

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

ОСНОВЫ УЧЕНИЯ О БИОСФЕРЕ

Учебно-методическое пособие

Составители:
В. Б. Голуб,
О. П. Негроров,
В. А. Соболева

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета
2012

Утверждено научно-методическим советом биолого-почвенного факультета
22 декабря 2011 г., протокол № 4

Рецензент д-р биол. наук, проф. Л.Н. Хицова

Пособие подготовлено на кафедре экологии и систематики беспозвоночных животных биолого-почвенного факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для обеспечения лекционных курсов: «Экология и рациональное природопользование», читаемого студентам по направлению «Биология» (дневная форма обучения), «Экология», читаемого студентам по направлению «Экология» (дневная форма обучения) биолого-почвенного факультета, и «Экология», читаемого студентам по направлению «Философия» факультета философии и психологии (дневная форма обучения).

Для направлений: 020400 – Биология; 022000 – Экология; 03010 – Философия

СОДЕРЖАНИЕ

Основные понятия о биосфере	5
Понятие о биосфере	5
Предмет учения о биосфере	5
Методы изучения биосферы	5
Краткая история изучения биосферы.....	7
Свойства биосферы.....	10
Структура биосферы.....	16
Гидросфера	16
Литосфера	17
Атмосфера.....	21
Энергетические процессы в биосфере	24
Типы веществ в биосфере	26
Основные биогеохимические функции живого вещества.....	29
Свойства живого вещества.....	30
Химический состав живого вещества	31
Распределение живого вещества в биосфере.	
Биомасса и продуктивность живого вещества.....	32
Биогеохимические принципы В. И. Вернадского.	
Круговорот веществ в природе.....	38
Круговорот воды	40
Круговорот углерода.....	42
Круговорот кислорода	45
Круговорот азота	48
Круговорот фосфора	50
Круговорот серы.....	52
Источники живого вещества в биосфере.....	54
Формирование биосферы.	
Основные группы гипотез происхождения жизни.....	56
Группа гипотез абиогенного происхождения жизни на земле (абиогенеза) ..	57
<i>Гипотеза химической эволюции на земле (коацерватная гипотеза)</i>	58
<i>Гидротермальная гипотеза</i>	66
<i>Гипотеза генетического захвата (минерального организмобиоза).....</i>	66
<i>Гипотеза возникновения жизни в грунте и вулканических пеплах.....</i>	67
<i>Гипотеза гиперциклов</i>	68
<i>Гипотезы возникновения жизни или предбиологических систем вне Земли</i>	69
<i>Гипотеза астрокатализа</i>	74
Мир РНК	76

Первые организмы. Начальные этапы организации биосферы в архейской эре на прокариотном экосистемном уровне	77
Экологические условия существования прокариотических экосистем	81
Появление эукариотных организмов. Основные гипотезы происхождения эукариот.....	82
<i>Суццессивная гипотеза</i>	82
<i>Эндосимбиотическая гипотеза</i>	83
Появление многоклеточных организмов. Основные теории возникновения многоклеточных животных.....	86
Экологические причины возникновения многоклеточности	91
Биосфера в криптозойе	92
Основные этапы эволюции биосферы в фанерозое.....	97
Ноосфера. Современные глобальные экологические проблемы	105
Проблема продовольствия населения	108
Истощение природных ресурсов.....	110
Загрязнение биосферы.....	115
<i>Химическое загрязнение</i>	116
<i>Загрязнение атмосферы</i>	117
<i>Загрязнение гидросферы</i>	123
<i>Загрязнение почвы</i>	126
Физическое загрязнение	129
<i>Тепловое загрязнение</i>	129
<i>Шумовое загрязнение</i>	130
<i>Вибрационное загрязнение</i>	132
<i>Электромагнитное загрязнение</i>	132
<i>Радиоактивное загрязнение</i>	134
Биологическое загрязнение.....	139
Литература	141

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ УЧЕНИЯ О БИОСФЕРЕ

ПОНЯТИЕ О БИОСФЕРЕ

В соответствии с взглядами основателя науки о биосфере В. И. Вернадского она понимается как оболочка Земли, заселенная живыми организмами, находящаяся под их воздействием и занятая продуктами их жизнедеятельности. Биосфера – «пленка жизни», глобальная экосистема Земли.

«Оболочкой» в прямом смысле этого слова биосфера не является. Она представляет собой пространство Земли и над нею, заселенное организмами и продуктами их жизнедеятельности. По выражению В. И. Вернадского, биосфера – пространство, «наружная область, отграничивающая ее (Землю) от космической среды...».

В самых общих чертах биосфера включает в себя (рис. 1) всю водную среду (гидросферу), верхний слой земной коры (верхнюю часть литосферы) и нижнюю часть атмосферы (воздушную оболочку Земли).

Предмет учения о биосфере

Предметом учения о биосфере является состав и структура живой оболочки Земли, единый процесс взаимодействия живых организмов между собой и с факторами неорганической среды, круговорот веществ и энергии на Земле, который, в свою очередь, обеспечивает существование всех организмов как единого целого.

Поскольку изучение существования организмов на Земле как единого целого требует анализа воздействия на организмы самих живых организмов и факторов неорганической среды, то и методы изучения биосферы разнообразны.

Методы изучения биосферы

К методам изучения относится, прежде всего, таксономический, обеспечивающий знание систематического состава растительного, животного населения планеты и всего объема микроорганизмов.

Структура биосферы включает систему наземных и водных экосистем. Поэтому к методам ее изучения относится целая система экологических подходов – от наблюдений и описаний фенологических и многолетних изменений в природе до инструментальных биоценологических и математических методов анализа структуры экосистем различного типа (разнообразных наземных и водных экосистем).

Функционирование экосистем происходит под воздействием физических и химических факторов. Следовательно, исследование функциониро-

вания биосферы осуществляется с широким использованием физических и химических методов и приборной базы. При этом определяются уровни различных излучений (солнечной радиации, освещенности, радиоактивности), определяется изотопный состав объектов и внешних воздействий, состав и концентрации химических элементов и соединений, их динамика и характер миграций в живых системах.

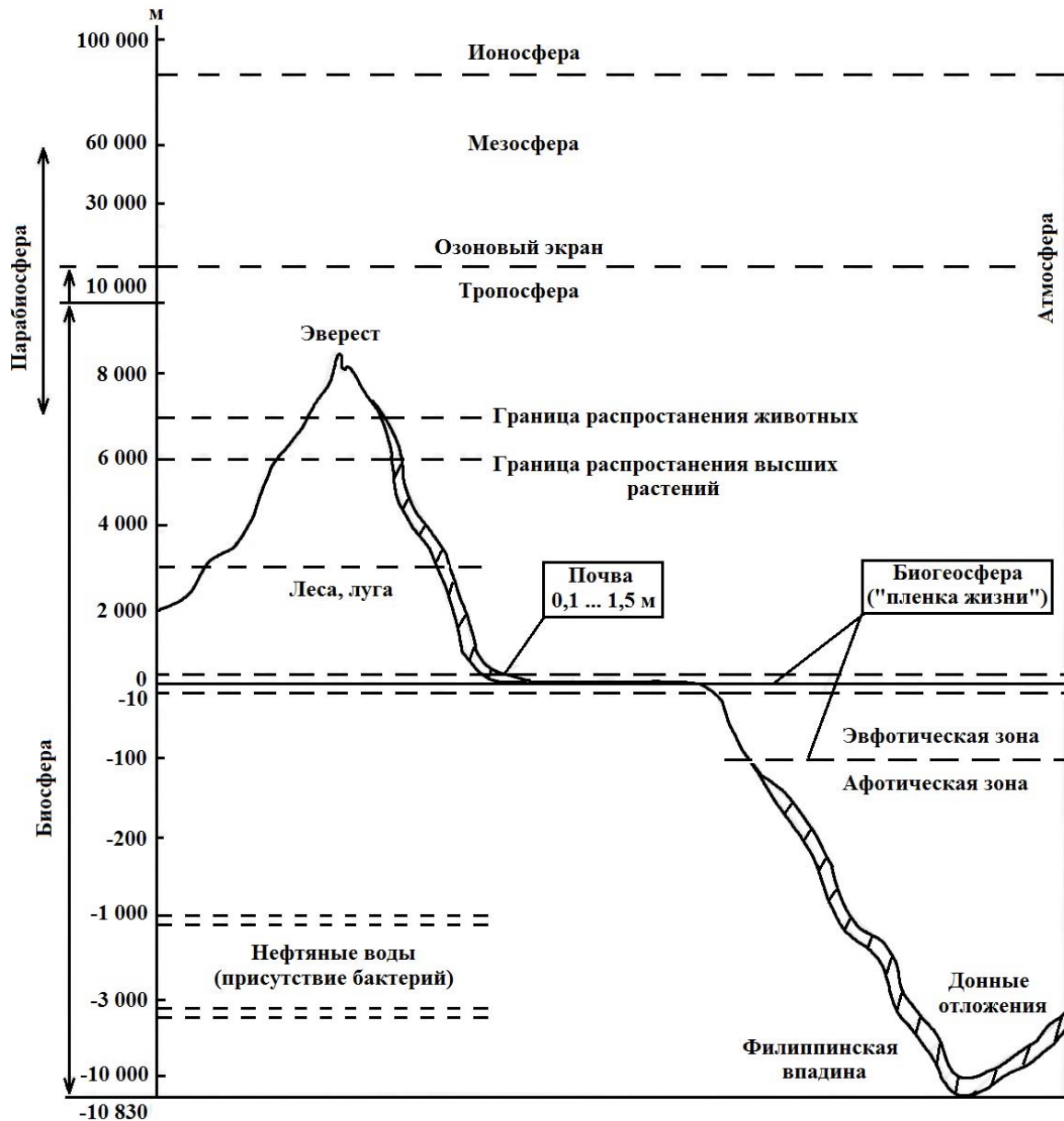


Рис. 1. Структура биосферы в соответствии с представлениями В. И. Вернадского

Функционирование экосистем происходит в пространстве и времени. При этом происходят изменения в составе видов и высших таксонов в результате действия естественных закономерностей, прежде всего борьбы за

существование и естественного отбора. Следовательно, понять функционирование биосферы можно только раскрывая эти закономерности, т.е. с использованием комплекса исторических методов.

Изменения в составе и структуре элементов и обширных частей биосферы происходят в тесной связи с историческими изменениями в земной коре, подвижками континентальных платформ, изменениями ландшафтов. Таким образом, исследование функционирования частей биосферы и биосферы в целом осуществляется с использованием геологических и геофизических методов.

Структура различных частей биосферы зависит от широты и долготы той или иной территории и акватории. Поэтому исследование биосферы осуществляется с использованием биогеографических методов.

Таким образом, изучение биосферы осуществляется с использованием очень широкого круга биологических, геологических, геофизических, физических, химических, исторических методов.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ БИОСФЕРЫ

Связь организмов со средой обитания рассматривалась многими учеными до работ В. И. Вернадского, начиная с Аристотеля. Леонардо да Винчи, Галилей, Ньютон, Ломоносов, Бюффон и другие великие ученые близко подходили к решению вопросов о взаимосвязи всего живого с неживым в природе. Особенно активно и на строго научной основе ученые стали решать эти вопросы после гениальных трудов Ж. Б. Ламарка, Ч. Дарвина, Э. Геккеля, Э. Ж. Сент-Илера. Однако по целому ряду причин им не удалось показать эту связь достаточно убедительно.

Связь развития организмов с историей Земли была впервые научно обоснована основоположником исторической геологии, палеонтологии и сравнительной анатомии, крупнейшим в то время исследователем Ж. Кювье. Однако идея Кювье о катастрофах, которые обуславливали смену последовательных фаун на Земле, и его представления о постоянстве органических форм не была им доказана и далеко не всеми была принята по вполне обоснованным причинам.

Натуралист и мыслитель Жан Батист Ламарк (1744–1829), изучавший мир растений, животных, минералов, воспринимал явления природы во всей их совокупности. Он писал: «В природе существует особая сила, могущественная и непрерывно действующая, которая обладает способностью образовывать сочетания, умножать их, разнообразить их... Влияние живых организмов, находящихся на поверхности Земного шара и образующих его внешнюю кору, весьма значительно, потому что эти существа, бесконечно разнообразные и многочисленные, с непрерывно сменяющимися поколениями, покрывают своими постепенно накапливающимися и все время от-

лагающимися остатками все участки поверхности земли». Эти слова и мысли показывают, что Ж. Б. Ламарк оценил огромную геологическую роль живых организмов и продуктов их распада в существовании Земли. Ламарк первым предложил понятие биосферы.

Важным вкладом в разработку концепции биосферы явились труды немецкого ученого-энциклопедиста А. Гумбольдта (1769–1859). Он впервые сумел взглянуть на планету Земля как на единое целое. В своем фундаментальном труде «Космос» он развивал идеи о повсеместном распространении жизни и ее неразрывной связи с неорганическим миром, что было новым для естествознания начала XIX в. Он даже употребил термин «жизнесфера», однако без обсуждения этого термина.

Новый этап в развитии знаний о связи живой и неживой природы начинается после опубликования трудов В. В. Докучаева о русском черноземе и о почве как особом естественно-историческом теле, находящемся в тесной взаимосвязи с факторами почвообразования. Кстати, В. В. Докучаев заложил научные основы возрождения почвы в Воронежской губернии. Ученые Института земледелия в Таловском районе нашей области и по настоящее время успешно развивают его идеи.

В. В. Докучаев указывал, что исторически сложившаяся связь почв с комплексом природных факторов является настолько живой и тесной, что, зная тип почвы, можно предсказать климат и растительный покров, под воздействием которых формировалась данная почва. В. В. Докучаев сформулировал закон, гласящий о связях между всеми элементами географической среды. Этот закон дает возможность по характеру осадочных пород и древней коры выветривания, по захороненным в Земле остаткам растительных и животных организмов устанавливать методом диалектических обобщений реальный ход взаимообусловленного развития организмов и внешней среды в координатах геологического времени. На этой основе, по видимому, можно показать тенденции развития и более точно прогнозировать пути дальнейшей эволюции биосферы.

Идеи В. В. Докучаева привели к созданию новых научных направлений и дисциплин. Так, в географии появилось ландшафтоведение, в биологии – биогеоценология, в почвоведении – учение о едином почвообразовательном процессе, в геологии – геохимия и биогеохимия.

Термин «биосфера» вошел в науку более 135 лет тому назад. В 1875 г. австрийский геолог Э. Зюсс (1831–1914), говоря о различных оболочках Земного шара, впервые употребил его в своей книге о происхождении Альп. Под биосферой Зюсс понимал особую оболочку земной коры, охваченную жизнью. По этому поводу В. И. Вернадский позже писал, что Э. Зюсс высказал «новое, очень большое эмпирическое обобщение, всех последствий которого он не предвидел» (Вернадский, 2004). Однако при жизни Зюсса развитие

концепции о биосфере не произошло. Термин «биосфера» в геологической и географической литературе использовали в различном понимании.

Учение о биосфере в современном понимании этого термина создал в полной мере великий русский и советский геохимик В. И. Вернадский (1863–1945), творчески развив идеи своих предшественников и используя термин, предложенный Э. Зюссом. Именно В.И. Вернадский является основоположником биогеохимии. В своей первой книге «Биосфера» ученый изложил основные положения новой науки. Книга была опубликована в 1926 г. на русском, а позднее, в 1929 г., на французском языке. Концепция биосферы, которую мы принимаем сейчас, в основном опирается на идеи Вернадского, развитые им спустя 50 лет после работ Э. Зюсса. Сам В. И. Вернадский считал, что первым ученым, в работах которого изложено немало глубоких геохимических идей, был Ж. Б. Ламарк.

Владимир Иванович Вернадский был великолепным энциклопедистом и крупным специалистом в ряде смежных научных направлений – минералогии, кристаллографии, геологии, геохимии, биогеохимии, радиogeологии. Он глубоко интересовался философией, историей науки и общественной жизнью. Он обладал даром предвидения на много лет вперед. Создавая новые отрасли науки о Земле, он предвидел их огромное значение и важность для практической деятельности человека.

Изучая историю минералов, миграцию химических элементов в земной коре, Вернадский выявляет грандиозную роль живых организмов в геохимических процессах нашей планеты. Для изучения их роли в биосфере требовались знания в таких областях, как биология, геология, химия. На их основе ученым были заложены основы новой науки – биогеохимии. Вернадский показал, что жизнь на Земле за все геологически обозримое время развивалась как взаимосвязанная совокупность организмов («живого вещества», по терминологии Вернадского), обеспечивавшая и обеспечивающая непрерывный поток элементов в биогенном обмене веществ на поверхности нашей планеты. Приземной слой атмосферы, вся гидросфера и многокилометровый слой литосферы обязаны своими свойствами тому влиянию, которое оказали организмы за миллиарды лет своего существования и эволюции. Этот поверхностный слой Земли, заселенный живыми организмами и изменяемый их деятельностью, Вернадский и назвал биосферой. Именно жизнь, совокупную деятельность всех организмов на Земле Вернадский считал наиболее мощным геохимическим агентом, преобразующим поверхность Земли. Жизнь он рассматривал как энергетический фактор планетарного масштаба и значения. Весь облик Земли («лик», по выражению Вернадского), структура ее атмосферы и гидросферы, толщи осадочных пород, залежей полезных ископаемых – все это возникло благодаря жизни. И именно жизнь была связующим звеном между космосом и планетой, что позволило энергии Солнца оказать решающее влияние на ее развитие. Раз-

витие жизни на Земле – это, в сущности, развитие сложных комплексов организмов, обеспечивающих постоянный круговорот различных элементов, в первую очередь тех, которые принято называть биогенными.

Большой оптимист в жизни, В. И. Вернадский, оценивая воздействие организмов на всю земную кору и их биогеохимическое значение, пришел к выводу о том, что биогеохимическая роль человека за последнее столетие стала значительно превосходить роль всех других организмов. Воздействие человека на поверхность Земли принципиально отличается от воздействия остальных организмов, так как оно связано не с биологической, а с производственной деятельностью человека, направляемой его разумом. Вернадский, веривший в победу разума, писал, что биосфера в наши дни уступает место ноосфере – сфере влияния человеческого разума. Он писал: «Человечество, взятое в целом, становится мощной геологической силой. И перед ним, перед его мыслью и трудом становится вопрос о перестройке биосферы в интересах свободно мыслящего человечества как единого целого. Это новое состояние биосферы, к которому мы, не замечая этого, приближаемся, и есть ноосфера». И еще один очень важный вывод в этом учении состоит в том, что человечество должно принять на себя ответственность за дальнейшую судьбу нашей планеты. В противном случае у человечества просто не будет будущего.

СВОЙСТВА БИОСФЕРЫ

Биосфера – это оболочка Земли, заселенная живыми организмами, находящаяся под их воздействием и занятая продуктами их жизнедеятельности. В. И. Вернадский называл ее еще «пленкой жизни». Биосфера – это глобальная экосистема Земли. Биосфера имеет свойства, или особенности, отличающие ее от других сфер Земли.

1. В. И. Вернадский показал, что важнейшей особенностью биосферы является **жизнь**, преобразующая лик Земли. Биосфера представляет собой область жизни, или область существования «живого вещества» (термин В. И. Вернадского). Центральным звеном ее выступают живые организмы (живое вещество). Это свойство всесторонне раскрыто В. И. Вернадским. Таким образом, биосфера – **централизованная система**. В качестве ее центрального звена выступают живые организмы (живое вещество).

2. Как сказал В. И. Вернадский, «биосфера может быть рассматриваема как область земной коры, занятая трансформаторами, переводящими космические излучения в действенную земную энергию – электрическую, химическую, механическую, тепловую» (Вернадский, 2004). В своем глобальном, космическом проявлении биосфера, или «сфера жизни», выступает как **гигантский аккумулятор и уникальный трансформатор лучистой энергии Солнца**. Именно биосфера, как приемник космического излучения на

нашей планете, осуществляет активную связь Земли с Космосом. Если бы на Земле не было жизни, не было биосферы, работа солнечного луча сводилась бы лишь к перемещению газообразных, жидких и твердых тел по поверхности планеты и к временному их нагреванию. Солнечная энергия не совершала бы на Земле созидательной деятельности, так как не могла бы удержаться на поверхности планеты и не смогла бы преобразоваться в необходимую для этого форму.

Интенсивность воздействия живого вещества на поверхностные оболочки планеты целиком и полностью определяется особыми, только живым организмам присущими, свойствами. Зеленые хлорофилловые растения создают в биосфере органические вещества, характеризующиеся высокой сложностью химического строения и большими запасами заключенной в них энергии. В. И. Вернадский показал, что роль фотосинтеза состоит в том, что он служит причиной изменения всего облика Земли. Преобразуя космическую (главным образом солнечную) энергию в свободную земную (химическую, механическую, тепловую, электрическую), живое вещество постоянно нарушает то относительное химическое равновесие, которое присуще поверхности планеты. Усвоение солнечной энергии осуществляется только растительным миром. Но при этом удерживает и преобразует ее все живое вещество планеты. Количество солнечной энергии, поглощаемой живым веществом, колоссально: ежегодно в процессе фотосинтеза растения связывают $1,7 \times 10^{18}$ ккал энергии, хотя живое вещество составляет лишь ничтожную часть массы биосферы, около 0,0001 (Реймерс, 1990).

3. Биосфера – система с наличием механизмов, обеспечивающих непрерывный **круговорот веществ**, основу бесконечности жизни на планете. Благодаря осуществлению круговорота веществ, достигается неисчерпаемость химических элементов и их соединений строительному материалу живых организмов.

Автотрофные организмы, поглощая солнечную энергию, **превращают бедные энергией неорганические вещества в высокомолекулярные богатые энергией органические соединения** и снабжают ими все живое. В процессе передачи с одного трофического уровня в другой энергия постепенно рассеивается. После окончательного разложения органических остатков она частично накапливается в земной коре в виде алюмосиликатов.

Обновление всего живого вещества биосферы Земли осуществляется в среднем за 8 лет. При этом вещество наземных растений (фитомасса суши) обновляется примерно за 14 лет. В океане циркуляция вещества происходит во много раз быстрее: вся масса живого вещества обновляется за 33 дня, в то время как фитомасса океана – каждый день. Процесс полной смены вод в гидросфере осуществляется за 2800 лет. В атмосфере смена кислорода происходит за несколько тысяч лет, а углекислого газа – за 6,3 года. Эти цифры блестяще подтверждают основной тезис В. И. Вернадского о ведущей роли

живого вещества в геохимических процессах. При этом биогеохимический эффект деятельности живого вещества в биосфере проявляется не только в течение геологического времени (миллионы и миллиарды лет), но отчетливо выражен даже в пределах исторического времени – тысячи лет и менее. Наряду с этим некоторые вещества, участвующие в биогеохимическом круговороте, имеют значительно меньшие скорости миграции. Так, время, необходимое для фотосинтетического разложения массы воды Мирового океана, исчисляется 5–6 млн лет. Миллионами лет измеряется также продолжительность общепланетарных циклов углерода, азота и фосфора.

4. Поглощая постоянно из окружающей среды энергию (зеленые растения – непосредственно в форме квантов солнечного света, другие организмы – в форме подготовленного растениями органического материала), живые существа накапливают ее, в результате количество энергии в биосфере увеличивается. Поэтому общее направление природных процессов в поверхностной оболочке планеты противоположно тому, которое следует из второго закона термодинамики по отношению к неживой части природы. **Энтропия биосферы уменьшается, упорядоченность ее соответственно возрастает неуклонно с ходом геологического времени.** Организованность биосферы, высокая слаженность всего живого на планете (при отсутствии, разумеется, разрушительного воздействия человека) наиболее ярко проявляется во взаимной приспособленности организма и среды, их взаимосогласованности и взаимовлияния.

5. Биосфера – **закономерный продукт эволюции Земли.** К такому выводу В. И. Вернадский пришел, исследовав химический состав и химическую эволюцию земной коры и убедившись в том, что они не могут быть объяснены чисто геологическими причинами без учета роли живого вещества в геохимической миграции атомов. Все самоподдерживающиеся динамические системы эволюционируют в сторону усложнения организации и возникновения системной иерархии образования подсистем в структуре системы. Следствием же увеличения сложности и разнообразия биосферы является ускорение эволюции.

6. Биосфера Земли представляет собой **глобальную открытую систему** со своими «входом» и «выходом». Ее «вход» – это поток солнечной энергии, поступающий из космоса, «выход» – образованные в процессе жизнедеятельности организмов вещества, которые в силу каких-либо причин вышли из биогеохимического круговорота, часто – на многие миллионы лет, например залежи угля, нефти, горючих сланцев, торфа и т.п.

7. С точки зрения кибернетики, биосфера – система, обладающая свойством **саморегуляции.** В период создания учения о биосфере, когда кибернетика как наука еще не существовала, В. И. Вернадский говорил об «организованности» биосферы. Одним из наиболее характерных проявлений «организованности», т. е. саморегулирования биосферы, Вернадский считал

озоновый экран, поглощающий губительные для жизни ультрафиолетовые лучи. Состав газовой оболочки нашей планеты полностью регулируется жизнью.

Широко распространенный пример саморегулирующейся системы – Мировой океан. Реки ежегодно вносят в него 2,5 млн тонн карбонатов кальция, а солевой состав океанической воды существенно не меняется. Это происходит потому, что морские организмы используют большую часть растворимых карбонатов для построения своих скелетов, а после отмирания организмов карбонаты в нерастворимой форме осаждаются на дно. Так, в результате создания кальциевых покровов нашей планеты стабилизируется состав океанских вод. Этот механизм действует в биосфере многие миллионы лет.

Таким образом, саморегулирование биосферы Земли обеспечивается живыми организмами. Это позволяет считать биосферу **централизованной** кибернетической системой, обладающей свойством **гомеостаза**. Под таким названием объединяют системы, в которых один элемент или одна подсистема играет доминирующую роль в обеспечении функционирования системы в целом. Этот элемент называют ведущей частью системы, или ее центром. Живые организмы в биосфере играют роль такого центра.

8. Наряду со свойством гомеостаза, биосфера обладает и свойствами **динамичной и неравновесной системы**. Функционирует известный «принцип устойчивого неравновесия живых систем» Бауэра, выдвинутый им в 1935 г. К неравновесным системам относятся атмосфера и океан в связи с непостоянством их химического состава, который в основном регулируется жизнедеятельностью организмов Земли.

Таким образом, функционирование биосферы базируется на сочетании свойств гомеостазиса и динамики.

9. Биосфера характеризуется значительным **разнообразием природных условий**. Согласно кибернетическому закону необходимого разнообразия Винера – Шеннона – Эшби, кибернетическая система только тогда обладает устойчивостью для блокирования внешних и внутренних возмущений, когда она имеет достаточное внутреннее разнообразие.

Высокое разнообразие биосферы определяется общим разнообразием природных условий, которое, в свою очередь, определяется широтными и сезонными изменениями интенсивности поступления солнечной энергии, а также рельефом Земли. Разница абсолютных отметок поверхности Земли составляет больше 19 км: от +8848 м (высшая точка Эвереста) до –1022 м (Марианская впадина в Тихом океане). При этом основное разнообразие биосферы Земли создается живыми организмами.

Примерные расчеты биоразнообразия показывают, что в настоящее время в биосфере представлено более 2 млн видов живых организмов, каждый из которых, в свою очередь, включает в себя миллионы и миллиарды особей, характеризующихся дисперсным распределением в пространстве.

Каждый вид по-своему взаимодействует с окружающей средой. Деятельность живых организмов и создает огромное разнообразие биосферы. Высокое биоразнообразие служит определенной гарантией сохранения всей жизни на нашей планете. Несмотря на многочисленные геологические катастрофы, происшедшие в истории биосферы, нигде не обнаружено лишённых жизни отложений, даже в самых древних, доступных для изучения. В материале, накопленном геологией, отражена непрерывность развития жизни в течение всей геологической истории. Внутреннее разнообразие биосферы обеспечило ее устойчивость даже к самым значительным катастрофическим потрясениям. Так, число родов высших растений составляло: в силуре – 1, в девоне – 36, в интервале от карбона до триаса – 150–200, от юры до неогена – 250–300 (Шилова, Банкина, 1994). Такое увеличение разнообразия таксонов отмечается и среди животных. Следовательно, **разнообразие биосферы в историческом аспекте возрастает.**

Разнообразие является основным условием устойчивости любой экосистемы и биосферы в целом. Именно поэтому биологическое разнообразие отнесено Конференцией ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992 г.) к числу трех (наряду с конвенциями по сохранению лесов и по предотвращению изменений климата) важнейших экологических проблем, по которым приняты специальные заявления или конвенции.

10. Биосфере свойственна **мозаичность строения**. Живое вещество функционирует в пределах отдельных участков биосферы, которые представляют собой экосистемы. Экосистема – это комплекс взаимосвязанных организмов разных видов и изменяемой ими абиотической среды. Без разрушительного воздействия со стороны человека экосистемы обладают способностью к саморегуляции и полному самовозобновлению биоты. Экосистема – это фундаментальная общность живого и среды его обитания. Размеры экосистем могут быть самыми разными, например, экосистема луга, болота, определенного типа леса и т.д. Экосистема глобального масштаба – биосфера Земли.

Экосистемы находятся в постоянном взаимодействии друг с другом и все вместе образуют гигантский круговорот веществ и потоков энергии в пределах биосферы. В нем участвуют следующие основные элементы: водород, кислород, углерод, азот, кальций, калий, кремний, фосфор, сера, стронций, барий, цинк, молибден, медь и никель. Биогеохимический круговорот веществ в биосфере незамкнут. Степень воспроизводства циклов достигает 90–98 % (Шилова, Банкина, 1994). В масштабе геологического времени неполная замкнутость биогеохимических циклов приводит к дифференциации элементов и накоплению их в атмосфере, гидросфере или осадочной оболочке Земли.

11. Биосфера – своеобразный «механизм», в котором связь и соотношение между живым и неживым веществом подчиняются точным матема-

тическим закономерностям, таким же непреложным, как законы движения небесных светил или же перемещений в системах атомов. Точное количественное выражение явлений жизни становится возможным тогда, когда от рассмотрения отдельных особей мы переходим к целым биоценозам, а затем и ко всему живому веществу планеты. Материально-энергетический «напор жизни» на среду подобен напору газа. Живое вещество стремится занять максимальный объем, распространиться на всю свободную территорию. Растекаясь по земной поверхности, оно переносит вместе с собой энергию, полученную от Солнца. Такое растекание жизни по поверхности планеты осуществляется благодаря процессу размножения. **Размножение** – одно из основных свойств жизни, посредством которого осуществляется постоянный обмен веществом и энергией между организмом и средой.

Процесс материально-энергетического обмена в биосфере строго ритмичен. Этот ритм определяется постоянством астрономических явлений – постоянством периода обращения Земли вокруг своей оси (с суточной периодичностью связано размножение одноклеточных) и Солнца (с годовой периодичностью, как правило, связано размножение многоклеточных). Скорость размножения зависит также от скорости распространения солнечной энергии в среде обитания организмов, от размеров последних, от количества заключенной в них геохимической энергии.

Постоянный темп размножения живого вещества задается устойчивостью всех химических реакций земной коры. Изменение этой устойчивости означало бы нарушение всех веками установившихся циклов химических превращений на Земном шаре. Среднее количество неделимых живых организмов, появляющееся в биосфере благодаря размножению в единицу времени, представляет собой меру геохимической энергии живого вещества. У различных биологических видов количество присущей им энергии, а следовательно, и производимой ими работы различно и служит, отмечал В. И. Вернадский, важнейшим видовым признаком.

12. Отличительной особенностью биосферы является ее оводненность. **Вода без жизни в биосфере практически не существует.** Безжизненны лишь ничтожные по массе воды вулканов, богатые серной или соляной кислотой, и, возможно, некоторые рассолы. В водной среде осуществляются практически все химические процессы, происходящие в биосфере. Именно поэтому химически чистая вода в биосфере представляет собой столь же большую редкость, как и вода, лишенная жизни.

Содержание воды в тканях живых организмов примерно в пять раз больше, чем во всех реках Земного шара. Половина воды, содержащейся в корнях растений, обновляется в течение нескольких минут. В результате этого круговорот воды на суше определяется почти исключительно транспирацией растений: они испаряют большую часть воды, выпавшей на сушу в виде атмосферных осадков, а в океане весь объем воды профильтровывается

планктонными ракообразными за полгода, но верхний слой воды (0–500 м) – за 20 дней.

13. Биосфера – система с наличием механизмов, обеспечивающих непрерывный круговорот веществ, **основу бесконечности жизни на планете**. Благодаря осуществлению круговорота веществ достигается неисчерпаемость химических элементов и их соединений, представляющих собой строительный материал живых организмов.

СТРУКТУРА БИОСФЕРЫ

Структура биосферы на уровне самых крупных ее подразделений включает в себя всю гидросферу, верхнюю часть литосферы и нижнюю часть атмосферы.

Гидросфера

Гидросфера – водная оболочка Земли, представляющая собой совокупность океанов, морей, озер, рек, прудов, болот, ледяных покровов и подземных вод. Она занимает 70 % земной поверхности и расположена между атмосферой и литосферой. Она представляет собой прерывистую оболочку планеты, включающую все ее свободные воды, которые могут двигаться под влиянием гравитационной силы, а также под влиянием тепла. Гидросфера отличается высокой динамичностью, движущей силой которой служит круговорот воды. Гидросфера Земли находится в тесной взаимосвязи с другими сферами: с литосферой при посредстве подземных вод и с атмосферой через атмосферную влагу (водяной пар).

Взаимодействие гидросферы с живыми компонентами биосферы очень сложные. Жизнь зародилась в гидросфере, и большинство растений и животных состоит в основном из воды. Однако ее суммарная масса в живых организмах незначительна относительно общего объема гидросферы. Вода с биосферой связана также процессом транспирации, который относится к биологическому звену круговорота воды.

Велика роль гидросферы в поддержании относительно неизменного климата, что позволило жизни воспроизводиться в течение трех с лишним миллиардов лет. Жизнь, возникнув на самой заре существования планеты Земля не менее 3,7 млрд лет назад (о возникновении жизни см. ниже), не прерывалась ни на секунду. Для жизни необходимы температуры в диапазоне от 0 до 100 °С (пределы жидкой фазы воды). Следовательно, температура на протяжении большей части истории планеты отличалась относительным постоянством.

К особенностям гидросферы следует отнести циркуляцию приповерхностных вод океанов, которая вызывается действием ветров. В тропиках

вода движется к западу, увлекаемая пассатами, а в средних широтах – к востоку под действием западных ветров. Это порождает круговые течения в субтропиках, характеризующиеся циркуляцией вод по часовой стрелке в северном полушарии и против часовой стрелки – в южном.

Гидросфера занимает около 70,8 поверхности Земли. Ее общий объем оценивается в 1386 млн км³, что составляет 1/800 части объема Земли. Площадь океанов и морей в 2,5 раза больше площади суши. Масса гидросферы распределена очень неравномерно: около 97 % ее массы находится в Мировом океане, 2,2 % заключены в материковых льдах и лишь 0,1 % приходится на континентальные водоемы.

Структура пресных вод гидросферы следующая: ледники – 85 %, подземные воды – 14 %, озера и водохранилища – 0,6 %, почвенная влага – 0,3 %, пары атмосферы – 0,05 %, речные воды – 0,004 %.

Из общего количества воды на Земле доля пресных вод немногим более 2,5 %, (на каждого жителя Земли приходится около 5,8 млн м³). Однако для человека доступно менее 30 % этих вод, так как основная их часть сосредоточена в ледниковых покровах (около 27 млн км³), скрыта в подземных образованиях (объем подземных пресных вод примерно в 100 раз больше объема поверхностных вод в озерах, реках, болотах).

Нижний предел гидросферы близок к зоне, где проходит сейсмически активный слой Земли, а поверхность граничит с атмосферой.

В наиболее обширной части гидросферы, океаносфере, выделяют три области. В поверхностной толще (до глубины 100 м) света достаточно для фотосинтеза, здесь могут жить зеленые растения; соленость воды меняется в зависимости от района. Батинальная область (от 100 до 1500 м), куда свет проникает лишь в верхние горизонты, отличается слабым механическим движением воды и постоянной соленостью. Абиссальная область (глубже 1500 метров) лишена солнечного света. Температура в ней не превышает 4 °С; растительных организмов нет, однако животные там обитают.

Мировой океан является для человека источником поистине колоссальных ресурсов. Это энергетический потенциал океанических приливов и волн, морских течений, термальных вод. Дно океана содержит отложения, в которых имеются запасы более 30 элементов таблицы Менделеева, сопоставимые с их запасами на суше. Из океана добывают 90 % брома, 60 % магния, 30 % поваренной соли и другие ресурсы. Океан обеспечивает более 75 % мирового грузооборота. Уже сегодня более 25 % белков животного происхождения население Земли получает, используя пищевые ресурсы океана.

Литосфера

Литосфера – верхняя твердая оболочка Земли, обладающая большой прочностью, переходящая без отчетливой границы в подстилающий слой

Земли астеносферу. Вещество астеносферы способно, судя по геофизическим данным, к вязкому или пластичному течению. В связи с этим полагают, что именно в астеносфере происходят процессы, вызывающие горизонтальные и вертикальные движения больших участков (платформ) земной коры. Мощность литосферы колеблется в пределах 50–200 км. Верхняя часть литосферы образует земную кору, а нижняя – верхнюю часть мантии Земли.

Под земной корой понимают сиалитную (состоящую в основном из кремнезема и алюминия) оболочку Земли, имеющую среднюю плотность около $2,7 \text{ г/см}^3$. Земная кора, хотя и представляет собой, в отличие от гидросферы, сплошную оболочку нашей планеты, очень неоднородна как по горизонтали, так и по вертикали.

Горизонтальная неоднородность земной коры проявляется очень резко. В строении земной коры материков и океанов имеются наибольшие различия. В связи с этим различают два основных типа земной коры: континентальный и океанический. Континентальная кора характеризуется наличием всех трех названных выше слоев и очень большими мощностями, достигающими 70–75 км, при средней мощности 35 км. Для океанического типа коры характерны отсутствие гранитного слоя и незначительная мощность, обычно около 5–10 км.

По вертикали в земной коре на основании геофизических данных об изменении плотности вещества сверху вниз выделяют: 1) осадочный слой, средняя плотность которого составляет $1,8\text{--}2,5 \text{ г/см}^3$; 2) гранитный слой, со средней плотностью $2,5\text{--}2,75 \text{ г/см}^3$; 3) базальтовый слой, средняя плотность которого оценивается в $2,75\text{--}3 \text{ г/см}^3$.

Осадочный слой в основном сложен неизменными или слабоизменными осадочными породами (глинами, песками, конгломератами, известняками, доломитами, гипсами и т. д.), образовавшимися на поверхности Земли в результате совместного воздействия следующих факторов: 1) перетолжения продуктов выветривания и разрушения более древних пород; 2) химического и механического выпадения осадка из воды; 3) жизнедеятельности организмов. Меньшую роль в образовании осадочного слоя играют: 4) современные осадки и 5) породы магматического (глубинного) происхождения, возникшие в результате излияния на поверхность расплавленного вещества из недр Земли.

Мощность осадочного слоя очень изменчива. Местами он отсутствует, местами достигает толщины 15–25 км. Средняя мощность этого слоя значительно больше в пределах материков, чем океанов. Общий объем осадочного слоя составляет примерно 10 от объема всей земной коры, причем основная часть приходится на материки и окраины океанов.

Гранитный слой состоит главным образом из магматических пород группы гранита (богатых кремнеземом) и метаморфических пород, образовавшихся за счет сильного изменения под действием высокой температуры

и давления осадочных и магматических пород. Мощность слоя достигает 25–30 км.

Базальтовый слой, вероятно, сложен преимущественно основными, т.е. относительно бедными кремнеземом, породами типа базальтов и метаморфическими породами. Мощность его, как и предыдущих слоев, очень изменчива. Под материками толщина слоя достигает 30 км, в то время как под океаном она колеблется от 2–3 до 10–15 км.

В биосферу входит только самая верхняя часть земной коры, причем нижняя граница биосферы имеет нечеткий, расплывчатый характер, поскольку распространение живых организмов от границы литосферы с атмосферой и гидросферой в глубь Земли резко уменьшается. Отчетливое распространение жизни отмечается лишь до глубины в несколько десятков метров, однако с подземными водами микроорганизмы распространяются и на значительно большие глубины (до 2–3 км). Известно небольшое число находок микроорганизмов в нефтеносных водах и нефти, добытых при бурении с глубин более 4,5 км. Нижняя граница может меняться в зависимости от геологического строения местности, гидрогеологических условий и геотермического градиента (этот показатель представляет собой прирост температуры горных пород земной коры при углублении на каждые 100 м). В различных местах он неодинаков и колеблется от 0,5 до 20 °С, составляя в среднем 3 °С. Основным физическим фактором, определяющим границы распространения микроорганизмов в земной коре, является температура. Подавляющее большинство микроорганизмов не выдерживает длительного пребывания при температуре, близкой к 100 °С, поэтому нижней границей биосферы считают именно глубину распространения температуры в 100 °С. В действительности же распространение живых организмов ограничено не только температурными условиями, но и другими факторами, и не всегда достигает предела, обусловленного возрастанием температуры. Поэтому реальное положение границы биосферы обычно не может быть точно определено.

В составе литосферы принято выделять еще одну, особую сферу жизни – **педосферу**. Она представляет собой сложную, специфическую биогенную оболочку земного шара, которая как бы окутывает сушу материков и мелководье морей и озер (Шилова, Банкаина, 1994). Она выполняет роль земной геомембраны, аналогичную функциям биомембран живых существ. Это своеобразная «кожа» Земли, через которую осуществляется постоянный обмен веществом и энергией между геосферами планеты – атмосферой, гидросферой, литосферой и живыми организмами биосферы. Почва, как геомембрана, регулирует этот обмен, пропуская одни вещества или энергетические потоки и отражая, задерживая, поглощая другие.

Почвенная оболочка образовалась в результате взаимодействия геофизических оболочек планеты. Она – продукт переработки первозданных гор-

ных пород и организмов. Почва обладает развитым плодородием, т.е. способностью производить урожай растений.

Основоположник классического почвоведения В. В. Докучаев дал следующее определение почве: это особое естественно-историческое тело, образующее верхнюю рыхлую оболочку земной коры, сформированную при совокупном воздействии элементов физико-географической среды и организмов.

Почва неоднородна по вертикали. Она представляет собой комплекс горизонтов, различающихся физическими свойствами, окраской, общим обликом и т.д. Совокупность генетических почвенных горизонтов объединяется в понятие «профиль почвы». Каждая почва имеет свой, характерный для нее профиль, т.е. последовательность и характер горизонтов. Генетические горизонты почвы тесно связаны и являются продуктом ресинтеза, аккумуляции, миграции и дифференциации вещества при почвообразовании. Количество, сочетание, степень выраженности и свойства этих горизонтов являются устойчивыми и характерными признаками для определенных типов и разновидностей почв.

Строение и сочетание генетических горизонтов почвенного профиля определяют тип почвы и ее важнейшие свойства. Наиболее существенным и характерным горизонтом почвы является верхний темноокрашенный горизонт. Он содержит гумус и обозначается литерой A_1 . Эллювиальный горизонт (горизонт разрушения и вымывания мелкодисперсных частиц и химических веществ), залегающий под горизонтом, имеет пепельную, светло-серую, белесую, желтовато-серую окраску и обозначается A_2 .

