живое вещество выступает не пассивным объектом, а активным стабилизирующим фактором глобальной среды.

Во второй части пособия проанализированы современные антропогенные вызовы: динамика роста народонаселения, трансформация земельных и лесных ресурсов, проблемы водного стресса. Представленные данные свидетельствуют о том, что человеческая деятельность достигла масштабов, сопоставимых с геологическими процессами.

В совокупности материалы учебного пособия формируют у студента целостное представление о биосфере как сложной системе, где природные и антропогенные факторы находятся в тесном взаимодействии, а их количественный анализ является необходимым условием для поиска путей устойчивого развития.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Вещественный состав Земли. Образовательный геологический сайт Юрия Попова. [https://porovgeo.sfedu.ru/lecture\\_3](https://porovgeo.sfedu.ru/lecture_3). Дата обращения: 15.01.2020.
- 2 Ферсман А.Е. Геохимия, том 1. ОНТИ Госхимтехиздат Ленинградское отделение, 1934, 324 с.
- 3 Гаврилов В.П. Геотектоника: учебник. М.: Изд-во «Нефть и газ». 2005. 368 с.
- 4 Короновский Н. Земля: метеориты, вулканы, землетрясения. Изд-во «Век 2». 2014. 176 с.
- 5 Morgan W. J. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *Journal of geophysical research*, Vol. 73. No.6. 1968.
- 6 Dewey J., Bird J. Mountain belts and the new global tectonics. *Journal of geophysical research*. Vol. 75. Pp. 2625-2647. 1970.
- 7 Гальпер А. М. Радиационный пояс Земли. Соросовский образовательный журнал. №6. С. 75-81. 1999.
- 8 Андреева Н. В., Фомина Н. Ю. Роль атмосферы Земли в формировании погоды и климата. Материалы VIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». <https://scienceforum.ru/2016/article/2016020112>. (Дата обращения: 13.09.2024 ).
- 9 Бурова Т. Е. Выполнение контрольных работ по дисциплине «Экология»: учебно-методическое пособие. СПб. 2017. 128 с.
- 10 Климов В. В. Окисление воды и выделение молекулярного кислорода при фотосинтезе. Соросовский образовательный журнал. №11. С. 9-12. 1996.
- 11 Ruben, S., Randall, M., Kamen, M. & Hyde, J. L. Heavy oxygen ( $O^{18}$ ) as a tracer in the study of photosynthesis. *J. Am. Chem. Soc.* Vol. 63. Pp. 877–879. 1941.
- 12 Field C. B. et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*. Vol. 281. № 5374. Pp. 237-240. 1998.
- 13 Bar-On Y. M., Phillips R., Milo R. The biomass distribution on Earth. *PNAS*. Vol. 115 (25). Pp. 6506-6511. 2018.

- 
- 14 Никитин М. Происхождение жизни. От туманности до клетки. М.: Альпина нон-фикшн. 2016. 542 с.
- 15 Lyons T., Reinhard C., Planavsky N. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature*. Vol. 506. Pp. 307–315. 2014.
- 16 Егоренков Л. И., Кочуров Б. И. Геоэкология. Учебное пособие. М.: Финансы и статистика. 320 с. 2005
- 17 Мировой круговорот воды. <https://sites.google.com/view/gidrosphera>. Дата обращения: 02.10.2024.
- 18 Вронский В. А. Прикладная экология. М. 385 с. 1996.
- 19 Горшков В. В., Горшков В. Г., Данилов-Данильян В. И., Лосев К. С., Макарьева А. М. Биотическая регуляция окружающей среды. *Экология*. № 2. С. 105-113. 1999.
- 20 Wright J. S., Fu R., Worden J. R., Yin L. Rainforest-initiated wet season onset over the southern Amazon. *PNAS*. Vol. 114 (32). Pp. 8481-8486. 2017.
- 21 Горшков В. В. Характеристики восстановления лесных экосистем после пожаров. Доклады РАН. № 333. С. 811-813. 1993.
- 22 Bergeron Y., J. Frisque. Workshop Abstracts of Second International workshop on disturbance dynamics in Boreal Forests. Rouyn-Noranda, Quebec, Canada. August 1996. Universite du Quebec, 1996.
- 23 Land Use. <https://ourworldindata.org/land-use>. Дата обращения: 03.10.2024.
- 24 Вернадский В. И. Несколько слов о ноосфере. *Успехи современной биологии*. № 18. Вып. 2. С. 113-120. 1944.
- 25 Переписка В.И. Вернадского с Б.Л. Личковым, 1940-1944. М. Наука. 1980. 224 с.
- 26 Моисеев Н. Н., Александров В. В., Тарко А. М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. Москва: Наука. 271 с. 1985.
- 27 Найдено В. В., Губанов Л. Н., Петрова Е. Н. Глобальные эколого-экономические проблемы: учеб. пособие. Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. Н. Новгород: ННГАСУ. 2002. 294 с.

---

28 Hannah L. et al. A preliminary inventory of human disturbance of world ecosystems. *Ambio*. Pp. 246-250. 1994.

29 Water Use and Stress. <https://ourworldindata.org/water-use-stress>. Дата обращения: 04.10.2024.