Ниже залегают иллювиальный горизонт, образованный вследствие вымывания и накопления материала из расположенных выше горизонтов A_1 и A_2 . Он более плотной консистенции, бурой или коричневатой окраски, обогащен коллоидно-дисперсными глинистыми минералами, соединениями полоторных окислов и обозначается литерой В.

Ниже располагается горизонт, представляющий собой почвообразующую породу, измененную почвообразовательными процессами, он обозначается литерой С. Исходная горная порода, не затронутая почвообразованием, обозначается литерой D. Если почвообразование идет на магматических породах, то почва обычно развивается из исходной почвообразующей, или материнской, породы, аналогичной подпочвенному горизонту D.

Неоднородность и слоистость большинства осадочных пород, особенно-рыхлых наносов, вызывают несоответствие свойств той осадочной породы, которая превратилась в почву, и современного горизонта D. В таких случаях кроме материнской выделяют подстилающую породу, т. е. ту породу, которая не была исходной для образования данной почвы, но подстилает почвенный профиль. Этот горизонт подстилающей породы обозначается литерой Р.

Мощность почвенного профиля зависит от условий почвообразования и от продолжительности почвообразовательного процесса. Так, в полярном климате, где неблагоприятные условия для жизнедеятельности организмов, низкие температуры, мерзлота, замедленное физическое и химическое выветривание пород, образуются малоразвитые почвы с мощностью не более 10–20 см.

В условиях жаркого, влажного тропического климата, где жизнедеятельность организмов повышена, а продукты выветривания и почвообразования не удаляются эрозионными процессами, мощность почв достигает десятков метров. Таким образом, она не ограничивается пахотным слоем, а определяется глубиной преобразующего воздействия наземных климатических факторов, корневой системы растений и почвенной фауны.

Почва обладает специфическими физическими свойствами (которых нет у горных пород): рыхлостью, структурой, водопроницаемостью, вододерживающей способностью, аэрацией и поглотительной способностью. Благодаря высокой дисперсности почва может удерживать в поглощенном состоянии различного рода ионы, газы и пары. Специфические физические свойства почвы создают благоприятные условия для развития корневых систем растений. Почвы заселены высшими и низшими организмами.

Атмосфера

Атмосфера – газовая оболочка Земли, состоящая в основном из азота (78,08 %), кислорода (20,95 %), аргона (0,93 %), углекислого газа (0,03 %) и остальных газов, составляющих в общей сложности 0,01 % всего объема атмосферы.

Нижняя граница атмосферы – это поверхность суши и гидросферы, резкой верхней границы атмосферы по существу нет. При отдалении от поверхности Земли плотность атмосферы постепенно уменьшается, и она незаметно исчезает. Около половины массы всей атмосферы сосредоточено в приземном 5-километровом слое, а 99 % – в 30-километровом. Масса воздуха выше 30 км составляет лишь 1 %. Верхней границей атмосферы обычно условно принимают высоту над Землей, равной примерно 3 тыс км. Это высота, где плотность атмосферы и межпланетного пространства уравниваются.

Общая масса атмосферы равна $5,16 \times 10^{15}$ т. Атмосферное давление на уровне моря примерно соответствует давлению ртутного столба в 760 мм, или, что то же самое, столба воды высотой 10 м.

Атмосферу делят на ряд слоев. Наиболее распространено деление по характеру изменения температуры в зависимости от высоты. По этому принципу снизу вверх выделяют тропосферу, стратосферу, мезосферу, термосферу и экзосферу.

Тропосфера – нижний, прилегающий к земной поверхности слой атмосферы, в пределах которого температура равномерно уменьшается с высотой. Верхняя граница тропосферы проходит по тропопаузе, высота которой изменяется в зависимости от широты местности, времени года и даже суток. При движении от полюсов к экватору она повышается, и, следовательно, изменяется и высота тропосферы, в среднем от 9 до 17 км.

Основная причина изменения высоты тропосферы колебания температуры. В средних широтах часто отмечаются разрывы тропопаузы в связи с резким изменением ее высоты.

В тропосфере заключено около 80 % всей массы атмосферы и практически весь водяной пар, в ней происходят интенсивные горизонтальные перемещения воздушных масс, обуславливающие погоду, образуются облака, выпадают осадки. Температура в пределах тропосферы сильно изменяется как в пространстве, так и во времени, однако в среднем она уменьшается с высотой примерно на 0,6 °С на каждые 100 м. Уменьшение температуры с высотой вызвано тем, что тропосфера прогревается преимущественно за счет тепла, излучаемого земной поверхностью. У верхней границы тропосферы температура снижается до –56 °С.

Тропосфера – слой, где в основном формируется погода планеты.

Стратосфера – это воздушная оболочка, расположенная над тропосферой. Для стратосферы характерны относительно постоянная температура в нижней части (примерно до высоты 25 км) и постепенное возрастание ее в верхней части, а также, в отличие от тропосферы, исключительная сухость воздуха. Верхняя граница стратосферы расположена на высоте в среднем около 50 км. У верхней границы стратосферы температура воздуха достигает 0 ... +10 °С.

В нижней части стратосферы располагается озоновый слой, для которого характерно повышенное содержание озона. Общая доля озона составляет менее одной миллионной части от общей массы атмосферы. Однако в связи с тем, что содержание озона в атмосфере при удалении от поверхности Земли примерно на границе тропосферы и стратосферы резко увеличивается, а затем на высоте 30 км также резко падает, создается слой, обогащенный этим газом. В озоновом слое, несмотря на то, что он составляет незначительную часть атмосферы, содержится основная часть всего озона, причем его концентрация на высоте 15–26 км более чем в 100 раз превышает концентрацию у поверхности Земли. Под влиянием магнитного поля Земли озоновый слой над полюсами находится на меньшей высоте и содержит больше озона, чем над экватором.

Значение озонового слоя очень велико. Он поглощает 13 % солнечной радиации, идущей к Земле, в то время как вся атмосфера Земли поглощает 20 %. Поэтому температура воздуха в стратосфере снизу вверх возрастает от –56 до +10 °С. Однако главное значение озонового слоя заключается в

том, что он почти полностью поглощает ультрафиолетовые лучи, губительные для всего живого. Эти лучи на границе с атмосферой составляют около 7 % от всего потока солнечной радиации. Благодаря озону атмосферы, до поверхности Земли доходят лишь сотые доли процента ультрафиолетовых лучей. Именно поэтому озоновый слой часто называют озоновым экраном, защищающим жизнь на Земле.

Мезосфера располагается выше стратосферы. Для нее характерно уменьшение температуры с высотой. Верхняя граница ее проходит по слою, обладающему минимальной для атмосферы температурой (около $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$), располагающемуся в среднем на высоте около 85 км.

Термосфера. Мезосфера переходит в термосферу, характеризующуюся быстрым возрастанием температуры до 1000–2000 $^{\circ}\text{C}$. Однако непосредственно измерить температуру в атмосфере можно лишь до высоты 6070 км. Выше же в связи с чрезвычайной разреженностью газа этого сделать нельзя. В термосфере температура не может ощущаться физически как степень нагретости тела. Для столь разреженного газа она может быть лишь рассчитана как мера средней кинетической энергии хаотического движения частиц газа. Таковую рассчитанную температуру называют кинетической. Граница термосферы с самой внешней оболочкой земной атмосферы (экзосферой) располагается выше 800–1000 км. В пределах термосферы температура и плотность воздуха очень сильно зависят от времени года и суток. Так, плотность воздуха и температура значительно больше днем, чем ночью. Температура и плотность воздуха термосферы резко возрастают в годы с повышенной солнечной активностью. В пределах термосферы возникают полярные сияния. Из-за воздействия ультрафиолетовых и космических лучей частицы воздуха в термосфере и выше ее ионизированы. Поэтому иногда всю часть атмосферы выше 80 км выделяют как ионосферу – оболочку, в которой воздух сильно ионизирован. Часто не выделяют отдельно стратосферу и мезосферу, а объединяют обе эти части в стратосферу. В таких случаях атмосферу делят на тропосферу, стратосферу и ионосферу.

Экзосфера – внешняя оболочка земной атмосферы – располагается выше 300–1000 км. В этом слое плотность газов становится столь низкой, что наиболее «легкие» атомы (водорода и гелия) способны вырваться из гравитационного поля Земли и стать частью межпланетной среды.

В биосферу входит самая нижняя часть атмосферы – тропосфера. Физическим пределом распространения жизни в атмосфере является озоновый слой. Поэтому нижнюю границу его можно рассматривать как верхнюю границу биосферы. Озоновый слой ограничивает распространение жизни, так как выше его концентрация содержащегося в нем озона губительна для живого. Для живых организмов критическим считается содержание озона в 0,00005 % (объемного процента), в озоновом слое на высоте около 15–26 км его концентрация достигает 0,001 % (у земной поверхности озона 0,000007 %).

Жизнь в атмосфере не может существовать без непосредственной связи с литосферой или гидросферой. Тропосфера представляет собой место временного нахождения способных летать организмов (насекомых, птиц, рукокрылых из млекопитающих) или подхваченных воздушными потоками с поверхности Земли бактерий, спор, пылицы. Т.е. у атмосферы нет своих постоянных жителей, а имеются только «временные пришельцы» из других областей биосферы (Шилова, Банкина, 1994). В этом заключается своеобразие проявления жизни в тропосфере, определяющее некоторую условность отнесения всей этой оболочки к биосфере. Действительно, пропуская через фильтр воздух, взятый на больших высотах, можно найти в нем споры бактерий и грибов. Но этот «аэропланктон», очевидно, не имеет активного метаболизма. Даже на поверхности Земли есть места слишком жаркие, слишком холодные или слишком сухие, для того чтобы там могли существовать организмы с активным метаболизмом (не считая, конечно, людей, снабженных соответствующим оборудованием). Но и в таких местах всегда можно найти споры. Таким образом, оболочка Земли, называемая биосферой, имеет неправильную форму. Она окружена некой «парабиосферной» областью, в которой жизнь присутствует только в покоящемся состоянии.

При этом атмосфера входит необходимым компонентом в глобальную систему поддержания жизни. Она состоит из сложного набора газов, многие из них биогенного происхождения. Атмосфера Земли меняется, отражая, словно в зеркале, все разнообразные перемены, характеризующие непрерывные изменения жизни.

В целом, почва представляет собой многофазную, полидисперсную систему, состоящую из различных по размеру механических элементарных частиц, минеральных или органических, микроагрегатов, крупных структурных единиц и их групп. Значительная часть почвы (около 50 %) занята твердой фазой. Остальная часть представлена живым веществом, водой и воздухом.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В БИОСФЕРЕ

Энергетические процессы в биосфере основаны на фотосинтетическом восстановлении двуокиси углерода, в процессе которого образуются органические вещества и молекулярный кислород. Этот процесс – лишь один из нескольких, описываемых общим уравнением:



В этой реакции донором водорода может служить вода (у цианобактерий и зеленых растений), сероводород (у фотосинтезирующих серобактерий) или различные органические соединения (у несерных пурпурных бак-

терий). Реально фотосинтез – очень сложный процесс, причем у разных организмов на некоторых этапах этот процесс может идти несколькими взаимноисключающими путями. Возникновение сложных совокупностей сопряженных реакций представляет собой результат эволюции на основе длительного действия естественного отбора.

Общий геохимический результат фотосинтеза – появление более окисленной области биосферы (атмосфера и большая часть воды, в которой растворен кислород), а также восстановленной ее области (тела организмов и продукты их разложения в подстилке, почве и донных отложениях). Часть остатков подвергается захоронению, образуя диспергированный органический углерод или горючие ископаемые. Кислород также уходит из биосферы, окисляя при выветривании первичные горные породы.

Количественное соотношение органического (восстановленного) и неорганического (окисленного) углерода, несомненно, связано с историей Земли. При этом восстановленная часть живого или мертвого вещества биосферы постоянно окисляется атмосферным кислородом. Образуется двуокись углерода, которая может быть вновь использована в фотосинтезе, а энергия тратится на двигательную активность, рост и размножение. Из этого обратимого цикла некоторая часть углерода уходит, образуя горючие ископаемые. Именно наличие этой части процесса человечество обязано своей цивилизацией.

Эффективность фотосинтеза в планетарном масштабе невелика, в разных географических зонах различна. Связано это с наклоном земного шара в $23,5^\circ$ к плоскости эклиптики. В результате возникает значительный градиент приходящего солнечного излучения между полюсами и экватором, обладающий сезонной изменчивостью.

Количество солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы, является функцией широты. Распределение приходящей солнечной радиации зависит от свойств облачного покрова, содержания пыли в атмосфере, а также от суточных и сезонных изменений различных физических величин. В среднем за год примерно 25–30 % солнечной радиации отражается газами и облаками обратно в космическое пространство. Еще примерно 25 % радиации поглощается, а затем переизлучается облаками, пылью и газами в виде нисходящего излучения. Примерно такое же количество поступает на поверхность Земли в виде прямой солнечной радиации. В силу отражательной способности (альбедо) поверхности Земли часть падающей солнечной энергии (в среднем для планеты примерно 32 %) уходит обратно в атмосферу. Форма и цвет освещаемых поверхностей сильно влияют на величины альбедо. Снег, например, может отражать 80 % солнечного излучения и поэтому нагревается медленно, тогда как травянистая поверхность отражает 20 %, а темные почвы – всего лишь 10 % приходящей радиации.

В процессе фотосинтеза используется лишь энергия видимой части спектрального состава солнечного излучения (380–710 нм), составляющая примерно 41 %. Ее называют фотосинтетически активной радиацией (ФАР). Разные виды растений и растительных сообществ существенно различаются по величинам эффективности фотосинтеза (КПД, %), которую рассчитывают в процентах как отношение величины прироста сухой биомассы в единицу времени на единицу пространства к величине, поглощенной ФАР (см. табл. 1).

Установлено, что средняя величина КПД фотосинтеза для естественной растительности на Земле низка и оценивается примерно в 0,2 %.

Таблица 1

*Эффективность фотосинтеза растений и сообществ
(Камлюк, 2004)*

Виды растений и сообщества	КПД фотосинтеза, %
Кукуруза	5,1 (3,1–7,4)
Поливная кукуруза	12,8
Рис	2,8–3,5–4,9
Люцерна	0,4–1,8
Белый клевер	1,8
Зерновые культуры	3–4
Культура хлореллы	14
Пустынные кустарники	0,03
Субальпийские луга	0,2
Прерии	1,2–3,0
Заросли тростника (пойма реки Вахш)	4,1–4,8
Лесные фитоценозы	до 3,5

ТИПЫ ВЕЩЕСТВ В БИОСФЕРЕ

В. И. Вернадский выделял в биосфере семь различных, но в то же время генетически взаимосвязанных типов веществ в биосфере.

1. Живое вещество – это совокупность живых организмов биосферы, численно выраженная в элементарном химическом составе, массе и энергии. Термин введен В. И. Вернадским. Живое вещество связано с биосферой материально и энергетически посредством биогенной миграции атомов в результате дыхания, питания, роста и размножения организмов. Живое вещество представлено автотрофными организмами (зеленые растения и автотрофные микроорганизмы), гетеротрофными организмами (бесхлорофильные растения, все животные, человек), миксотрофными организмами, которые питаются готовыми органическими соединениями, хотя и способны их синтезировать.

Живое вещество, несмотря на то, что оно по массе занимает ничтожно малую часть Земли, играет исключительно важную роль в биосфере и не имеет себе равных среди других ее компонентов. Живое вещество – главная структурная единица биосферы. Оно влияет на все природные процессы: влияет на изменения ландшафтов, на условия выветривания пород (разрушения и преобразования), обеспечивает миграцию и перемещения подвижных химических, минеральных и органических веществ; включает многообразные энергетические и геохимические функции, свойственные только организмам и их биогеохимической деятельности.

В. И. Вернадский указывал, что химическое состояние наружной коры нашей планеты всецело находится под влиянием жизни, определяется живыми организмами, которые превращают солнечную (космическую) лучистую энергию в земную (химическую). Именно живое вещество создает бесконечное разнообразие окружающего мира. С деятельностью живых организмов, их дыханием, питанием, размножением, смертью и разложением их остатков связан планетарный процесс миграции химических элементов в биосфере.

Живое вещество чрезвычайно химически и геологически активно. Рассеянное в мириадах особей, непрерывно умирающих и рождающихся, обладающих колоссальной действенной энергией, живое вещество выполняет в биосфере огромную работу и является могучей геологической силой планетарного характера, определяющей лик Земли. Одно из проявлений геологической работы живого вещества – его участие в создании органогенных осадочных пород (каменный уголь, битумы, известняки, нефть и т.д.), названных Вернадским биогенным веществом биосферы. При участии живого вещества образуются и биокосные вещества: почти вся вода биосферы, почва, кора выветривания и т.д. Роль живого вещества как геологического фактора проявляется в контроле им всех основных химических превращений в биосфере.

Биогенную, т.е. основанную на функционировании живых организмов, миграцию веществ Вернадский назвал основной чертой организованности биосферы. Эволюция видов, приводящая к созданию форм жизни, устойчива в биосфере и должна идти в направлении увеличения биогенной миграции атомов.

В. И. Вернадский писал: «Растекание жизни, движение, выражающееся во всюдности жизни, есть проявление прежде всего химической энергии в биосфере. Эта энергия проявляется в работе, производимой жизнью, в переносе химических элементов и в создании из них новых тел. Я буду называть ее геохимической энергией жизни в биосфере».

Как указывал Вернадский, жизнь создает в окружающей ее среде условия, благоприятные для своего существования. Поступательное развитие

жизни от ее зачатков до настоящего времени можно кратко охарактеризовать следующим образом (Камлюк, 2004):

- 1) увеличивалось разнообразие живых существ;
- 2) изменялась их биомасса;
- 3) усложнялась структурная организация экосистем;
- 4) совершались коренные преобразования неживой части биосферы;
- 5) изменялся химический состав литосферы, природных вод и атмосферы и их неорганических и органических продуктов;
- 6) биогенная форма миграции приобрела решающее значение в круговороте веществ и энергии в земной коре.

2. Биогенное вещество, или вещество биогенного происхождения, это категория веществ, которые сформировались в результате жизнедеятельности живого вещества. Они сформировались как в прошедшие геологические эпохи (каменный уголь, природный газ, торф, нефть, известняк), так и создаются в настоящее время (например торф, сапропель, гумус). Биогенные вещества в том масштабе, в котором они образовывались в прошлом, сейчас, по-видимому, не образуются.

3. Биокосное вещество представляет собой неживое вещество, преобразованное живым в результате длительного взаимодействия между ними. Это почва, донные отложения, приземная атмосфера, природные воды, насыщенные живыми организмами и т.д.

4. Косное вещество – это неживое вещество, не затронутое преобразующей деятельностью живых организмов. Оно находится в трех состояниях: жидком, твердом и газообразном. Большую часть нашей планеты образует именно косное вещество, однако в пределах биосферы его найти трудно. Оно выступает по разломам, трещинам в земной коре, в результате вулканической деятельности. Попав в биосферу, косное вещество взаимодействует с живыми организмами, превращаясь постепенно в биокосное вещество.

5. Космическое вещество. Попадает на Землю из космоса в виде метеоритов, болидов, космической пыли. В биосферу по очень приблизительным оценкам ежегодно поступает около 10 тыс. тонн космического вещества. Приток вещества из космоса уравнивается потерей вещества в виде легких газов, которые рассеиваются в космическом пространстве.

6. Радиоактивное вещество. Оно выделяется в отдельную группу. По гипотезе В. И. Вернадского, радиоактивный распад – это один из двигателей, приведших к созданию живого вещества.

7. Рассеянные атомы. Жесткое космическое излучение вызывает трансформацию элементов и образование новых атомов, которые остаются в атмосфере. Их роль в биосфере мало изучена. Они служат одним из элементов асимметрии биосферы, как веществ, возникающих вне биосферы.

ОСНОВНЫЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ ЖИВОГО ВЕЩЕСТВА

1. Энергетическая функция. Она заключается в способности живых организмов аккумулировать и трансформировать энергию – прежде всего энергию солнца. Она аккумулируется в виде первичной продукции, которая ежегодно составляет 200 млрд т сухого органического вещества. Эта энергия передается в последующие пищевые звенья.

Энергетическая функция живого вещества нашла отражение в двух биогеохимических принципах, сформулированных В. И. Вернадским. В соответствии с первым из них геохимическая биогенная энергия стремится в биосфере к максимальному проявлению. Второй принцип гласит, что в процессе эволюции выживают те организмы, которые своей жизнью увеличивают геохимическую энергию.

2. Газовая функция. Она заключается в способности изменять и поддерживать определенный газовый состав среды обитания и атмосферы в целом. Метаболизм совершается за счет газового обмена или сопровождается им. Наиболее масштабные процессы – это фотосинтез и дыхание растений, животных и микроорганизмов, сопровождающиеся поглощением и выделением CO_2 и O_2 . Организмы, способные к фотосинтезу, сыграли решающую роль в смене восстановительной среды на окислительную в геохимической эволюции планеты и формировании состава современной атмосферы.

3. Концентрационная функция. Живое вещество способно концентрировать в себе химические элементы. Считается, что элемент сконцентрирован, если его в организме больше, чем в окружающей среде на 10 % и более. Именно благодаря этой функции и были образованы осадочные породы, залежи горючих ископаемых, руды, почвы. Эта функция приводит также к накоплению в организмах по цепям питания вредных для них органических веществ.

4. Окислительно-восстановительная функция. Окислительно-восстановительные реакции лежат в основе метаболизма всех живых организмов. Эта функция базируется на биогенной миграции элементов и концентрационной функции. Многие вещества в природе очень устойчивы и не подвергаются окислению при обычных условиях. Примером может служить молекулярный азот – один из важнейших биогенных элементов. Но живые клетки располагают настолько эффективными ферментами, что способны осуществлять многие окислительно-восстановительные реакции в миллионы раз быстрее, чем это может происходить в абиогенной среде. Жизнь любых организмов сопровождается непрерывным синтезом и распадом веществ в их клетках. Это свойство объединяет все живые существа. Соотношение этих реакций различно, одни процессы могут преобладать над другими, но в целом в биосферном масштабе они сбалансированы.

5. Деструкционная функция. Выполнение этой функции приводит к тому, что мертвые органические вещества расщепляются на простые и, в конечном итоге, до минеральных веществ, а минеральные вещества вовлекаются в новый круговорот веществ и энергии.

6. Информационная функция. Она состоит в том, что организмы способны получать информацию путем соединения потока энергии с активной молекулярной структурой, играющей роль программы (нуклеиновые кислоты). Способность живых организмов воспринимать, хранить и перерабатывать молекулярную информацию совершила эволюцию в природе и стала важнейшим экологическим системообразующим фактором.

7. Средообразующая и средорегулирующая функции. Деятельность живых организмов привела к образованию современного состава атмосферы, от которого зависит тепловой и радиационный режимы на Земле. Живое вещество как саморегулирующаяся система регулирует состав среды, в которой оно и находится. Основным принцип средорегуляции – кибернетический принцип отрицательной обратной связи.

Растительный покров существенно определяет водный баланс, распределение влаги и климатические особенности больших пространств. Живые организмы играют ведущую роль в самоочищении воздуха, рек и озер, от них во многом зависит солевой состав природных вод и распределение многих химических веществ между сушей и океаном. Благодаря растениям, животным и микроорганизмам создается почва и поддерживается ее плодородие. Человек обеспечен всем необходимым (пищей, одеждой и т.д.) именно благодаря функционированию природных сообществ, которые, по существу, создали условия для своего существования. Разрушение же среды, осуществляемое человеком в настоящее время, неизбежно приводит к ослаблению средообразующей функции живого вещества.

СВОЙСТВА ЖИВОГО ВЕЩЕСТВА

Живое вещество, как совокупность всех живых организмов на планете, находится в постоянной динамике, движении, развитии. По этим показателям оно коренным образом отличается от всех других типов веществ. Оно обладает комплексом уникальных свойств, основные из которых следующие.

1. Живое вещество характеризуется огромной энергией, запасенной в нем и способной производить работу.

2. Скорость протекания химических реакций в живом веществе, благодаря наличию ферментов, увеличивается в тысячи и миллионы раз.

3. Ряд органических веществ, в первую очередь, белки, нуклеиновые кислоты, многие липиды, устойчивы только в живых организмах.

4. Живому веществу присуща подвижность. Вернадский различал две формы движения живого вещества: а) пассивную, создаваемую ростом и размножением живого вещества и присущую всем организмам; б) активную, представленную направленным перемещением организмов (характерна для животных, в меньшей степени – для некоторых протист и бактерий). Благодаря различным формам движения живое вещество способно заполнить собой все возможное пространство. В. И. Вернадский называл этот процесс давлением жизни.

5. Живое вещество более разнообразно морфологически и химически, чем неживое. Например, одних только белков насчитывается примерно 20^{20} .

6. Живое вещество в биосфере представлено дискретными единицами, т.е. индивидами.

7. Наряду с дискретным существованием, живое вещество всегда представлено сообществами – фитоценозами, зооценозами, биоценозами, в целом.

8. Живое вещество существует в форме непрерывного чередования поколений. Это способствует его обновлению и эволюции.

9. Способность к эволюционным процессам. При этом происходит нарушение абсолютного копирования в ряду поколений, и на основе конкуренции и естественного отбора улучшаются приспособительные возможности живых организмов.

10. Живое вещество постоянно производит работу.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЖИВОГО ВЕЩЕСТВА

В живых организмах содержится в разных количествах и формах значительное число известных химических элементов. Одни из них постоянно встречаются, другие реже, одни в большем количестве, другие – в меньшем. К химическим элементам, содержащимся в наибольших количествах, так называемым макроэлементам, относятся кислород, углерод, водород и азот. Только углерод образует с другими элементами не менее двух миллионов органических соединений. По массе на долю кислорода в составе живых организмов приходится 60–70 %, углерода – 20 %, водорода – 10 % и азота – 3–5 %.

Источником химических элементов для растений является почва, для животных – растения и другие животные. Химический состав растений и животных неодинаков. Так, в организме животных накапливается больше, чем в организме растений, N, P, S, C, Ca и меньше Si, Al, Mg. В растениях содержится кислорода больше, чем в литосфере, в 1,1–1,5 раза, азота – в несколько раз, а углерода и водорода – в десятки раз. P, S, Br, K в растениях меньше, чем в литосфере, в несколько раз; C, Ca, Mg, I, Cu, Mo – в десятки, Na, Ba, Mn, Fe, Al, Si – в сотни раз и т.д.

В организме животных, по сравнению с литосферой, содержание N, C, H в десятки раз больше, P, S в несколько раз, O – в 1,11–1,5 раза. В то же время в организме животных, по сравнению с литосферой, меньше Ca, Na, K в несколько раз, Zn, Br, Mg, As – в десятки, Pb, Cu, F, Fe, B – в сотни, Mn – в тысячи, Si, Ti, Al – в десятки тысяч раз.

Биологическая роль химических элементов определяется не столько их количественным содержанием в организме, сколько активностью участия в процессах создания органического вещества. А это зависит, главным образом, от свойств элементов.

Известно, что организмы аккумулируют в основном 11 химических элементов: O, C, H, Ca, N, K, P, Mg, S, Si, Na. В. М. Гольдшмидт, а затем А. Е. Ферсман указывали, что возникновение жизни на Земле и дальнейшее ее существование невозможны без 17 химических элементов – биофилов: C, H, O, N, P, S, Si, I, B, Ca, Mg, K, Na, V, Mn, Fe, Cu. Отношение концентрации элементов в живом веществе к кларку (кларк – среднее содержание химического элемента в земной коре) А. И. Перельман назвал биофильностью элементов. Наибольшей биофильностью обладает углерод – 7 800. Биофильность азота – 160, водорода – 70, кислорода – 1,5, хлора – 1,1, серы – 1, фосфора – 0,75.

Восемь химических элементов-биофилов из приведенного выше перечня являются абсолютными органогенами, без которых невозможно существование жизни: O, H, C, N, Mg, K, P, S.

Каждый химический элемент в живом организме выполняет определенную функцию. Так, магний входит в состав молекулы хлорофилла, фитина, каротина и других органических соединений, осуществляющих процесс фотосинтеза, железо входит в состав гемоглобина – дыхательного пигмента крови животных и т. п.

Химические элементы после отмирания живых организмов и их минерализации возвращаются в почву (водную среду), а из нее вновь захватываются другими организмами, вовлекаясь в новый биогеохимический цикл.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЖИВОГО ВЕЩЕСТВА В БИОСФЕРЕ. БИОМАССА И ПРОДУКТИВНОСТЬ ЖИВОГО ВЕЩЕСТВА

По структуре и составу биосфера мозаична, распределена неравномерно по массе и составу. В этой мозаичности отражается геохимическая и геофизическая неоднородность лика Земли (представленность и чередование океанов, равнин, гор, озер, рек и т.д.). Причем неравномерность распределения живого вещества проявлялась в прошлые геологические эпохи и в настоящее время. Максимальное содержание живого вещества гидросферы приурочено к мелководьям морей, минимальное – к глубинным акваториям (абиссаль); на суше эта неравномерность проявляется в мозаике биогеоценотического

покрова (леса, болота, степи, пустыни и др.) с минимумом плотности живого вещества в высокогорьях, пустынях и полярных областях.

Главной геохимической особенностью живого вещества является миграция атомов в его составе. Благодаря процессам жизнедеятельности химические элементы земной коры, гидросферы и атмосферы упорядоченным образом постоянно сортируются и дифференцируются. Для оценки масштабов геохимической работы живого вещества и ее интенсивности можно использовать показатели биомассы и скорости прироста продуктивности.

По условиям жизни для организмов выделяют две основные структурные части биосферы: континентальную и океаническую. Континентальная часть биосферы занимает 29 % площади планеты, океаническая – 71 %.

Несмотря на преобладание океанической части биосферы основная масса живого вещества сосредоточена на континентах (см. табл. 2).

Как видно из таблицы, на континентах по биомассе преобладают растения (99,2 %), в океане – животные и микроорганизмы (93,7 %). Основная масса живого вещества планеты сосредоточена в зеленых растениях суши, и по абсолютной величине она почти на четыре порядка больше водных фототрофных организмов водорослей и цианобактерий. Однако по функциональным показателям (величинам продукции) они вполне сопоставимы. Организмы, не способные к фотосинтезу, составляют менее 1 %.

Таблица 2

*Биомасса организмов Земли (млрд т сухой массы)
(Камлюк, 2004)*

Сухое вещество	Континенты			Океан			Итого
	зеленые растения	животные и микроорганизмы	всего	зеленые растения	животные и микроорганизмы	всего	
Тонны 10 ⁹	2400	20	2420	0,2	3,2	3,4	2423,4
Проценты	99,2	0,8	100	6,3	93,7	100	–

Из-за шарообразности планеты и наклона ее оси вращения разные географические зоны континентальной части биосферы получают различное соотношение тепла и влаги, что формирует широтную зональность.

Отечественные ученые А. А. Григорьев и М. И. Будыко (1958), изучая современную биосферу, сопоставили взаимосвязь теплового (радиационного) и водного балансов природных ландшафтов разных географических поясов Земного шара, сформулировали «периодический закон географической зональности»: в разных географических поясах, обладающих различными тепловыми ресурсами, но в близких по увлажнению условиях форми-

руются типы ландшафтов, аналогичные соответствующим географическим зонам. Они произвели расчет теплового баланса Земли с учетом падающего потока солнечной энергии. М. И. Будыко (1982) создал «энерго-балансовую» модель климата, которая стала базовой в современных исследованиях глобального потепления. Для этого указанные авторы использовали два показателя: радиационный баланс и радиационный индекс сухости.

Радиационный баланс земной поверхности – это разность величин между поглощенной солнечной радиацией и длинноволновым излучением, отраженным земной поверхностью. Радиационный баланс измеряется в ккал/см²/год. На основании радиационного баланса выделяют следующие географические пояса: меньше 0 – высокие широты; 0–50 – умеренные широты; 50–75 – субтропические широты; больше 75 ккал/см²/год – тропические широты.

Радиационный индекс сухости представляет собой отношение радиационного излучения, полученного земной поверхностью, к затрате тепла на испарение годовой суммы атмосферных осадков.

На основании сопоставления величин этих двух показателей указанными авторами построена географическая широтная зональность, включающая несколько главных типов глобальных экосистем – биомов (совокупностей биоты и среды их обитания определенной ландшафтно-географической зоны). Различают гумидные экосистемы с избыточными атмосферными осадками; семиаридные с ограниченными осадками; аридные с значительным недостатком осадков. Эти экосистемы имеют различные запасы растительной биомассы (см. табл. 3, средняя первичная продукция).

Представленные в табл. 3 величины биомасс растений и первичной продукции получены в результате исследований (1967–1972) в рамках Международной биологической программы (МБП), в которой приняли участие ученые из 58 стран, в том числе и из бывшего СССР.

Несмотря на низкую эффективность использования солнечной энергии в процессе фотосинтеза, растительные сообщества морских и наземных экосистем аккумулируют около 170 млрд т сухого органического вещества в год (см. табл. 3).

Наиболее продуктивными являются тропические леса, наименьшая продуктивность у пустынных экосистем. Продуктивность сельскохозяйственных земель намного ниже, чем всех лесных экосистем. Таким образом, природа работает более эффективно, чем человек. Болота в 3 раза более продуктивны, чем возделываемые человеком земли. Таким образом, осушая болота, мы существенно снижаем продуктивность экосистемы.

Более 30 % первичной продукции и около 90 % всей растительной биомассы планеты сосредоточено в лесах, занимающих менее 10 % общей площади суши. Только в тропических лесах находится более половины всей фитомассы нашей планеты, а занимают эти леса только 4 % поверхности Земного шара. Таким образом, основная масса кислорода планеты образуется лесами, и они поистине являются легкими планеты.

Таблица 3

*Первичная продукция и биомасса растений
(в сухом органическом веществе) в различных биомах биосферы
(Камлюк, 2004)*

Тип экосистемы	Площадь ($\times 10^6$ км ²)	Первичная продукция (г/м ² /год)	Суммарная первичная продукция (10^9 т/год)	Средняя первичная продукция (кг/м ²)	Суммарная биомасса (10^9 т)
<i>Продуктивность суши</i>					
Влажные тропические леса	17,0	2200	37,4	45	765
Субтропики	7,5	1600	12,0	35	260
Лиственные леса умеренной зоны	7,0	1200	8,4	30	210
Тайга	17,0	1050	16,1	28	415
Саванна и лесостепь	23,5	800	19,5	5	110
Степь	9,0	600	5,4	1,6	14
Тундра	8,0	140	1,1	0,6	5
Пустыни и полупустыни	18,0	90	1,6	0,7	13
Песок, скалы, лед	24,0	3	0,07	0,02	0,5
Обрабатываемые земли	14,0	650	9,1	1	14
Заболоченные земли	2,0	2000	4,0	15,0	30
Озера и реки	2,0	250	0,5	0,02	0,05
Всего на суше	149,0	–	115,0	–	1837
<i>Продуктивность океана</i>					
Открытый океан	332,0	125	41,5	0,003	1
Апвеллинг	0,4	500	0,2	0,02	0,008
Шельф	26,6	360	9,6	0,01	0,27
Макрофиты и рифы	0,6	2500	1,6	2,0	1,2
Эстуарии	1,4	1500	2,1	1,0	1,4
Всего в океане	361,0	–	55,0	–	3,9
Всего на планете	510,0	–	170,0	–	1841

На суше, занимающей менее 30 % поверхности планеты, ежегодно образуется 69 % первичной продукции и более 99 % суммарной биомассы растений.

Продуктивность открытого океана значительно ниже продуктивности суши и лишь немного превышает продуктивность пустынь. Высокая продуктивность эстуарий, зарослей макрофитов и коралловых рифов существенно не меняет положения, поскольку эти экосистемы занимают ничтожно малую часть океана.

Некоторые экосистемы, занимающие обширные пространства планеты, попадают в категорию низкопродуктивных из-за таких ограничивающих факторов, как вода (пустыни) или биогенные вещества (открытый океан).

Основная биомасса растений суши сосредоточена в древесной растительности. В лесных биомах основная часть биомассы сосредоточена в надземных органах – 30–50 т/га), а в тропических биомах – 150–170 т/га. Соотношение надземной части древостоя к подземной составляет 3 : 1; 4 : 1. Древесные растения ежегодно потребляют от 50 до 300 кг/га зольных элементов и только 15–25 (реже 50 %) этого количества возвращается с опадом. С опадом древесные растения возвращают (в кг/га): а) хвойные Са – 8–30, К – 2–9, N – 7–34; б) лиственные Са – 20–105, К – 16–84, N – 23–65. Отношение массы подстилки к массе зеленой части опада составляет 10–15 % вследствие медленного разложения и минерализации органических остатков. Масса подстилки в хвойных лесах составляет 20–70 т/га, иногда до 100 т/га. Эти подстилки содержат (в т/га) 1–3,6 зольных элементов и 0,5–0,8 азота. В широколиственных лесах масса подстилок значительно меньшая – 2–20 т/га, но они содержат столько же зольных элементов, сколько и подстилки в хвойных лесах, т.е. 1–3,6 т/га (Камлюк, 2004).

Древесная растительность не только переносит громадное количество химических элементов в системе почва – растение, но и активно участвует в почвообразовании.

Биогеохимический круговорот в экосистемах травянистой растительности носит несколько иной характер. Во-первых, надземный запас фитомассы луговых степей и прерий составляет всего 7–8 т/га. На долю корней в травянистых экосистемах приходится 65–95 %, или 4–7 т/га. У однолетних травянистых растений ежегодно возвращается 100 % надземной фитомассы, а у многолетних 45–60 %. Корневые системы обновляются через 2–4 года, а ежегодно отмирает 40–50 % корней, которые становятся субстратом для микробного разложения (Камлюк, 2004).

Эти данные свидетельствуют о быстрой оборачиваемости химических элементов в системе почва – растение, и биогеохимический цикл в травянистых экосистемах оказывается значительно короче, чем в лесных. При этом в биологический круговорот зольных элементов вовлекается столько же, сколько и в лесных экосистемах.

В разных почвенно-климатических зонах эти циклы отличаются и скоростью оборота химических элементов, и их объемами. Наименьшее количество химических элементов вовлекается в тундровых экосистемах, где они почти полностью возвращаются в почву. Наибольшее количество химических элементов вовлекается в лесной растительности, но возвращается их не более половины. Травянистая растительность может вовлекать большие количества химических элементов и большую их часть возвращать в почву ежегодно.

Описанные уровни биогеохимических циклов сильно нарушаются деятельностью человека.

Биомасса животных в различных естественных экосистемах суши составляет 0,04–5,3 % запасов фитомассы. Из всей зоомассы наземных экосистем на долю позвоночных приходится 0,2–4,3 %. Имея ничтожную по сравнению с растениями биомассу, животные играют большую роль в регулировании их роста. По мнению большинства исследователей, роль животных в круговороте вещества и энергии, в основном, стабилизирующая. Они уменьшают амплитуду возможных колебаний биомассы растений при изменении внешних факторов. В некоторых же случаях (например, при сильном размножении саранчи) вспышки численности животных приводят к катастрофическому уничтожению растительности.

Через пастбищные цепи питания в экосистемах суши проходит только около 7 % чистой первичной продукции, в то время как в водных экосистемах примерно 40 %. Отсюда следует, что нагрузка на детритофагов и редуцентов в трансформации мертвого органического вещества в наземных экосистемах значительно большая, чем в водных экосистемах.

В природе действует правило максимального «давления жизни»: организмы размножаются с интенсивностью, обеспечивающей максимально возможное их количество. Репродуктивный потенциал многих организмов столь велик, что если бы на какое-то время были сняты ограничения размножения и остановлено умирание, то произошел бы «биологический взрыв» и за небольшое время масса живого вещества превысила все возможные пределы. Этого не происходит из-за ограничений по веществу: масса питательных веществ для всех форм жизни на Земле конечна и ограничена. Ее не хватает для всех делящихся клеток, появившихся спор, семян, яиц, личинок, зародышей. Это означает, что общее количество живого вещества всех организмов планеты сравнительно мало изменяется, во всяком случае в пределах больших отрезков времени. Эта закономерность была сформулирована В. И. Вернадским в виде закона константности живого вещества: *количество живого вещества биосферы* (для данного геологического периода) *есть константа*. Поэтому значительное увеличение численности и массы каких-либо организмов в глобальном масштабе может происходить только за счет уменьшения численности и массы других организмов.

В биосфере круговорот веществ направляется совместным действием биологических, геохимических и геофизических факторов. Именно в этом смысле употребляются термины «биогеохимический круговорот», «биогеохимические циклы» элементов, соединений, вещества. Благодаря осуществлению круговорота химических веществ создается фундамент для бесконечности жизни на планете Земля.

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ В. И. ВЕРНАДСКОГО. КРУГОВОРОТ ВЕЩЕСТВ В ПРИРОДЕ

В. И. Вернадский открыл фундаментальные законы, управляющие геохимической деятельностью живых организмов в биосфере. Они заключаются в следующем:

- 1) биогенная миграция атомов химических элементов в биосфере всегда стремится к максимальному своему проявлению;
- 2) эволюция видов в ходе геологического времени, приводящая к созданию устойчивых в биосфере форм жизни, идет в направлении, увеличивающем биогенную миграцию атомов биосферы.

Миграция химических элементов и соединений в биосфере осуществляется в форме циклов, или круговоротов веществ. При этом круговорот веществ сопровождается круговоротом энергии. Благодаря круговороту веществ достигается динамическое равновесие и устойчивость биосферы в целом и отдельных ее частей.

В едином круговороте выделяют большой геологический круговорот, происходящий в результате действия абиотических факторов, и малый биотический круговорот веществ в твердой, жидкой и газообразной фазах, происходящий при участии живых организмов.

Большой круговорот представляет собой подъем вещества в результате восходящих тектонических движений и вулканизма, переносе его по горизонтали во внешних оболочках Земли и аккумуляции. Этот восходящий поток вещества сопровождается нисходящим потоком, в результате которого происходит захоронение осадков и погружение в результате нисходящих тектонических движений. На глубине происходит метаморфизм, плавление вещества с образованием магмы и метаморфических горных пород.

Большой геологический круговорот происходит в течение сотен тысяч или миллионов лет. В процессе большого круговорота вещества лишь частично возвращаются на сушу с организмами, извлеченными из воды человеком или другими животными. Установлено, что в Мировой океан ежегодно выносятся 12 км^3 минерального вещества, в результате чего с поверхности континентов в среднем снимается слой толщиной около 0,08 мм. При таких темпах разрушения все континенты были бы уничтожены за 10–11 млн лет.

Однако это не происходит, так как в противовес процессу разрушения материков действует процесс подъема вещества из глубин земной мантии. Крупные медленные геотектонические изменения, процессы опускания материков и поднятия морского дна, перемещение морей и океанов приводят к тому, что морские отложения возвращаются на сушу и процесс начинается вновь.

Малый, или биотический, круговорот, происходящий при обязательном участии живого вещества, является частью большого. Он развивается на основе большого и представляет собой непрерывный, циклический, но неравномерный процесс в пространстве и времени. Скорость протекания малого круговорота значительно выше, чем большого. В единый биотический круговорот вовлечено все живое вещество планеты. Если рассматривать этот круговорот как единую замкнутую цепь, то все растения, животные, микроорганизмы составляют отдельные звенья этой цепи. Связь отдельных звеньев выражается в том, что вещество и энергия, приобретенные каждым предшествующим звеном, далее потребляются и перерабатываются в последующем звене. Это происходит до тех пор, пока остатки вещества не возвращаются к исходному звену.

Процесс биотического круговорота, в принципе, осуществляется по следующей схеме.

Растения осуществляют фотосинтез, т.е. процесс образования органического вещества с использованием в качестве исходных компонентов воды и углекислого газа и с выделением кислорода.

Часть химической энергии, аккумулированной зелеными растениями, далее усваивается фитофагами, а затем зоофагами, питающимися фитофагами. Остатки мертвого органического вещества, образующегося после смерти живых организмов или в процессе их жизнедеятельности (отмершие организмы растительного и животного происхождения, продукты обмена веществ), разрушаются деструкторами (прежде всего, микроорганизмами), с определенной скоростью поступают в почву, воду, воздух и вновь включаются в биотический круговорот. При этом часть вещества исключается из биотического круговорота и с помощью геохимических процессов закрепляется в осадочных отложениях или переносится в океан.

Большой круговорот веществ и малый круговорот веществ взаимно связаны и представляют собой единый процесс. Подсчитано, что весь кислород, содержащийся в атмосфере, совершает круговорот через организмы (связывается при дыхании и высвобождается при фотосинтезе) за 2000 лет, углекислота атмосферы совершает круговорот в обратном направлении за 300 лет, а все воды на Земле разлагаются и воссоздаются путем фотосинтеза и дыхания за 2 000 000 лет.

Ниже рассмотрены процессы круговорота основных соединений и элементов на планете.

КРУГОВОРОТ ВОДЫ

Самым значительным по переносимым массам и по затратам энергии круговоротом на Земле является круговорот воды (рис. 2), образующий основу большого и малого круговоротов. Круговорот воды играет основополагающую роль в создании географической оболочки Земли. За год в него вовлекается 0,04 % массы гидросферы, но это соответствует 16,5 млн м³ за секунду. Вода – самое распространенное в биосфере вещество. Океаны, полярные шапки льдов, ледники, озера, реки, почва и атмосфера содержат 1,4 млрд км³ воды в различных ее формах. Физические свойства воды в большинстве своем либо уникальны, либо резко выражены по сравнению с такими же свойствами других веществ. Необычные физические свойства в свою очередь обуславливают уникальный химизм воды. Именно особенности физико-химических свойств воды определяют ее биологическое значение.

Хотя основная масса воды на Земле представлена солеными водами (97,5 %), но и объемы пресных вод колоссальны. Они равны 35 млн км³.

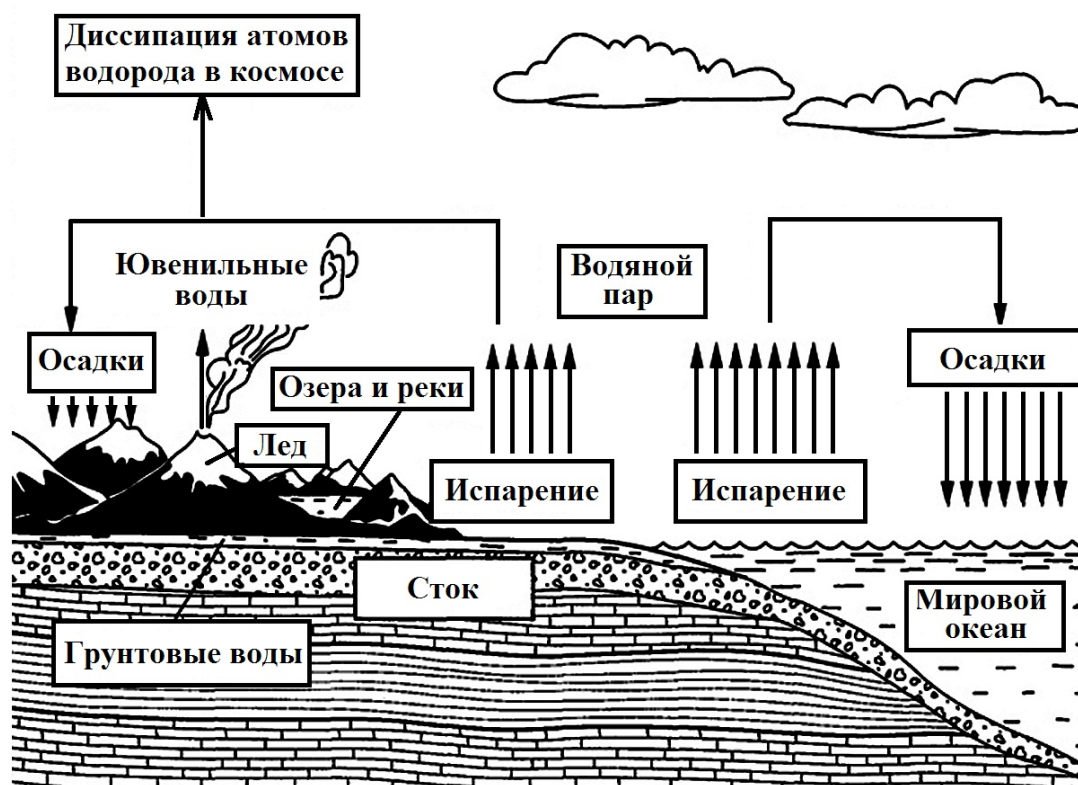


Рис. 2. Схема круговорота воды (по данным разных авторов)

Таким образом, почти три четверти запасов пресной воды хранится в твердом виде в ледниках и вечных снегах. Измерить количество этой воды очень трудно, и разброс в оценках неизбежен. Если растопить все льды и равномерно распределить воду по Земле, высота столба воды составит по

усредненным оценкам около 50 м (максимальная оценка 120 м). Другой крупный резервуар пресной воды – подземные воды – тоже трудно поддаются измерению. Если их распределить по всей поверхности Земного шара, то высота водного столба по весьма усредненным оценкам может составить примерно 15 м. Вся вода озер при равномерном распределении примерно составит от 0,4 до 1 м. Среднее содержание водяного пара в атмосфере соответствует толщине слоя воды 30 мм. Эта, как видно, очень малая часть общего запаса играет исключительно важную роль в определении климата и круговорота воды на Земле.

Содержание водяных паров в воздухе зависит от географической широты и времени года. Больше всего водяных паров в области экватора. Если воздух здесь выжать досуха, получилось бы около 44 мм осадков, в средних широтах, скажем, от 40 до 50 °С, осадков набралось бы летом до 20 мм, а зимой до 10 мм. Конечно же, эти цифры зависят от географических условий и погоды. В полярных областях в атмосфере содержится зимой около 2, а летом около 8 мм воды.

Водяные пары поступают в атмосферу при испарении (сюда входит и транспирация растений). Вполне понятно, что главным источником пара в атмосфере служит поверхность океана. Уходит вода из атмосферы в виде дождя или снега, а поскольку выпадение осадков может произойти и вблизи места испарения и за тысячи миль от него, то время пребывания воды в атмосфере может составлять от нескольких часов до нескольких недель. В среднем эта величина составляет 9–10 суток.

При неизменности уровня Мирового океана водный баланс Земли складывается следующим образом. Выпадающие на планете осадки уравниваются испарением. Обе величины близки к $577\,000\text{ км}^3$ в год. При этом испарение с океана превышает осадки на $47\,000\text{ км}^3$. Эта влага и возвращается в океан за счет речного стока.

В настоящее время мировой водный баланс сдвинут в сторону океана. Последний получает больше воды, чем ее испаряется на $430\text{--}550\text{ км}^3$ в год. Результатом этого является постепенное повышение уровня океана (примерно на 14 см за последнее столетие). Считается, что около 75 % этой дополнительной влаги океан получает в результате таяния ледников, 18 % – за счет расходования запасов подземных вод и 7 % дают озера.

Считается, что недоиспарение осадков на суше ($47\,000\text{ км}^3$) связано в основном не с дефицитом тепла (он характерен только для высоких широт), который позволил бы испариться всем осадкам, а с регулирующей ролью экосистем.

Соотношение между объемом выпавших осадков и объемом испарения воды лежит в основе подразделения на гумидную и аридную зоны.

Количество воды, содержащейся во всем живом веществе биосферы, небольшое. Если пересчитать эту воду на осадки, как приведено выше, то ее, очевидно, хватило бы, чтобы покрыть всю земную поверхность слоем в

1 мм. Это на порядок меньше содержания водяных паров в атмосфере, а распределение этой воды варьирует в пространстве и во времени еще сильнее. При богатом урожае в полностью созревшей пшенице (Северная Америка) или сахарной свекле (Северо-Западная Европа) содержится запас воды, равный 5 мм, причем в летний период этот запас обновляется за 2–3 дня. Отсюда можно рассчитать, сколько воды необходимо, чтобы поддерживать оптимальные условия для роста.

За незначительными исключениями основой всей жизни на Земле является фотосинтез, осуществляемый зелеными растениями. Это не только физический процесс, при котором улавливается солнечная энергия, но и химический процесс, приводящий к связыванию воды и двуокиси углерода с образованием углеводов и других, более сложных химических соединений. Вода присутствует в растениях в двух формах: свободной и связанной. Количество связанной воды может составлять менее одной пятой свободной воды.

Круговорот воды, особенно поверхностный и подземный сток на суше определяют гидрогенную миграцию веществ, которая, помимо переноса, состоит из множества процессов растворения, ионного обмена, окислительно-восстановительных реакций, кристаллизации, осаждения и т. п.

Общие запасы воды на Земле оцениваются в 1354 млн км³. Если все воды гидросферы равномерно распределить по поверхности планеты, слой ее будет иметь толщину около 2,5 км. В пределах Мирового океана, который занимает примерно 2/3 поверхности Земли, средняя глубина составляет 3,96 км при максимальной 11 022 м (Марианская впадина). Эти огромные запасы воды распределены следующим образом:

- 1) соленая вода морей и океанов – 97,5 %;
- 2) воды ледников и постоянных снегов – 1,74 % (почти 70 % всей пресной воды);
- 3) подземные воды – 0,76 %;
- 4) озера – 0,007 %;
- 5) атмосферная влага – 0,001 %;
- 6) почвенная влага – 0,001 %;
- 7) реки – 0,0002 %;
- 8) вода организмов – 0,0001 %.

КРУГОВОРОТ УГЛЕРОДА

Углерод является важнейшим химическим элементом нашей планеты, хотя его на Земле в 49 раз меньше, чем кислорода, и в 26 раз меньше, чем кремния.

С углеродом связан процесс возникновения и развития биосферы, именно он обуславливает огромное разнообразие и сложность строения веществ, так как этот элемент способен соединяться с большинством из эле-

ментов самыми разнообразными способами. Так, углерод в соединении с водородом и другими элементами является одним из основных компонентов клеток растений и животных. Например, в организм человека углерод поступает с пищей (в норме около 300 г в сутки). Общее содержание углерода в организме человека достигает около 21 (15 кг на 70 кг массы тела). Углерод составляет 2/3 массы мышц и 1/3 массы костной ткани. Выводится из организма преимущественно с выдыхаемым воздухом (углекислый газ) и мочой (мочевина).

Многочисленность и очень широкое распространение живых организмов не позволяют удовлетворительно оценить общее содержание в них углерода. Можно, однако, приблизительно оценить суммарное количество углерода, связываемого растениями, а также выделяемого в процессе дыхания растений, животных и микроорганизмов. Установлено, что зеленые растения поглощают в год порядка 220 млрд т CO_2 . Почти такое же количество этого вещества выделяется в неорганическую среду в процессе дыхания всех живых организмов, а также в результате разложения и сгорания органических веществ.

При определенных условиях разложения и сгорания созданных живыми организмами веществ не происходит, что ведет к накоплению углеродсодержащих соединений. Так, например, древесина живых деревьев может быть на 3–4 тысячелетия надежно защищена от микробного разложения и от пожара корой, способной противостоять действию микробов и огня. Древесина же, попавшая в торфяное болото, сохраняется еще дольше. В обоих случаях связанный в ней углерод оказывается как бы в ловушке и надолго выводится из круговорота. В условиях, когда органическое вещество оказывается захороненным и изолированным от воздействия воздуха, оно разлагается только частично и содержащийся в нем углерод сохраняется.

Если впоследствии в течение миллионов лет эти органические остатки подвергаются давлению вышележащих отложений и нагреванию за счет земного тепла, значительная часть его превращается (процесс метаморфизации) в ископаемое топливо, например в каменный уголь или нефть, во что именно – зависело от исходного материала, продолжительности и условий пребывания в породах.

Ископаемое топливо образует природный резерв углерода. Так, каменные угли содержат 76–95 % С, бурые угли – 64–80 % С, торф – 53–56 % С, нефть – 82–87 % С, горючие ископаемые – антрацит – 94–97 % С. Свободный углерод находится в природе в виде алмаза и графита.

Несмотря на интенсивное сжигание ископаемого топлива, начавшееся с 1700-х годов, неизрасходованными еще остаются примерно 20×10^{15} т, и суммарное содержание углерода в земной коре составляет около 0,35 %.

Вторым резерватом углерода является Мировой океан, в котором присутствует в 500 раз меньше углерода, чем в земной коре.

Роль углерода в биосфере лучше всего иллюстрируется схемой его круговорота (рис. 3).

Атомы углерода постоянно мигрируют из одной части биосферы (узкой оболочки Земли, где существует жизнь) в другую. За геологический период с момента появления жизни на Земле углерод атмосферы и гидросферы неоднократно прошел через живые организмы. В течение 3–4 лет растения усваивают столько углерода, сколько его содержится в атмосфере. Следовательно, за четыре года может обновиться углеродный состав атмосферы, и условно можно считать, что углерод атмосферы за этот срок завершает свой цикл. Однако цикл биологического круговорота углерода не замкнут: этот элемент часто выходит из круговорота на длительный срок в виде карбонатов, торфов, сапропелей, углей, гумуса. С другой стороны, нарушение цикла происходит и благодаря поступлению в атмосферу глубинного углекислого газа и окиси углерода.

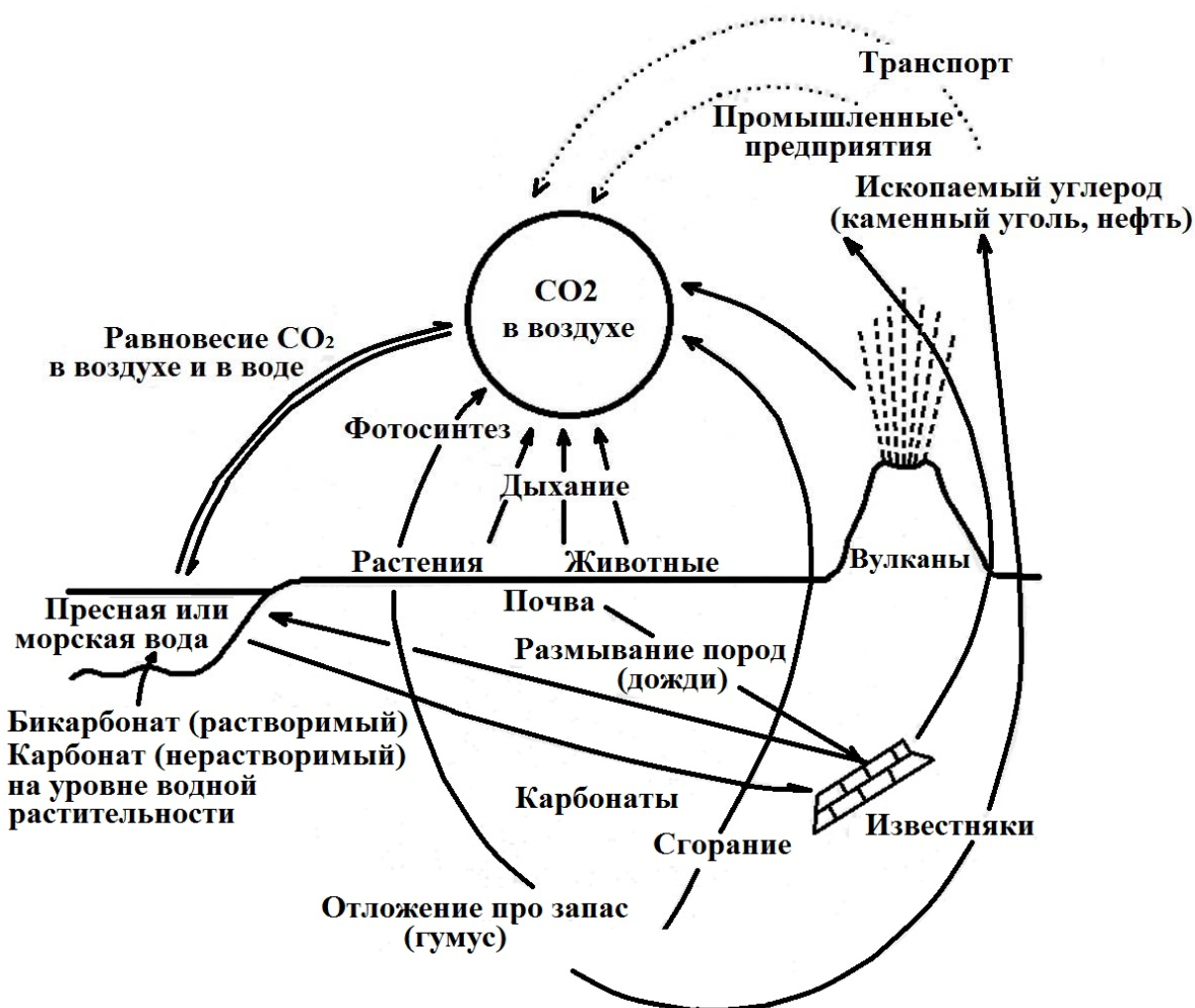


Рис. 3. Схема круговорота углерода (Н. И. Простаков, 1999)

Основной путь, посредством которого углерод из мира неорганического перемещается в мир живого, – это осуществляемый растениями фотосинтез. В ходе цепи реакций, идущих с потреблением солнечной (световой) энергии, происходит расщепление молекул воды и использование высвобождающихся ионов водорода и связанного CO_2 в синтезе богатых углеродом органических веществ, в том числе акцептора CO_2 .

На каждую молекулу углекислого газа, которую поглощает растение, чтобы синтезировать органические вещества, выделяется молекула кислорода, образованная при расщеплении воды. Предполагается, что именно таким путем образовался весь свободный кислород атмосферы. Если бы процесс фотосинтеза на Земле внезапно прекратился и нарушился углеродный цикл, то, согласно имеющимся расчетам, весь свободный кислород исчез бы из атмосферы примерно за 2000 лет.

Для прогнозирования поведения углерода в биосфере необходимы массовые сведения по содержанию углекислоты в атмосфере разных регионов и на разных уровнях, сведения о влиянии изменения концентрации ее в атмосфере на первичную продуктивность. В пределах одного и того же региона накопление, трансформация и миграция углерода различны: в элювиальном, транзитном и аккумулятивном ландшафтах, в естественных биоценозах и в агроценозах.

Хозяйственная деятельность человека интенсифицирует биологический круговорот углерода и может способствовать повышению первичной и, следовательно, вторичной продуктивности. Но дальнейшая интенсивность этой деятельности может сопровождаться повышением концентрации двуокси углерода в атмосфере. Повышение концентрации углекислоты до 0,07 % резко ухудшает условия дыхания человека и животных. Расчеты показывают, что при условии сохранения современного уровня добычи и использования горючих ископаемых потребуется чуть более 200 лет для достижения такой концентрации в атмосфере Земли. Локально в отдельных крупных городах эта угроза вполне реальна уже в настоящее время.

КРУГОВОРОТ КИСЛОРОДА

Кислород – самый распространенный на Земле элемент, на его долю (в составе различных соединений, главным образом силикатов) приходится около 47,4 % массы твердой земной коры. Морские и пресные воды содержат огромное количество связанного кислорода – 85,8 % (по массе), в атмосфере содержание свободного кислорода составляет 20,95 % по объему и 23,12 % по массе. Более 1500 соединений земной коры в своем составе содержат кислород.

Кислород входит в состав многих органических веществ и присутствует во всех живых клетках. По числу атомов в живых клетках он составляет около 25 %, по массовой доле – около 65 %.

Благодаря исключительно высокой химической активности, кислород играет особо важную роль в земной коре. Он определяет окислительно-восстановительные и щелочно-кислотные условия растворов и расплавов, формирование геохимических объектов. Для него характерна как ионная, так и не ионная форма миграции в растворах.

Эволюция процессов на Земном шаре сопровождается увеличением содержания кислорода. Наличие органического вещества установлено в древних осадочных отложениях, возраст которых исчисляется в 3,8 млрд лет. Следовательно, выделение кислорода в процессе фотосинтеза продолжается миллиарды лет. В настоящее время количество кислорода в атмосфере равно $1,185 \times 10^{15}$ т. Масштабы продуцирования кислорода таковы, что указанное количество при сохранении скорости могло бы быть удвоено примерно за 4000 лет. Но этого не происходит, так как в течение года различными путями разлагается примерно такое же количество органического вещества, какое образуется в ходе фотосинтеза, и при этом поглощается почти весь выделившийся кислород. Тем не менее, благодаря сохранению части органического вещества, свободный кислород постепенно накапливается в атмосфере.

Реакции образования кислорода в земной коре весьма разнообразны. В свободном виде кислород накапливается главным образом как побочный продукт фотосинтеза растений и цианобактерий (синезеленых водорослей), т.е. как «отход» при ассимиляции углерода при использовании энергии солнечного света. Весь растительный покров поставляет за год 430–470 млрд т кислорода.

Второй миграционный цикл свободного кислорода связан с массообменом в системе природные воды – тропосфера. В воде океана находится от 3×10^9 до 10×10^9 кубических метров растворенного кислорода. Холодная вода высоких широт поглощает кислород, поступая с океаническими течениями в тропический пояс, она выделяет кислород. Поглощение и выделение кислорода происходят и при смене сезонов года, сопровождающихся изменением температуры воды.

Кислород расходуется в громадном количестве окислительных реакций, большинство из которых имеет биохимическую природу. В этих реакциях высвобождается энергия, поглощенная в ходе фотосинтеза. В почвах, илах, водоносных горизонтах развиваются микроорганизмы, использующие кислород для окисления органических соединений. Запасы кислорода на планете огромны. Он входит в состав кристаллических решеток минералов и высвобождается из них живым веществом.

Таким образом, общая схема круговорота кислорода в биосфере (рис. 4) складывается из двух основных ветвей:

- 1) образование свободного кислорода при фотосинтезе;
- 2) поглощение кислорода в окислительных реакциях.

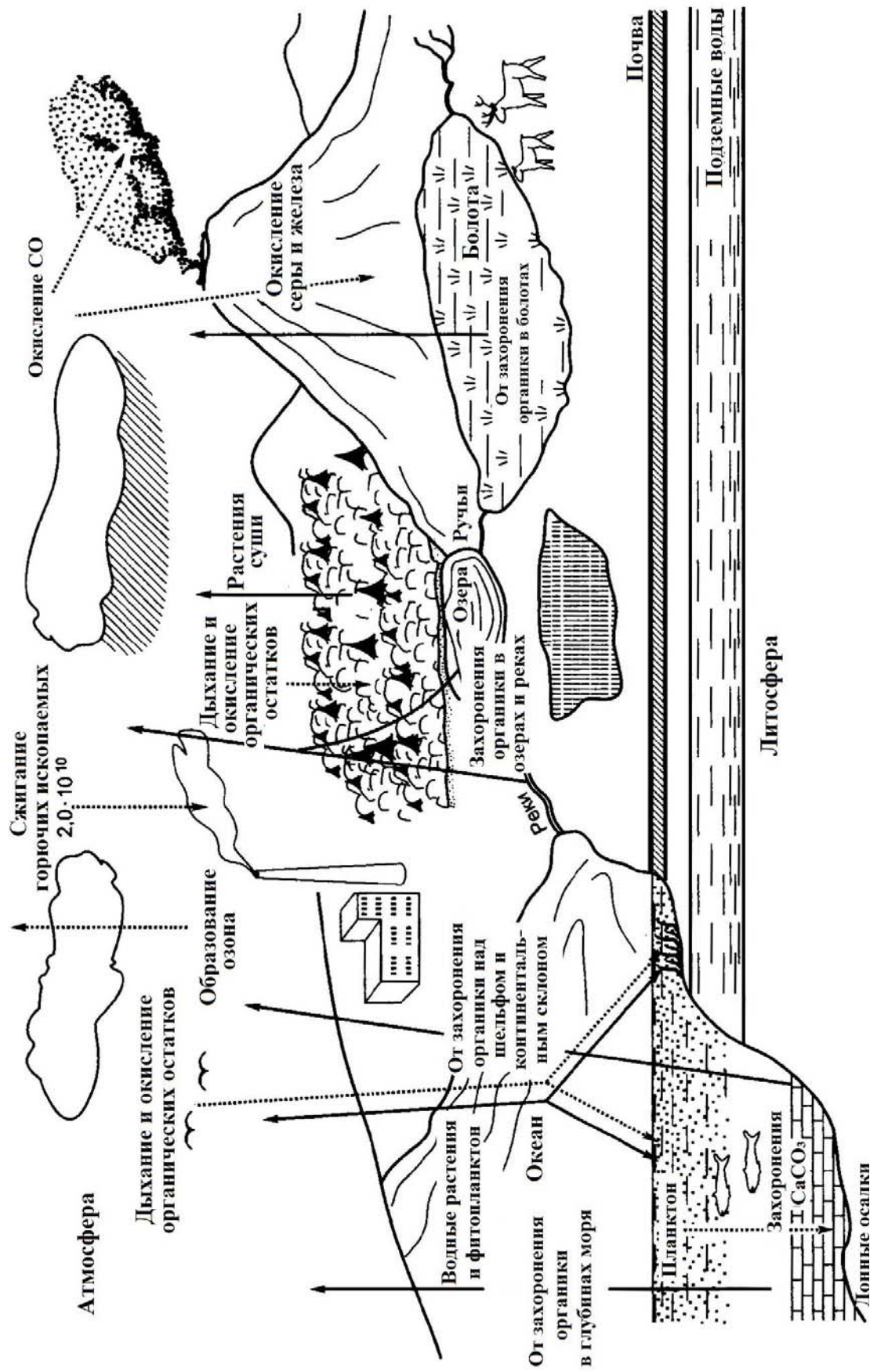


Рис. 4. Схема круговорота кислорода (Н. Н. Марфенин, 2006)

В современных условиях установившиеся в биосфере цикл кислорода и кислородсодержащих соединений нарушаются техногенными миграциями. Химические соединения, сброшенные предприятиями в природные воды, связывают растворенный в воде кислород, нарушая природные потоки этого элемента. В атмосферу выбрасывается большое количество углекислого газа, различных аэрозолей, что также ухудшает кислородный обмен. Загрязнение почв, вырубка лесов, опустынивание земель на огромных территориях уменьшают обмен кислородом и углекислым газом между атмосферой и сушей. Огромное количество атмосферного кислорода расходуется при сжигании топлива. В некоторых промышленно развитых странах кислорода сжигают больше, чем его образуется за счет фотосинтеза.

КРУГОВОРОТ АЗОТА

Азот является элементом, необходимым для существования животных и растений, он входит в состав белков (16–18 % по массе), аминокислот, нуклеиновых кислот, нуклеопротеидов, хлорофилла, гемоглобина и др. В составе живых клеток по числу атомов азота около 2 %, по массовой доле – около 2,5 (четвертое место после водорода, углерода и кислорода). В связи с этим значительное количество связанного азота содержится в живых организмах, «мертвой органике» и дисперсном веществе морей и океанов. Это количество оценивается примерно в $1,9 \times 10^{11}$ т. В результате процессов гниения и разложения азотсодержащей органики, при условии благоприятных факторов окружающей среды, могут образоваться природные залежи полезных ископаемых, содержащие азот, например «чилийская селитра» (нитрат натрия с примесями других соединений), «норвежская», «индийская селитры».

Около 80 % запасов азота сосредоточено в атмосфере планеты, что связано с направлением биогеохимических потоков соединений азота, образующихся при денитрификации. Первично азот в атмосфере был, вероятно, результатом процессов дегазации верхней мантии, магмы и вулканических выделений. Электрические и фотохимические реакции в высоких слоях атмосферы приводят к заметному поступлению соединений азота на сушу и в океан с атмосферными осадками. Этот азот включается в общий биогеохимический поток растворенных соединений, мигрирующих с водными массами, участвует в почвообразовательных процессах и в формировании биомассы растений.

Общая направленность биогеохимического круговорота азота на планете – аккумуляция в молекулярной форме в атмосфере (рис. 5). Огромное количество азота содержит биосфера в связанном виде: в органическом веществе почвенного покрова ($1,5 \times 10^{11}$ т), в биомассе растений ($1,1 \times 10^9$ т), в биомассе животных ($6,1 \times 10^7$ т).

На заре жизни после того как атмосфера из восстановительной стала окислительной благодаря накоплению свободного кислорода, появились

бактерии (азотобактер, цианобактерии и др.), способные усваивать молекулярный азот (N_2) с помощью особых ферментов, переводящих его в аммиак (NH_3). Этот процесс называется *азотфиксацией*.

Микроорганизмы и растения активно используют нитраты при синтезе своих белков. После отмирания организма белки разлагаются бактериями-редуцентами сначала до аминокислотных остатков, а затем другими бактериями до аммиака, что называется *аммонификацией*. В результате почти весь азот оказывается снова доступен для усвоения бактериями и растениями. В биосфере сформировалась такая система экологических отношений между группами видов, при которой значительная часть запаса азота оставалась внутри биоты, а потери в виде образования инертной формы молекулярного азота были сведены к минимуму.

С возникновением хищных эукариот цикл азота несколько усложнился. Автотрофами, т.е. фотосинтезирующими организмами, получающими все вещества и энергию только из окружающей неорганической природы, стали питаться животные (гетеротрофы), получающие и «строительный материал», и энергию только из органической пищи. В результате ассимиляции органической пищи вырабатывается в виде отхода мочевина (H_2NCONH_2), которая образуется в организме из конечных продуктов распада белков CO_2 и NH_3 . Растения усваивают мочевину в качестве дополнительного источника азота.

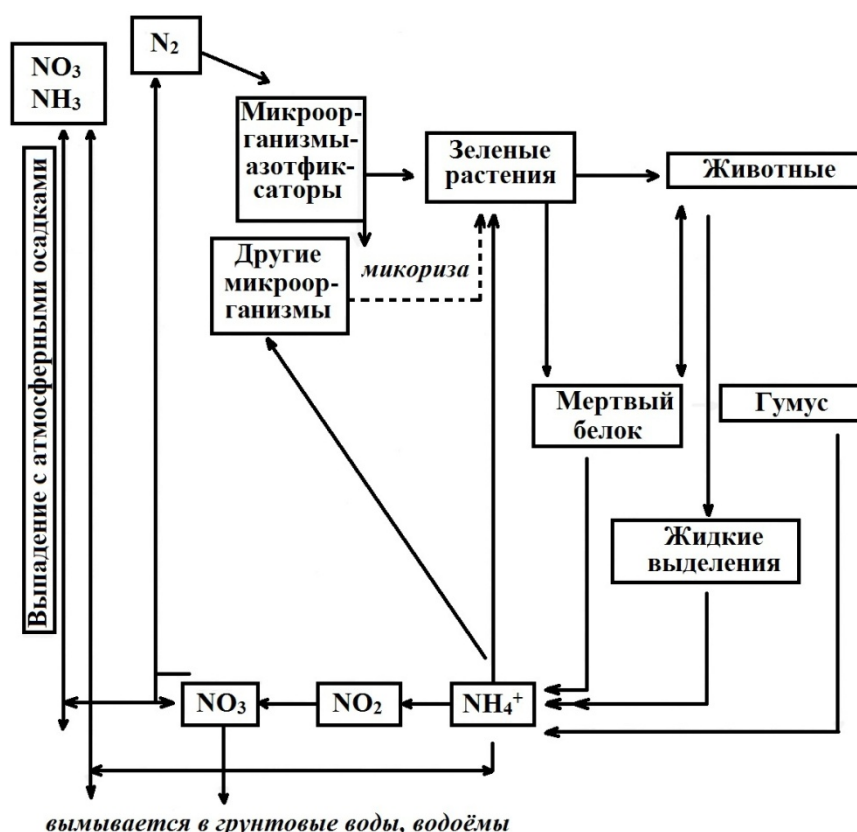


Рис. 5. Схема круговорота азота (О.С. Безуглова, Д.С. Орлов, 2000)

После распространения жизни на сушу схема круговорота азота, по существу, не изменилась. Две среды обитания оказались мало связанными друг с другом по параллельно происходящим круговоротам, за исключением двух важных обстоятельств. С суши в Мировой океан стал поступать дополнительный поток неорганического азота, что значительно увеличило продуктивность прибрежных экосистем. В свою очередь экосистемы суши за счет азотфиксации использовали атмосферный азот, который пополнялся в значительной степени за счет деятельности сообществ Мирового океана.

В последние 100 лет в круговорот азота были внесены очень важные изменения, которые могут привести к далеко идущим последствиям для всей биосферы, что связано с производством почти в неограниченных количествах азотных удобрений для сельского хозяйства.

Ежегодно 30–35 млн т азота вносится в почву в виде минеральных удобрений. Поступление за счет азотных удобрений составляет 30 % от общих поступлений азота на сушу и в океан. Это часто приводит к загрязнению среды и тяжелым заболеваниям человека и животных. Особенно велики потери нитратных форм азота, так как он не сорбируется почвой, легко вымывается водами, восстанавливается в газообразные формы и до 20–40 % его теряется для питания растений. Все это, естественно, сказывается на биогеохимическом цикле азота.

Существенным нарушением цикла азота является сильное увеличение отходов животноводства, отходов и стоков больших городов, поступление в атмосферу NH_3 и оксидов азота при сжигании угля, нефти, мазута и т.д. Опасно проникновение оксидов азота в стратосферу (ядерные взрывы, выхлопы сверхзвуковых самолетов, ракет), так как это может быть причиной разрушения озонового слоя.

Таким образом, для удовлетворения нужд человечества потребность в азотных удобрениях должна быть компенсирована как можно быстрее. Но культура их применения должна быть более высокой.

КРУГОВОРОТ ФОСФОРА

Фосфор является важнейшим биогенным элементом. В свободном виде в природе по причине своей очень сильной окисляемости он не встречается, но входит в состав многих минералов (их насчитывается до 120) и множества органических веществ. Большинство минералов, содержащих фосфор, являются редкими. Наиболее важные минералы (природные фосфаты) – апатит, вивианит, а также осадочная горная порода фосфорит, состоящая из мелкокристаллического или аморфного фосфата кальция с примесью некоторых других веществ.

Несмотря на свою малую распространенность, фосфор, однако, имеет исключительно важное значение в жизни растительных и животных организмов. Он присутствует в живых клетках в виде орто- и пирофосфорной

кислот, входит в состав нуклеотидов, нуклеиновых кислот (ДНК и РНК), фосфопротеидов и фосфолипидов, входящих в состав клеточных мембран, коферментов, ферментов. Фосфор составляет также важнейшую часть основных энергетических молекул АТФ и АДФ.

В отличие от биогеохимических циклов углерода, кислорода, азота и серы, круговорот фосфора в природе существенно разомкнут, так как газовая форма соединений фосфора (например, PH_3) практически не участвует в биогеохимическом цикле фосфора (рис. 6).

Запасы фосфора, доступные живым организмам, в основном сосредоточены в литосфере. Основными источниками неорганического фосфора являются изверженные породы (например, апатиты) или осадочные породы (например, фосфориты). Минеральный фосфор – довольно редкий элемент в биосфере, в земной коре его содержание не превышает 1 %, что является основным фактором, лимитирующим продуктивность многих экосистем. Неорганический фосфор из пород земной коры вовлекается в циркуляцию выщелачиванием и растворением в континентальных водах. Затем он поглощается растениями, которые при его участии синтезируют различные органические соединения, и таким образом включается в трофические сети. Затем органические фосфаты вместе с трупами, отходами и выделениями живых существ возвращаются в землю, где снова подвергаются воздействию микроорганизмов и превращаются в ортофосфаты, готовые к использованию автотрофами.



Рис. 6. Схема круговорота фосфора
(О. С. Безуглова, Д. С. Орлов, 2000)

В водные экосистемы фосфор приносится текучими водами. С речными водами в океан ежегодно выносится около 1 млн т фосфора, а возвращается на сушу (с выловом рыб человеком и птицами) лишь около 60 тыс. т. Остальные 940 тыс. т осаждаются в виде мертвого органического вещества в донных отложениях океана на больших глубинах и надолго выключаются из круговорота. Только в зонах апвеллинга осуществляется вовлечение в активный круговорот донных отложений фосфатов. Органический фосфор, осевший на небольшой глубине приливно-отливных и неритических зон, вовлекается в круговорот гораздо быстрее, что и обуславливает большую биологическую продуктивность, чем зон открытого океана.

Таким образом, в естественных условиях механизм возвращения фосфора на сушу совершенно не способен компенсировать потери этого элемента на седиментацию в донных отложениях на больших глубинах.

В последние 50–75 лет общая картина распределения и миграции фосфора в биосфере резко нарушена человеком. Происходит мобилизация фосфора из агроруд и шлаков, производство и применение фосфорных удобрений; производство многочисленных фосфорсодержащих препаратов и их использование в быту; производство фосфорсодержащих ресурсов продовольствия и кормов, вывоз и потребление их в зонах концентрации населения и больших городов; развитие рыбного и китобойного промыслов, добыча морских моллюсков, водорослей влечет за собой перераспределение фосфора с океана на сушу.

В итоге наблюдается процесс фосфотизации суши. Процесс этот проявляется неравномерно. Увеличивается содержание фосфора в окружающей среде больших городов, промышленных центров, и, наоборот, страны, экспортирующие органические продукты и не применяющие фосфорных удобрений, теряют запасы фосфора в своих почвах.

КРУГОВОРОТ СЕРЫ

Сера является одним из биогенных элементов, играющих важную роль в круговороте веществ биосферы. Сера входит в состав некоторых аминокислот (цистеин, метионин), витаминов (биотин, тиамин), ферментов. Сера участвует в образовании третичной структуры белка (формирование дисульфидных мостиков). Также она вовлечена в бактериальный фотосинтез (входит в состав бактериохлорофилла, а сероводород является источником водорода).

Сера определяет важные биохимические процессы живой клетки, является компонентом питания растений и микрофлоры. Соединения серы участвуют в формировании химического состава почв, в значительных количествах находятся в подземных водах, а это, в свою очередь, играет решающую роль в процессах засоления почв.

В природе соединения серы распространены во всех трех сферах. Больше всего ее в литосфере (0,05 % по массе). Особенно распространены сульфаты щелочных и щелочноземельных металлов (Na_2SO_4 , K_2SO_4) и сульфиды железа, меди, цинка и свинца. Примеси серы присутствуют в углях, сланцах, нефти и природном газе.

В гидросфере сера содержится в концентрации примерно 1 г/л, главным образом в виде растворенного сульфата магния MgSO_4 , ионов SO_4^{2-} , SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, H_2S .

В атмосфере содержание серы невелико. В воздухе она может присутствовать в очень малых концентрациях ионов SO_4^{2-} и в виде сероводорода. Миграция соединений серы происходит в основном из литосферы в гидросферу с речным стоком и воздушными массами. При выветривании коры происходит вынос растворимых в воде ионов SO_4^{2-} . Обратное на сушу из Мирового океана серы поступает значительно меньше с воздушными массами, в которых в ничтожной концентрации содержится SO_4^{2-} .

Биогеохимический цикл серы состоит из четырех стадий (рис. 7).

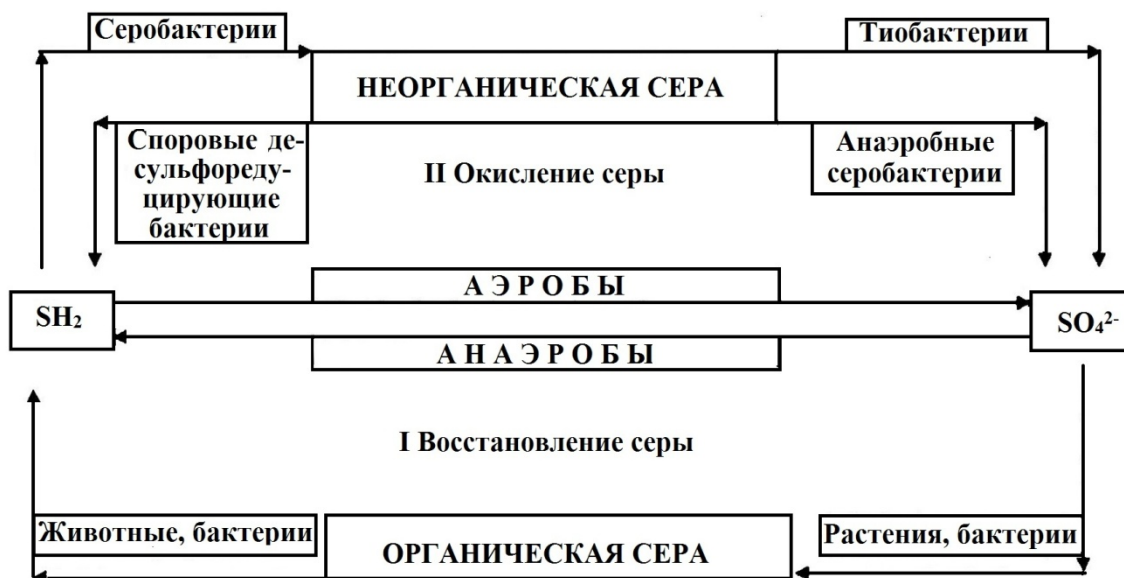


Рис. 7. Схема круговорота серы (О.С. Безуглова, Д.С. Орлов, 2000)

1. Усвоение минеральных соединений серы живыми организмами (растениями и бактериями) и включение серы в состав белков и аминокислот.
2. Превращение органической серы живыми организмами (животными и бактериями) в конечный продукт – H_2S .
3. Окисление минеральной серы живыми организмами (серобактериями, тионовыми бактериями) в процессе сульфатредукции. На этой стадии происходит окисление сероводорода, элементарной серы, ее тио- и тетра-соединений.

4. Восстановление минеральной серы живыми организмами (бактериями) в процессе десульфификации до H_2S .

Таким образом, важнейшим звеном всего биогеохимического цикла серы в биосфере является биогенное образование сероводорода. Биогеохимический цикл серы играет основную роль в общем круговороте этого элемента в биосфере.

ИСТОЧНИКИ ЖИВОГО ВЕЩЕСТВА В БИОСФЕРЕ

Живое вещество состоит из тех же элементов, что и неживое вещество – тем самым оно неразрывно связано со всей материей Вселенной.

В. И. Вернадский еще в 30-е гг. высказал мысль о том, что живое вещество было всегда и появилось оно вместе с возникновением материи. Находятся некоторые свидетельства о частичной справедливости этих слов. Точно установлено, что планета Земля возникла 4,56 млрд лет назад. Сегодня можно с уверенностью сказать, что переход от косной материи, как ее называл Вернадский, к живой, от нежизни к жизни, выходит за пределы геологической летописи. На Земле нет осадочных отложений, в которых отсутствовали бы признаки жизни. По крайней мере, 3 млрд 800 млн лет назад, когда сформировались самые древние осадочные породы, сохранившиеся до нашего времени, жизнь уже была. В них обнаружен углерод, который мог образовываться только биогенным путем. Более того, в них обнаружены консервированные остатки прокариот.

Очевидно, что это не предел, т.к. самые глубокие слои осадочных пород пока просто не вскрыты. Жизнь, очевидно, возникла приблизительно около 4 млрд лет назад, т.е. спустя 500–600 млн лет после возникновения планеты. Правда, в эти древние периоды земная кора была тонкой, точка плавления пород была высокой и поэтому кора все еще перерабатывалась. Земля все еще кипела и поэтому кора вздымалась и снова погружалась, переправлялась многократно так, что продукты жизнедеятельности самых первых организмов могут и вообще никогда не обнаружиться.

В целом, таким образом, установлено, что насколько вглубь времен на планете изучены осадочные породы, настолько и известны их остатки и продукты их жизнедеятельности.

Самые отдаленные по времени углеродистые соединения – даже без остатков организмов – 3,8 млрд лет назад – свидетельствуют о их биогенном происхождении, более того, о протекании процессов фотосинтеза. При фотосинтезе неизбежно изменяется изотопный состав углерода: ^{13}C переходит в ^{12}C .

В метеоритах, углистых хондритах обнаруживаются литифицированные (окаменевшие) остатки оболочек бактерий. Возраст этих метеоритов больше 4 млрд лет.

Источник живого – материя космического пространства. Математическими и физическими методами и с помощью мощнейших телескопов, таких как Хаббл, можно увидеть космическое пространство на удаленности около 13 млрд световых лет.

На основе совокупности этих методов доказано, что Вселенная возникла 13,7 млрд лет назад в результате Большого взрыва вместе со своим временем, пространством и веществом. Физики предполагают, что до него Вселенная представляла собой чрезвычайно плотную материю бесконечно малого объекта без атомов и молекул с необычайно большой массой. Причины взрыва не установлены, возможно, в результате взаимодействия частиц и античастиц. После Большого взрыва Вселенная последовательно проходила этапы инфляции, отрыва вещества от излучения, темной эпохи, рождения галактик и звезд первого поколения, звездного нуклеосинтеза химических элементов, взрывов звезд и формирования в молекулярных облаках звезд следующих поколений вместе с планетными системами.

Первые несколько сот млн лет в пространстве не было атомов и молекул, а были только субъединицы. После этого из субъединиц формировались атомы. Вся Вселенная – густое горячее непрозрачное водородное облако (темная эпоха). В нем продолжала действовать ударная волна после Большого Взрыва, возникали вихри и водовороты, в результате этого образовывались водородные сгустки. Затем, под действием сил тяготения – газовые шары водорода. Они вращались и разогревались, повышалась температура. В этих шарах вспыхивали термоядерные реакции. Так 12–13 млрд лет назад возникли звезды первого поколения. Они функционировали по термоядерному принципу, т.е. постоянно происходили реакции мощностью в миллионы водородных бомб. При этом атомы водорода (H) переходили в атомы гелия (He), а далее – в атомы других элементов.

По мере расходования водородного топлива и понижения кинетической энергии атомов звезды остывали. При этом под действием сил тяготения звезды сжимались до необычайно высокой плотности, далее происходил взрыв звезды – вспышка сверхновой. В 1987 г. наблюдалась вспышка сверхновой (происходит примерно один раз в 100 лет). При этом были изучены детали этого процесса.

Вспышки сверхновых звезд моделируются и в экспериментальных условиях в США. Создается концентрация элементов в микроскопической дозе. Направляется мощнейший поток лазера. Все элементы после этого взрыва соответствуют вспышкам сверхновых.

При вспышке сверхновых давление и температура в недрах звезды достигают колоссальных величин, что создает необходимые условия для синтеза тяжелых элементов. Во время таких взрывов могли образоваться все элементы тяжелее гелия, в том числе необходимые для жизни углерод, кислород, азот, фосфор, сера и другие. Звезды первого поколения стали «фабрикой» по производству атомов, необходимых для будущей жизни.

После вспышки сверхновой миллиарды тонн вещества разлетаются в космосе. В его составе много элементов (H, C, Fe, K, Ca). Разорванное космическое вещество под действием сил тяготения образует мощное скопление в одном или нескольких местах – будущие звезды второго поколения. Вещество звезды при этом увеличивается в размерах и уплотняется.

Под действием сверхмощного давления вспыхивают и рождаются звезды второго поколения (например, Солнце). После вспыхивания фрагменты звездного вещества вокруг звезды в некоторых участках концентрируются, образуются сгустки, которые, соединяясь, формируют новые крупные тела. По законам механики они начинают вращаться вокруг звезды – это будущие планеты, а вся масса вещества, дифференцирующаяся на будущие планеты, представляет собой протопланетный диск, или облако. Таким путем, по современным, но очень упрощенным представлениям, около 5 млрд лет назад сформировалась Солнечная система. При этом Земля оформилась как планета 4,56 млрд лет назад. Первые несколько сотен млн лет Земля, по-видимому, представляла собой раскаленный шар. Она постепенно остывала с образованием снаружи твердого тела и конденсирующихся паров воды.

Большая часть поверхности была покрыта соленой водой. Атмосфера длительное время оставалась водородной, с примесью других газов, и не пропускала солнечные лучи. Жизнь возникла в восстановительной атмосфере, и первыми организмами должны были быть хемотрофики. Жизни предшествовала эволюция химических реакций.

ФОРМИРОВАНИЕ БИОСФЕРЫ.

ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ ГИПОТЕЗ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЖИЗНИ

Историческое формирование живого вещества и биосферы в целом – одна из важнейших проблем учения о биосфере. Ее решение даст возможность понять, как начиналась жизнь, как она развивалась и развивается и что ее ждет в будущем. На решение этой проблемы направлены усилия многих ученых и научных коллективов. Достижения в этом направлении большие, но проблема, в целом, остается не решенной.

Одним из наименее изученных этапов самоорганизации вещества, предшествовавшей жизни, является этап абиогенного синтеза первичных предбиологических систем, приведший к «миру РНК» (Спирин, 2001). При этом не столь важно, где появилась жизнь – на Земле или на другой планете, главное – понять, как она вообще возникла из неживого вещества.

К настоящему времени разработана общая схема стадийности и эволюции предбиологических систем. Многие звенья этой эволюционной схемы доказаны экспериментально. Синтезированы почти все аминокислоты, синтезированы белки, а небиологическое происхождение многих компонентов

подтверждено наблюдениями и анализами – в вулканических породах, метеоритах, кометах и т.д.

Учитывая тот факт, что в настоящее время отсутствует какая-либо абсолютно доказанная гипотеза происхождения жизни, биосферы на Земле, ниже изложены некоторые развивающиеся сейчас гипотезы, имеющие тот или иной объем объективных свидетельств и экспериментальных доказательств.

Основные гипотезы происхождения жизни можно сгруппировать и сформулировать следующим образом.

А. Группа гипотез абиогенного возникновения жизни на Земле (абиогенеза).

1. Гипотеза химической эволюции на Земле (первоначальное название – коацерватная гипотеза) – возникновение жизни в толще воды на небольшой глубине в первичном бульоне органических соединений или же в первичной атмосфере.

2. Гидротермальная – возникновение жизни вблизи термальных источников в океане или на суше.

3. Гипотеза генетического захвата, или гипотеза минерального организмобиоза.

4. Гипотеза возникновения жизни в грунте и вулканических пеплах.

5. Гипотеза гиперциклов.

Б. Группа гипотез возникновения жизни за пределами Земли с последующим заносом на нее и абиогенного синтеза предбиологических систем в протопланетном диске Солнечной системы.

1. Гипотеза происхождения жизни путем заноса живых организмов – прокариот (бактерий) инопланетного происхождения (старое название – гипотеза «панспермии»).

2. Гипотеза происхождения жизни на Земле путем заноса органических соединений (кометная гипотеза).

3. Гипотеза астрокатализа – абиогенного происхождения предбиологических систем в протопланетном диске Солнечной системы.

Рассмотрим эти гипотезы последовательно.

ГРУППА ГИПОТЕЗ АБИОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЖИЗНИ НА ЗЕМЛЕ (АБИОГЕНЕЗА)

К настоящему времени довольно детально разработана общая схема стадийности и эволюции предбиологических систем. Многие звенья этой эволюционной схемы доказаны экспериментально. Синтезированы почти все аминокислоты, синтезированы белки, а небиологическое происхождение многих компонентов подтверждено геологическими наблюдениями – в вулканических породах и метеоритах.

Гипотеза химической эволюции на Земле (коацерватная гипотеза)

Эта гипотеза наиболее разработана и имеет существенные экспериментальные доказательства. Суть этой гипотезы состоит в том, что жизнь могла возникнуть в первичном океане или первичной атмосфере. В них происходила преджизнь (возникновение и развитие сложных химических молекул) и в них же происходил биопоэз, или биогенез – процесс перехода от неживого к живому веществу.

В 1924 г. выдающийся отечественный биохимик, академик Александр Иванович Опарин впервые сформулировал основные положения концепции предбиологической эволюции, а затем развил эти положения в коацерватной гипотезе происхождения жизни. А. И. Опарин и его сторонники не допускают возможности формирования материальных носителей жизни вне фазово-обособленной системы, имеющей границу раздела со средой в виде оболочки. Суть гипотезы А. И. Опарина заключается в том, что процесс зарождения жизни начинался с синтеза простейших органических соединений в водах первичного океана под влиянием различных источников энергии. При этом начальные этапы биогенеза были связаны с формированием белковых структур. В соответствии с взглядами А. И. Опарина, в современных условиях возникновение живых существ из неживой природы невозможно.

Эта идея поддерживается многими учеными. Основанием служит следующий установленный факт: неклеточная система, включающая белки и нуклеиновые кислоты, при снабжении необходимым высокоэнергетическим строительным материалом может репродуцировать свои составные части вне организма, т. е. эта система проявляет все существенные функции живой клетки.

Основное содержание коацерватной гипотезы А. И. Опарина в ее современном, хотя в целях доступности и упрощенном виде состоит в следующем.

Абиогенное (т.е. без участия живых организмов) возникновение живой материи возможно было только в условиях древней атмосферы и отсутствия живых организмов. На первом этапе добиологической (химической) эволюции косного вещества Земли происходил самопроизвольный синтез простых веществ. По мере остывания молодой Земли тяжелые вещества оседали к центру и образовывали ядро планеты, а более легкие – ее оболочку. Постепенно газы, вовлеченные во внутренние слои планеты, начали выделяться, и благодаря им образовалась земная атмосфера. В ее состав входили метан (CH_4), аммиак (NH_3), углекислый газ (CO_2), водород (H_2), вода (H_2O). Когда температура поверхности планеты стала ниже 100°C , из водяных паров атмосферы образовались первичные моря и океаны. Первичная атмосфера была, по-видимому, восстановительной. Об этом свидетельствует наличие в самых древних горных породах Земли металлов в восстанов-

ленной форме, таких как, например, двухвалентное железо, графит, лазурит и др. При этом следует иметь в виду, что в атмосфере имелись свободные атомы водорода, углерода, кислорода и азота, составляющие 99 % атомов, входящих в мягкие ткани любого живого организма. Для того чтобы на основе этих атомов образовались молекулы, должна была присутствовать дополнительная энергия, которая имела на Земле как результат вулканической деятельности, электрических грозных разрядов, радиоактивности, ультрафиолетового излучения Солнца. Процессы, предшествовавшие возникновению жизни, несомненно, совершались на основе тех же физических и химических законов, которые действуют и сейчас. Физические и химические особенности воды (высокий дипольный момент, вязкость, теплоемкость и т. д.) и углерода (способность к восстановлению и образованию линейных соединений) определили их важнейшую роль в образовании жизни. Химические и физические свойства различных атомов и молекул вызывали неизбежные взаимодействия между ними.

Из водорода, азота и соединений углерода при наличии свободной энергии на Земле должны были возникать сначала простые молекулы (аммиак, метан и т.п.). В дальнейшем эти несложные молекулы в первичном океане могли вступать в реакции между собой и с другими веществами, образуя новые, более сложные соединения. Особое значение имели процессы роста молекул с группой $-N-C-N-(N_2C)$. Эта группа открывает большие химические возможности для роста молекул в результате присоединения к атому углерода атома кислорода и в случае реагирования ее с азотистым основанием.

Второй этап химической (добиологической) эволюции состоял в дальнейших превращениях органических веществ и образовании абиогенным путем более сложных органических соединений, в том числе и биологических полимеров. По мнению А. И. Опарина, этот процесс также происходил в древнем океане. При этом с определенного этапа химической эволюции участие кислорода в процессе роста молекул стало необходимым. В атмосфере Земли кислород мог накапливаться в результате разложения воды и водяного пара под действием ультрафиолетовых лучей Солнца. Для превращения восстановленной атмосферы первичной Земли в окисленную потребовалось не меньше 1–1,2 млрд лет. С накоплением в атмосфере кислорода восстановленные соединения начали окисляться, а именно: NH_3 до NO_3 , CH_4 до CO_2 , H_2O до O_3 . При окислении CH_4 образовывались также метиловый спирт, формальдегид, муравьиная кислота и др. Они вместе с дождевой водой попадали в первичный океан и, вступая в реакции с аммиаком и цианистым водородом, по-видимому, дали начало аминокислотам и соединениям типа аденина.

Возможность синтеза аминокислот и других низкомолекулярных органических соединений из неорганических элементов и соединений доказана

экспериментально. В 1953 году американский исследователь С. Миллер в ряде экспериментов моделировал условия, существовавшие на Земле приблизительно 4 млрд лет назад. Пропуская электрические разряды через смесь аммиака, метана, водорода и паров воды, он получил ряд аминокислот, альдегидов, молочную, уксусную и другие органические кислоты. Позже американский биохимик С. Поннаперума добился самопроизвольного образования в искусственных условиях нуклеотидов и АТФ. В процессе таких самопроизвольных реакций вода первичного океана могла насыщаться различными веществами, образуя так называемый «первичный бульон».

Эксперименты в этом направлении оказались перспективными и для выяснения происхождения других веществ. Осуществлен синтез аденина, гуанина, аденозина, аденозинмонофосфата, аденозиндифосфата и аденозинтрифосфата. Американский химик С. Фокс составлял смеси аминокислот, подвергал их нагреванию и получал протеиноподобные вещества. Таким образом, в результате реакции полимеризации из простых молекул абиотическим путем могли быть образованы и более сложные: белки, липиды, нуклеиновые кислоты и их производные.

В настоящее время принимается предположение, что синтез белка мог проходить на поверхности земной коры. В небольших углублениях в застывающей лаве возникали водоемы, содержащие растворенные в воде малые молекулы, в том числе и аминокислоты. Когда вода испарялась или выплескивалась на горячие камни, аминокислоты вступали в реакцию, образуя протеноиды. Затем дожди смывали протеноиды в воду. Если некоторые из этих протеноидов обладали каталитической активностью, то мог начаться синтез полимеров, т.е. белковоподобных молекул.

Следует, однако, отметить, что в настоящее время установлено, что такие соединения, как вода, аммиак, синильная кислота, формальдегид, метилцианид, метилацетилен и некоторые другие широко распространены в межзвездном пространстве (см. выше). Формальдегид, в частности, обнаружен примерно в 13 из 22 исследованных районов Вселенной. Его облака с концентрацией около тысячи молекул в 1 см^3 заполняют ее обширные области. Предшественники аминокислот найдены в метеоритах и в лунном грунте. Таким образом, Земля при своем образовании могла получить эти вещества и из космоса.

Третий, также химический, этап подготовки к образованию биологических систем характеризовался выделением в первичном «питательном бульоне» особых коацерватных микроскопических капель, представляющих собой группы полимерных соединений. В ряде биохимических химических опытов было показано, что образование коацерватных суспензий, или микросфер, типично для многих биологических полимеров в растворе. Коацерватные капли обладают некоторыми свойствами, характерными и для живой протоплазмы, в частности, могут избирательно адсорбировать вещества

из окружающего раствора и за счет этого увеличивать свои размеры. Благодаря тому, что концентрация веществ в коацерватных каплях была в десятки раз больше, чем в окружающем растворе, возможность взаимодействия между отдельными молекулами увеличивалась во много раз.

Четвертый этап становления жизни, уже непосредственно связанный с формированием самых примитивных организмов, заключался в появлении структур, способных к самовоспроизведению, репликации и изменчивости. Известно, что молекулы многих веществ, в частности полипептидов и жиров, состоят из частей, обладающих разным отношением к воде. Гидрофильные части молекул, расположенные на границе между коацерватами и раствором, ориентируются в сторону раствора, где содержание воды больше. Гидрофобные части, напротив, ориентируются внутрь коацерватов, где концентрация воды меньше. В результате поверхность коацерватов приобретает определенную структуру и в связи с этим свойство пропускать в определенном направлении одни вещества и не пропускать другие. Благодаря этому свойству концентрация некоторых веществ внутри коацерватов еще больше возрастает, концентрация других уменьшается, и реакции между компонентами коацерватов приобретают определенную направленность. Коацерватные капли становятся системами, обособленными от среды. Возникают протоклетки, или протобионты (пробионты), как назвал их А. И. Опарин. Важным этапом химической эволюции явилось образование мембранной структуры. Параллельно с появлением мембраны шло упорядочение и усовершенствование метаболизма. В дальнейшем усложнении обмена веществ в таких системах существенную роль должны были играть катализаторы.

Одним из основных признаков живого является способность к репликации, т.е. созданию копий материнских молекул. Таким свойством обладают нуклеиновые кислоты, которые в отличие от белков способны к репликации. Основываясь на этом положении, выдающийся английский генетик и эволюционист Дж. Холдейн в 1929 г. выдвинул свою гипотезу абиогенного происхождения жизни. Согласно его взглядам, первичной пробиотической системой на земле была не коацерватная, способная к обмену веществ с окружающей средой, а макромолекулярная система, способная к самовоспроизводству. Другими словами, в отличие от А. И. Опарина, Дж. Холдейн отдавал первенство не белкам, а нуклеиновым кислотам. Дж. Холдейн допускал существование жизни до возникновения первых живых клеток. Он считал, что первые живые объекты представляли собой макромолекулы, синтезировавшиеся под действием солнечных лучей и способные размножаться. Первую клетку Дж. Холдейн представлял составленной из многочисленных полуживых химических молекул, взвешенных в воде и заключенных в маслянистую пленку. Такая «вирусная» стадия жизни

длилась многие миллионы лет, прежде чем подходящий набор элементарных единиц оказался собранным в первой клетке.

Как было указано выше, по расчетам в первичной атмосфере Земли преобладали неокисленные газы, образовывались коацерватные капли с усложняющимся синтезом. В 30–50-е гг. эту гипотезу развивали С. Миллер и Г. Юри. Известный классический эксперимент этих ученых, в котором симулировались гипотетические условия раннего периода развития Земли для проверки возможности химической эволюции вплоть до живых организмов, заключался в следующем. Они пропускали электрические разряды через модель первичной атмосферы и обнаружили молекулы органических веществ. Миллер доказал, что в этих опытах может образовываться синильная кислота. При этом синтезировалась молекула формальдегида. Кроме того, первичный анализ показал наличие в конечной смеси 5 аминокислот. Известно, что формальдегиды могут объединяться с образованием сахаров. Более точный повторный анализ показал, что эксперимент привел к образованию 22 аминокислот. В 60-х гг. американский биохимик Х. Оро показал, что молекулы синильной кислоты могут конденсироваться с образованием аденина. К 70-м гг. XX в. экспериментально была доказана принципиальная возможность синтеза в первичной атмосфере составных частей компонентов для дальнейшего синтеза более сложных органических соединений.

По современным представлениям ученых, развивающих коацерватную гипотезу, в коацерватах мог образовываться протеноид, способный катализировать полимеризацию нуклеотидов с образованием коротких цепочек РНК. Эти цепочки могли выполнять роль информационной РНК или же примитивного гена. В этом процессе ДНК, рибосомы, транспортные РНК, ферменты белкового синтеза еще не участвовали. Все они появились позже. Уже на стадии формирования протобионтов имел место, вероятно, естественный отбор, т.е. сохранение одних форм и элиминация (гибель) других. Прогрессивные изменения в структуре протобионтов закреплялись благодаря отбору. Для этого этапа добиологической эволюции в качестве элементарного объекта эволюции выделяют фракцию макромолекул полинуклеотидов или полипептидов, а в качестве элементарной эволюционирующей единицы – устойчивый «коллектив» макромолекул, связанных между собой процессами синтеза, катализа и др. В системе коацерватов не исключен и отбор самих нуклеиновых кислот по наиболее удачному сочетанию смысловой последовательности нуклеотидов, т.е. отбор по генам. А.И. Опарин считал, что системы с работающей (смысловой) последовательностью нуклеотидов в нуклеиновой кислоте уже вправе называться живыми.

В дальнейшем усложнении обмена веществ в таких системах существенную роль должны были играть катализаторы (различные органические и неорганические вещества) и пространственно-временное разобщение начальных и конечных продуктов реакции. Каталитическая активность коа-

церватов могла быть усилена и при возникновении комплексов между металлами и органическими соединениями. В результате такого сочетания, вероятно, появились коферменты в коацерватах, а затем и субстрат-специфические ферменты, способствовавшие биогенным синтезам. При возникновении ферментов исходно могли быть использованы простые пептиды в комплексе с ионами металлов.

Обмен веществ, функционирование ферментов не могли происходить без обособленности от внешней среды мембранами. Образование мембранной структуры считается самым трудным этапом химической эволюции жизни. Хотя объединением полинуклеотидов и полипептидов в какой-то степени и была достигнута возможность самосборки системы, однако истинная клетка, хотя бы и самая примитивная, не могла оформиться до возникновения мембранной структуры.

Биологические мембраны образованы агрегатами белков и липидов. Мембраны могли возникнуть или в ходе формирования коацерватов, образующихся в воде при контакте двух слабо взаимодействующих полимеров, или, как считают некоторые ученые, при адсорбции полимеров на поверхности глини.

Таким образом, в позднем архее (приблизительно 3,5 млрд лет назад) на дне небольших водоемов или мелководных, теплых и богатых питательными веществами морей возникли первые примитивные живые организмы, которые по типу питания были гетеротрофами, т. е. питались готовыми органическими веществами, синтезированными в ходе химической эволюции. Способом обмена веществ им служило, вероятно, брожение – процесс ферментативного превращения органических веществ, в котором акцепторами электронов служат другие органические вещества. Часть энергии, выделяемой в этих процессах, запасается в виде АТФ. Возможно, некоторые организмы для жизненных процессов использовали и энергию окислительно-восстановительных реакций, т.е. были хемосинтетиками. Со временем происходило уменьшение запасов свободной органики в окружающей среде, и преимущество получили организмы, способные синтезировать органические соединения из неорганических. Таким путем, вероятно, около 2 млрд лет назад возникли первые фототрофные организмы типа цианобактерий, способные использовать световую энергию для синтеза органических соединений из CO_2 и H_2O , выделяя при этом свободный кислород. Переход к автотрофному питанию имел большое значение для эволюции жизни на Земле, как в отношении запасов органического вещества, так и в отношении насыщения атмосферы кислородом. При этом атмосфера стала приобретать окислительный характер. Появление озонового экрана защитило первичные организмы от губительного воздействия ультрафиолетовых лучей и положило переходу преимущественно к биогенному синтезу органических веществ.

Таковы современные научные представления об основных этапах происхождения и становления жизни последователей гипотез А. И. Опарина и Дж. Холдейна возникновения жизни в условиях Земли. В этой гипотезе одной из наиболее важных ступеней химической эволюции признается объединение способности к самовоспроизведению полинуклеотидов с каталитической активностью полипептидов. При возникновении жизни необходимо было участие как полинуклеотидов, так и полипептидов. При этом каталитические способности молекул РНК, вероятно, сыграли важную роль в ходе предбиологической эволюции, были усилены и каталитическими функциями молекул белков.

Коацерватная гипотеза, как имеющая наибольшее количество фактических доказательств, имеет и большое число невыясненных моментов, порой неразрешимых, и большое число ее противников.

Основные противоречия и нерешенные проблемы этой гипотезы заключаются в следующем.

1. Граница между компонентами нуклеиновых кислот, которые синтезированы в опытах, и самими нуклеиновыми кислотами, носителями генетической информации, очень большая, и еще никому не удалось абиогенным путем синтезировать и произвести «запуск» нуклеиновой кислоты.

2. Нуклеиновые кислоты в организмах включают нуклеотиды в большом количестве, а в опытах их образовывалось очень мало. В соответствии со II законом термодинамики они должны рассеиваться и разрушаться.

3. Остается нерешенным вопрос об абсолютной хиральной чистоте компонентов важнейших соединений в организмах – аминокислот и нуклеиновых кислот. В молекулах белков представлены только левовращающие оптические изомеры аминокислот, а в нуклеиновых кислотах – только правовращающие изомеры сахаров. Неживой природе присуща тенденция к установлению зеркальной симметрии (рацемации). В лабораторных опытах также не удается абсолютно дифференцировать эти соединения и составить из соответствующих изомеров функционирующие белки и нуклеиновые кислоты.

Только в хирально чистых растворах может происходить удлинение цепочки полинуклеотидов и процесс саморепликации. Рацемический полинуклеотид не в состоянии реплицироваться, так как его основания направлены в разные стороны, и у него нет спиральной организации. Живые системы организованы так, что транспортные РНК из правых сахаров присоединяют к себе только левые аминокислоты. Поэтому возникновение жизни, очевидно, произошло после разрушения зеркальной симметрии предбиологической среды.

В последние десятилетия была развита теория неравновесных систем. Основатель неравновесной термодинамики – И. Пригожин. Оказалось, что если в химической системе создать неравновесные условия, то химические реакции идут по-другому, со снижением энтропии. Например, при нерав-

номерном нагревании в химической системе под действием конвекционных токов начиналось согласованное движение молекул. Они образуют правильные фигуры (например, шестиугольники). Молекулы начинают двигаться с одинаковой скоростью и в определенных направлениях. Если в неравновесной системе смешаны молекулы, определяющие синий и красный цвета, то в обычных условиях они перемешиваются, и жидкость становится фиолетового цвета. В опытах Пригожина – Бернара, когда создавалось неравновесное состояние, молекулы двигались согласованно, и в одних опытах жидкость в сосудах окрашивалась полностью в красный цвет, а в других полностью в синий. Достигалось состояние, когда сосуд окрашивался сначала в красный, а затем в синий цвет. Эти положения неравновесной термодинамики были распространены на процессы, происходящие в первичной атмосфере Земли. При этом в определенный исторический момент, возможно, было достигнуто такое неравновесное состояние среды, когда оказалось возможным самопроизвольная дифференцировка оптических изомеров. Однако все изложенное – пока только гипотезы возможных путей абиогенного возникновения жизни именно на Земле.

4. Возникновение жизни в соответствии с коацерватной гипотезой (в широком смысле, с учетом всех возможных вариантов) требует времени, измеряемого сотнями миллионов лет, по-видимому, – более 1 миллиарда. Однако достоверные свидетельства жизни в виде окаменевших оболочек прокариотических клеток обнаружены в отложениях возрастом 3,8 млрд лет, и это явно еще не предел. Иными словами, жизнь появилась очень быстро после формирования планеты Земля и остывания ее наружной оболочки до температур, когда белки, нуклеиновые кислоты и другие макромолекулы не разрушаются и не денатурируются, а функционируют в составе живых систем.

5. В соответствии с коацерватной гипотезой первыми должны были возникнуть и длительное время существовать гетеротрофные организмы с сапрофитным типом питания. Такие организмы развиваются, потребляя питательные растворенные вещества диффузным путем через мембрану. Однако расчеты показывают, что, размножаясь в геометрической прогрессии, такие гетеротрофные сапрофитные организмы очень быстро потребили все существующие в океане органические вещества и, тем самым, уничтожили бы все средства к собственному существованию. К тому же выделение в огромном количестве продуктов метаболизма создало бы несовместимую для жизни организмов среду.

6. Сложные органические соединения не только могут синтезироваться абиогенным путем на каталитической основе на Земле, но и поступать в довольно большом количестве с кометами и метеоритами. Следует иметь в виду, что в условиях первичной бескислородной атмосферы Земли ее поверхность не была защищена от их падения. Таким образом, материал для

абиогенного синтеза основных типов макромолекул (нуклеиновых кислот и белков) не обязательно должен был синтезироваться автокаталитическим путем именно в условиях Земли.

В целом, коацерватная гипотеза (в самом широком ее понимании, со всеми вариантами) пока не имеет безусловных и полных доказательств теоретического и экспериментального характера, хотя и накопила их наибольшее количество, по сравнению с другими изложенными ниже гипотезами.

Гидротермальная гипотеза

В 60-х гг. XX в. исследователи открыли на дне Тихого океана подводные вулканы – черные курильщики. Условия вблизи них, на первый взгляд, абсолютно неприемлемые для жизни: клубы ядовитых газов, отсутствие солнечного света и кислорода, температура +120 °С и т.д. И тем не менее, в непосредственной близости к ним существуют колонии микроорганизмов. Подобные черным курильщикам условия были на Земле уже 2,5–3,7 млрд лет назад, о чем свидетельствуют пласты строматолитов – осадочных пород в результате жизнедеятельности комплексов автотрофных и гетеротрофных прокариот (подробнее – см. ниже). Формы, похожие на эти микроорганизмы, есть и среди окаменевших остатков древнейших организмов возрастом 3,5–3,7 млрд лет.

Некоторые наблюдения на океаническом дне свидетельствуют о возможности абиогенного синтеза природных углеводородов, входящих в состав нефти и газа в условиях гидротермальных источников.

Несомненно, что гидротермальные источники существовали и на древней Земле. Они и обеспечивали синтез углеводородов, из которых могли сформироваться древние формы жизни.

Гидротермальные источники существуют и на суше. Почва вокруг них заселена бактериями. В горячих источниках обнаружены цианобактерии (синезеленые водоросли), пурпурные и серные бактерии. Их многообразие вблизи наземных гидротермальных источников создает богатую палитру этих необычных водоемов, например, в Йеллоустонском национальном парке. Возможно, именно такие горячие водоемы населяли первые жители нашей планеты.

Гипотеза генетического захвата (минерального организмобиоза)

В основе обеих гипотез лежит явление кристаллообразования. В основе ряда современных концепций происхождения жизни лежит идея стартовой роли минералов. При этом минералы рассматриваются как катализаторы неорганического синтеза биополимеров, как своеобразные «воспитатели» белков и как информационные матрицы, структурно-функциональных

предшественников гена. Информационная емкость минералов (точнее – их межслоевых пространств) сравнима с емкостью молекул ДНК. Сторонники этой гипотезы отдают приоритет первичности гена в происхождении жизни генобиоза. При этом структурой протогена признается кристаллическая решетка минералов, в частности некоторых пород глины. А уже в процессе дальнейшей эволюции, совместной с синтезированными ею полимерами, развивается спираль ДНК. Одним из основателей этой гипотезы был шотландский химик А. Дж. Кернс-Смит. Он утверждал, что первым организмом на Земле был именно «глиняный ген». Кристаллы некоторых глин очень похожи по своей структуре на спирально закрученные молекулы нуклеиновых кислот и точно так же состоят из более мелких субъединиц. Попадая между слоями глинистых частиц, органические молекулы взаимодействовали с ними, перенимали способ хранения информации и роста, можно сказать, обучались. Какое-то время минералы и протожизнь мирно сосуществовали, но вскоре произошел разрыв, или генетический захват, по Кернс-Смиту, после чего жизнь покинула минеральный дом и начала свое собственное развитие.

Аминокислоты структурно также подобны минералам, в которых находят органические молекулы. Вполне вероятно, что синтез аминокислот шел внутри структуры и на поверхности глинистых минералов. Есть и экспериментальные подтверждения такого синтеза. Таким образом, «глиняный» ген мог стать основой происхождения жизни.

Однако структурное соответствие и совместимость некоторых минералов и макромолекулярных биосистем не может однозначно свидетельствовать в пользу биостартовой роли минералов. Экспериментальных доказательств этой гипотезы пока не существует.

Гипотеза возникновения жизни в грунте и вулканических пеплах

Суть ее заключается в том, что жизнь или преджизнь (т.е. комплексы сложных органических, предбиологических соединений, представляющих собой химическую основу жизни) на Земле могла возникнуть в пропитанном водой и элементоорганическими соединениями первозданном грунте и вулканических пеплах в начале раннего архея, т.е. около 4,0–3,9 млрд лет назад. В этот период на Земле возникла восстановительная азотно-углекислотно-метановая атмосфера (см. выше). При этом зарождение жизни на Земле совпало с первым и наиболее сильным тектоническим и геохимическим рубежом в истории ее развития. Это был период начального выделения земного ядра, т.е. начала химико-плотностной дифференциации земного вещества. Эта дифференциация привела к формированию гидросферы, плотной атмосферы и континентальной земной коры и сопровождалась интенсивной вулканической деятельностью.

Вулканологи, исследуя механизмы извержения вулканов, высказали мысль о том, что условия в пепло-газовых тучах сходны с условиями биохимических экспериментов по абиогенному синтезу аминокислот (<http://xroniki-nauki.ru/teorii/aminokisloty-iz-pepla>). Эти высказывания подкреплены фактами. Во время извержения вулканов на Дальнем востоке России (на Камчатке и Курильских островах) вулканологами были взяты, а химиками и микробиологами проанализированы пробы вулканического пепла. Часть проб была отобрана непосредственно во время извержения, когда в пепел еще не могли попасть продукты жизнедеятельности микроорганизмов. Результаты анализов, выполненных с использованием современных, очень тонких методов показали, что микроорганизмов в свежем пепле еще нет, он стерилен. Но при этом в пепле содержится обширный комплекс органических соединений – углеводороды, в том числе гетероатомные (содержащие, кроме углерода и водорода, еще атомы кислорода, азота и других элементов), и даже аминокислоты и пептиды (компоненты белков).

Кроме того, были проведены исследования воздуха на расстояниях до 23 км от вулкана Тятя на острове Кунашир и на высоте до 8 м над ним во время его извержения в 1973 г. Результаты анализов позволили определить количество микроорганизмов во всем объеме воздуха над вулканом и узнать, сколько микробных клеток из воздуха оседает вместе с пеплом. Оказалось, что общий вес всех белков или углерода микробного происхождения в пепле не превышает 10 кг. Эта цифра в 1000 раз меньше того количества аминокислот, которое обнаружено в пепле вулкана (<http://xroniki-nauki.ru/teorii/aminokisloty-iz-pepla>).

Результаты проведенных анализов и расчеты полностью подтвердили предположение о том, что в вулканической туче из пепла и газа идут процессы синтеза сложных предбиологических соединений. Эти соединения в процессе дальнейшей химической эволюции, образуя гигантские микромолекулы, могли положить начало жизни на нашей планете.

Гипотеза гиперциклов

Абиогенетическая гипотеза возникновения жизни на основе химических реакций особого типа, гиперциклов, была выдвинута немецким ученым, лауреатом Нобелевской премии М. Эйгеном (1973), а затем развита совместно с П. Шустером (Эйген, Шустер, 1982).

В основе гиперциклов лежат каталитические химические циклы, в которых промежуточные продукты (все или часть из них) химических реакций, так называемые интермедиаты, сами являются катализаторами последующих реакций данного цикла (рис. 8, а). Таким образом, замкнутый каталитический цикл представляет собой автокатализатор. Системы же сопряженных химических реакций, в которых отдельные автокаталитических циклы, в свою очередь, образуют циклические связи на более высоком уровне (второго порядка), и представляют собой гиперциклы (рис. 8, б).

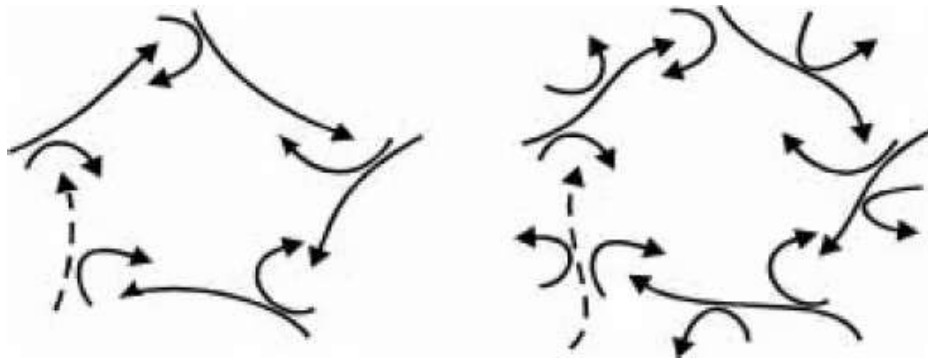


Рис. 8. Упрощенные схемы каталитического химического цикла (а) и гиперцикла (б) (К. Ю. Еськов, 2004)

Такие замкнутые автокаталитические химические циклы, гиперциклы, хотя и являются только комплексами взаимосвязанных химических реакций, но они обладают некоторыми признаками живого вещества – круговоротом веществ и энергии, воспроизведением с наследованием информации, приспособляемостью к изменяющимся условиям. Они обладают даже признаками естественного отбора на уровне молекул. Если имеется система самовоспроизводящихся единиц, которые строятся из материала, поступающего в ограниченном количестве из единого источника, то в ней с неизбежностью возникает конкуренция и, как ее следствие, естественный отбор. Иными словами, гипотеза возникновения жизни на основе гиперциклов предполагает эволюцию на молекулярном уровне, приведшую к формированию примитивных клеток, использующих генетический код для матричного синтеза.

Эта гипотеза вполне удовлетворительно описывает возникновение на основе взаимного катализа системы «нуклеиновая кислота – белок», которое представляет собой решающее событие в процессе возникновения жизни на Земле (Еськов, 2004).

Существуют и другие гипотезы абиогенного появления жизни на Земле, пока не имеющие убедительных доказательств. Так, например, существует предположение о том, что первые белки и нуклеиновые кислоты могли автокаталитическим путем образоваться в тончайших зазорах между слоями слюды, находящейся в морской воде. Существуют и другие гипотезы.

Гипотезы возникновения жизни или предбиологических систем вне Земли

1. Гипотеза происхождения жизни путем заноса живых организмов – прокариот (бактерий) инопланетного происхождения (старое название – гипотеза «панспермии»).

2. Гипотеза происхождения жизни на Земле путем заноса органических соединений (кометная гипотеза).

Эти две гипотезы тесно связаны между собой, и их целесообразно рассмотреть совместно.

Гипотеза «панспермии» берет начало от старой гипотезы Аррениуса. Согласно этой гипотезе, предложенной в 1865 г. немецким ученым Г. Рихтером и окончательно сформулированной шведским ученым Аррениусом в 1895 г., жизнь могла быть занесена на Землю из космоса. Не разбирая здесь необоснованных прежних утверждений о возможности заноса на Землю неких высокоорганизованных организмов или их половых клеток, отметим, что в кардинально пересмотренном виде эта гипотеза имеет фактические свидетельства о возможности заноса законсервированных низших организмов или их важнейших компонентов.

По современным представлениям наиболее вероятно попадание живых организмов внеземного происхождения с метеоритами и космической пылью. Это предположение основывается на данных о высокой устойчивости некоторых организмов и их спор к радиации, глубокому вакууму, низким температурам и другим воздействиям.

В последние два десятилетия исследованы некоторые метеориты с большим содержанием углерода (углистые метеориты, или углистые хондриты). Они представляют легко режущийся материал черного цвета. В них обнаружено значительное количество углеродных органических соединений, содержащих повышенное содержание изотопа углерода ^{12}C . Известно, что растения интенсивно накапливают ^{12}C и относительное содержание этого изотопа в их составе выше, чем в неживой природе, например в атмосфере.

Обнаружены также окаменевшие остатки, которые очень напоминают отдельные клетки и цепочки прокариот. На этом основании делается вывод о возможности заноса на Землю законсервированных прокариот. При этом считается, что жизнь или преджизнь не могли быть занесены из отдаленных уголков Вселенной, в связи с тем, что время образования Вселенной составляет 13–14 млрд лет, и, следовательно, даже свет от отдаленных звезд доходит до Солнечной системы за многие миллиарды лет. Солнечная же система возникла 5 млрд лет назад. Сторонниками данной гипотезы предполагается, что жизнь могла возникнуть в пределах Солнечной системы или на планетах относительно близких звезд.

Американские ученые в 1990-х гг. установили, что в углистом метеорите, найденном еще в 1969 г. в Австралии (его название – Murchison, или Мурчисонский метеорит, масса 108 кг) содержится большое количество органических включений. В частности, результаты исследования его состава в последние годы самыми современными биохимическими методами показали наличие в нем аминокислот (причем, как и на Земле, левых изомеров) и нуклеиновых оснований. Однако некоторые ученые подвергли сомнению

результаты этих исследований, заявив, что преобладание левых аминокислот в метеорите – всего лишь следствие загрязнения метеорита земной породой. Сторонники внеземного происхождения в этом метеорите (а также и в некоторых других метеоритах) аминокислот и азотистых оснований (блоков нуклеиновых кислот – генетического материала) доказывают обратное: эти сложные соединения при контаминации (загрязнении) были бы только снаружи метеорита, но никак не внутри него. Но ведь именно в глубине метеорита такие соединения и обнаружены.

Установлено, что углистые хондриты имеют возраст 4,39–4,59 млрд лет. Во всех группах углистых хондритов присутствуют очень сложные органические соединения. Однако неопровержимые доказательства их биогенного происхождения пока отсутствуют, и вопрос остается открытым.

В целом, на Землю постоянно поступает огромное количество внеземного (космического) материала в виде космической пыли и значительно реже в виде достаточно крупных обломков, которые можно (около 1 %) обнаружить и распознать. Наиболее принятые (наиболее вероятные) оценки количества внеземного вещества, поступающего на Землю, – 100–1000 т в сутки.

Исследования с помощью электронного сканирующего микроскопа углистого вещества метеоритов Мурчисон российских ученых (Жмур, Розанов, Горленко, 1993; Розанов, 2000) показали, что в составе его минеральной матрицы довольно часто встречаются микроскопические структуры, которые с достаточной степенью вероятности могут быть приняты за литифицированные остатки коккоидных бактерий типа современных цианобактерий рода *Gloeocapsa*. Можно наблюдать общий вид макроколоний и сколы, на которых видны более мелкие микроколонии и отдельные клетки. Размер макроколоний обычно составляет 10–16 мкм, микроколоний – 5–6 мкм. Некоторые остатки коккоидных форм по строению чрезвычайно сходны с современными цианобактериями *Enthophysalis granulosa*. Кроме того, в матрице метеорита Murchison были обнаружены литифицированные остатки нитчатых микроорганизмов. В некоторых случаях они сохранили даже детали клеточного строения, ветвились и имели сходство с грибными мицелиями или актиномицетами.

При этом литифицированные остатки микроорганизмов тесно сопряжены с минеральной матрицей хондритов. Указанные авторы отмечают, что этот доказанный факт снимает вопрос о возможной контаминации (засорении) метеоритов биологическими объектами или сложными органическими соединениями.

Исследование метеоритов Ефремовка (Казахстан, находка 1962 г.), отнесенного к углистым хондритам, Оргей и других также показало наличие в матрице структур, сходных с микроорганизмами как коккоидной, так и нитчатой форм (рис. 9).

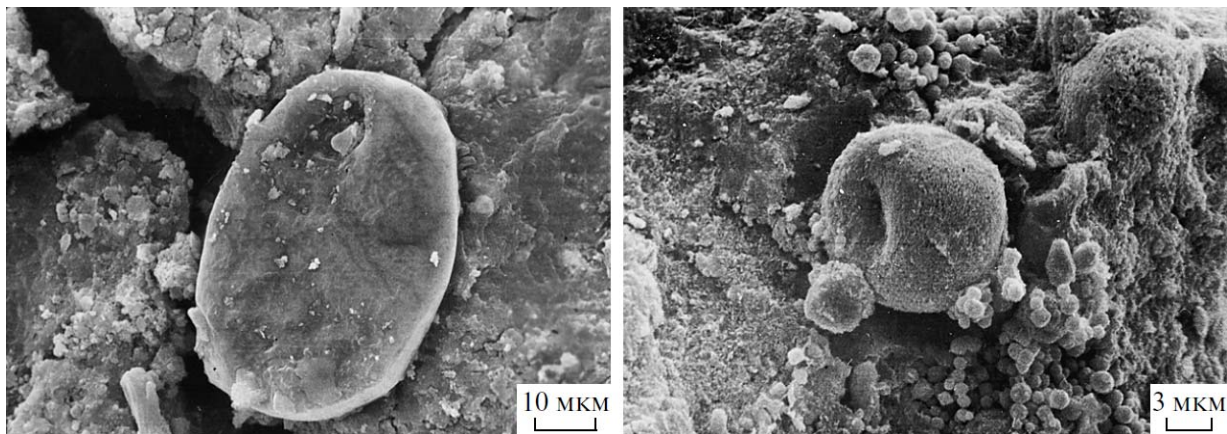


Рис. 9. Предполагаемые эвкариотические организмы в метеорите Оргей (А. Ю. Розанов, 2010)

На поверхности микроколоний обнаруживаются полые сферы, которые можно рассматривать как остатки клеток и их капсул. Часто обнаруживаются короткие цепочки мелких коккоидных клеток, которые иногда не полностью разделены и образуют диплококки. Связь этих остатков микроскопических окаменелостей (микрофоссилий) с минеральной матрицей хондрита настолько тесная, что предположить их происхождение контаминацией весьма трудно. Все же А. Ю. Розанов (1996) делает два замечания. Первое – метеорит Ефремовка (Казахстан, находка 1962 г.) пролежал в Земле какое-то время. Заражение микроорганизмами и их быструю фоссилизацию (развитие окаменелости) с трудом, но можно допустить. Сложнее с цианобактериями, которым нужен свет и им нет смысла «лезть» внутрь метеорита. Второе – метеорит Мурчисон был поднят очень быстро, и в этом случае даже грибное заражение практически исключено.

Таким образом, многие ученые считают доказанным тот факт, что в углеродистых хондритах присутствуют литифицированные остатки микроорганизмов. При этом обнаруженные в метеоритах окаменевшие микроорганизмы входят и в состав цианобактериальных матов – первых в истории Земли экосистем (см. ниже). Принадлежность большей части микрофоссилий к минеральной матрице дает основание считать их первичными по отношению к породе и соответственно признать биогенную природу углеродистого вещества содержащих их метеоритов. Выявленные остатки микроорганизмов, вероятно принадлежащие к цианобактериям, указывают на формирование вещества углистых хондритов в водной среде. Таким образом, возможно, 4,5 млрд лет тому назад (возраст метеоритов) за пределами Земли существовала жизнь на уровне бактерий и, может быть, низших грибов. Однако не следует считать вопрос решенным окончательно. В частности, существуют данные (Юшкин, Гаврилюк, Голубев, 1996) о форме кри-

сталлов керрита из древних (1,7 млрд лет тому назад) пород, внешне сходных с бактериями.

Среди огромного множества бактерий выделяется обширная и разнообразная группа архебактерий (подробнее см. ниже). Среди этих бактерий есть термофилы и кислотоустойчивые формы, т.е. бактерии-экстремофилы. Они живут в непригодных для других организмов условиях, в том числе и в ядерных реакторах, где все живое должно быть убито. Поэтому архебактерии, по-видимому, раньше всех должны были появиться, поскольку космос – это комплекс экстремальных условий. В связи с этим часть ученых считает, что если все-таки имела место панспермия, т.е. перенос живых организмов через космическое пространство, то это был перенос, скорее всего, архебактерий.

Астрономы с помощью космического телескопа «Кеплер» и компьютерного моделирования в конце 2011 г. подтвердили существование 716 экзопланет в 584 планетных системах галактики Млечный Путь. Общее же количество экзопланет в нашей галактике оценивается предположительно в 50 млрд, из которых около 2 млрд, возможно, являются «землеподобными». По современным оценкам, около 34 % солнцеподобных звезд имеют в своей обитаемой зоне планеты, сравнимые с Землей.

Условия для синтеза предбиологической органики могли быть в космосе. В 1961 г. известный американский биохимик Джон Оро опубликовал статью о кометном происхождении органических молекул. Молодая Земля, не защищенная плотной атмосферой, подвергалась массированным бомбардировкам кометами, которые состоят в основном из льда. Они содержат также аммиак, формальдегид, цианид водорода, цианоацетилен, аденин и другие соединения, необходимые для абиогенного синтеза аминокислот, нуклеиновых и жирных кислот – основных компонентов клетки. Вода комет образовала океаны, где через сотни миллионов лет расцвела жизнь. Наблюдения подтверждают, что в космических телах и межзвездных пылевых облаках есть простая органика и даже аминокислоты. Спектральный анализ показал наличие аденина и пурина в хвосте кометы Хейли-Боппа, а в метеорите Мурчисон нашли пиримидин. Образование этих соединений в условиях космоса не противоречит законам физики и химии.

Ряд авторов считают, что метеориты имели астероидные родительские тела и, возможно, были обогащены льдом и в этом отношении сходны с ядрами комет. Считается, что на Землю поступал и поступает большой объем кометного материала. Ученые уже довольно давно установили химический состав вещества ядер наблюдаемых комет (см. табл. 4).

Как видно из таблицы, кометное вещество содержит разнообразные сложные органические соединения, лежащие в основе функционирования биологических систем.

*Химический состав вещества ядер наблюдаемых комет
(А. А. Баренбаум, 1995)*

Соединение	Химическая формула	Состав, % мас.
Вода	H ₂ O	60–70
Простые газы	NH ₃ , CH ₄ , CO, CO ₂ , ...	5–10
Органические соединения: Нитрилы Альдегиды Органические кислоты Спирты Производные рядов: Ацетиленового (C ₂ H ₂) Этиленового (C ₄ H ₄) Этанового (C ₆ H ₆) Аминокислоты: Глицин Аланин Валин Полимеры типа парафинов с длинными цепями	HCN, CH ₃ CN, ... H ₂ CO, CH ₃ CHO, ... HCOOH, CH ₃ COOH, ... CH ₃ OH, C ₂ H ₅ OH, ... HCCCN, HCCCH ₃ , ... H ₂ CCO, H ₃ CCCN, ... CH ₃ CHO, C ₂ H ₅ CN, ... NH ₂ CH ₂ COOH CH ₃ CH(NH ₂)COOH (CH ₃) ₂ CHCH(NH ₂)COOH C _n H _{2n+2}	10–15
Внутриядерная пыль: Силикаты Графит Оксиды металлов Сульфиды Никелистое железо	SiO ₂ , MgSiO ₃ , Mg, FeO ₂ , SiO ₄ , FeSiO ₃ , (Mg, Fe, Ca)SiO ₃ , ... C FeO, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄ , ... CS, FeS, MnS ₂ , CaS, ... FeNi	10–25

Гипотеза астрокатализа

Эта гипотеза довольно тесно связана с гипотезами заноса прокариот или сложных органических соединений из космоса и не приходит с нею в противоречие.

Суть ее заключается в том, что есть основания предполагать, что абиогенный синтез пребиотического вещества как этап возникновения жизни на Земле имел место в протопланетном околозвездном диске солнечной системы. Взрыв звезды первого поколения не только создавал тяжелые элементы, но и рассеивал их в пространстве. Из новых скоплений атомов образовались

звезды второго поколения, в том числе и наше Солнце. Облака рассеянных частиц, не вошедших в состав центральной звезды, вращались вокруг нее и постепенно разделялись на отдельные сгустки – будущие планеты. Именно на этом этапе и мог начаться синтез первых органических молекул.

Возможность органического синтеза в протопланетном облаке предполагалась давно, но подтверждена была лишь недавно, во многом благодаря работам академика В. Н. Пармона (2002), В. Н. Снытникова (2006) и их коллег из Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН (Новосибирск). При помощи сложных расчетов и компьютерного моделирования было показано, что в сгустках многокилометровых первичных тел и протопланет с подвижной твердой фазой в области развития гравитационных неустойчивостей мог осуществляться каталитический абиогенный синтез органических соединений. В газово-пылевых протопланетных облаках имеются необходимые условия для синтеза разнообразной органики из водорода, азота, угарного газа, цианистого водорода и других простых молекул, обычных в космосе. Непременным условием является присутствие твердых частиц-катализаторов, содержащих железо, никель и кремний. С помощью современной компьютерной техники рассчитано, что, во-первых, число стадий самоорганизации на химическом этапе эволюции от простых химических соединений к «миру РНК» невелико. Во-вторых, абиогенный синтез первичных органических соединений должен включать в себя на порядки большую массу простых соединений углерода, азота, кислорода, чем их имеется на поверхности Земли и в ее коре. В-третьих, для высокой производительности синтеза эволюция на первых химических этапах должна быть каталитической с включением твердой фазы. Для самого синтеза должен существовать реактор подобно тому, как звезды представляют собой реакторы синтеза химических элементов. И поэтому вопрос об абиогенном синтезе первичного пребиотического вещества вполне возможно может найти свое решение как астрофизическая или астрохимическая проблема.

Главный результат исследований по астрокатализу сводится к выводу, что абиогенный синтез первичных органических соединений проходил непосредственно при формировании первичных тел и протопланет при развитии гравитационной коллективной неустойчивости с одновременным объединением множества малых тел. В процессе образования планет в сгустках вещества создаются благоприятные условия для гетерогенного каталитического синтеза органических соединений. Следы этих процессов следует искать в метеоритах и астероидах, на спутниках планет, там, где не было геологической эволюции. Так как время изменения содержания химических соединений в реакциях органического синтеза редко превышает часы или дни при нормальных условиях, то темпы химической эволюции на этой стадии были очень высокими на уровне всего нескольких лет. Соответственно, «мир РНК» предположительно существовал именно в этих условиях.

Таким образом, в соответствии с этой гипотезой стадия «астрокатализа» для первичного абиогенного синтеза основной массы органических со-

единений соответствует этапу формирования крупных тел в Солнечной системе. В этом случае молодая Земля могла иметь в своем составе большое количество органики уже с самого начала своего существования. Абиогенный синтез органики продолжался уже на Земле.

В заключение обзора основных гипотез происхождения жизни на Земле приведем выдержку из статьи крупнейшего российского палеонтолога, академика А. Ю. Розанова (2010), свидетельствующую о сложности решаемой проблемы.

«Итак, сегодня можно говорить только о времени появления жизни на Земле, а не о ее происхождении (зарождении). Во всяком случае, это справедливо для последних 4,0 млрд лет, то есть документированной геологической истории. Проследим цепь биотических и абиотических событий на Земле на протяжении 4,6 млрд лет ее существования. Между 4,6 и 4,0 млрд лет назад на поверхности Земли воды или совсем не было, или было очень мало. Вода появилась в значительном количестве 4 млрд лет назад, когда закончилась интенсивная метеоритная бомбардировка. В то время в мелководных бассейнах начинают образовываться осадочные породы, и бурно расцветает жизнь на поверхности нашей планеты. Кроме бактерий, в том числе и цианобактерий, не исключено освоение Земли зелеными водорослями и, может быть, даже и грибами. Поверхность суши была заселена микроорганизмами уже в архее. Цианобактерии, эвкариоты и Metazoa появились много раньше, чем обычно предполагалось. И по уровню их организации можно составить представление о степени оксигенизации атмосферы. Объем воды, соизмеримый с современным, образовался около 1,3 млрд лет назад, и с этого времени мы наблюдаем широчайшую экспансию различных организмов. Мир РНК, как самостоятельное состояние, если и существовал, то только до 4,0 млрд лет назад, а может быть, – до образования Земли. Вероятность возникновения жизни именно на Земле крайне мала».

МИР РНК

Многие ученые, придерживающиеся взглядов химического возникновения жизни на Земле, считают, что не менее чем за 0,5 млрд лет до появления самых примитивных клеток и в течение 1,5–2 млрд лет уже биологической жизни ее основой была рибонуклеиновая кислота (РНК), но не дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК), как сейчас.

Как известно, на современном этапе биологической эволюции основную роль в хранении и передаче наследственной информации играют молекулы ДНК. Основную роль в работе по самоподдержанию, росту, получению энергии играют белки. Молекулы же РНК принимают участие в выполнении обеих функций: они являются посредниками между ДНК и белками. Какая-либо функция в организме без РНК не может быть выполнена. Поскольку у прокариот РНК выполняет функцию передачи наследственной информации считается, что именно эти нуклеиновые кислоты первыми и

возникли в процессе эволюции. Но при этом они выполняли и функцию создания и поддержания структуры организмов, и работу, направленную на выработку энергии, т.е. функции современных белков.

Молекула РНК проще по своему строению, чем ДНК: состоит из одной нити и из меньшего числа нуклеотидов, чем молекула ДНК. Молекулы РНК могут выполнять функции катализаторов, в частности реакций синтеза полипептидов из аминокислот, а также реакций саморепликации. В современном органическом мире эту функцию катализаторов выполняют, в основном, белки, но в самом начале возникновения клеток, по-видимому, эту функцию выполняли исключительно молекулы РНК.

В искусственной среде вне клеток, в насыщенных РНК растворах эти молекулы функционируют самостоятельно, реплицируясь и обмениваясь друг с другом своими фрагментами, т.е. генетической информацией. В таких растворах происходит спонтанный отбор молекул РНК, т.е., по существу, естественный отбор. В настоящее время в лабораторных опытах искусственно синтезируются молекулы РНК с заданными свойствами, например, молекулы, выполняющие функцию катализаторов синтеза цепочек нуклеотидов, молекулы, устойчивые к высокой температуре и др.

В природных условиях мир РНК мог возникнуть примерно 4 млрд лет назад в мелких теплых водоемах, в которых проходило спонтанное размножение молекул. Постепенно молекулы стали собираться в «сообщества», и между ними возникали конкурентные взаимоотношения, сопровождавшиеся выживанием наиболее приспособленных. Неточности и ошибки при передаче информации, обеспечивающей определенные свойства молекул, могли компенсироваться большим количеством комбинаций фрагментов молекул РНК. По расчетам отбор РНК должен был происходить очень быстро, и за полмиллиарда лет могла возникнуть клетка. Дав толчок возникновению жизни, молекулы РНК продолжали выполнять многие функции, но уже в пределах цитоплазмы и органоидов клеток.

Важнейшей нерешенной проблемой в теоретических построениях существования мира РНК, как и вообще возникновения живого вещества, является отсутствие фактических доказательств существования механизмов образования обособленной клетки, отграниченной от окружающей среды мембраной. Создать живую клетку в пробирке пока не удалось.

ПЕРВЫЕ ОРГАНИЗМЫ. НАЧАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ ОРГАНИЗАЦИИ БИОСФЕРЫ В АРХЕЙСКОЙ ЭРЕ НА ПРОКАРИОТНОМ ЭКОСИСТЕМНОМ УРОВНЕ

Первыми организмами, несомненно, были прокариоты, т.е. бактерии (гетеротрофные прокариоты) и цианобактерии (синезеленые водоросли – автотрофные прокариоты).

В настоящее время среди всех прокариот выделяют небольшую, но разнородную группу, выделяемую часто в царство или домен – археобакте-

рии, или археи. В свою очередь, в составе этого домена разные ученые выделяют 5 типов, сильно различающихся между собой, в основном, по физиологическим особенностям. Археобактерии, с одной стороны, имеют некоторые более примитивные особенности, чем эубактерии, с другой – по некоторым физиологическим особенностям они даже более близки к эукариотической клетке, чем эубактерии.

В морфологическом отношении археобактерии слабо отличаются от эубактерий. Однако они имеют существенные отличия от них в строении тонких структур и физиологии. Так, археи имеют однослойную (а не двухслойную, как у других бактерий и эукариот) плазматическую мембрану. В составе макромолекул клеточной мембраны у них вместо пептидогликана мууреина, характерного для эубактерий, представлен сильно отличающийся от него псевдомуреин. В связи с этим археобактерии нечувствительны к пенициллину и другим антибиотикам, подавляющим синтез пептидогликана. Мембранные липиды образованы не глицерином и жирными кислотами, как у эубактерий, а глицерином и терпеноидными спиртами.

Генетический материал имеет ряд признаков, сближающих их археобактерий с эукариотами, и в то же время отличающих от тех и других. Геном представлен двухцепочной кольцевой ДНК, длиной от 500 000 до 4 000 000 пар нуклеотидов, и кольцевых плазмид. В генетическом материале имеются, как у эукариот, интроны (участки ДНК, относящиеся к генам, но не кодирующие последовательность аминокислот в белках). Рибосомы археобактерий по размерам сходны с рибосомами эубактерий, а по форме – с рибосомами эукариот. При этом они сильно отличаются от тех и других по важнейшему показателю – константе седиментации – S (скорости оседания в центрифуге): этот показатель рибосом эукариот равняется 80S, эукариот – 70S, археобактерий – 16S. Ряд рибосомальных белков археобактерий уникален. ДНК-зависимая РНК-полимераза состоит из 9–12 субъединиц, а не из 4–8, как у эубактерий.

Археобактерии, в отличие от эубактерий и эукариотических клеток, не способны синтезировать сложные гидролитические ферменты. Поэтому большинство из них усваивают лишь самые простые, низкомолекулярные органические соединения.

Но при этом они способны существовать в более широком диапазоне условий окружающей среды. В целом, археобактерии распространены в природе очень широко. При этом они часто занимают такие экологические ниши, которые другим организмам недоступны. В частности, ряд видов археобактерий (археи-термофилы, т.е. теплолюбивые) живет в горячих источниках при температурах от +45 до +113 °С! Клетки всех других организмов такие температуры не выдерживают: белки денатурируются и разрушаются, нуклеиновые кислоты распадаются и т.д. Археи-психрофилы (холодолюбивые) способны к размножению при довольно низких температурах – от –10 до +15 °С. Археи-ацидофилы живут в кислотных средах (при pH = 1–5).

Археи-алкалофилы встречаются в щелочных средах (при pH = 9–11). Археи-барофилы выдерживают давление до 700 атмосфер. Археи-галофилы живут в соляных растворах при концентрациях NaCl (поваренной соли) 25–30 %. Археи-ксерофилы выживают при относительной влажности среды близкой к нулю.

Среди археобактерии известны метанобразующие бактерии. Им свойствен энергетический процесс, в результате которого образуется метан. Эти археобактерии восстанавливают углекислый газ до метана молекулярным водородом. Весь метан биогенного происхождения на Земле производит только эта группа прокариот (ежегодно $5\text{--}10 \times 10^8$ т). Метанобразующие археобактерии существуют в строго анаэробных условиях: в затопляемых почвах, болотах, или водоемов, очистных сооружениях, рубце жвачных животных. Большинство запасов природного газа в далеком прошлом образовано благодаря деятельности этих бактерий.

Обитание археобактерий в экстремальных условиях, именно в тех, которые должны были быть на Земле вскоре после ее остывания, дает возможность многим ученым рассматривать эубактерии как возможные первые организмы на Земле.

На вопрос о том, когда появились первые организмы, разумеется, одноклеточные, отвечают их обнаруженные окаменевшие (фоссилизированные) остатки. В отложениях черных сланцев в Западной Австралии такие остатки обнаружены возрастом 3,5 млрд лет. Обнаруженные окаменелости в виде микроскопических шариков и волоконцев принадлежат прокариотам. Американский палеобиолог Уильям Шопф, открывший эти самые древние окаменевшие остатки организмов в земных породах (здесь не учитываются окаменевшие остатки клеток в углистых метеоритах возрастом 4,5–4,56 млрд лет), насчитал 11 видов окаменелостей, относящихся к прокариотам. Из них шесть, по мнению ученого, – синезеленые водоросли. Обнаружение столь древних цианобактерий означает, что, по крайней мере, 3,5 млрд лет назад существовали организмы, которые потребляли углекислый газ и производили кислород, умели избегать вредного воздействия солнечной радиации. Следовательно, в то время уже начала складываться биосфера.

Находка древнейших цианобактерий отодвигает начало жизни на период, стертый из геологической истории навсегда. Чем старше породы, тем дольше они пребывали под давлением, температурой, выветривались. Пока невозможно назвать интервал времени, когда живых организмов еще не было. Этапы эволюции живого пока не удастся проследить ранее 3,5–3,8 млрд лет назад. По-видимому, не удастся когда-либо найти самое начало формирования биосферы на Земле.

На вопрос о том, какими были первые одноклеточные прокариотные организмы, гетеротрофными или автотрофными, в настоящее время получен ответ, подкрепленный фактическими доказательствами.

Как было уже отмечено выше, если придерживаться гипотезы А. И. Опарина, утверждающей возникновение жизни на Земле химическим абиогенным путем с начальной стадией в виде коацерватных капель, то первыми и единственными в течение длительного времени должны были появиться гетеротрофные прокариоты. Однако они, размножаясь в геологической прогрессии, в течение очень короткого времени, буквально за несколько поколений, утилизировали бы всю органическую продукцию первичного океана и отравили бы своими метаболитами сферу своей же жизни. Если предположить, что первыми появились автотрофы (в частности, фототрофы), выделяющие в качестве своих метаболитов кислород (что и высказывалось еще до гипотезы Опарина – Холдейна), то за очень короткое время был бы связан весь атмосферный углерод, а выделявшимся кислородом первые организмы отравили бы ту атмосферу, в которой они и возникли. Результат тот же – самоуничтожение. И только великий русский геохимик и мыслитель, создатель учения о биосфере, В. И. Вернадский еще в 20-е годы высказал непонятую его современниками мысль о том, что биосфера на Земле складывалась сразу на экосистемном уровне – с автотрофами и гетеротрофами, продуцентами, консументами и редуцентами.

Большую роль в понимании начальных этапов возникновения биосферы сыграло изучение строматолитов и образующих их цианобактериальных матов. Строматолиты представляют собой известковые бугорки, покрывающие обширные участки. В 70-е гг. на западном побережье Австралии были обнаружены живые строматолиты. Их образовывали цианобактериальные маты. Мат представляет собой плоский многослойный ковер толщиной примерно 2 см. Его основу составляют нитчатые цианобактерии и гетеротрофные бактерии. Слои:

1) плотный верхний – поверхность роста (1–1,5 мм). В нем автотрофы, продуцирующие кислород – фотосинтетики; гетеротрофы – облигатные аэробы;

2) подкладка (менее 1 мм). В ней живут автотрофы, осуществляющие бескислородный фотосинтез. Там же живут гетеротрофы – факультативные аэробы;

3) бескислородная зона (более 1 см). В ней живут только анаэробы. На поверхность дна и матов оседают частицы, они затемняют участки верхней фотической зоны, ухудшают условия фотосинтеза. Однако микроорганизмы обладают положительным фототаксисом. По мере затемнения они продвигаются вверх, а частицы карбоната кальция опускаются глубже, образуя строматолит.

Установлена абсолютная идентичность современных строматолитов и тех, возраст которых определен не менее чем в 3,5–3,7 млрд лет. Такие экосистемы прокариот формировались не только как донные организмы, но и как планктонные. Обнаружены и изучены онколиты – сферические мелкие

образования, которые имеют слоистую структуру, как и донные строматолиты поэтому считается, что существовали и плавающие цианобактериальные маты, внутри которых образовывалась осадочная порода. Плавуность придавали газы, выделяющиеся в процессе метаболизма.

Таким образом, первые экосистемы с первыми организмами уже обладали сложной трофической структурой. В их составе были продуценты, консументы и редуценты. До начала палеозоя большая часть жизни была в виде прокариотных сообществ. Правда, в конце протерозоя появились прокариотные организмы, но преобладала прокариотная жизнь. Многоклеточности прокариоты не достигли, хотя попытки были. Приблизительно 1,5 млрд лет назад появились первые эукариоты.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПРОКАРИОТИЧЕСКИХ ЭКОСИСТЕМ

Судя по функционированию цианобактериальных матов и онколитов, прокариотическая жизнь возникла сразу в виде экосистем. При этом эти экосистемы характеризуются замкнутостью или частичной замкнутостью геохимических циклов. Концентрация матов была неравномерной по акватории и поверхности суши. Очевидно, в отдельных участках происходило насыщение атмосферы кислородом. Считают, что в этих участках, где не было нулевого баланса, происходило захоранивание органических остатков (как в современных болотах) и, таким образом, образование избытка кислорода, которым и обогащалась атмосфера.

Считается, что 3–2,5 млрд лет назад существовали обширные заболоченные территории, где происходило накопление и перераспределение кислорода. Он накапливался до содержания его в объеме 1 % от нынешнего в течение 2,5 млрд лет (до 1 млрд лет до настоящего времени). Поверхность Земли в архее была представлена чередующимися участками водоемов и с очень незначительным уровнем над водой легко размываемого грунта с отдельными скалами. Считают, что цианобактериальные маты существовали не только в воде, но и на суше. Таким образом, вся планета была покрыта прокариотическими системами. Вообще, прокариотический мир включает 6/7 всего времени существования жизни.

По мере накопления в воде и в атмосфере кислорода появилась возможность формирования все более и более сложных и крупных организмов, самыми простыми из которых являлись эукариотические одноклеточные. Произошло это около 1,9–2 млрд лет назад. Насыщение всей толщи воды кислородом происходило в результате отрицательного парникового эффекта в атмосфере и первых оледенений. Накопление кислорода в атмосфере усилило теплоотдачу. Произошло охлаждение и атмосферы, и гидросферы. Вода замерзала, образовывались ледники, лед плавал на поверхности, а по-

верхностные слои воды, насыщаясь кислородом, как наиболее плотные, опускались вниз, осуществляя транспорт кислорода на большие глубины. Таким образом, большая толща воды все больше насыщалась кислородом. При этом ухудшались условия существования прокариот, и одновременно с вымиранием прокариотных экосистем их место занимали более сложные организмы, и их формирование происходило, очевидно, по тому же экологическому принципу.

ПОЯВЛЕНИЕ ЭУКАРИОТНЫХ ОРГАНИЗМОВ. ОСНОВНЫЕ ГИПОТЕЗЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЭУКАРИОТ

Одной из основных проблем филогенетики животных и эволюционной теории является проблема возникновения эукариотической клетки. Первичные эукариоты – это предки современных одноклеточных, или простейших (Protozoa).

Несомненным является тот факт, что первичные эукариоты произошли от прокариот. На происхождение простейших от прокариот указывает целая группа важнейших общих структурных и функциональных признаков на молекулярном уровне: 1) наличие липопротеиновых мембран; 2) белков-ферменты; 3) генов; 4) генетическая регуляция внутриклеточных процессов; 5) синтез белков, регулируемый информацией, закодированной в ДНК; 6) функционирование АТФ как главного донора энергии; 7) ряд метаболических процессов, например гликолиз, клеточное дыхание. Этот комплекс общих признаков (во многом взаимосвязанных между собой) прокариот и эукариот не мог возникнуть в двух обширных группах живых организмов независимо друг от друга. Таким образом, прокариот и простейших (наиболее примитивных эукариот) можно рассматривать как два уровня одноклеточной организации, филогенетически связанных между собой.

В отношении же конкретной группы (или групп) прокариот, от которых взяли начало одноклеточные эукариоты, существуют две основные гипотезы, кардинально различающиеся между собой.

Сукцессивная гипотеза

Сукцессивная гипотеза, или гипотеза **прямой филиации**. Точнее говоря, это целая группа гипотез, объединяемых одной идеей, суть которой заключается в том, что первичные эукариоты произошли от какой-то одной группы древних прокариот. Этими предками эукариот и, соответственно, первичными эукариотами были либо автотрофы, либо гетеротрофы.

Наиболее старой по времени возникновения является гипотеза, высказанная Пашером в 1914 г. Он считал, что первичными одноклеточными организмами были автотрофные простейшие. По его мнению, они должны

были питаться веществами окружающей неорганической среды. Среди современных простейших автотрофный тип обмена веществ и растительный способ питания встречается только у жгутиконосцев. Поэтому в соответствии с этой гипотезой первичными настоящими одноклеточными были именно они. Однако как объяснить появление у самых примитивных одноклеточных таких сложных органоидов, какими являются хроматофоры (пластиды одноклеточных), данная гипотеза не может.

В свете гипотезы академика А. И. Опарина жизнь возникла в первичном океане из коацерватных капель на основе использования ими в своем первичном метаболизме уже готовых органических веществ. В соответствии с этой точкой зрения, первичными эукариотами были гетеротрофы. Первыми на Земле эукариотами должны были быть организмы, сходные с бактериями, но более сложными. Помимо единства основных физиологических и биохимических процессов, многие одноклеточные эукариоты имеют жгутики, по форме сходные со жгутиками гетеротрофных бактерий. Однако гипотеза наталкивается на ряд очень серьезных трудностей, к числу которых относится, например, совершенно различное строение жгутиков у прокариот (бактерий) и настоящих одноклеточных жгутиконосцев. Резко различается строение цитоплазматической мембраны клеток прокариот и эукариот. Имеются и другие кардинальные различия между прокариотами и эукариотами. Кроме того, очень трудно логично объяснить, каким образом генетические механизмы биосинтеза белка, функционирующие в ядре эукариотической клетки, осуществляются и в митохондриях.

Основываясь на успешивной гипотезе эукариот, невозможно объяснить различия в особенностях химизма и коэффициента седиментации между рибосомами, находящимися в цитоплазме, и рибосомами, находящимися в митохондриях. Таким образом, непосредственное выведение одноклеточных из какой-либо одной группы прокариотических организмов, либо автотрофных, либо гетеротрофных, в настоящее время из-за отсутствия убедительных доказательств подвергается серьезной критике.

Эндосимбиотическая гипотеза

Впервые теория симбиогенеза была выдвинута русским ученым А. С. Фаминцыным в конце 60-х гг. XIX в. при изучении функционирования и возникновения лишайников. Позже К. С. Мережковский в начале XX в. на основе изучения хроматофоров растений предположил симбиотическое происхождение пластид. Эта гипотеза была развита профессором Воронежского государственного университета Б. М. Козо-Полянским (1924). В начале 80-х гг. большой вклад в развитие гипотезы эндосимбиогенеза в происхождении эукариотической клетки внесла американский ученый Линн Маргулис (Маргелис, 1983). В своей монографии на основе тща-

тельных многолетних исследований и обобщения огромного количества данных Л. Маргулис убедительно доказывает, что три основные клеточные органеллы – митохондрии, пластиды и базальные тельца жгутиков – были когда-то свободноживущими прокариотическими клетками. В настоящее время эндосимбиотическая гипотеза происхождения одноклеточных является наиболее доказательной, все шире принимаемой в научном мире.

В соответствии с этой гипотезой первичные эукариоты произошли в результате установления симбиотических взаимоотношений разных по типу обмена веществ древних прокариот – гетеротрофных и автотрофных, аэробных и анаэробных. Одни из гетеротрофных прокариот, очевидно, бактерии типа микоплазм (не имеющих развитой клеточной стенки, а ограниченных снаружи только плазматической мембраной), захватывали других прокариот, как автотрофных, так и гетеротрофных, но не переваривали их. Энергетически более выгодным оказывались мутуалистические взаимоотношения. При этом эндосимбионты выступали в качестве поставщиков органических веществ (автотрофы), энергии в виде макроэргических связей молекул АТФ (синтезируемых захваченными гетеротрофами) и локомоторных органоидов (жгутиков, ресничек), в которые целиком преобразовывались захваченные гетеротрофы типа спирохет.

Важнейшие доказательства гипотезы эндосимбиогенеза заключаются в следующем.

1. Наличие в эукариотической клетке ДНК-содержащих органоидов (митохондрий, пластид), хотя окруженное мембраной ядро, несомненно, из всех органоидов сформировалось первым в процессе эволюции.

2. Последовательность аминокислот в цитохромах (в частности, в цитохроме *c*, важнейших белках-переносчиках электронов, на мембранах митохондрий и пластид клеток эукариот очень сильно отличается от их последовательности в цитоплазме клеток эукариот и в большей степени соответствует их последовательности в клетках синезеленых водорослей и бактерий.

3. Химический состав липопротеинового комплекса внутренних мембран митохондрий и пластид имеет большее сходство с таковым мембран прокариот, чем эукариот.

4. В митохондриях и пластидах содержатся рибосомы прокариотного типа с характерной константой седиментации.

Время становления эукариотической клетки и ряда крупных таксономических групп, находящихся на одноклеточном уровне организации, а также низших многоклеточных животных, относится к протерозойской эре. Оно определяется, очевидно, не менее чем двумя миллиардами лет. В протерозойской эре возникли не только одноклеточные животные, или простейшие, но и такие древние группы, как губки, кишечнополостные и кольчатые черви. Не известные по ископаемым остаткам, но еще более прими-

тивные пластинчатые животные (Plasozoa), а также плоские и круглые черви, более примитивные, чем кольчатые черви, тоже, несомненно, возникли в протерозое.

Первыми в процессе эволюции появились, очевидно, предки современных представителей типа саркомастигофор, включающего саркодовых и жгутиконосцев. Представители этого типа, в частности саркодовые, обладают наиболее выраженными в целом плезиоморфными (древними) чертами. У многих из них непостоянная форма тела, отсутствует разделение на постоянные зоны эктоплазмы и эндоплазмы, оболочка тела более или менее плотная, придающая относительно постоянную форму тела, самый древний способ питания – фагоцитоз и т.д. При этом у части из них (жгутиконосцев) имеются более сложные органоиды передвижения – жгутики, у некоторых же имеет место сочетание псевдоподий и жгутиков, функционирующих как одновременно, так и в процессе смены жизненных стадий. У автотрофных жгутиконосцев в качестве органоидов питания функционируют хроматофоры (пластиды с различными по цвету пигментами). Это очень сложные структуры. Они могли возникнуть либо в процессе эволюции в самой этой группе эукариотов (в соответствии с сукцессионной гипотезой возникновения эукариотической клетки), либо как сильно видоизмененные прокариоты, вошедшие в состав клетки в процессе эндосимбиотического возникновения эукариотов (по соответствующей гипотезе). Вообще, ввиду сочетания среди жгутиконосцев различных типов обмена и способов питания, считается, что именно в этой группе проходит граница между животными и растительными организмами. Именно жгутиконосцы представляют собой узловую группу в процессе эволюции: они не только дали начало различным другим типам одноклеточных организмов, но и в лице своих колониальных представителей и целых групп колониальных жгутиконосцев (например, колониальных воротничковых жгутиконосцев) дали начало первым многоклеточным организмам.

Это произошло 1,9–2 млрд лет назад, когда содержание кислорода в атмосфере и поверхностных слоях гидросферы достигло 1 % от нынешнего содержания (первая точка Пастера), т.е. тогда, когда возможно было существование аэробных организмов в составе планктона. Хотя они и были симбионтами, в связи с достаточным количеством кислорода биохимические процессы их проходили по аэробному типу. Очевидно, в составе планктонных экосистем в отдельных участках моря среди эукариот преобладали автотрофы, в других участках – гетеротрофы, в третьих – между ними существовало равновесие. Очень большое значение в дальнейшем насыщении атмосферы кислородом сыграли водорослевые луга. В ископаемых системах обнаружены в больших количествах цепочки из одноклеточных эукариотических водорослей. Они покрывали огромные акватории. У них преобладал аэробный процесс фототрофности. С одной стороны, они накопи-

вали в этих участках кислород, с другой стороны – они, очевидно, дали начало первым многоклеточным водорослям, в частности красным. Скопления автотрофов и гетеротрофов обеспечили и появление первых многоклеточных организмов.

ПОЯВЛЕНИЕ МНОГОКЛЕТОЧНЫХ ОРГАНИЗМОВ. ОСНОВНЫЕ ТЕОРИИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МНОГОКЛЕТОЧНЫХ ЖИВОТНЫХ

Первые многоклеточные животные и растения появились на Земле, вероятно, 700–900 млн лет назад. У растений возникновение многоклеточного уровня организации, очевидно, произошло на основе дифференциации лентообразных колоний одноклеточных водорослей. Усложнение колоний с переходом в многоклеточное состояние происходило путем бокового срастания прикрепленных нитчатых форм или благодаря делению клеток колоний в двух взаимно перпендикулярных направлениях (в одной плоскости). У колоний, прикрепленных одним концом к субстрату, различные участки находились в разных условиях по отношению к падающему свету, субстрату и водной среде. В связи с этим естественный отбор благоприятствовал возникновению дифференциации частей колонии. Первым шагом было возникновение полярности колонии. При этом на одном ее конце выделялись клетки, служившие для прикрепления к субстрату (для них характерно ослабление фотосинтеза, потеря способности к делению), на другом же конце формировались верхушечные клетки, которые интенсивно делились и образовывали «точку роста» колонии. Естественный отбор благоприятствовал приобретению клетками колонии способности делиться в разных направлениях, что приводило к ветвлению и увеличению поверхности колонии. Деление клеток вдоль трех взаимно перпендикулярных осей или переплетение отдельных нитей вело к возникновению многослойного «объемного» тела. В процессе его дальнейшей дифференциации сформировались многоклеточные органы, выполнявшие разные функции – фиксацию на субстрате, фотосинтез, размножение. Одновременно между разными клетками растения складывалась определенная взаимозависимость, что и указывает на достижение многоклеточного уровня организации.

У животных активный образ жизни требовал более совершенной и сложной дифференциации организма, чем у растений. Сложность организации многоклеточных животных (Metazoa) и разнообразие ее конкретных форм послужили основой для разработки различных гипотез о происхождении Metazoa.

Для выяснения происхождения той или иной группы живых организмов существуют три группы доказательств: палеонтологические, эмбриологические и сравнительно-анатомические. Наиболее доказательные из них –

палеонтологические: на основе сравнения особенностей строения современных животных или растений и ископаемых, особенно в последовательном эволюционном ряду, можно восстановить всю или почти всю исследуемую эволюционную линию (как, например, лошадей). Однако палеонтологический метод применим только по отношению к организмам с твердыми тканями или их производными. Например, хорошо сохраняются раковины моллюсков и плеченогих, окаменелости костных тканей позвоночных животных и проч. У первых же многоклеточных, как и у других неспециализированных животных, таких жестких элементов скелета или раковин не было. В связи с этим гипотезы и теории происхождения первичных многоклеточных животных основаны на доказательствах сравнительно-эмбриологического и сравнительно-анатомического характера.

Наиболее доказательные и выдержавшие проверку временем теории происхождения многоклеточных основываются на филогенетической связи наиболее примитивных многоклеточных и колониальных одноклеточных.

Первая научная гипотеза происхождения в процессе эволюции многоклеточных животных от колониальных одноклеточных принадлежит немецкому ученому Э. Геккелю, опубликовавшему ее в 1874 г. В своих эволюционных построениях он основывался на сформулированном им же биогенетическом законе (закон Геккеля – Мюллера), который гласит, что в онтогенезе проявляются основные этапы филогенеза.

Зародыш многоклеточного животного в процессе развития последовательно проходит стадии морулы (начальная, бесполостная, стадия дробления зиготы), бластулы (однослойный зародыш с первичной полостью внутри), гастрюлы (двухслойный зародыш с гастральной полостью под двумя слоями клеток). Геккель считал, что эти стадии отражают последовательные этапы эволюции от колониальных одноклеточных до первичных многоклеточных. В частности, эволюционную стадию колониальных одноклеточных, давших начало многоклеточным, он назвал Бластеей (в именительном падеже – Бластeya). Это были колонии, напоминающие современного колониального жгутиконосца вольвокса. Гипотетический же непосредственный предок всех многоклеточных, по Геккелю, Гастрeya, которая по строению соответствует гастрюле многоклеточных, т.е. двухслойному зародышу. По мнению Геккеля, Гастрeya в процессе эволюции образовалась путем впячивания, или инвагинации, однослойной стенки Бластеи внутрь. Правда, инвагинация как способ гастрюляции присущ не самым примитивным многоклеточным, а хордовым животным, начиная в филогенетическом ряду с ланцетника. Кроме того, остается непонятным физиологический смысл образования двухслойного организма в процессе эволюции, т.к. механизмов захвата крупной добычи образовавшимся гастропором (первичным ртом) и полостного переваривания пищи у примитивных первичных многоклеточных еще не было.

Современник Э. Геккеля русский ученый И. И. Мечников несколько позже, в 1882 г., основываясь на том же биогенетическом законе, изложил другую гипотезу происхождения многоклеточных, которая имела много общего с гипотезой Э. Геккеля, но в то же время и принципиальные отличия. Он также считал, что первичные многоклеточные произошли от колониальных жгутиконосцев. Но эволюционный переход от одноклеточного состояния к многоклеточному происходил не путем инвагинации однослойной стенки Бластем, а путем более примитивного способа гастрюляции – иммиграции. Этот способ гастрюляции известен у губок – одних из самых примитивных современных многоклеточных. Кроме того, Мечниковым было открыто и изучено явление фагоцитоза – первичного процесса внутриклеточного переваривания микроскопических частичек пищи. На основе сочетания этих двух процессов, иммиграции и фагоцитоза, по Мечникову, и происходил эволюционный переход от одноклеточности к многоклеточности.

Колониальные шаровидные колонии жгутиконосцев в процессе борьбы за существование и естественного отбора приобретали дифференцировку составляющих их клеток. При этом некоторые жгутиковые клетки, находящиеся на поверхности, захватывали мельчайшие частички пищи. Такая нагруженная пищей клетка утрачивала жгутик и, погружаясь в полость колонии, осуществляла переваривание пищи путем фагоцитоза, находясь под защитой наружного жгутикового слоя. Таким образом, происходила вначале временная, а затем постоянная дифференцировка клеток колонии на клетки, осуществляющие передвижение всей колонии, и клетки, осуществляющие переваривание путем фагоцитоза микроскопической пищи и распределение энергетических материалов между всеми клетками колонии. В процессе длительной эволюции сформировались первичные многоклеточные организмы с примитивной еще дифференцировкой клеток по строению и выполняемым функциям, не имеющие еще рта и переваривавшие пищу только путем фагоцитоза. К подобным современным примитивным многоклеточным, хотя уже и со специализированными некоторыми типами клеток, относятся губки. Гипотетическим (предполагаемым) предкам всех многоклеточных животных Мечников дал обобщенное название Фагоцителла (по названию процесса фагоцитоза, лежащего в основе дифференцировки клеток шаровидной колонии). Гипотеза Фагоцителлы Мечникова имела серьезные преимущества по сравнению с гипотезой Гастреи. Во-первых, она отражает филогенетическую связь именно низших многоклеточных с колониальными одноклеточными, т.к. иммиграция как способ гастрюляции характерен для губок как низших многоклеточных. Во-вторых, становится понятен физиологический смысл усложнения организации колониальных простейших, в процессе которого был достигнут уровень первичных многоклеточных: прогрессивная дифференцировка клеток с их специализацией и формированием на этой основе двух клеточных слоев. Жгутиковые клетки

наружного слоя, кинобласта, осуществляли передвижение всей колонии, а безжгутиковые клетки внутреннего слоя, фагоцитобласта, переваривали путем фагоцитоза микроскопическую пищу. И только значительно позже в процессе эволюции появились более сложные организмы с ротовым отверстием и первичной кишкой.

Гипотеза И. И. Мечникова благодаря своей доказательности получила поддержку большинства ученых, занимающихся вопросами эволюции низших многоклеточных, и дальнейшее развитие в их трудах. Огромный вклад в развитие гипотезы происхождения всех многоклеточных от фагоцителлообразных предков внес отечественный ученый А. В. Иванов. Он привел убедительные фактические доказательства правильности гипотезы Фагоцителлы Мечникова и довел ее до уровня строгой и стройной теории в своей книге «Происхождение многоклеточных животных» (Иванов, 1968). Помимо изложения в развернутом виде теории Фагоцителлы, выводящей первичных многоклеточных из колониальных одноклеточных, А. В. Иванов в своей книге дал подробный анализ в историческом аспекте многих гипотез. В частности, он показал несостоятельность гипотезы, развивавшейся известным югославским ученым Хаджи, который выводил многоклеточных из одиночных высокоспециализированных одноклеточных, таких как инфузории.

А. В. Иванов показал, что существует фундаментальное морфологическое и физиологическое единство колониальных воротничковых жгутиконосцев и воротничковых жгутиковых клеток низших многоклеточных – губок. Именно древние колониальные гетеротрофные, воротничковые жгутиконосцы дали начало первым многоклеточным, тело которых еще не имело настоящих тканей и органов, в том числе пищеварительной системы, но имелось уже первичная дифференцировка клеток, выполнявших различные функции – локомоторную и пищеварительную. Одной из современных групп, очень примитивных, но в то же время специализированных сидячих фильтрующих многоклеточных организмов, произошедших непосредственно от фагоцителлообразных первичных многоклеточных, и являются губки. Гипотетический обобщенный первичный многоклеточный, не имевший еще рта и давший начало в процессе эволюции губкам, А. В. Иванов назвал ранней Фагоцителлой (Фагоцителлой I).

Сами фагоцителлообразные предки многоклеточных эволюционировали и совершенствовались. У более высокоорганизованных из них появились ротовое отверстие и первичная кишка, обеспечивающие организм питанием более крупными частицами пищи. Такой гипотетический первичный многоклеточный организм, имеющий ротовое отверстие и первичную кишку, А. В. Иванов назвал поздней фагоцителлой (фагоцителлой II). Эти фагоцителлообразные предки в процессе эволюции дали начало основному стволу всего эволюционного дерева современных животных (кроме губок).

В последние десятилетия теория Фагоцителлы Мечникова получила фактические доказательства в связи с тем, что было установлено существование в современной морской фауне живой действующей модели ранней Фагоцителлы в лице двух представителей особого типа пластинчатых животных, или плакозоев (Placozoa). Два вида рода трихоплакс (Trichoplax) имеют строение трехслойной пластинки. Верхний и нижний слои клеток трихоплакса образованы плотно расположенными клетками со жгутиками. Внутреннее пространство между верхним и нижним слоями заполнено массой клеток разнообразного строения и формы (амебоидные клетки). Медленно ползая по поверхности водорослей, трихоплакс отдельными клетками своего нижнего слоя захватывает микроскопические частички пищи. Такие нагруженные частичками пищи клетки утрачивают жгутик и, погружаясь во внутреннюю паренхиматозную массу клеток, переваривают пищу путем фагоцитоза. Кроме того, в отдельных участках наружного эпителиального слоя, в которых концентрируется микроскопическая пища, клетками выделяются пищеварительные ферменты, выполняющие функцию наружного переваривания, а продукты пищеварения всасываются. Таким образом, строение пластинчатых животных, не имеющих каких-либо оформленных тканей и высокоспециализированных клеток, захват микроскопических частичек пищи отдельными клетками и переваривание их путем фагоцитоза соответствуют принципиальным чертам того прототипа всех многоклеточных животных, который описан Мечниковым как Фагоцителла.

В настоящее время учеными расширено толкование фагоцителлы. Очевидно, это была довольно обширная и разнообразная группа первичных фагоцителлообразных предков многоклеточных. Предполагается, что существовало три основных типа Фагоцителл, различающихся способом питания:

- Фагоцителла 1 – концентраторы, сгущающие микроскопическую пищу в точке ее захвата;
- Фагоцителла 2 – седиментаторы, осаждающие микроскопическую пищу в замкнутую внутреннюю полость тела;
- Фагоцителла 3 – фильтраторы, прогоняющие через сквозную полость тела воду вместе с пищевыми частицами и задерживающие их на фильтрах жгутиковых клеток.

Фагоцителлы первого типа (концентраторы) могли дать начало непосредственно пластинчатым животным как сохранившим наиболее близкий план строения к таковому первичных многоклеточных. У двух современных видов этого типа полностью сохранилось питание на основе фагоцитоза. Вполне возможно, что в процессе эволюции предки современных плакозоев могли дать начало еще и ресничным червям (бескишечным турбелляриям) как наименее специализированным плоским червям. От плоских же червей могли взять начало круглые, а от предковых форм круглых (червеобразных животных со сквозной кишкой) – кольчатые черви. Это направление эво-

люции, взявшее начало от фагоцителл-концентраторов, очевидно, является магистральным.

Фагоцителлы второго типа (седиментаторы) могли дать начало примитивным двухслойным животным с первичной пищеварительной полостью, в которой осаждались первоначально мельчайшие частички пищи. Такими эволюционными производными фагоцителл-седиментаторов являются кишечнополостные. По-видимому, это направление эволюции – тупиковое. Но не исключается также, что от этого типа предковых форм могли произойти многоветвистокишечные турбеллярии; бескишечные турбеллярии в этом случае должны рассматриваться как утратившие кишечник вторично.

Фагоцителлы третьего типа (фильтраторы, с механизмом фильтрации на клеточном уровне), несомненно, дали начало губкам. Можно провести практически прямую филогенетическую линию от колониальных воротничковых жгутиконосцев к губкам, имеющим единый план строения основного типа клеток – воротничковых жгутиковых. Эта линия эволюции – тупиковая, она привела только к высоко специализированным современным губкам, имеющим своеобразный характер эмбриогенеза, сильно отличающийся от эмбриогенеза всех остальных животных и сопровождающийся изменением первоначального.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МНОГОКЛЕТОЧНОСТИ

В качестве экологических причин возникновения многоклеточных организмов выдвигаются следующие.

1. В настоящее время считается, что многоклеточность возникла на основе необходимости в этом для дальнейшей эволюции экосистемы и всей биосферы. Даже в отсутствие хищников существовала необходимость в увеличении размеров тела организмов в составе экосистем.

Все организмы, в том числе одноклеточные эукариоты, нуждаются в поступлении через мембрану биогенов, растворимых газов. Все это происходит путем диффузии через мембрану. При этом из-за своих малых размеров организмы не могут выделиться, индивидуализироваться из окружающей среды. Во-первых, будучи очень мелкими, они, по существу, находятся в одном месте, неподвижно. Следовательно, находясь в составе планктона и имея очень эффективное соотношение поверхности и объема тела, они «выедают» все вокруг себя и, оставаясь неподвижными, не могут обеспечить себе достаточного поступления питательных веществ.

Во-вторых, будучи эффективными организмами, они много потребляют и много выделяют, и объемы среды вокруг них насыщаются метаболитами, а водоемы, соответственно, эвтрофицируются (т.е. насыщаются органикой).

Из сложившейся ситуации есть два эволюционных выхода, и оба направлены на то, чтобы создавать потоки воды вокруг себя (Еськов, 2004).

Первый выход состоит в том, чтобы, оставаясь неподвижными или почти неподвижными, заселять проточные водоемы или мелководья, где находится приливная зона. По этому пути пошла часть первичных организмов, в том числе и цианобактериальные маты.

Второй выход заключается в увеличении размеров тела. При этом снижается коэффициент отношения объема тела к площади его поверхности и возникает возможность развития каких-либо органоидов или органов, осуществляющих передвижение (реснички, жгутики, плавники, сократительная мускулатура и т.п.). То есть активизация передвижения вела к оптимизации отношений с внешней средой.

2. Взаимоотношения хищник-жертва.

На основании ископаемых и современных материалов установлено, что существуют определенные размерные соотношения хищников и их жертв. Суть в том, что хищник использует в качестве питания жертву, соответствующую его размерам. То же самое наблюдается и на микроуровне, среди беспозвоночных. Инфузории питаются простейшими чуть более мелких размеров, коловратки питаются инфузориями и т.д. Во многом размеры жертвы стимулируют увеличение (или уменьшение) размеров хищника.

К концу протерозоя, около 1 млрд лет назад, в планктоне появилось очень большое количество беспозвоночных с различными выростами тела. Эти выросты не только улучшали плавучесть организма, но и увеличивали размеры тела. Судя по большому количеству пеллетов – твердых метаболитов, оседающих на дно, в это время в составе планктона были хищные одноклеточные эукариоты, а возможно, и первые многоклеточные. Кардинальным решением проблемы сохранения популяции явилось для множества видов резкое увеличение размеров тела жертв. Ответной реакцией было увеличение размеров хищников. В пределах одноклеточных это соревнование имеет естественные ограничения (размер клетки). Поэтому считают, что выходом на многоклеточный уровень обеспечивалось сохранение популяций планктонных и бентосных организмов (Еськов, 2004).

3. Активация метаболизма требует увеличения количества кислорода для окисления. Количество кислорода в атмосфере и в водоемах становится все больше к концу протерозоя. Причина – ледниковые периоды, при которых происходило насыщение атмосферы кислородом. Следовательно, существовали возможности для все большего увеличения размеров тела.

Все эти экологические обстоятельства и дали возможность интеграции клеток и формирования первых многоклеточных.

БИОСФЕРА В КРИПТОЗОЕ

Всю историю биосферы Земли с момента ее возникновения до наших дней делят на два неравных отрезка: криптозой (время скрытой жизни) и

фанерозой (время явной жизни). Продолжительность криптозооя – около 3,5–4 млрд лет. Фанерозой начался примерно 570 млн лет назад.

Границу между криптозоом и фанерозом проводят по началу кембрия, самого древнего периода палеозойской эры. Поэтому криптозой называют еще докембрием. Основные этапы развития жизни в докембрии представлены на рис. 10.

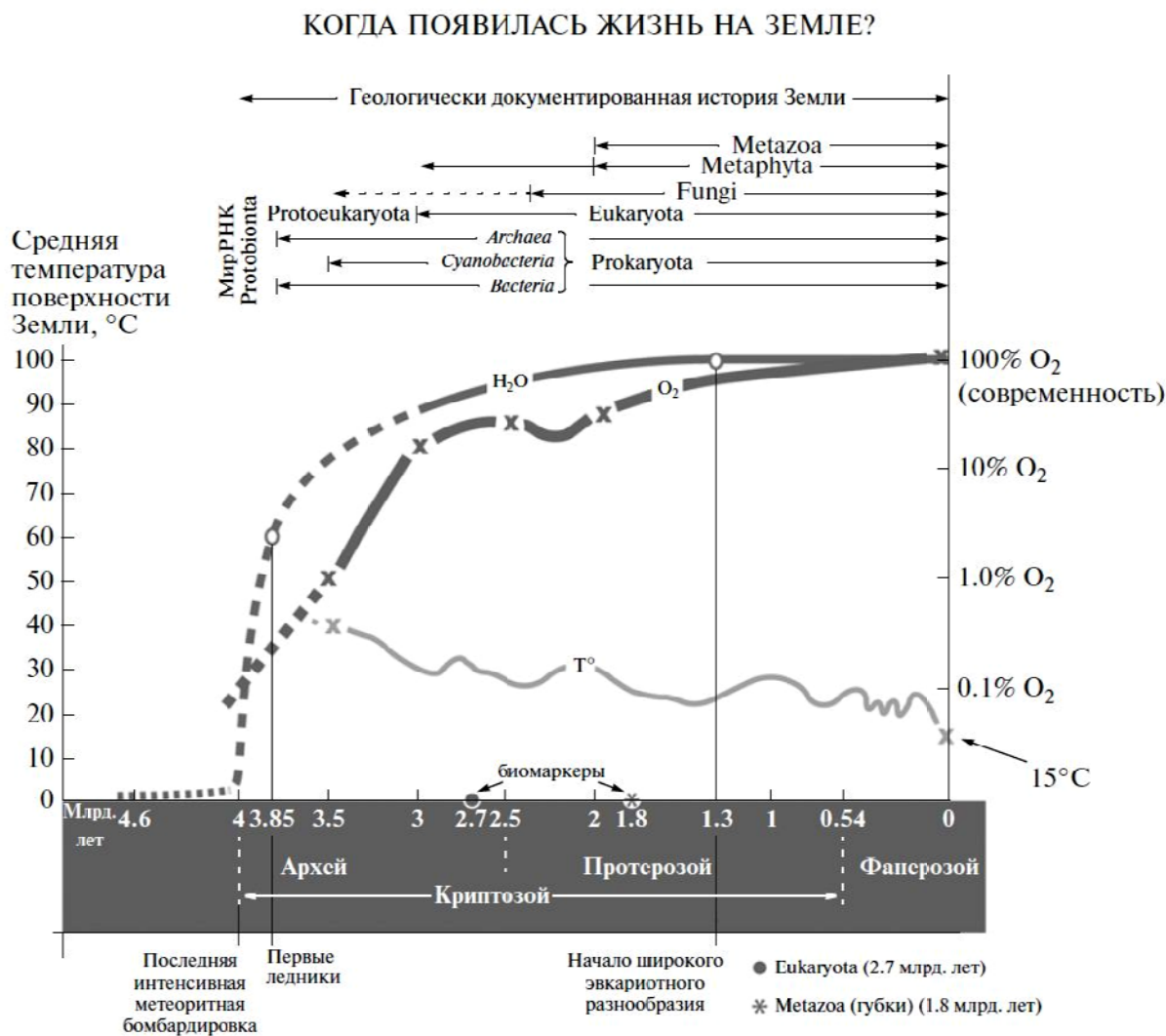


Рис. 10. Схема геобиологических событий в докембрии (А. Ю. Розанов, 2010)

В течение криптозооя жизнь на Земле прошла длительный путь эволюции, но оставалась сосредоточенной преимущественно в пределах теплых морских мелководий. Основной отличительной особенностью криптозойской фауны является то, что она была образована, в основном, бесскелетными организмами. Только в самом конце докембрия появились первые, очень мелкие скелетные организмы, которые обнаруживаются по трубочкам длиной всего в несколько миллиметров.

Длина некоторых из бесскелетных животных докембрия достигала 1 м. Они, вероятно, состояли из желеобразного вещества подобно современным медузам. Многие из обнаруженных групп не имеют современных аналогов.

В 1908 г. в докембрийских отложениях Намибии (Южная Африка) немецкие геологи нашли отпечатки, показавшиеся им похожими на морские перья, листья папоротника, медузы или губки.

В начале 30-х гг. XX в. в местечке Эдиакара Южной Австралии австралийский исследователь Р. Сприг (Sprigg) нашел отпечатки бесскелетных многоклеточных организмов. В 1947 г. вышла его работа «Раннекембрийские медузы хребта Флиндерс Южной Австралии». К середине XX в. на этой территории уже была собрана богатая коллекция из несколько сотен отпечатков, которые интерпретировались как ископаемые остатки медуз, морских перьев и червей.

Австралийский палеонтолог М. Глесснер (Glaessner) первым предположил, что возраст «эдиакарской фауны» древнее кембрийского. Вслед за австралийскими похожие отпечатки мягкотелых организмов нашли в докембрийских отложениях Европы, Азии и Северной Америки. В 1952 г. академик АН СССР Б. С. Соколов установил существование венда – особого периода, предшествовавшего кембрийскому.

В настоящее время ученым ясно, что эти остатки древнейших многоклеточных совершенно не напоминают «привычные» нижнекембрийские окаменелости. Они представлены исключительно отпечатками мягких тел, без каких-либо следов раковин или панцирей. От мелких ископаемых начала кембрия их отличают размеры в десятки сантиметров и крайне своеобразное строение.

По мере накопления материала по древнейшим беспозвоночным укреплялось мнение, что вендские организмы представляли собой нечто совершенно особое. Для них трудно было подыскать место в существующей системе многоклеточных. Их пытались сравнивать даже с лишайниками и гигантскими многоядерными одноклеточными. На территории бывшего СССР местонахождения вендских окаменелостей известны на Украине, в Сибири, на Урале и в Архангельской области.

В 1977 г. М. А. Федонкин и Н. В. Бочкарева нашли отпечатки вендских организмов на Зимнем берегу Белого моря. С тех пор в юго-восточном Беломорье ежегодно работают российские и международные палеонтологические экспедиции. В Архангельской области выявлена самая представительная в мире ассоциация вендских организмов и описаны десятки новых видов.

Основная отличительная особенность вендских ископаемых в том, что они представлены только отпечатками. Вендские животные еще не имели минерализованных раковин или панцирей; их тела состояли только из мягких тканей, как у современных медуз или слизней, так что сохраняться в форме окаменелостей эти животные не могли.

Интересен сам факт сохранения отпечатков вендских животных, которые длительное время лежали на дне, не будучи съеденными трупоедами. Кроме того, их отпечатки не разрушались биотурбаторами (животными, зарывающимися в осадок на дне и разрушающими отпечатки). При этом на отпечатках не обнаруживаются повреждения и следы укусов хищных животных.

Ученые объясняют этот факт неповторимыми особенностями вендской среды: в вендской экосистеме практически отсутствовали биотурбаторы, макроскопические трупоеды и хищники, измельчавшие пищу. Отмершая органика подвергалась только микробному разложению.

В биосфере венда, как и вообще в криптозое, главенствовали микроорганизмы. Дно обширных мелководных морей и низменные участки суши покрывали ковры бактериальных матов. В отдельных частях акватории располагались леса лентовидных водорослей. Вода морей и океанов была мутной, т.к. ее некому было фильтровать; минеральные осадки и россыпи органического детрита накапливались на дне тонкими чередующимися слоями, т.к. их некому было перемешивать. Благодаря жизнедеятельности микробных и водорослевых сообществ в океане и пресных водоемах и процессам бескислородного захоранивания отмирающих клеток цианобактериальных матов на заболоченных территориях к позднему докембрию первичная атмосфера Земли обогатилась свободным кислородом. Появилась возможность возникновения и развития многоклеточных животных. Их первое широкое распространение связывают с лапландским оледенением (670–620 млн лет назад).

Это было великое оледенение. По оценкам ученых, льды в море в тот период заплывали даже в тропическую зону, а суша была покрыта почти сплошными ледниками. После окончания ледниковой эпохи возвращающиеся на мелководья сообщества микроорганизмов и водорослей уже включали многоклеточных животных. Среди этих мягкотелых существ встречались гиганты, достигавшие в длину полутора метров, и совсем маленькие, не более 2–3 мм. Одни плавали или парили в толще воды, другие жили на дне: прикреплялись к нему, свободно лежали или ползали.

Долгое время не было удовлетворительного ответа на вопрос, кем были вендские организмы – растениями, животными, грибами или принадлежали иному, не дожившему до наших дней царству? Большинство исследователей считает их многоклеточными животными, возможно, лишь из-за внешнего сходства отпечатков с некоторыми беспозвоночными. Благодаря находкам цепочек следов, заканчивающихся отпечатками оставивших их существ, окончательно доказано, что, по крайней мере, часть вендских организмов была настоящими многоклеточными животными (если передвигались, значит – животные). Хотя способ питания этих существ – посредством соскребывания верхней пленки субстрата всей брюшной поверхностью тела – необычен для крупных фанерозойских животных.

Вендские отпечатки практически не с чем сопоставить, в геологической летописи мягкие тела сохраняются очень редко. Тем не менее, палеонтологи делят вендских, так же как и современных многоклеточных животных, на две большие группы: радиально-симметричные (Radiata) и двусторонне-симметричные (Bilateria). Радиально-симметричные объекты обладают осью симметрии, проходящей через центр, так что тело переходит само в себя при повороте на некоторый угол. Сколько раз тело отобразится само на себя при повороте на 360 градусов, таков порядок оси симметрии. Двусторонне-симметричные объекты обладают плоскостью симметрии, относительно которой правая и левая половины тела зеркально симметричны. Особую группу вендских многоклеточных составляют перистые формы или петалонамы. Главную часть отпечатка петалонамы составляет «перо», состоящее из многочисленных мелких «перышек». Вниз от «пера» у многих петалонам отходил стебель с прикрепительным образованием грушевидной или дисковидной формы на конце. Кроме простого двулопастного «пера», бывают трех- и четырехлопастные. Конструкция петалонам очень сложная, в своей организации они сочетают признаки радиально-лучистых ископаемых.

Существует две школы, мнение которых о происхождении вендской фауны различается.

1. Ее сторонники считают, что вендские организмы – предки современных скелетных форм.

2. Альтернативное мнение – это так называемый «эдиакарский эксперимент»: попытка природы создать многоклеточные организмы по экосистемному принципу.

За последние 10–15 лет при доскональном изучении внутреннего строения вендских организмов установлено, что у них не было никаких систем органов!

Обнаружено, что внутри этих организмов находилось огромное количество симбионтов: автотрофных про- и эукариот. Была выдвинута гипотеза о том, что эти организмы не животные и не растения, а особого типа симбионты. Внешняя оболочка у них, местами вздутая, увеличивала площадь поверхности тела, а внутренняя полость была наполнена симбионтами.

Поскольку богатая вендская фауна, судя по неповрежденным отпечаткам, не имела в своем составе хищников, она была названа «эдиакарским садом» (по аналогии с райским садом, Эдемом). Правда, к концу протерозоя обнаружили и поврежденные организмы, и остатки таких структур, которые уже не относились к эдиакарским.

Эдиакарская фауна к началу палеозоя, то есть примерно 600 млн лет назад, довольно быстро вымирает, по-видимому, не оставив какого-либо эволюционного потомства. Только в начале палеозоя появляются первые скелетные организмы, которые имеют прямых потомков в современной фауне.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЭВОЛЮЦИИ БИОСФЕРЫ В ФАНЕРОЗОЕ

Фанерозой делят на эры: *палеозой* (время древней жизни), *мезозой* (время средней жизни) и *кайнозой* (время новой жизни).

Палеозой (начало около 570 млн лет назад). Палеозой делится на периоды. В *нижнем палеозое* выделяются *кембрий*, *ордовик*, *силур*; в *верхнем палеозое* – *девон*, *карбон*, *пермь*. В нижнем палеозое жизнь развивалась преимущественно в океане. В верхнем палеозое началось активное формирование растительного покрова и животного мира суши.

Возникнув в океане, организмы коренным образом трансформировали химические свойства его вод, газовый состав атмосферы. Изменилось соотношение ионов: бывшая кислой морская вода приобрела щелочную реакцию. Фотосинтез за счет деятельности водных автотрофов и не использованный при захоранивании в болотах отмирающих цианобактериальных кислород обогатили им воду и атмосферу. Образование биогенных известняков регулировало содержание углекислого газа в атмосфере. Содержание свободного кислорода в атмосфере и гидросфере стало достаточным для того, чтобы перейти организмам от использования энергии процессов ферментативного брожения и хемосинтеза к энергетически более эффективно (в 30–50 раз) окислению при дыхании. Именно это послужило причиной настоящего биологического взрыва в океане в начале палеозоя – кембрийском периоде.

Водная среда в нижнем палеозое (кембрии) являлась необходимым условием для жизни всех организмов. В нижнем палеозое растения были представлены низшими споровыми – водорослями: одноклеточными, входящими в состав фитопланктона, и многоклеточными зелеными, красными, позже бурыми водорослями, образующими подводные заросли на мелководьях. В океане в нижнем палеозое уже жили представители основных современных типов беспозвоночных животных. При этом в начале палеозоя произошел скачок в физиологии и морфологии большинства беспозвоночных: они приобрели твердые известковые или хитиновые покровы. Господствовавшими и самыми развитыми животными в кембрии были трилобиты, относящиеся к членистоногим.

Все растения и животные размножались путем рассеивания большого количества гамет в воду, где происходило их слияние.

В то же время жизнь на суше в нижнем палеозое, видимо, была представлена по-прежнему только в сырых местах цианобактериальными прокариотными матами, о чем свидетельствуют палеопочвы, содержащие органическое вещество. Их возраст около 2,4 млрд лет. Процессы разрушения обнаженной поверхности горных пород на материках и выноса терригенного осадочного материала в океан были очень интенсивными.

Ордовикский период палеозоя является переломным этапом в эволюции морских экосистем. Геологические события кардинально изменили условия жизни на Земле. Об этом свидетельствуют следы глобального потепления в среднем ордовике и материковые оледенения в позднем ордовике. В раннем и среднем ордовике произошло максимальное за всю фанерозойскую историю Земли распространение эпиконтинентальных морей, а в позднем ордовике – резкое их сокращение во время материкового оледенения. Расширение жизненного пространства в среднем ордовике можно рассматривать как благоприятный фактор для широкого расселения бентосных сообществ. Сокращение шельфовых морей в позднем ордовике, вероятно, было основной причиной резкого снижения таксономического разнообразия, которое контрастно проявилось в мелководных обстановках и в меньшей степени в более глубоководных частях шельфов.

В атмосфере Земли сформировался озоновый экран, защитивший живые организмы от жестких космических излучений и обеспечивший экспансию бентосных и пелагических форм жизни в морских экосистемах, а затем выход растений и животных на сушу.

В морских экосистемах произошло крупнейшее в фанерозое быстрое увеличение таксономического разнообразия гидробионтов. Новые экологические группы очень быстро (в масштабе геологического времени) осуществили глобальную колонизацию дна и водной толщи морей, что сопровождалось формированием многочленной трофической структуры экосистем. В ордовике впервые появились и начиная со среднего ордовика достигли максимального расцвета многие группы фильтраторных организмов с каркасным скелетом. Среди них выделяются своим разнообразием табуляты и ругозы – группы сидячих донных организмов, сходных по своей организации с современными губками, а также мшанки, криноидеи (особый класс иглокожих) и некоторые другие. На низшем трофическом уровне доминирующее положение заняли остракоды (ракушковые ракообразные). Многие из сидячих организмов вели колониальный образ жизни.

Расцвет колониальных организмов сопровождался дроблением экологического пространства и усложнением трофических цепей. До начала среднего ордовика в эпиконтинентальных морях доминировали строматолитовые постройки, которые свидетельствуют о важном значении в трофических цепях цианобактерий. Вероятно, со среднего ордовика главным компонентом первичной продукции становится фитопланктон. Формируется зоопелагиаль: появляются и расцветают специализированные планктонные и нектонные организмы (Петров, 2006).

В конце ордовика произошло резкое снижение таксономического разнообразия морских биот, которое, однако, не сопровождалось полным вымиранием каких-либо экологических гильдий в отличие от более поздних великих биотических кризисов (например, на границах перми и триаса, ме-

ла и палеогена). В раннем силуре позднеордовикское снижение таксономического разнообразия полностью компенсировалось быстрым восстановлением новых экологических гильдий и более сбалансированными соотношениями между старыми и новыми гильдиями.

Большое распространение получили древние кораллы. По дну ползали трилобиты. Одно из первых мест среди животного мира занимали головоногие моллюски, обитавшие в прямых или слабо изогнутых, украшенных красивым узором раковинах.

Характерными представителями иглокожих были морские лилии, значительного разнообразия достигли представители плеченогих, мшанок, брюхоногих и пластинчатожаберных моллюсков. Все эти таксономические группы, кроме морских лилий, представлены и в современной фауне, но, разумеется, другими семействами, родами и видами.

В силуре получили развитие бесчелюстные рыбообразные – наиболее примитивные хордовые, не считая бесчерепных (ланцетников). В современной фауне к бесчелюстным по строению ближе всего стоят бесчелюстные – миноги и миксины.

Эволюция растений привела к появлению высших споровых, обладающих приспособлениями к наземному образу жизни. Начинается выход организмов из морской среды на сушу. Из животных первыми обитателями почв стали беспозвоночные – черви и членистоногие.

С девонского периода начинается верхний палеозой – начало активного завоевания суши растениями и животными. В океане эволюция хордовых дала большое разнообразие рыб. По этому признаку девон называют эпохой рыб.

Эволюция рыб привела к появлению древнейших земноводных (амфибий). Большинство представителей этой группы позвоночных часть своей жизни проводит в воде, а часть на суше. Свою икру большинство амфибий откладывает в воду. Вылупляющиеся из нее личинки (например, головастики лягушек) являются исключительно водными организмами. Со временем они подвергаются метаморфозу, приобретают легкие и конечности, после чего способны выходить из воды и жить на суше.

Наземная флора девона принадлежала к единому фитогеографическому царству суши. В раннем и среднем девоне она была представлена однолетними водными или полуводными растениями, заселявшими мелководья морских бассейнов, а также периодически затопляемые плоские побережья. Развитие первых в истории Земли травянистых болот привело к образованию древнейших пластов угля. Начало формирования наземной растительности связано с высшими споровыми.

Во флоре позднего девона появляются первые многолетние древесные формы плауновидных, хвощевидных и папоротниковидных. С ними связано возникновение отсутствовавшего ранее лесного типа растительности. Это обстоятельство значительно ослабило эрозию суши и поступление осадоч-

ного материала в океан. Однако развитие растительного покрова еще было ограничено приморскими равнинами. Склоны гор продолжали интенсивно разрушаться.

Для высших споровых растений, рыб и земноводных животных по-прежнему необходимым условием размножения являлась водная среда. Это служило определенным препятствием для продвижения организмов в глубь суши.

В начале каменноугольного периода (карбона) палеозоя облик Земли определялся в Северном полушарии группой континентов, из которых основными были Еврамерийский (Европа и Северная Америка), Ангарский (Восточная Сибирь), Катазиатский (юго-восточная часть Китая и Индокитай). В южном полушарии располагался всего один гигантский континент – Гондвана.

В морях каменноугольного периода жизнь была богата и разнообразна. В огромном числе были представлены моллюски, членистоногие (ракосcorpions, мечехвосты и др.), рыбы. Появились древние акулы, которые активно охотились на других многочисленных рыб.

Влажный и теплый климат карбона благоприятствовал формированию пышных лесов высших споровых растений – плауновидных, хвощевидных, папоротниковидных. Появляются семенные папоротники и первые голосеменные – саговники, кордаиты. Высокая продуктивность растительности служила источником для образования мощных пластов каменного угля.

Развиваются первые по-настоящему сухопутные животные. К ним прежде всего относятся членистоногие – наземные ракообразные и настоящие завоеватели суши, господствующие в настоящее время насекомые. Появились и первые наземные позвоночные – пресмыкающиеся, или рептилии. В отличие от большинства амфибий эти животные не используют воду в процессе воспроизводства, а откладывают яйца в наземных условиях, которые здесь и развиваются. Таким образом, у рептилий появилась настоящая возможность осваивать сушу.

Пермский, самый поздний период палеозоя, отмечен резкими изменениями климата и рельефа. Активизировалась вулканическая деятельность, поднимались новые горы (герцинский горообразовательный цикл). В северном полушарии располагался единый суперконтинент – Лавразия. На нем господствовал пустынный климат. На южный же суперконтинент, Гондвану, надвигались ледники. Возможно, что причина похолодания климата крылась в том, что пышная растительность каменноугольного периода поглотила в процессе фотосинтеза большое количество CO_2 . При этом содержание O_2 постоянно увеличивалось. В такой атмосфере с пониженным содержанием углекислого газа и паров воды и в то же время с возрастающим содержанием кислорода не возникало парникового эффекта, в результате

чего Земля стала отдавать тепло все в большем количестве в космическое пространство.

В конце пермского периода происходит грандиозная экологическая катастрофа, в результате которой около 90 % видов организмов вымерло. В океане осталось менее 5 % видов животных. Причиной кризиса, по видимому, была мощная вулканическая деятельность, проявившаяся, в частности, в образовании восточносибирских траппов – местностей со склонами в виде уступов. Извержения вулканов сопровождалось выбросами в атмосферу диоксида серы и оксида азота, послуживших причиной интенсивных кислотных дождей. У большинства палеозойских организмов репродуктивный цикл происходил в водной среде с нейтральным уровнем pH. В водоемах с кислой средой гаметы и молодь организмов погибали (Петров, 2006).

К концу палеозоя северные континенты объединились с Гондваной, образовав единый суперматерик Пангея, окруженный суперокеаном Панталассом.

Мезозойская эра (мезозой) начался около 240 млн лет назад. Эта эра делится на периоды: *триас, юра, мел*. Суперматерик Пангея, включавший в себя почти всю сушу Земли, стал дробиться. Начался процесс формирования современных очертаний материков и океанов.

Возник океан Тетис, разделивший материки Лавразию и Гондвану. Изоляция материков явилась предпосылкой расхождения биот.

Появились Атлантический и Индийский океаны и новые обособленные материки: Североамериканский, Евразийский, Южноамериканский, Африканский. Австралия и Антарктида были еще едины, однако от них откололась Новая Зеландия.

Биогеографические особенности современных океанов объясняются их возрастом: более молодая и более бедная биота Атлантики и более богатая биота древнего Тихого океана.

В результате раскола Пангеи и образования новых океанов, соединенных проливами, циркуляция вод Мирового океана стала более свободной. Открылся доступ в высокие широты, куда поверхностные течения стали переносить тепло из тропиков. В это время вблизи полюсов температура поверхностных вод была около +15 °С; сезонность климата – слабовыраженная. В теплом океане происходило очень вялое конвекционное перемешивание. Основной причиной опускания поверхностных вод стало увеличение их солености (и плотности) в результате интенсивного испарения. Такой тип перемешивания слабо вентилировал глубины. Недостаток кислорода в воде привел к массовой гибели глубоководной фауны.

В триасе глобальный климат стал более ровным и теплым (безморозный климат). Наступает расцвет рептилий. Следует отметить появившуюся в позднем карбоне группу синапсидных рептилий. По мере эволюции ее представители становились все более сходными с млекопитающими. Наконец, в позднем триасе появляются самые ранние настоящие млекопитающие.

Отличительные признаки млекопитающих: теплокровность и наличие у самок желез, которые выделяют молоко для вскармливания детенышей. За редким исключением (однопроходные млекопитающие) они рожают живых детенышей, а не откладывают яйца.

Родственные связи примитивных групп млекопитающих друг с другом до сих пор остаются неясными. Однако можно предположить, что обособлению основных отрядов млекопитающих способствовала изоляция материков, образовавшихся в результате раскола Пангеи. Плацентарные возникли в Лавразии, а сумчатые и однопроходные – в Гондване.

Позднеюрская и раннемеловая биоты представляют собой единый этап развития. Они формировались в условиях влажного, безморозного, но сезонного климата. Юра и мел – время господства динозавров, которые освоили и сушу, и воду, и воздух. В юре появились первые птицы, один из наиболее известных представителей которых – археоптерикс. Теплокровность млекопитающих и птиц – важное приспособление, позволившее им начать заселение областей с холодным климатом.

В меловом периоде континенты начали принимать современные очертания, возникли такие гигантские планетарные системы, как Тихоокеанский вулканический пояс и система современных океанских хребтов, изменился состав атмосферы. Континенты были более плоскими, чем ныне, океан – мелким. Климат был ровным и теплым. Поскольку не было ледяных шапок, и количество воды оставалось примерно таким же, как и сейчас, обширные участки континентов были затоплены мелководными морями. Разность температур поверхности океана между полюсом и тропиками была в три раза меньше, чем теперь. В глубоких частях более теплого, чем ныне, океана царил бескислородная среда, где не могли жить высшие организмы.

В начале мелового периода восстанавливается разнообразие семейств морских животных после предыдущего великого вымирания на границе палеозоя и мезозоя. Развиваются богатые фауны кораллов и моллюсков, растет разнообразие рыб. Появление мелководных морей на затопленных частях континентов способствовало процветанию морской флоры и фауны. Даже крупнейшие динозавры были преимущественно обитателями мелководий.

Высокая продуктивность морского планктона (развитие фораменифер и микропланктона – жгутиконосцев кокколитофорид) способствовала накоплению сланцев, образованию месторождений нефти и газа. Мельчайшие известковые скелеты планктонных организмов образовали многометровые пласты писчего мела. Накопление этих слоев и само существование известнякового планктона были возможны лишь в очень теплой насыщенной углекислотой воде; при понижении температуры карбонат кальция растворяется с образованием гидрокарбоната (Петров, 2006).

Во второй половине мелового периода начинается новый глобальный экологический кризис. Происходит морская регрессия (отступление моря и

осушение материков) и похолодание с минимумом температур на границе с кайнозойской эрой. Причинами похолодания могли служить изменение системы морских течений, уменьшение количества углекислоты в атмосфере и как следствие – ослабление парникового эффекта.

Падение температуры в конце мелового периода могло нарушить хрупкое химическое равновесие в океанах. Еще один удар по экосистемам морей нанесли биоценозы суши, которые удерживали биогенные элементы и быстро включали их во внутренний оборот: это лишало моря подпитки биогенами, выносимыми с материков.

На границе мела и палеогена наблюдается массовое вымирание планктонных водорослей. Оно затронуло все организмы, связанные с фитопланктоном пищевыми цепями. Вымирают головоногие моллюски – аммониты. Вымерли многие семейства морских брахиопод, морских лилий и других иглокожих, стрекающих, губок, мшанок и двустворчатых моллюсков. Исчезли и крупные морские рептилии, составлявшие высшие звенья трофических цепей. Морская регрессия и сокращение площади мелководных морей также способствовали гибели донных беспозвоночных.

Начиная с середины мела получают все более интенсивное эволюционное развитие покрытосеменные растения. С ними же прямо и опосредованно экологически связаны современные группы господствующего класса животных на суше – насекомых. В конце мела полностью вымерли динозавры. Причину этой катастрофы значительная часть ученых связывает с падением на Землю крупного небесного тела. Губительной для крупных животных могла оказаться мощная ударная волна, а для всей биоты – резкое похолодание климата, вызванное выбросом в атмосферу большого количества пыли, которая закрыла доступ солнечным лучам к поверхности Земли. Однако запыленность атмосферы могла быть вызвана и усилившейся вулканической деятельностью начиная с середины мела. В любом случае вторая половина мела характеризуется крупнейшей биотической сменой – мезофита (господства голосеменных растений) на голофит (господство покрытосеменных растений), с которым трофическими цепями связаны основные современные группы животных.

Кайнозойская эра началась 60–70 млн лет назад. Она подразделяется на *палеоген*, *неоген* (раньше их объединяли в третичный период) и *четвертичный период*. Океаны и материки приобрели современные очертания.

В наземной биоте продолжали быстро развиваться появившиеся еще в триасе млекопитающие, в юре – птицы, а в конце мезозоя – цветковые (покрытосеменные) растения. Началось вторичное освоение Мирового океана; покинув сушу, к жизни в море приспособились некоторые цветковые растения (морские травы), пресмыкающиеся (змеи, черепахи), млекопитающие (киты, дельфины), птицы (пингвины) и многие другие. Большое влияние на

развитие органического мира оказали геологические и климатические события кайнозоя.

В палеогене климат в Северном полушарии от Индии до Арктики был теплый, географическая зональность была слабо выражена.

В Северном полушарии главные события связаны с раскрытием Северо-Восточной Атлантики. Нарушение устойчивой до этого континентальной связи Евразии и Северной Америки произошло около 50 млн лет назад в результате отделения Шпицбергена от Гренландии. Полная же изоляция Америки от Евразии установилась только в конце палеогена. Сочленение Индостанской плиты с Азией привело к активному биотическому обмену между Индией и внетропической Азией. В Южном полушарии произошло отделение Австралии от Антарктиды.

Вымирание мезозойских динозавров сделало млекопитающих хозяевами суши. При этом не следует забывать об огромной ценотической роли насекомых, которая, благодаря их разнообразию, численности видов и представленности во всех звеньях трофических цепей, не менее важна, чем роль млекопитающих. Огромно значение птиц, также освоивших в качестве гетеротрофов все экологические ниши и трофические уровни. В сложении растительного покрова ведущую роль приобрели цветковые растения. Палеоген и последующие периоды кайнозоя – это эпоха цветковых растений и тесно связанных с ними насекомых.

Неоген начался с периода активного горообразования: окончательно сформировались Альпы, Гималаи, омолодился рельеф гор Герцинской складчатости. Высокие горы стали преградой на пути господствующих ветров, дующих с океана. Началось иссушение внутриконтинентальных пространств Азии. Климат Северного полушария становится холоднее. Пространства, покрытые вечнозелеными лесами, сократились, а под листопадными лесами и травянистой растительностью увеличились. Впервые на Земле появились травянистые ландшафты саванн и степей.

Альпийский орогенез сопровождался разделением океана Тетис на западную и восточную части в результате сочленения Африканской и Аравийской плит в начале неогена. Это вызвало изоляцию морских биот Индо-Пацифической и Атлантическо-Средиземноморской областей (Петров, 2006).

В истории Средиземного моря отмечен ряд катастроф: пролив, соединявший море с Атлантическим океаном, неоднократно замыкался, и тогда вся морская вода испарялась. В условиях сухого и жаркого климата на это уходило около 5000 лет. В эти периоды дно Средиземного моря представляло собой пустыню, покрытую толстым слоем соли. Наступала общая аридизация климата побережий и трансформация тропических лесов в биомы средиземноморского типа.

Значительным событием на рубеже миоцена и плиоцена было образование Панамского перешейка и ликвидация существовавшего с середины мезозоя пролива, отделявшего Северную Америку от Южной.

Открылся пролив Дрейка, отделивший Антарктиду от Южной Америки. Вокруг Антарктиды образовалось кольцо вод Южного океана с постоянным дрейфовым течением, изолирующим приполярные области от проникновения теплых вод. Началось выхолаживание Антарктиды, приведшее к ее полному оледенению. Отток холодных вод в глубины океанов достиг Северного полушария, что способствовало похолоданию климата и усилению ледовитости Северного Ледовитого океана. Из-за похолодания в районах полюсов началось активное конвективное перемешивание толщи океана. Ведущую роль играли процессы опускания холодных, богатых кислородом вод у берегов Антарктиды. Так образовались глубинные водные массы почти всех океанов. Вентилиция глубин создала благоприятные условия для формирования глубоководной биоты (Петров, 2006).

Образование ледового щита Антарктиды привело к понижению уровня Мирового океана (около 30 млн лет назад). Эта крупная регрессия кайнозоя сопровождалась изоляцией некоторых окраинных морей, с одной стороны, и восстановлением и расширением многих сухопутных связей – с другой.

Четвертичный период кайнозоя, или антропоген, начался с плейстоцена, который в Северном полушарии характеризуется, прежде всего, великой ледниковой эпохой. Похолодание стимулировало вспышку видообразования, формирования специфичной арктической и бореальной флоры и фауны как на мелководьях Мирового океана, так и на суше. Около 10–11 тыс. лет назад началась послеледниковая эпоха (голоцен), сопровождавшаяся потеплением климата и формированием современных зональных типов ландшафтов.

НООСФЕРА. СОВРЕМЕННЫЕ ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Термин «ноосфера» основан на сочетании двух греческих слов, передающихся в русской транслитерации как «ноос» – разум и «сфера» – шар, сфера, в дословном переводе – «разумная сфера».

Термин «ноосфера» был предложен в 1927 г. французским математиком и философом, профессором Сорбонны Эдуардом Леруа. При этом он отмечал, что к идее существования ноосферы, начиная с периода становления человека разумного, он пришел совместно с крупным геологом, палеонтологом-эволюционистом и философом Пьером Тейяром де Шарденом. При этом оба ученых основывались на представлениях о биосфере В. И. Вернадского, который в 1922–1923 гг. читал лекции по геохимии в Сорбонне. Позже В. И. Вернадский развил идею о ноосфере до стройной теории.

В. И. Вернадский рассматривал ноосферу как новую, высшую стадию эволюции биосферы, становление и развитие которой связано с развитием человека и общества. Именно человек и общество оказывают в настоящее время глубокое влияние на природные процессы в планетарном и космическом масштабах. Согласно В. И. Вернадскому (2004), «в биосфере существует великая геологическая, быть может, космическая сила, планетное действие которой обычно не принимается во внимание в представлениях о космосе... Эта сила есть разум человека, устремленная и организованная воля его как существа общественного».

Начало ноосферы положено еще в период палеолита – первой созданной человеком культуры. Этот период начальной стадии ноосферы продолжался 20–30 тыс. лет. Он совпал с длительным периодом четвертого в Евразии оледенения. Основой жизни человеческого общества была охота на крупных животных – оленей, шерстистого носорога, мамонта, дикой лошади, тура и других, а также рыбалка. Уже в этот период интенсивное истребление крупных животных, особенно травоядных, привело к сравнительно быстрому сокращению их численности и исчезновению многих видов. Переход, хотя и постепенный от ледникового периода к теплomu послеледниковому (атлантическому), не только привел к смене растительного покрова и видового состава охотничьих животных, но и потребовал смены объектов охоты человеком. И в этот период происходило их интенсивное истребление. В целом, начальный период в развитии взаимоотношений человека и биосферы характеризовался исключительно потребительским отношением к природе со стороны человека и подрывом естественного взаимоотношения между организмами в природе.

Крупный отечественный ученый-антрополог, академик В. П. Алексеев (1989), выделяющий пять этапов взаимоотношений природы и общества, рассматривает этот первый этап как эпоху первого экологического кризиса, т.е. «начального нарушения экологического равновесия между обществом и природой. Этот кризис начался, похоже, с самых ранних шагов истории человечества и продолжался длительное время на всем протяжении развития охотничьего хозяйства».

В эпоху неолита, наряду с охотой, рыбной ловлей и собирательством, начинает приобретать значение производство пищи самим человеком. Делаются первые шаги в направлении одомашнивания животных и разведения растений. Начинает развиваться производство керамики. Уже 10–11 тыс. лет назад существовали поселения, среди остатков которых обнаруживают пшеницу, ячмень, чечевицу, кости домашних животных – коз, свиней, овец. Развиваются зачатки земледельческого и скотоводческого хозяйства. Все шире используется огонь – для уничтожения растительности в условиях подсечного земледелия и как средство охоты для загона диких животных в места их уничтожения. Начинается освоение минеральных ресурсов – руды,

зарождается первобытная металлургия. Этот длительный период в истории человечества можно выделить как второй этап, он же – второй кризис во взаимоотношениях человека и природы. «Если реакция среды на первый экологический кризис имела своим последствием исчезновение крупных млекопитающих, то освоение новых земель в связи со скотоводством и земледелием повело к обезвоживанию больших массивов земель и эрозии почвы, замене степных травостоев на полупустынные и пустынные, наступлению степи на лес» (Алексеев, 1989).

Третий период кризисных взаимоотношений человека и природы начинается с создания городских поселений, разрушения при этом окружающей среды, все большей концентрации населения и производства на ограниченных территориях, в благоприятных природных условиях для добычи и переработки полезных ископаемых. По-существу, в этих районах «искусственная среда преобразовывала ландшафт, практически в корне меняла его, а концентрация населения и функционально значимой деятельности коллективов создавала новые ландшафтные зоны, никак не напоминающие предшествующие» (Алексеев, 1989). Нередко экологи этот период критических взаимоотношений человека с природой называют «периодом технической революции», длящимся до XX в. (Пономарева, 2009).

Четвертый период, относительно короткий, проявляется как отчетливо кризисный и обозначившийся во второй половине XX в. (Пономарева, 2009). Этот период, с точки зрения человека, представляет собой эпоху научно-технического прогресса. Человек достиг огромной технической оснащенности, создания и практического применения новых технологий и источников энергии, включая ядерную энергетику, синтез абсолютно новых химических соединений, с которыми прежде человек не встречался и не адаптировался к ним, и многое другое. «Производство развивается до все более глобальных масштабов, и наступает эра грандиозных миграций вещества и энергии, охватившая весь или почти весь земной шар».

Наконец, пятый период – это современная эпоха, когда «мы имеем громадный рост численности человечества и массивную разработку новых технологий, преобразующих лицо нашей планеты в самых разнообразных аспектах».

Эти пять эпох – пять периодов глобального расширения сферы действия человеческой цивилизации и освоения планетарного и космического пространства, одновременно и изменяющегося отношения человечества к природе и воздействия природы на человечество. Они и могут рассматриваться как основные вехи исторической периодизации системы «природа – общество» (Алексеев, 1989).

В. И. Вернадский увидел в человеке умелого творца природы, призванного, в конце концов, занять место у штурвала эволюции. Он рассматривал ноосферу как царство разума, как закономерный и неизбежный этап

развития материи, этап естественно-исторический: «Мы только начинаем сознавать непреодолимую мощь свободной научной мысли, величайшей творческой силы Homo sapiens, человеческой свободной личности, величайшего нам известного проявления ее космической силы, царство которой впереди» (Вернадский, 2004).

В. И. Вернадский рассматривал человека как биосоциальный вид, который существует не только на основе своих, социальных, законов, но и по законам природы, поскольку он является ее частью. Это единство обусловлено, прежде всего, функциональной неразрывностью окружающей среды и человека, которую пытался показать Вернадский как биогеохимик. Человечество представляет собой природное явление. Поэтому влияние биосферы сказывается не только на среде жизни, но и на образе мышления человека.

Тем не менее, как было кратко показано выше, все исторические этапы взаимоотношения человека и биосферы представляют собой образец кризисных отношений.

Современный этап развития ноосферы как этапа эволюции биосферы характеризуется серьезными экологическими проблемами глобального значения. Эти проблемы затрагивают как всю биосферу, так и человечество – ее неотъемлемую часть. Ниже дается краткая характеристика основных экологических проблем современности, которые непосредственно связаны с развитием общества.

ПРОБЛЕМА ПРОДОВОЛЬСТВИЯ НАСЕЛЕНИЯ

Современному этапу развития технологической цивилизации сопутствуют экспоненциальный рост населения Земли, постепенное истощение ресурсов, а также растущее загрязнение окружающей природной среды. Одна из основных причин современного экологического кризиса – демографическая проблема человечества, связанная с экспоненциальным ростом численности и истощением природных ресурсов питания.

В конце XIX и особенно в XX в. произошли кардинальные изменения в демографической ситуации: уменьшилась детская смертность и резко возросла продолжительность жизни, что и послужило причиной современного демографического взрыва.

Около 90 % всех продуктов питания человечество получает благодаря земледелию. Около 50 % объема питательных материалов в животноводстве также представляют собой продукты растениеводства в непосредственном или переработанном виде. Основой земледелия являются почвы. Во «Всемирной хартии почв», принятой в 1983 г. международными организациями, входящими в состав ООН, говорится: «Среди главных ресурсов, которыми располагает человек, выделяется земля; к ней относятся почвы, вода, растения и животные: эксплуатация этих ресурсов не должна вызывать

их деградацию или разрушение, так как жизнь человека зависит от их неиссякаемой продуктивности».

По оценке, проведенной по заданию ФАО, первоклассные земли, способные давать высокие урожаи по 2–3 раза в год, занимают всего 400 млн га. Земли второго класса, урожайность культур на которых составляет 40–60 % от урожайности первоклассных, занимают 500 млн га, а земли третьего класса с урожайностью, не превышающей 20–40 % от урожайности культур на первоклассных землях, занимают 1500 млн га. Продукция, полученная на землях третьего класса, неконкурентоспособна на мировом рынке и используется только местным населением (Николайкин, 2009).

В странах Восточной Европы, США, Индии, Китае, Канаде и Бразилии размещается около 750 млн га пашни, т. е. более половины всех обрабатываемых земель мира. Наиболее благоприятные условия для развития земледелия находятся в Европе, однако здесь очень высока плотность населения, и обеспеченность пашней не превышает 0,3 га/чел. В Азии, где сосредоточен 31 % мировой пашни, этот показатель составляет 0,15 га (Николайкин, 2009).

Наибольшие резервы по увеличению обрабатываемых угодий имеют Южная Америка и Африка, где еще можно освоить сотни миллионов целинных земель. При этом основное внимание должно уделяться внедрению интенсивных технологий.

Эффективность земледелия постоянно, в течение многих веков, повышается. В настоящее время она повышается в основном за счет селекции, химизации, механизации и других форм увеличения вложения энергии в сельское хозяйство в непосредственном или опосредованном виде. Земельные ресурсы к сегодняшнему дню практически исчерпаны: целинные и залежные земли отсутствуют, за исключением вторично брошенных из-за бесхозяйственности и неудобий.

Сильно повышает интенсивность использования почвы, снижает естественное плодородие и требует повышения доз внесения удобрений сельскохозяйственное культивирование без севооборотов. Специалисты США так оценивают влияние различных факторов на урожайность сельскохозяйственных культур (в процентах): удобрения – 41, гербициды – 15–20, благоприятная почва – 15, гибридные семена – 8, ирригация – 5, прочие факторы – 11–16. В странах Западной Европы и Японии в последние годы вносят около 400 кг минеральных удобрений на 1 га пашни. В нашей стране к началу 90-х гг. на 1 га вносили около 115 кг минеральных удобрений (Николайкин, 2009). Большую в повышении урожайности сельскохозяйственных культур играет орошение возделываемых площадей. К началу 90-х годов второго тысячелетия системами орошения было охвачено 18 % пахотных земель планеты. Однако орошение одновременно с повышением урожайности способствует засолению и заболачиванию почв. Значительный урон

земледелию наносит эрозия почв – процесс разрушения и переноса почв и пород ветром и водой.

Интенсификацию растениеводства эффективнее всего осуществлять на основе мелиорации почв, т.е. повышения их плодородия путем искусственного регулирования водного, воздушного, теплового, солевого, биохимического и физико-химического режимов с помощью разнообразных приемов.

В экономически развитых странах, например странах Западной Европы, на каждый гектар вносится до 400 кг удобрений. В развивающихся же странах Азии вносится всего 9–50 кг (Николайкин, 2009), т.е. осуществляется минимальная подкормка почвы, не компенсирующая вынос из почвы питательных материалов для растений вместе с урожаем. Во многих развивающихся странах основные виды работ в сельском хозяйстве выполняют вручную или с помощью домашнего скота. В США и Западной Европе один трактор приходится в среднем на 34 га пашни, в развивающихся странах – на 620 га, а в Индии – на 3000 га. Низкая культура земледелия – причина того, что урожайность важнейших продовольственных культур в среднем в мире мала.

Несмотря на повышение уровня агротехники, население в странах Африки и Южной Америки не может обеспечить себя продовольствием. Помимо широкого распространения пустынь, полупустынь и трудностей освоения влажных тропических лесов этому препятствует низкий экономический и социальный уровни развития государств, расположенных в данных регионах. Постоянный рост населения усиливает напряженность в отношении продуктов питания.

К мерам по поддержанию популяционного равновесия человечества относится ряд международных соглашений, принятых в рамках ООН, в частности, соглашение по народонаселению. На основе программ ООН с целью снижения уровня рождаемости и уровня смертности разработана политика помощи развивающимся странам, а также экономические меры, призванные поднять уровень жизни и образованности населения. Кроме того, были разработаны международные проекты, в рамках которых развивающимся странам передавались современные технологии, ориентированные не на крупные промышленные или сельскохозяйственные производства, а на небольшие фермерские хозяйства.

ИСТОЩЕНИЕ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

Истощение ресурсов идет по нескольким направлениям.

1. Истощение невозобновимых, хотя пока и достаточно больших, ископаемых энергоресурсов биогенного происхождения – угля, нефти и природного газа. Замедление исчерпания невозобновимых ресурсов может быть осуществлено за счет использования альтернативных неисчерпаемых ис-

точников энергии: ветра, приливов и отливов, солнечной радиации. Кроме того, в настоящее время начата промышленная добыча сланцевого газа. Сланцы относятся к горючим ископаемым, как уголь, торф, нефть и природный газ. По мере обострения энергетического дефицита интерес и актуальность темы добычи сланцевого газа возрастает. Многие эксперты рассматривают природный газ как сырье, которое быстро закончится и ищут альтернативу ему в сланцевом газе. Интенсивное освоение месторождений сланцевого газа осуществляется в настоящее время в США.

2. Истощение относительно возобновимых ресурсов – почвы и лесов. Почвенный покров планеты страдает от эрозии, в результате которой катастрофически убывает плодородный слой. Многие древние цивилизации исчезли с лица Земли именно вследствие неумеренной распашки почвенного слоя. Например, в распадае Римской империи большую роль сыграло превращение плодородных земель в пустыню Сахару, которая была в течение тысячелетий для империи богатейшей житницей. И сейчас на различных участках земного шара происходит опустынивание, связанное, прежде всего, с вырубкой лесов, сведением кустарников и травяного покрова. Каждый день от пожаров и вырубок исчезают около 50 га лесов и порядка 20 тыс. га сельскохозяйственных угодий, которые превращаются в пустыню в результате эрозии почв и опустынивания. Сплошная распашка почв ведет к пыльным бурям, ветровой и водной эрозии плодородного почвенного слоя. Для борьбы с этими явлениями необходима защита полей лесными и кустарниковыми полосами, укрепление склонов оврагов древесными и кустарниковыми насаждениями и иные простые, но эффективные мероприятия.

Катастрофичной в данное время является рубка тропических лесов, которые являются одним из крупнейших источников кислорода, жизненно важного ресурса нашей планеты, возобновляемого биотой. Тропические леса исчезают в силу того, что население в этих районах быстро увеличивается. Из-за угрозы голода люди используют под поля и огороды любые клочки земли, вырубая для этого древние тропические леса, деревья, кустарники.

Важным источником кислорода является фитопланктон тропического океана. Однако он находится под угрозой, так как океан с громадной скоростью загрязняется отходами промышленного и сельскохозяйственного производства. Таким образом, биогенные ресурсы кислорода, хотя и являются возобновимыми, но в настоящий момент находятся под угрозой истощения.

3. Под угрозой исчезновения оказались запасы чистой пресной воды из-за загрязнения водоемов (подробнее о загрязнении воды – см. ниже). При загрязнении абиогенными продуктами сельскохозяйственного и промышленного производства (тяжелыми металлами и ксенобиотиками) воды становятся токсичными для своих обитателей. Эта опасность – результат стока воды с полей и ферм, от промышленных объектов. Загрязняясь биогенами, водоемы подвергаются эвтрофикации, многие из них превращаются в забо-

лоченные водоемы, становясь непригодными для жизни многих видов рыб, в том числе промысловых пород.

В целом, в загрязнение воды и почвы весомый вклад вносят применение в сельском хозяйстве удобрений и пестицидов, выбросы промышленности из-за недостаточно совершенных очистных сооружений.

Поскольку самовосстановление и саморегуляция являются природными свойствами экосистем, то почвы, воздух и вода в природных экосистемах способны к самоочищению. Однако из-за нарушения трофических цепей и исчезновения многих биологических видов – звеньев трофических цепей – экосистемы теряют способность к восстановлению и начинают разрушаться.

Дефицит пресной воды – явление, знакомое человечеству с древнейших времен. Именно водный кризис, обусловленный последствиями грандиозных работ по гидромелиорации (а именно – вторичным засолением почвы), стал причиной гибели цивилизации Древнего Двуречья. Аналогичные проявления неумелого водопользования привели к экономическому ослаблению Карфагена, последовавшему затем его поражению в войнах с Римом и фактическому исчезновению с карты Древнего Средиземноморья. В наши дни водный кризис приобретает глобальные масштабы.

По данным ООН, уже сейчас более 1,2 млрд людей живут в условиях постоянного дефицита пресной воды, около 2 млрд страдают от него регулярно (в сухой сезон и т. п.). По прогнозам ФАО, к середине третьего десятилетия XXI в. численность живущих при перманентной нехватке воды превысит 4 млрд человек. Продолжение роста водопотребления с темпами, характерными для второй половины XX в., уже невозможно.

В последние десятилетия все чаще дефицит пресной воды возникает в регионах, где его раньше не было, и повсеместно усиливается. Очевидная причина этого – расширение водопотребления увеличивающимся населением и растущей экономикой (Данилов-Данильян, 2008). При этом пресной воды удовлетворительного качества становится меньше не только в относительном, но и в абсолютном измерении.

Пресную воду принято считать воспроизводимым, возобновляемым ресурсом. Предполагается, что эксплуатация водных объектов не наносит им существенного ущерба. Во всяком случае, ущерб не достигает критического уровня, за которым начинается деградация водного объекта – источника пресной воды, а ее воспроизводимость (даже необязательно в полном объеме) становится проблематичной. Однако широко известны примеры гибели малых рек, зарастания озер, очень высокого загрязнения водных объектов всех видов и разновидностей. При этом следует иметь в виду два аспекта. Во-первых, качество воды в природных водных объектах, то есть ее пригодность для различных целей, прежде всего для питьевого водо-

снабжения. Во-вторых, физическое количество доступной воды и процессы воспроизводства этого количества (Данилов-Данильян, 2008).

Поверхностные воды суши – совокупность специфических и при этом весьма разнообразных экосистем. Как количество, так и главное – качество пригодной для использования воды, воспроизводимой конкретным водным объектом, в существенной мере зависят от соответствующей экосистемы и ее состояния. Угнетение, деградация, тем более гибель пресноводной экосистемы неизбежно влекут серьезное ухудшение качества, а подчас и ошутимое изменение количества воспроизводимой пресной воды. Нормально функционирующая экосистема находится в состоянии равновесия с окружающей ее средой, потоки вещества из системы и в нее сбалансированы (и значимо меньше, чем обмен внутри экосистемы). Отклонение от равновесия, если оно не превосходит саморегулирующих возможностей экосистемы, достаточно быстро устраняется. Чрезмерное воздействие на экосистему, превосходящее эти возможности, угнетает ее, инициирует деградиционные явления.

Главная характеристика любой экосистемы, уменьшение которой однозначно свидетельствует об ухудшении здоровья экосистемы, ее угнетении, а затем и деградации – биоразнообразие. Оценивая биоразнообразие экосистемы, принимают во внимание как количество биологических видов, представители которых составляют соответствующее сообщество организмов, так и показатели внутривидового разнообразия. Вторая характеристика – биопродуктивность экосистемы – показывает количество биомассы, которую она производит за год. В отличие от биоразнообразия рост биомассы может быть и негативным симптомом, сигнализирующим о неблагополучии экосистемы. В частности, массовое размножение чужеродного вида может привести к нарушению экологического баланса, а в дальнейшем – к угнетению и деградации экосистемы. Чрезмерное эвтрофирование водоема (увеличение массы водорослей вследствие роста концентрации в воде веществ, связанных с оборотом органики, прежде всего соединений азота и фосфора, из-за смыва минеральных удобрений с территории, а также сброса загрязненных органикой стоков) является едва ли не самой распространенной причиной ухудшения качества воды (Данилов-Данильян, 2008). Чаще всего эта причина вторичная. Среди первичных процессов, обуславливающих ухудшение качества пресной воды, оказывается антропогенное загрязнение, в первую очередь – сброс неочищенных сточных вод непосредственно в водные объекты. Далее следуют смыв разнообразных загрязняющих веществ (прежде всего минеральных удобрений, пестицидов, гербицидов) паводками и атмосферными осадками с почвы, проникновение поллютантов в поверхностные источники из подземных. Чаще всего такими поллютантами оказываются нефтепродукты, соли тяжелых металлов, радионуклиды и т. д. Существенную роль играет и выпадение загрязнителей из атмосферы,

прежде всего с осадками: окислы серы и азота вызывают закисление почвы на территории водосбора с весьма серьезными последствиями и для водных экосистем, а восстановленный азот усиливает эвтрофикацию водоемов. Соответствующую характеристику обычно называют ассимиляционным потенциалом экосистемы. Предел воздействий на экосистему, превышение которого вызывает в ней необратимые деграционные процессы, называют ее несущей емкостью (Данилов-Данильян, 2008). Проблема почти повсеместного ухудшения качества пресной воды в мире обусловлена тем, что антропогенное воздействие на ее источники – водные объекты – превышает их несущую емкость. Частный случай – антропогенное загрязнение, уровень которого превышает ассимиляционный потенциал экосистемы, – обычно принимают за главную причину. Однако другие антропогенные воздействия имеют не меньшее значение.

Истощение поверхностных водных источников обуславливается прежде всего косвенными воздействиями на них – через нарушения лесных экосистем, режима воспроизводства подземных вод, механическую обработку почвы в сельском хозяйстве и пр. Важнейшее значение имеет распространение производимых человеком возмущений по «гидрологическим цепочкам», например, осушение верховых болот неизбежно влечет оскудение питаемых ими рек, чрезмерный забор воды из подземных источников может привести к катастрофическим последствиям даже для крупных рек.

Таким образом, важнейшее значение для возникновения водного дефицита имеет общее экологическое неблагополучие, которое сегодня характерно для большинства стран мира и биосферы в целом. Уничтожение лесных экосистем (в настоящее время в мире сведено около 40 лесов, существовавших три тысячи лет тому назад, причем основная часть этих потерь приходится на последние сто лет), опустынивание, почти полная утрата луговых и степных экосистем и замена их агроценозами – все это факторы истощения водных источников, ухудшения качества воды (Данилов-Данильян, 2008).

В течение XX в., и особенно в последние 50 лет, воздействие человека на водный цикл планеты достигло глобального масштаба. Данные об объеме сбросных вод, приводимые в различных источниках, сильно расходятся (как и нормы разбавления загрязненных вод). Сопоставление различных данных приводит к выводу, что ежегодно в мире загрязняется от 12 до 17 тыс. км³ поверхностных вод, то есть порядка половины доступной пресной воды. Именно загрязнение водных объектов в настоящее время служит основной причиной нехватки воды, неустойчивости водопользования (Данилов-Данильян, 2008).

Недопустимо высокий водозабор из многих рек, а также подземных источников обуславливает изменение режима водных объектов, чему способствуют также угнетение и преобразование естественных экосистем на водо-

сборах и строительство всевозможных гидротехнических сооружений. Всемирная комиссия по воде (World Commission on Water) констатировала, что более половины крупных рек мира «серьезно истощены и загрязнены, деградируют и отравляют окружающие их экосистемы, угрожая здоровью и жизнеобеспечению зависящего от них населения» (Данилов-Данильян, 2008).

Представление о масштабах потребностей различных производств в воде дают несколько примеров. Теплоэлектростанция мощностью 1 млн кВт потребляет более 1 км³ воды в год, АЭС той же мощности – не менее 1,5 км³ воды в год. Средний расход воды на производство 1 т стали составляет около 20 м³, 1 т бумаги – 200 м³, 1 т химического волокна – более 4000 м³. Импорт 1 т зерна эквивалентен импорту 1000 м³ воды. По водоемкости производства ввоз продуктов питания в Северную Африку и на Ближний Восток эквивалентен годовому стоку реки Нил.

Мировые резервы пресной воды, которые могли бы с приемлемыми затратами быть вовлечены в экономику, близки к исчерпанию. Между тем рост населения мира будет продолжаться еще по крайней мере полвека, хотя и с уменьшающимися темпами. Однако не только дополнительное население обусловит рост потребности в воде. Не менее важно, что этот рост поддерживается стремлением населения всех стран, а прежде всего – развивающихся, к улучшению качества жизни, невозможному без решения водохозяйственных проблем.

Правильный выбор стратегии преодоления вододефицита заключается в выборе интенсивных факторов развития производства, когда общее потребление дефицитного ресурса не растет, зато увеличивается эффективность его использования, сокращаются его затраты на единицу получаемого экономического результата, например на единицу выпускаемой продукции.

По оценкам ученых (Данилов-Данильян, 2008), дефицит пресной воды будет нарастать, если процесс экологической деградации не будет остановлен. Отсюда следует вывод: необходимым условием решения проблемы дефицита пресной воды является нормализация антропогенного воздействия на окружающую среду, экологизация производства и потребления, сохранение и восстановление необходимого для экологического баланса количества неугнетенных экосистем.

ЗАГРЯЗНЕНИЕ БИОСФЕРЫ

Под загрязнением окружающей среды понимают любое внесение в ту или иную экологическую систему не свойственных ей живых или неживых компонентов, физических или структурных изменений, прерывающих или нарушающих процессы круговорота и обмена веществ, потоки энергии со снижением продуктивности или разрушением данной экосистемы (Большаков, 2005).

Загрязнения биосферы подразделяют на локальные, региональные и глобальные. Локальные загрязнения характерны для городов, крупных промышленных предприятий, районов добычи полезных ископаемых. Региональные загрязнения охватывают значительные территории и акватории, подверженные влиянию крупных промышленных районов. Глобальные загрязнения распространяются на большие расстояния от места своего возникновения и оказывают неблагоприятное воздействие на крупные регионы, а иногда на всю планету.

По происхождению выделяют естественное и антропогенное загрязнение. Естественное загрязнение возникает в результате мощных природных процессов (извержения вулканов, лесных пожаров, выветривания и пр.), без влияния человека. Антропогенное загрязнение представляет собой результат деятельности человека и иногда по масштабам воздействия превосходит естественное загрязнение. Антропогенное воздействие на биосферу вызывает не только ее загрязнение, но и разрушение вследствие несбалансированности биохимических процессов.

Ежегодно в биосферу поступает 17,4 млрд т твердых отходов и 500 млрд м³ жидких стоков. Поступления содержат 100 тыс. наименований химических веществ. Наибольший ущерб приносят:

- диоксид углерода – 20 млрд т;
- диоксид серы – 150 млн т;
- железо – 50 млн т;
- синтетические материалы – 60 млн т;
- минеральные удобрения – 500 млн т;
- пестициды – 5 млн т.

Различные типы загрязнения подразделяются на три основных: химическое, физическое и биологическое. Кроме того, вещества, загрязняющие атмосферу, подразделяют на первичные и вторичные. Первичные – это вещества, содержащиеся непосредственно в выбросах предприятий и поступающие с ними от разных источников. Вторичные являются продуктами трансформации первичных или вторичного синтеза. Они нередко более опасны по сравнению с первичными веществами.

Химическое загрязнение

Химическое загрязнение – увеличение количества химических компонентов определенной среды, а также проникновение (введение) в нее химических веществ в концентрациях, превышающих норму или не свойственных ей. Наиболее опасно для природных экосистем и человека именно химическое загрязнение. Оно поставляет в окружающую среду различные токсиканты – аэрозоли, химические вещества, тяжелые металлы, пестициды, пластмассы, поверхностно-активные вещества (детергенты) и др. По

расчетам специалистов, в настоящее время в природной среде содержится от 7 до 8,6 млн различных химических веществ, причем их арсенал ежегодно пополняют еще 250 тыс. новых соединений. Многие химические вещества обладают канцерогенными и мутагенными свойствами, среди которых особенно опасны 200 наименований (список составлен экспертами ЮНЕСКО): бензол, асбест, бензапирен, пестициды (ДДТ, элдрин, линдан и др.), тяжелые металлы (особенно ртуть, свинец, кадмий), разнообразные красители и пищевые добавки. По оценкам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в мире около 600 млн человек подвержены воздействию атмосферы с повышенной концентрацией диоксида серы и более 1 млрд человек (каждый шестой житель планеты) – вредной для здоровья концентрацией взвешенных частиц в атмосфере (Большаков, 2005).

Антропогенному загрязнению подвержены атмосфера, гидросфера и почва.

Загрязнение атмосферы

Химические вещества. В результате деятельности человека в атмосферу поступают углекислый газ CO_2 , угарный газ CO , диоксид серы SO_2 , метан CH_4 , оксиды азота NO_2 , NO и N_2O , хлорфторуглероды (при использовании аэрозолей в быту), а также углеводороды, бензапирен и др. (в результате работы транспорта).

В среднем автомобиль с бензиновым двигателем за 15 тыс. км пробега потребляет 4350 кг кислорода и выбрасывает 3250 кг диоксида углерода, 530 кг оксида углерода, 98 кг углеводородов, 27 кг оксидов азота (Большаков, 2005). Наиболее массовые загрязнители, выбрасываемые всеми техногенными источниками в атмосферу Земли, представлены в табл. 5.

В России в 2010 г. объем выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников, по данным Росстата, составил 19,1 млн т, что выше уровня 2000 г. на 1,6 %.

При растворении в воде диоксидов серы и азота образуются кислотные осадки (дожди). Такие осадки, выпадая на поверхность Земли, имеют показатель кислотности $\text{pH} < 5,6$. Основным источником подобных выбросов являются продукты сгорания топлива (уголь, мазут, бензин и т. д.) в энергетических установках предприятий, наземного и воздушного транспорта, выбросы химических и металлургических предприятий.

Благодаря своей активности SO_2 в атмосфере претерпевает ряд химических превращений, главное из них – окисление с образованием H_2SO_4 . При этом кислотные пары могут разноситься с облаками на сотни километров (до 1500 км). При выпадении кислотных дождей и снега наносится серьезный ущерб флоре, фауне (химические ожоги), вызывается коррозия и разрушение элементов зданий и сооружений.

*Загрязнители, выбрасываемые всеми техногенными источниками
в атмосфере Земли в 90-е гг. XX в. (Большаков, 2005)*

Загрязнители	Масса, млн т/год
Твердые частицы дыма и промышленная пыль	580
Окислы углерода	360
Летучие углеводороды и другая органика	320
Окислы серы	160
Окислы азота	110
Соединения фосфора	18
Сероводород	10
Аммиак	8
Хлор	1
Фтористый водород	1

Кислотные соединения азота (NO , NO_2) из антропогенных источников – энергетики (57,0 %), транспорта (38,5 %), промышленности (4,5 %) – служат источниками образования атмосферной азотной кислоты.

Азотная кислота, в отличие от серной, может долгое время оставаться в атмосфере в газообразном состоянии, так как она плохо конденсируется. Пары HNO_3 в атмосфере поглощаются капельной влагой облаков и частицами аэрозоля.

Кислотные осадки антропогенного происхождения заметно изменили рН окружающей среды. Около 150 тыс. лет назад при образовании ледяного покрова Гренландии уровень рН в осадках составлял 6,0–7,6 (по результатам анализов полярных льдов и горных глетчеров). Во второй трети XX в. рН атмосферных осадков составлял: 4,0–4,5 в Германии и странах Бенилюкса, 2,4–2,7 в Шотландии и Норвегии, 4,0–4,5 в США и Японии (CO_2).

Значение рН среды чрезвычайно важно для жизнедеятельности практически всех организмов, прежде всего для процессов, связанных с действием ферментов, гормонов, регулирующих обмен веществ, рост и развитие. Особенно это чувствительно для обитателей водоемов и рек, для организмов, которые адаптировались к среде с рН = 6–7.

Кислотные осадки вызывают деградацию лесов, особенно хвойных. Попадая на листья и хвою деревьев, кислоты разрушают защитный восковой покров, что делает растения более уязвимыми для патогенных организмов, снижает их сопротивляемость болезням, способствует большему испарению влаги.

При взаимодействии с почвенным покровом усиливаются процессы выщелачивания биогенов. При рН < 4 резко снижается активность редуцен-

тов и азотфиксаторов, обостряется дефицит питательных веществ: почвы теряют плодородие. Под действием кислотных осадков существенно ускоряется коррозия металлов, нарушается целостность лакокрасочных покрытий, стекол, разрушаются здания, памятники архитектуры. Например, серная кислота, взаимодействуя с мрамором (CaCO_3), образует CaSO_4 , что приводит к нарушению целостности поверхностного слоя изделий из этого камня. Из минеральных строительных конструкций и стекол выщелачиваются карбонаты и силикаты.

Среди вредных веществ, содержащихся в воздухе городов, имеется большая группа, обладающая канцерогенной активностью. Это в первую очередь бензапирен и другие ароматические углеводороды, поступающие от котельных промышленных предприятий и с выхлопными газами автотранспорта.

Большое отрицательное воздействие на атмосферу оказывает загрязняющее воздействие аэрозолей.

Аэрозоли – это аэродисперсные (коллоидные) системы, в которых неопределенно долго могут находиться во взвешенном состоянии твердые частицы (пыль), капельки жидкости, образующиеся при конденсации паров, при взаимодействии газовых сред, попадающие в воздушную среду без изменения фазового состава. Воздух или газ являются дисперсной средой, а твердые и жидкие частицы – дисперсной фазой. Значительная часть аэрозолей формируется в атмосфере при взаимодействии твердых и жидких частиц между собой или с водяным паром.

В атмосфере аэрозольные загрязнения воспринимаются в виде дыма, тумана. Основными источниками искусственных аэрозольных загрязнений воздуха являются тепловые электростанции, которые потребляют уголь высокой зольности, обогатительные фабрики, металлургические, цементные, магнезитовые и сажевые заводы. Чаще всего в них обнаруживаются соединения кремния, кальция и углерода (несгоревший уголь, сажа, смола). Реже в них встречаются оксиды железа, магния, марганца, цинка, меди, никеля, свинца, сурьмы, висмута, селена, мышьяка, бериллия, кадмия, хрома, кобальта, молибдена, а также асбест. В органической пыли содержатся алифатические и ароматические углеводороды, а также соли кислот. Она образуется при сжигании остаточных нефтепродуктов.

Атмосферная пыль и аэрозоли ослабляют солнечное излучение в результате рассеяния, отражения и поглощения лучистой энергии. Пыль и аэрозоли играют заметную негативную роль в процессах коррозии металлических и силикатных материалов из-за образования на поверхностях отложений. В них содержатся сульфаты и хлориды, удерживающие влагу, в которой могут растворяться кислотные газы (SO_2 и HCl). Образующиеся кислоты разрушают изделия из камня, стекла, металлов. Пылевые и аэрозольные загрязнения атмосферы оказывают заметное влияние на здоровье человека, состояние флоры и фауны.

Снижение потока солнечного излучения, включая ультрафиолетовую часть спектра, снижает его стерилизующее действие, что повышает риск инфекционных бактериальных заболеваний у человека, животных и растений. Кроме того, такое уменьшение потока солнечного света уменьшает образование под действием УФ-лучей витамина В₃, недостаток которого отрицательно сказывается на формировании костных тканей, что повышает риск заболевания рахитом.

В зонах интенсивных пылевых загрязнений возникает ряд специфических заболеваний. К ним, среди прочих, относятся силикоз и асбестоз, приводящие к изменению тканей легких.

Ионы металлов, содержащиеся в выбросах производства в атмосферу, вызывают образование в крови токсических продуктов биохимических реакций. Особенно распространенными заболеваниями являются токсичные отравления свинцом, кадмием, алюминием, бериллием и их соединениями. Минеральная и органическая пыль антропогенного происхождения является причиной аллергических заболеваний.

Отложения пыли на листьях растений препятствует процессу фотосинтеза, отражая часть лучистой энергии в области длин волн 400–750 нм. Кроме того, пыль, характерная для городов, поглощает инфракрасное излучение, способствуя этим перегреву листьев растений. Все это нарушает нормальный водный и температурный режим и в конечном счете снижает активность ферментов фотосинтеза.

Быстрыми темпами нарастает в атмосфере содержание двухатомных газов (СО, НСl и др.), трехатомных газов (Н₂О, СО₂, SO₂) и газов с числом атомов больше трех (NH₃, СН₄ и др.). Эти газы обуславливают парниковый эффект. Солнечная радиация, падающая на Землю, частично поглощается поверхностью суши и океана. 30 % ее отражается в космическое пространство. Поглощенная энергия солнечной радиации преобразуется в теплоту и излучается в космос в диапазоне длин волн инфракрасного излучения. Чистая атмосфера прозрачна для ИК-излучения, а атмосфера, содержащая пары трехатомных (парниковых) газов (воды, углекислого газа, оксидов серы и др.), поглощает инфракрасные лучи, благодаря чему происходит ее разогрев.

Известно, что основным по значению парниковым газом являются водяные пары. За ним следуют СО₂, дающий сегодня по сравнению с началом XX в. прирост парникового эффекта на 49 %, метан (18 %), фреоны (14 %), диоксид азота (6 %). На остальные газы приходится около 13 % прироста.

Являясь парниковым газом, двуокись углерода в воздухе оказывает влияние на теплообмен планеты с окружающим пространством, эффективно блокируя переизлучаемое тепло на ряде частот, и таким образом участвует в формировании климата планеты. Естественный парниковый эффект создает прирост средней температуры поверхности Земли на 30 °С. В его отсутствие средняя температура поверхности Земли, составляющая в на-

стоящее время $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, понизилась бы до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом случае началось бы глобальное оледенение.

С XVIII в. природное равновесие содержания парниковых газов в атмосфере претерпело серьезные нарушения. Так, за 250 лет вследствие антропогенного влияния (добыча ископаемых видов топлива, рисовые поля, биохимические процессы разложения бытовых отходов и др.) содержание метана в атмосфере увеличилось в 3 раза.

Рост концентрации CO_2 сначала происходил из-за массовой вырубке лесов, потреблявших углекислый газ на синтез биомассы растений. С начала XIX в. определяющую роль приобретают выбросы CO_2 с продуктами сжигания ископаемого топлива, технологических и попутных газов. В связи с активным использованием человечеством ископаемых энергоносителей в качестве топлива, происходит быстрое увеличение концентрации этого газа в атмосфере. Впервые антропогенное влияние на концентрацию двуокиси углерода отмечается с середины XIX в. Начиная с этого времени, темп ее роста увеличивался и в конце 2000-х гг. происходил со скоростью 1,7 за год. В настоящее время ежедневно в атмосферу выделяется 60 млн т углекислого газа.

Из антропогенных источников поступления CO_2 в атмосферу наибольший вклад вносят предприятия энергетики и металлургии, транспорт, использующий двигатели внутреннего сгорания. Например, воздушный лайнер за 7 часов полета потребляет на сжигание топлива около 35 т кислорода, а количество CO_2 , выбрасываемое его двигателями в атмосферу, на 37,4 % больше.

Рост населения планеты и интенсивное разведение домашних животных привели к тому, что биологический вклад (аэробное дыхание, разложение органических остатков) в увеличение концентрации CO_2 в атмосфере стал соизмерим с промышленными выбросами.

Как результат, двуокись углерода постепенно аккумулируется в атмосфере и в 2009 г., например, ее концентрация на 39 % превосходила доиндустриальное значение. К настоящему времени, благодаря принимаемым мерам во всех развитых странах мира, рост увеличения CO_2 в атмосфере не происходит, и по состоянию на 2011 г., суммарное антропогенное выделение CO_2 не превосходит 8 % от его естественной эмиссии, а увеличение концентрации в основном обусловлено не уровнем антропогенных выбросов, а постоянным ростом уровня выбросов со временем. При этом следует иметь в виду, что увеличение содержания CO_2 в атмосфере на 60 % по сравнению с современным уровнем вызовет повышение температуры земной поверхности на $1,2\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это значит, что если до 2050 г. потребление ископаемого топлива не сократится, то концентрация CO_2 в атмосфере возрастет вдвое, а температура поверхности Земли увеличится на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Возрастет дополнительный вклад в парниковый эффект и таких газов, как NO_2 , SO_2 , NH_3 , CH_4 , фреонов и других органических веществ. Опере-

жающими темпами растет содержание в атмосфере CH_4 и NH_3 . Установлено, что если темпы роста концентрации в атмосфере газов, дающих дополнительный вклад в парниковый эффект, сохранятся на сегодняшнем уровне, то к 2020 г. их действие будет эквивалентно удвоению концентрации CO_2 в атмосфере (Большаков, 2005).

Потепление на Земле, по мнению климатологов, за счет роста температуры на $0,1^\circ\text{C}$ считается значительным, а увеличение температуры на $3,5^\circ\text{C}$ – критическим. Таяние полярных льдов приведет к повышению уровня Мирового океана почти на 100 м, т.е. к затоплению территории, на которой проживает подавляющее большинство населения и сосредоточен основной промышленный потенциал. Изменение перепада температур между зонами полюсов и экватора Земли нарушит естественную циркуляцию атмосферы. Ослабление интенсивности переноса воздушных масс приведет к существенному ухудшению переноса теплоты и влаги – произойдет глобальное изменение климата: в зонах с жарким и сухим климатом увеличится количество атмосферных осадков, в умеренном поясе станет значительно суше.

Развитие процессов в биосфере во многом зависит от состояния озонового экрана. Верхние слои атмосферы в значительной степени определяют условия жизни на Земле. Они являются защитным барьером на пути излучений и частиц высоких энергий из космоса. Особую опасность для биосферы представляет жесткое ультрафиолетовое излучение Солнца в диапазоне длин волн $\lambda < 310$ нм.

Известно, что более 99 % ультрафиолетового излучения Солнца поглощается слоем озона (O_3) на высоте в среднем 25 км от поверхности Земли – озоновым экраном. Естественные процессы круговорота озона в стратосфере нарушаются из-за его разрушения катализаторами, значительная доля которых техногенного происхождения. Среди таких катализаторов наиболее важная роль принадлежит оксидам азота, а также атомам хлора.

Основными источниками NO антропогенного происхождения являются двигатели внутреннего сгорания, высокотемпературные энергетические установки, в которых сжигается топливо, ракеты и сверхзвуковые самолеты.

Атомарный хлор образуется в результате фотохимического разрушения фреонов (фторхлорметанов): CF_2Cl_2 и CFC1_3 . Их источником являются холодильные установки и аэрозольные баллоны. Они летучи и устойчивы в тропосфере. С момента начала промышленного применения (в 50-е гг. XX в.) содержание фреонов в атмосфере увеличивалось на 5–10 % в год.

В настоящее время учеными обнаружены зоны стратосферы с существенно сниженным содержанием озона. Такая «озоновая дыра» зафиксирована над Антарктидой в весенние месяцы года. Она имеет обширные области с практически нулевой концентрацией озона. По оценкам специалистов, вклад каталитических процессов в разложение O_3 пока невелик. И хотя источник «озоновой дыры» пока непонятен (естественный или антропоген-

ный), установлено почти двукратное превышение хлорсодержащих частиц в зоне антарктической «дыры» по сравнению со средним значением.

Уменьшение озонового слоя, средняя толщина которого составляет 2,5–3,5 мм, может привести к изменениям облачного покрова Земли, нарушению теплового баланса атмосферы. Рост мощности ультрафиолетового излучения, достигающего поверхности Земли, может оказать существенное влияние на биологические и геохимические процессы. Действие этого излучения вызывает у организмов поверхностные ожоги, разрушает иммунную и генную системы, вызывает онкологические заболевания.

Загрязнение гидросферы

Среди химических загрязнителей воды наибольшую опасность представляют фенолы, нефть, нефтепродукты, тяжелые металлы, пестициды.

Загрязнение океана связано главным образом с поступлением огромного количества вредных антропогенных веществ на его акватории. Постоянно увеличивающаяся нагрузка на Мировой океан ведет к постепенной деградации морских экосистем с неблагоприятными экологическими последствиями. В настоящее время в водные объекты ежегодно поступает более 30 тыс. различных химических соединений в количестве до 1,2 млрд т, а всего на поверхность океанов, морей и рек в результате аварий и сбросов поступают нефть и нефтепродукты в количестве, превышающем 12 млн т/год. Каждая тонна нефти образует на воде пленку площадью до 12 км².

Основной путь поступления токсикантов в воду – прямой сброс; затем по значимости следуют поступления токсикантов с речными стоками и из атмосферного воздуха. Значительное количество загрязнителей поступает в акватории морей в результате уничтожения отходов, а также за счет работы морского транспорта и во время аварий танкеров.

Деятельность человека охватывает практически всю акваторию Океана: поверхность служит для мореплавания и рыболовства; прибрежная зона – для извлечения биологических, минеральных, энергетических ресурсов, интенсивного промышленного и жилищного строительства; дно – для добычи полезных ископаемых и захоронения отходов.

Океаны, как огромные впадины в рельефе Земли, являются местом стока поверхностных вод суши. За небольшим исключением замкнутых бессточных водных объектов, земная поверхность промывается атмосферными осадками. Таким образом, в загрязнении Мирового океана участвуют почти все источники антропогенного происхождения. Основными загрязнителями вод являются взвешенные вещества, нефтепродукты, фосфоробий, фенол, СПАВ, соединения тяжелых металлов.

В водные объекты поступают загрязненные сточные воды бытового, промышленного происхождения, ядохимикаты и удобрения, смываемые с

полей при паводках, загрязненные атмосферные осадки. В результате речных течений и циркуляционных процессов такие загрязнения распределяются на большие пространства и переносятся на сотни и даже тысячи километров.

В Мировой океан сбрасываются для захоронения многие тысячи тонн отходов, в том числе и весьма опасных химически активных веществ. При этом в водную среду поступают неорганические и органические вещества различного химического и фазового состава. Их отрицательное воздействие проявляется как в образующихся донных отложениях, так и при физико-химическом взаимодействии с водами и населяющими их организмами.

Продуктами жизнедеятельности человека и отходами ряда производств являются органические соединения, которые поступают в водные объекты со сточными водами или в результате фильтрации через грунты. Их разложение осуществляется в результате деятельности аэробных микроорганизмов. В процессах брожения при интенсивном потреблении кислорода, растворенного в воде, образуются CO_2 , H_2O , а также нитраты, фосфаты, сульфаты и кислородсодержащие соединения других элементов. Это приводит, с одной стороны, к интенсивному разложению водорослей и растений, что стимулирует рост зоопланктона и внешней фауны, потребляющей кислород для дыхания. С другой стороны, возникающий дефицит кислорода приводит к массовой гибели аэробных организмов и размножению анаэробных микроорганизмов, разрушающих биомассу путем брожения. Анаэробный распад приводит к образованию CH_4 , CO_2 , H_2S , NH_3 , что изменяет состав воды и делает часто невозможным ее возврат к аэробным условиям. Существенно негативное влияние фекальных стоков, особенно из-за повышенного содержания в них мочевины и патогенных микробов. Выделяющийся при разложении аммиак создает в воде щелочную среду, растворяющую белки, вызывая массовую гибель организмов.

Другими органическими загрязнителями являются фенолы, их галогенсодержащие соединения, которые попадают в водные объекты со стоками предприятий по производству клеев, пластмасс, кокса. Весьма опасны органические растворители, широко применяемые в различных химических технологиях (например, хлорированные углеводороды).

В число антропогенных загрязнителей водных объектов входят вещества, которые устойчивы или трудноразрушаемы в водной среде. Нефть и нефтепродукты попадают в водные объекты при бурении скважин, потерях при транспортировке, авариях танкеров, а также в результате сливов при промывании емкостей. На воде нефть образует тонкие пленки, которые постепенно создают эмульсионный слой нефть-вода, покрывающий в настоящее время до 20–30 % поверхности Мирового океана (Большаков, 2005).

Этот слой препятствует газообмену между водой и воздухом. Это ведет к повышению в клетках водных организмов содержания CO и их гибели. У морских птиц нефтяная пленка склеивает оперение, что приводит к утрате

способности держаться на воде и переохлаждению организма. Микробиологический распад нефти идет неделями и даже месяцами. Растворимые продукты окисления могут обладать токсическим действием, а нерастворимые выпадают в осадок, загрязняя донные отложения. Такие продукты отрицательно воздействуют на гидробиоценозы, так как аккумулируются в морской биоте, передаваясь по трофическим цепям. Потребление морепродуктов создает угрозу здоровью людей. В морскую среду ежегодно поступает около 3,5 млн т нефти и нефтепродуктов (табл. 6).

Особое значение приобрело загрязнение биосферы тяжелыми металлами. К ним относятся более 40 химических элементов периодической системы Д. И. Менделеева. Это хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь, цинк, галлий, германий, молибден, кадмий, олово, сурьма, теллур, вольфрам, ртуть, таллий, свинец, висмут и другие.

Главным природным источником тяжелых металлов являются породы (магматические и осадочные) и породообразующие минералы.

Таблица 6

*Концентрация нефтепродуктов в районах Мирового океана
(Большаков, 2005)*

Акватория	Концентрация, мкг/л
Тихий океан, северо-западная часть	0–200
Атлантический океан, северо-восточная часть	0–160
Северное море	0–350
Средиземное море	0–950
Балтийское море	800–8000

Поступление тяжелых металлов в биосферу вследствие техногенного рассеивания осуществляется разнообразными путями. Важнейшим из них является выброс при высокотемпературных процессах в черной и цветной металлургии, при обжиге цементного сырья, сжигании минерального топлива. Кроме того, источником загрязнения биоценозов могут служить орошение водами с повышенным содержанием тяжелых металлов, внесение осадков бытовых сточных вод в почвы в качестве удобрения. Вторичное загрязнение происходит также вследствие выноса тяжелых металлов из отходов рудников или металлургических предприятий водными или воздушными потоками, поступления больших количеств тяжелых металлов при постоянном внесении высоких доз органических, минеральных удобрений и пестицидов, содержащих тяжелые металлы. Часть техногенных выбросов тяжелых металлов, поступающих в атмосферу в виде аэрозолей, переносится на значительное расстояние и вызывает глобальное загрязнение. Другая

часть с гидрохимическим стоком попадает в бессточные водоемы, где накапливается в водах и донных отложениях и может стать источником вторичного загрязнения (Большаков, 2005).

Водоемы, особенно пресные, в значительной степени подвержены загрязнению СПАВ – синтетическими поверхностно-активными веществами. СПАВ поступают в водоемы с бытовыми, промышленными и сельскохозяйственными стоками (в сельском хозяйстве поверхностно-активные вещества используют для эмульгирования пестицидов). В подземные воды поверхностно-активные вещества попадают в результате применения почвенных методов очистки сточных вод на биологических полях, при пополнении запасов сточных вод из открытых водоемов и при загрязнении почвы этими веществами.

Поверхностно-активные вещества относятся к экологически жестким веществам. Они очень трудно ассимилируются природной средой и крайне отрицательно влияют на состояние водоемов. Это обусловлено тем, что на их окисление расходуется много растворенного кислорода, который при этом не участвует в процессах биологического окисления. Очень вредны для гидробионтов детергенты – моющие средства (мыло, стиральные порошки, шампуни). У рыб они вызывают жаберные кровотечения и удушье, а у теплокровных животных нарушают функции биомембран, усиливая тем самым токсическое и канцерогенное влияние других токсикантов водной среды.

Загрязнение почвы

Загрязнение почвы происходит различными типами веществ и классами соединений. Значительное загрязнение вызывается тяжелыми металлами, особенно свинцом, а также цинком и кадмием. Особенно оно проявляется вблизи автострад и на улицах городов. Так, ширина придорожных аномалий свинца в почве достигает 100 м и более. Тяжелые металлы, поступающие на поверхность почвы, накапливаются в почвенной толще, особенно в верхних гумусовых горизонтах, и медленно удаляются при выщелачивании, потреблении растениями, эрозии. Первый период удаления половины от начальной концентрации тяжелых металлов (полуудаления) значительно варьирует у различных элементов и занимает весьма продолжительный период времени: для цинка – от 70 до 510 лет; кадмия от – 13 до 110 лет, меди – от 310 до 1500 лет, свинца – от 770 до 5900 лет (Большаков, 2005).

Тяжелые металлы способны образовывать сложные комплексные соединения с органическими веществами почвы, поэтому в почвах с высоким содержанием гумуса они менее доступны для поглощения. Избыток влаги в почве способствует переходу тяжелых металлов в низшие степени окисления и в растворимые формы.

Растения могут получать из почвы микроэлементы, в том числе тяжелые металлы, аккумулируя их в тканях или на поверхности листьев, являясь таким образом промежуточным звеном в цепи «почва – растение – животное – человек». Различные растения сосредоточивают в себе разное число микроэлементов: в большинстве случаев – избирательно. Так, медь усваивают растения из семейства гвоздичных, кобальт – пасленовые, например, перец. Высокий коэффициент биологического поглощения цинка характерен для березы карликовой и лишайников, никеля и меди – для вероники и лишайников (Большаков, 2005).

Тяжелые металлы являются протоплазматическими ядами, токсичность которых возрастает по мере увеличения атомной массы. Их токсичность проявляется по-разному. Многие металлы при токсичных уровнях концентраций ингибируют деятельность ферментов (медь, ртуть). Некоторые из них образуют комплексные биологически активные органические соединения, которые действуют в живых организмах и почве (хелатоподобные комплексы). При этом они взаимодействуют с обычными метаболитами, нарушая нормальный обмен веществ. Такие металлы, как кадмий, медь, железо (II), взаимодействуют с клеточными мембранами, изменяя их проницаемость.

Почвенные животные, особенно сапрофитные виды, благодаря тесной связи с почвенными условиями и ограниченной территорией обитания могут быть хорошими индикаторами химического загрязнения биосферы. Среди животных такими индикаторами могут быть почвенные беспозвоночные (личинки насекомых, обитающих в почве), европейский крот, рыжая полевка и другие. Располагая сведениями о содержании тяжелых металлов в организме животных, можно прогнозировать их влияние на организм человека.

Особенно большое загрязнение почвы создают пестициды – химические средства, используемые для борьбы с вредителями и болезнями растений, сорняками, вредителями зерна и зернопродуктов, древесины, изделий из хлопка, шерсти, кожи, с эктопаразитами домашних животных, а также с переносчиками опасных заболеваний человека и животных.

Ежегодные потери урожая из-за сорняков и вредителей в мире составляют не менее 30 %, а убытки достигают 70 млрд долларов в год. В настоящее время используется около 700 химических веществ, на основе которых создается несколько тысяч препаратов пестицидов. В России их применение постоянно растет. Однако рост применения пестицидов не дает полной гарантии увеличения урожайности. Пестициды распространяются на большие пространства, весьма удаленные от места их применения. Многие из них могут сохраняться в почвах достаточно долго (до 10 лет).

Хлорорганические инсектициды (гексахлоран, ДДТ) обычно слабо растворимы в воде, очень устойчивы ко всем видам разложения и могут сохраняться в почве десятилетиями, аккумулируясь при систематическом приме-

нении. Остатки ДДТ обнаружены даже в организме пингвинов. Фосфорорганические инсектициды (карбофос, фосфамид и др.) в почве и других природных средах распадаются быстрее.

Пестициды поражают различные компоненты природных экосистем: уменьшают биологическую продуктивность фитоценозов, видовое разнообразие животного мира, снижают численность полезных насекомых и птиц, а в конечном итоге представляют опасность и для самого человека. В почве они вызывают депрессию процесса естественной нитрификации. Уничтожение пестицидами (в форме гербицидов) травяного покрова многократно увеличивает эрозию почвы. Пестициды существенно подавляют деятельность насекомых – опылителей растений, других организмов, не являющихся вредителями. До 80 % пестицидов адсорбируется почвенным гумусом и практически не подвергается биологическому разложению. В результате происходит их постоянная миграция в грунтовые воды и испарение с поверхности почв при их увлажнении и нагреве. Многие виды пестицидов, накапливаясь в почвах, растениях и животных, вызывают заметные изменения в естественных биохимических процессах. Отрицательное воздействие пестицидов на человека – несомненно, хотя и недостаточно изучено. Почва является основным приемником и аккумулятором пестицидов, которые накапливаются в ней в результате адсорбции их молекул почвенными коллоидами.

В последние годы усилия ученых направлены на изучение механизмов биологического концентрирования пестицидов. Показано, что в тканях и органах рыб, обитающих в воде без планктона, может накапливаться больше пестицидов, чем при наличии планктона, за счет сорбции вещества жабрами. Птицы, питающиеся протравленным зерном, могут накапливать в своем теле такое же количество пестицидов, что и насекомоядные птицы, питающиеся содержащими пестициды членистоногими, червями и другими организмами-концентраторами.

Сельскохозяйственные минеральные удобрения увеличивают урожайность сельскохозяйственных культур. Их внесение в почву постоянно увеличивается. Но при этом не все удобрения достигают растений – многое теряется, в частности при вымывании из почвы. Так, пятикратное увеличение количества применяемых азотных удобрений позволило повысить урожайность зерновых культур только на 20 %, а содержание нитратов в почве и в растениях резко возросло. Сельскохозяйственная продукция, содержащая повышенное количество нитратов, имеет пониженную питательную ценность, теряет устойчивость к длительному хранению. Кроме того, аммиачная форма азотных удобрений увеличивает минерализацию гумуса, что приводит к потере им продуктивных свойств.

Попадание нитратов в организм человека приводит к разрушению гемоглобина крови и, как следствие, к явлениям сердечной недостаточности. В кислой среде организма в результате образования нитрозоаминов возникают канцерогены.

Избыток в почве фосфорных удобрений обогащает фтором и мышьяком растения, что весьма вредно для питающихся ими животных. Значительная доля фосфорных удобрений не усваивается растениями, не вовлекается в биохимический круговорот, а около 5 % выносятся в водные объекты (Большаков, 2005).

Калийные удобрения (KNO_3 , K_2SO_4 , KCl) в силу высокой растворимости в воде в значительной степени вымываются в близлежащие водоемы.

Наряду с минеральными удобрениями в сельском хозяйстве широко используют органические удобрения (навоз, торф, компост). При большом количестве в почвах таких удобрений, содержащих много патогенных микроорганизмов, и при обогащении водной среды ими создаются условия для возникновения очагов болезнетворных организмов. Применение в качестве удобрений ила очистных сооружений и компоста после переработки отходов может создавать дополнительные проблемы. В таких удобрениях содержатся высокие концентрации тяжелых металлов и органических загрязнителей. Поэтому их использование возможно главным образом для цветоводства и выращивания декоративных растений.

ФИЗИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

Физическое загрязнение связано с изменением физических, энергетических, волновых и радиационных параметров внешней среды. Так, тепловое загрязнение проявляется в ухудшении режима земной поверхности и водоемов. К этому виду загрязнений относится воздействие шума и электромагнитного излучения, причем источниками последнего служат высоковольтные линии электропередач, электроподстанции, антенны радио- и телепередающих станций, а в последнее время также микроволновые печи, компьютеры и радиотелефоны. Особую опасность представляет радиоактивное загрязнение, главными источниками которого являются последствия испытаний ядерного оружия, аварии на ядерных объектах, а также радиоактивные отходы. Вносит свой вклад в уровень радиоактивного загрязнения и естественная радиоактивность, особенно радоновая.

Тепловое загрязнение

Повышение температуры окружающей среды за счет деятельности человека вносит значительный вклад в загрязнение биосферы. За 1880–1940 гг. было добыто 50 млрд т так называемого условного топлива (29,3–106 Дж/кг). Это означает, что в атмосферу было выброшено 1,465–1021 Дж тепла, которого достаточно, чтобы растопить 4,8 тыс. км³ льда. Общая глобальная площадь снежно-ледяного покрова сократилась к середине предыдущего столетия примерно на 10 %. А это серьезно уменьшило отражательную способность планеты – ее альбедо, вследствие чего средняя температу-

ра земной поверхности повысилась. Ежегодно в мире сжигается до 5 млрд т угля и 3,2 млрд т нефти. Это сопровождается ежегодным выбросом в атмосферу около 18 млрд т углекислого газа и выделением 21 020 Дж тепла (Большаков, 2005).

Переход от минерального горючего к ядерному до некоторой степени уменьшает химическое загрязнение среды, но при этом возрастает тепловое загрязнение. Так, при производстве 3,6–10 Дж электроэнергии на тепловой станции тепловые отходы в атмосферу и воду, используемую для охлаждения, составляют соответственно 1,67–106 и 5,65–105 Дж, а на современной атомной электростанции – 5,44–105 и 7,95–106 Дж. Таким образом, атомная электростанция средних размеров, производящая 3000 МВт электроэнергии, производит тепловой поток свыше 5,82–109 Вт. Следовательно, для рассеивания тепла требуется водная поверхность порядка 0,6 га на 1 МВт, или 1800 га на электростанцию мощностью 3000 МВт в местностях с умеренным климатом (Большаков, 2005).

Мощные тепловые электростанции отводят большое количество тепла с подогретыми сбросными водами в реки, озера, искусственные водохранилища, тем самым влияя на термический и биологический режимы водоемов.

Локальные вредные воздействия теплового загрязнения на водные поверхности таковы:

- при повышении температуры воды животным требуется больше кислорода, так как в теплой воде его содержание понижено в связи с меньшей растворимостью;

- высокая температура благоприятствует замене обычной флоры водорослей менее желательными синезелеными водорослями;

- повышение температуры воды часто усиливает восприимчивость организмов к токсичным веществам (которые, несомненно, присутствуют в загрязненной воде);

- температура может превысить критические значения для стенотермных стадий жизненных циклов водных организмов (Большаков, 2005).

Источниками теплового загрязнения в пределах городских территорий служат подземные газоходы промышленных предприятий металлургического производства, теплотрассы, сборные коллекторы, коммуникационные туннели, туннели метро и другие подземные сооружения.

Реальные техногенные вариации температурных полей не оказывают непосредственного влияния на человеческий организм, однако вызываемые ими негативные геологические процессы могут ухудшать условия жизни и труда, а в отдельных случаях – даже делать их опасными.

Шумовое загрязнение

Шумовое загрязнение является одним из серьезных физических загрязнителей биосферы. Адаптация организмов к шуму у человека и живот-

ных практически отсутствует. Измерение, регуляция и ограничение (в законодательном порядке) шумового загрязнения следует поставить в один ряд с мероприятиями, направленными на борьбу с другими видами загрязнений. Шум – сочетание акустических волн различной частоты и интенсивности. Основными параметрами акустических волн являются интенсивность и спектральный состав. Последний определяется простыми гармоническими колебаниями, которые характеризуются фазой, частотой и амплитудой.

Звуковые волны представляют собой колебательные изменения давления воздуха – сгущения и разрежения. Интенсивность звука – это количество энергии, переносимое звуковой волной за единицу времени через единицу площади поверхности, нормальной к направлению распространения волны. Интенсивность звука определяется изменением уровня давления в окружающей среде.

Минимальное значение звукового давления, воспринимаемое ухом человека, называется пороговым. Для характеристики уровня шума используют особый показатель, называемый уровнем интенсивности звука, или уровнем звукового давления, измеряемым в децибелах (дБ). В табл. 7 приведены значения этого показателя некоторых источников шума.

Таблица 7

*Уровень шума от некоторых источников, дБ
(Большаков, 2005)*

Уровень шума, дБ	Источник звука
160	Выстрел крупнокалиберного орудия на расстоянии 1–2 м от орудия
120	Шум самолета на удалении 50 м
100–110	Газотурбинные установки, компрессорные станции
80–100	В шумных цехах машиностроительных и металлургических заводов
90–100	Железнодорожный транспорт на расстоянии 20 м
95	Шум в вагоне метро при скорости 60 км/ч
90	Шум в кабине пассажирского самолета
77–83	Автомобильный транспорт на расстоянии 7,5 м
60	Нормальная речь
30–40	Шепот на расстоянии 1 м
15	Шелест листьев на расстоянии нескольких метров
0	Порог слышимости при 1000 Гц

Биологическое действие звуковых колебаний инфразвукового диапазона, сопутствующих некоторым природным явлениям, известно давно – это ощущение психологического дискомфорта, переживание безотчетного

страха, возникновение паники среди животных, наблюдаемые перед извержением вулканов, при землетрясениях, перед штормами. Подобную реакцию у животных вызывают звуки пролетающих тяжелых вертолетов, движущихся тяжелых машин, работающих прессов и других устройств, работа которых сопровождается шумом с инфразвуковыми частотами в спектре. Особенно неблагоприятно воздействие на организм человека инфразвуковых колебаний с частотой 4–10 Гц.

Вибрационное загрязнение

Вибрация – это совокупность механических колебаний. Вибрации могут способствовать звукоизлучению в окружающую среду и являться источником вредных, прежде всего инфразвуковых, волн. Кроме того, воздействуя непосредственно на скелет человека, вибрации могут передаваться с малым затуханием в любую точку организма и приводить даже при относительно малых уровнях вибраций к значительным последствиям, связанным с резонансными явлениями в организме человека.

Источниками вибраций являются транспортные средства, промышленные агрегаты, строительные машины и механизмы. Основная часть колебательной энергии переносится поверхностными волнами, распространяющимися в пределах самой верхней части грунтовой толщи (до 10–15 м).

Воздействие вибраций на грунт может приводить к изменению рельефа поверхности, ухудшению механической устойчивости пород, служащих основанием фундаментов зданий и инженерных сооружений. При длительном воздействии вибраций возникает явление «усталости» грунтов, материалов и строительных конструкций.

Электромагнитное загрязнение

Оно вызывается электромагнитными излучениями и является результатом изменения электромагнитных свойств окружающей среды (электромагнитного фона). Источниками естественных электромагнитных полей (ЭМП) являются атмосферное электричество, солнечное и космическое излучения. Естественные изменения электромагнитного фона вследствие существенного изменения солнечной активности, магнитных бурь и других факторов называют электромагнитными аномалиями.

Научно-технический прогресс привел к тому, что уровень ЭМП, созданных человеком, в отдельных районах выше среднего уровня естественных полей в сотни раз. В этой связи говорят об антропогенном электромагнитном загрязнении.

В условиях современного города на организм человека оказывают влияние электромагнитные поля, источниками которых являются различ-

ные генераторы и антенны радиопередающих устройств, электрифицированные транспортные линии, линии электропередач (ЛЭП), трансформаторы, электротехнические устройства автоматики, приборы бытовой техники, мобильная телефонная (сотовая) связь.

Токи промышленной частоты (50 Гц) являются сильными источниками электромагнитных волн. Измерения напряженности поля в районах прохождения высоковольтных ЛЭП показали, что под линией она может достигать нескольких тысяч и даже десятков тысяч вольт на метр. Волны этого диапазона сильно поглощаются почвой, поэтому на небольшом удалении от линии (50–100 м) напряженность поля падает до нескольких сотен и даже нескольких десятков вольт на метр. Наибольшая напряженность поля наблюдается в месте максимального провисания проводов по линии точек проекции крайних проводов на землю.

Наиболее чувствительна к воздействию ЭМП нервная система человека. Ее функциональные нарушения влекут за собой нарушения других систем организма, в частности эндокринного аппарата, а также обменных процессов.

Основные источники высокочастотной энергии в среде обитания человека – радио- и телепередающие центры, радиолокаторы, а в последние годы также микроволновые печи, мониторы компьютеров и сотовые телефоны.

Широкие исследования показали, что микроволновое (сверхвысокочастотное) облучение вызывает нарушения в организме, характеризующиеся повышением температуры. Микроволны вызывали катаракту хрусталика у ряда экспериментальных животных.

Оценивая биологическое влияние ЭМП в целом, можно отметить, что воздействие слабых ЭМП на целостный организм животных чаще всего приводит к нарушениям физиологических функций: ритма сердечных сокращений и уровня кровяного давления, электрической активности мозга и возбудимости нервных клеток, обменных процессов, иммунной активности. Под действием таких полей изменяются поведение животных, их двигательная активность, ориентация в пространстве и времени, способность к выработке условных рефлексов на различные раздражители (Большаков, 2005).

Под воздействием слабых ЭМП у человека могут возникать чувственные ощущения – зрительные, слуховые, осязательные, а у животных – разнообразные эмоциональные реакции: резкая возбудимость или подавленное состояние, оборонительные реакции или настороженность. При определенных параметрах электромагнитное поле может служить раздражителем для выработки у человека и животных условных рефлексов – сосудистых, пищевых, оборонительных и др.

Наиболее высока чувствительность организмов к многократным воздействиям ЭМП. При этих условиях имеет место кумулятивный эффект: реакции возникают в результате ряда воздействий, каждое из которых в от-

дельности не вызывает реакции. Подобные суммарные эффекты наблюдаются и при длительном непрерывном воздействии ЭМП.

Радиоактивное загрязнение¹

Радиоактивное загрязнение представляет особую опасность для человека и всей биосферы. Явление радиоактивности связано с самопроизвольным распадом атомных ядер, приводящим к изменению их атомного номера или массового числа и сопровождающимся альфа-, бета- и гамма-излучениями. Альфа-излучение – поток тяжелых частиц, состоящий из протонов и нейтронов, который задерживается листом бумаги и не способен проникнуть сквозь кожу человека. Однако он становится чрезвычайно опасным, если попадает внутрь организма, где вызывает процессы ионизации и распада. Бета-излучение обладает более высокой проникающей способностью и проходит в ткани человека на 1–2 см. Гамма-излучение может задерживаться лишь толстой свинцовой или бетонной плитой.

Процесс самопроизвольного распада нестабильного атома называется радиоактивным распадом, а сам нестабильный атом – радионуклидом. Время, за которое распадается в среднем половина всех радионуклидов данного типа, принято считать периодом полураспада соответствующего нуклида, а число распадов в секунду в радиоактивном образце – его активностью. Единицей измерения активности в системе СИ является 1 беккерель (Бк, Bq), который равен одному распаду в секунду. Количество энергии излучения, переданной тканям организма, называется дозой, а количество такой энергии, поглощенной единицей массы облучаемого тела, – поглощенной дозой, измеряемой по системе СИ в греях (Гр, Gy) ($1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$). Однако при одной и той же поглощенной дозе альфа-излучение гораздо опаснее бета- и гамма-излучений (в 20 раз). Пересчитанная с учетом этой кратности доза альфа-излучения считается эквивалентной дозой. Ее единицей в системе СИ является зиверт (Зв, Sv).

Кроме того, широко распространены внесистемные единицы: кюри (Ки, Ci) – единица активности изотопа ($1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$), рад (рад, rad) – единица поглощенной дозы облучения ($1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$), бэр (бэр, rem) – единица эквивалентной дозы ($1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$).

Радионуклиды подразделяются на естественные (образовавшиеся на начальном этапе эволюции Земли и при последующих геологических процессах) и искусственные (полученные человеком в атомных реакторах и других энергетических установках). Основную часть облучения (более 80 % годовой эффективной эквивалентной дозы) население земного шара полу-

¹ По Большакову, 2005, с привлечением данных о последних чрезвычайных происшествиях.

чает от естественных источников радиации. Среди естественных радионуклидов выделены четыре группы: долгоживущие (уран-238, уран-235 (актиноуран), торий-232); короткоживущие (радий, радон и другие радиоактивные элементы) – дочерние продукты распада урана, актиноурана и тория; долгоживущие одиночные радиоактивные изотопы, не образующие семейств (калий-40); радионуклиды, возникающие в атмосфере, гидросфере и земной коре в результате взаимодействия космических частиц с атомными ядрами вещества Земли (углерод-14 и др.).

Уровни земной радиации неодинаковы в разных районах и зависят от концентрации радионуклидов вблизи поверхности. Аномальные радиационные поля природного происхождения образуются при обогащении ураном, торием, некоторых типов гранитов и других магматических образований с повышенным коэффициентом эманирования; на месторождениях радиоактивных элементов в различных породах; при современном привносе урана, радия, радона в подземные и поверхностные воды, геологическую среду. Высокой радиоактивностью часто характеризуются угли, фосфориты, горючие сланцы, некоторые глины и пески, в том числе пляжные.

Зоны повышенной радиоактивности распределены на территории России неравномерно. Они известны как в европейской части, так и в Зауралье, на Полярном Урале, в Западной Сибири, Прибайкалье, на Дальнем Востоке, Камчатке, северо-востоке России. В большинстве комплексных пород, геохимически ориентированных на радиоактивные элементы, значительная часть урана находится в подвижном состоянии, легко извлекается и попадает в поверхностные, подземные воды, а затем в пищевую цепь. Именно природные источники ионизирующего излучения в зонах аномальной радиоактивности вносят основной вклад (до 70 %) в суммарную дозу облучения населения, равную 420 мбэр/год. При этом данные источники могут создавать высокие уровни радиации, влияющие в течение длительного времени на жизнедеятельность человека и вызывающие различные заболевания вплоть до генетических изменений в организме.

Среди естественных радионуклидов наибольшее радиационно-генетическое значение имеют радон и его дочерние продукты распада (радий и др.). Их вклад в суммарную дозу облучения на душу населения составляет более 50 %. Радоновая проблема в настоящее время считается приоритетной в развитых странах, в которых ей уделяется повышенное внимание. Опасность радона (период полураспада 3,823 суток) заключается в его широком распространении, высокой проникающей способности и миграционной подвижности, распаде с образованием радия и других высокорadioактивных продуктов. Радон не имеет цвета, запаха и считается невидимым врагом, угрозой для миллионов жителей Западной Европы, Северной Америки.

Образующиеся при распаде радона радиоактивные продукты в виде мельчайших твердых частиц легко проникают в органы дыхания и осажда-

ются в них, испуская альфа-лучи. По сообщениям печати, около 8 млн домов в США (10 % всего количества) наполнены радоном свыше принятых норм. В плохо проветриваемых помещениях радон накапливается, что усугубляет ситуацию. Отмечаются случаи наличия радона в водопроводной воде, используемой для питьевых нужд. Радон, радий и уран в количествах, часто превышающих ПДК для питьевой воды, обнаружены во всех штатах США.

В России радоновой проблеме начали уделять внимание лишь в последние годы. Территория нашей страны в отношении радона слабо изучена. Полученная в предыдущие десятилетия информация позволяет утверждать, что и в Российской Федерации радон широко распространен как в приземном слое атмосферы, почвенном воздухе, так и в подземных водах, включая источники питьевого водоснабжения.

Ядерная энергетика (при условии строжайшего выполнения необходимых требований) экологически чище, нежели теплоэнергетика, поскольку исключает вредные выбросы в атмосферу (золы, диоксидов углерода, серы, оксидов азота и пр.). Это обстоятельство объясняет строительство и эксплуатацию атомных электрических станций (АЭС), при нормальной работе которых выбросы радионуклидов в окружающую среду незначительны.

Согласно базе данных МАГАТЭ по энергетическим реакторам, на начало 2011 г. в мире эксплуатировались 442 ядерных энергоблока общей мощностью 375 001 МВт (примерно 20 % мирового производства электроэнергии). Самые сдержанные прогнозы говорят о том, что в перспективе 2030 г. на планете будет эксплуатироваться до 500 энергоблоков.

Ежегодно атомные станции в Европе позволяют избежать эмиссии 700 млн т CO_2 , а в Японии – 270 млн т CO_2 . Действующие АЭС России ежегодно предотвращают выброс в атмосферу 210 млн т углекислого газа. По этому показателю наша страна находится на четвертом месте в мире.

Тем не менее, любая АЭС независимо от уровня ее защиты представляет собой потенциально опасный объект. В зависимости от места аварии на АЭС и ее масштаба возможно загрязнение среды такими радионуклидами, как стронций-90, цезий-137, церий-141, йод-131, рутений-106 и др. Отсюда высокие требования к обеспечению надежности атомных реакторов, а также к соблюдению жестких правил их эксплуатации, гарантирующих безаварийную работу.

Авария на Чернобыльской атомной электростанции, расположенной на территории Украинской ССР (ныне Украина), произошла 26 апреля 1986 г. в результате разрушения четвертого энергоблока. Разрушение носило взрывной характер, реактор был полностью разрушен, и в окружающую среду было выброшено большое количество радиоактивных веществ. В отличие от бомбардировок Хиросимы и Нагасаки, взрыв напоминал очень

мощную «грязную бомбу» – основным поражающим фактором стало радиоактивное заражение.

Авария расценивается как крупнейшая за всю историю атомной энергетики, как по предполагаемому количеству погибших и пострадавших от ее последствий людей, так и по экономическому ущербу. 31 человек погиб в течение первых трех месяцев после аварии. Наибольшие дозы получили примерно 1000 человек, находившиеся рядом с реактором в момент взрыва и принимавшие участие в аварийных работах в первые дни после него. Эти дозы варьировали от 2 до 20 грэй (Гр) и в ряде случаев оказались смертельными. Более 115 тыс. человек из тридцатикилометровой зоны были эвакуированы. Для ликвидации последствий были мобилизованы значительные ресурсы, в ликвидации последствий аварии участвовали более 600 тыс. человек.

В результате аварии в атмосферу было выброшено, по разным данным, от 190 до 765 т радиоактивных веществ, с суммарной активностью не менее 50 млн кюри. Суммарный выброс радиоактивных продуктов в атмосферу в радиусе 300–400 км от станции составил 77 кг. Для сравнения – при взрыве атомной бомбы над Хиросимой количество радионуклидов не превысило 740 г. Люди в Чернобыле подверглись облучению в 100 раз большему, чем при падении бомбы на Хиросиму.

В состав радиоактивных осадков вошло около 30 радионуклидов с периодом полураспада от 11 (криптон-85) до 24 100 (плутоний-239) часов.

Облако, образовавшееся от горящего реактора, разнесло различные радиоактивные материалы, и прежде всего радионуклиды йода и цезия, по большей части территории Европы. Наибольшие выпадения отмечались на значительных территориях в Советском Союзе, расположенных вблизи реактора и относящихся теперь к территориям Белоруссии, Российской Федерации и Украины.

Загрязнению подверглось более 200 тыс. км², примерно 70 % – на территории Белоруссии, России и Украины. Чернобыльским выбросом в различной степени загрязнены 80 % территории Белоруссии, северная часть Правобережной Украины и 17 областей Российской Федерации.

Радиоактивные вещества распространялись в виде аэрозолей, которые постепенно осаждались на поверхность земли. Загрязнение было очень неравномерным, оно зависело от направления ветра в первые дни после аварии. Наиболее сильно пострадали области, в которых в это время прошел дождь. Большая часть стронция и плутония выпала в пределах 100 км от станции, так как они содержались в основном в более крупных частицах. Йод и цезий распространились на более широкую территорию. Загрязнение не ограничилось тридцатикилометровой зоной. Было отмечено повышенное содержание цезия-137 в лишайнике и мясе оленей в арктических областях России, Норвегии, Финляндии и Швеции.

Из-за аварии на ЧАЭС пять миллионов гектаров земли стали непригодны для сельского хозяйства, тридцатикилометровая зона вокруг АЭС стала зоной отчуждения, были уничтожены более 100 поселков.

Другая крупная авария, к счастью, не сравнимая по тяжести последствий с чернобыльской, произошла на японской атомной станции «Фукусима-1». В результате землетрясения в Японии 11 марта 2011 г. из строя вышли системы охлаждения на двух АЭС Японии. Наибольший ущерб был нанесен станции «Фукусима-1», на четырех энергоблоках которой произошла серия взрывов и пожаров. Авария привела к крупной утечке радиации. Чрезвычайное происшествие получило максимальную оценку опасности по международной шкале INES. Население, проживающее в радиусе 20 км от АЭС «Фукусима-1» и «Фукусима-2», было эвакуировано. Восстановительные работы продолжались несколько месяцев. В августе компания-оператор АЭС приступила к строительству защитного купола над наиболее поврежденным реактором станции. В конце 2011 г. правительство Японии объявило о холодной остановке аварийных реакторов. Японское правительство оценило общее количество радиоактивности в атмосфере после аварии, составляющее примерно одну десятую количества, которое было выпущено на Чернобыльской АЭС.

Антропогенными источниками радиоактивных загрязнений среды являются радиоактивные аэрозоли, вносимые в атмосферу ядерными взрывами или предприятиями атомной промышленности, а также радиоактивные отходы, сбрасываемые в гидросферу или литосферу. Прежде всего, к ним относятся радиоактивные отходы предприятий по добыче и обогащению урановой или ториевой руды, переработке ядерного горючего, получению металлов из ртутных концентратов, изготовлению тепловыделяющих элементов, регенерации ядерного горючего, а также при многих вспомогательных, ремонтных и дезактивационных работах.

Радиоактивное загрязнение биосферы при переработке ядерного горючего связано с наличием большого числа обстоятельств, возникающих вследствие отклонения от заданного технологического режима и сопровождающихся аварийными выбросами в окружающую среду радионуклидов.

В коммунальных условиях внешнее облучение может практически полностью определяться радиоактивностью строительных материалов. К таким материалам относятся некоторые разновидности гранитов, пемзы, а также бетона, при производстве которого использовались глинозем, фосфогипс и кальций-силикатный шлак, обладающие довольно высокой удельной радиоактивностью. Отмечались случаи, когда в бетон попадали высокордиоактивные вещества. В закрытых и непроветриваемых помещениях продукты распада урана и тория (в том числе радон) накапливаются и создают высокие уровни радиации.

Уран и другие радионуклиды могут в значительных количествах выбрасываться в атмосферу при работе ТЭЦ, котельных, автотранспорта. Это свя-

зано с тем, что угли и нефти иногда характеризуются повышенной ураноносностью. Площадь такого радиоактивного загрязнения может быть обширной.

В настоящее время радиационная обстановка в России определяется глобальным радиоактивным фоном, наличием загрязненных территорий, образовавшихся вследствие чернобыльской (1986) и кыштымской (1957) аварий, эксплуатацией урановых месторождений, предприятий ядерного топливного цикла, судовых ядерно-энергетических установок, региональных хранилищ радиоактивных отходов, а также аномальными зонами ионизирующих излучений, связанных с природными источниками радионуклидов.

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

Биологическое загрязнение может быть случайным или вызванным деятельностью человека. Оно проявляется через проникновение в эксплуатируемые экосистемы и технологические устройства чуждых данной территории растений, животных и микроорганизмов (последние могут вообще быть чуждыми природным условиям, в которых обитает человек). Особенно сильно загрязняют среду предприятия, производящие антибиотики, ферменты, вакцины, сыворотки, кормовой белок, биоконцентраты и другие предприятия промышленного биосинтеза, в выбросах которых присутствуют живые микроорганизмы. К биологическому загрязнению следует также отнести преднамеренную интродукцию и случайную инвазию видов растений и животных с территорий, не относящихся к их естественному ареалу.

Результаты интродукции живых организмов в новую среду ведут не только к постепенному изменению распределения видов на планете, но и создают прецеденты их весьма неблагоприятного воздействия на естественные условия. Интродуцированный или инвазионный вид, не имеющий естественных врагов на новой территории (хищников, паразитов) и находящийся вне конкуренции в свободной экологической нише, обычно дает в своем развитии из поколения в поколение вспышку массовой численности. Примером инвазионного вида может быть колорадский жук. Его естественный ареал охватывает юг Северной Америки, где он питается дикими пасленовыми растениями. В 1920 г. он был обнаружен во Франции. Дальнейшее его распространение по всему миру произошло с развитием культуры картофеля. Примером неудачной интродукции может служить пятнистый олень, завезенный в числе нескольких голов специально как ценное промысловое животное в Хоперский государственный заповедник в Воронежской области. Здесь для него были подготовлены условия для беспрепятственного размножения – уничтожены волки, а аборигенный вид, благородный олень, был вывезен за пределы заповедника. В итоге через три десятка лет пятнистый олень на территории всего в 16 тыс. га размножился в числе 4 тыс. голов. При этом олени стали сильно уничтожать подрост деревьев (питаются молодыми ветками и порослью). Сами же олени были поражены на 100 %

паразитическими червями. Поголовье пятнистого оленя стало приходить в упадок, а экосистема заповедника оказалась сильно нарушенной. В начале XXI в. вся популяция интродуцированного вида в Хоперском заповеднике была ликвидирована.

Из трех сфер обитания жизни на Земле – воздуха, воды и почвы – наиболее подвержена биологическому загрязнению гидросфера. Биогенное загрязнение воды вызывает усиленное развитие фитопланктона, приводящее к тому, что вода начинает «цвести». Под «цветением» воды понимают интенсивное развитие синезеленых водорослей. В период «цветения» концентрация водорослей достигает величины 1–5 млн клеток в 1 мл, или 1000–5000 млрд в 1 м³ воды, которая приобретает вид зеленого бульона.

При этом в воде образуются токсичные вещества, качество воды ухудшается, появляются посторонние неприятные запахи. Купание в такой воде недопустимо из-за развития аллергической реакции на нее. В периоды отмирания большой массы микро- или макрорастительности происходит еще более резкое ухудшение качества воды, снижается содержание растворенного кислорода, появляются неприятные запахи. Это явление (изменение качества воды в результате нарушения естественного хода биологических процессов) получило название вторичного (биологического) загрязнения. Наглядным примером сильного биологического загрязнения искусственно-водоема является современное состояние Воронежского водохранилища.

Под влиянием эвтрофирования и загрязнения водоемов значительно изменяются их биологические показатели, увеличивается видовое разнообразие, повышается численность и биомасса бактерий и грибов. Видовой состав водорослей и высших водных растений при росте их численности и биомассы уменьшается. В клетках гидробионтов накапливаются металлы, нефтепродукты и другие опасные соединения. Фауна водоемов изменяется качественно и количественно, многие виды беспозвоночных и позвоночных животных вымирают. Сокращается численность и биомасса рыбы, в том числе ценной; ухудшается санитарно-эпидемиологическая ситуация при усиленном размножении паразитирующих организмов, патогенной микрофлоры вирусов. Усиливаются заболевания гидробионтов, птиц, водных животных.

К основным причинам «цветения» воды относятся резкое сокращение скорости течения воды, перемешивания и, как следствие, образование застойных зон. На интенсивность развития водорослей большое влияние оказывает температура воды. Пересыщение водоемов питательными веществами (азотом, фосфором, органическими соединениями) представляет собой третью причину интенсификации роста водорослей (Большаков, 2005). Источниками биогенных элементов являются удобрения, вносимые в почву, воды канализации, поступления из затопленных почв, наконец, многолетние донные отложения. Синезеленые водоросли чрезвычайно стойки, на любую экологическую катастрофу они откликаются первыми, изменяя характер своего развития и приспособляясь к новым условиям. Комплекс

всех этих причин и вызывает «цветение» воды. Возникнув в силу сложившихся в водоеме условий, этот процесс повторяется из года в год с разной интенсивностью и в разных масштабах.

Ухудшение основных химических показателей воды при ее «цветении» связано с прижизненным ростом водорослей и разложением образованного ими органического вещества. В воде, подверженной интенсивному «цветению», обнаружено и идентифицировано порядка 200 разнообразных химических соединений, в том числе представляющих опасность для человека (токсины, канцерогенные вещества, аллергены). В скоплениях водорослей в результате возникающих там процессов накапливаются ацетон, масляная и уксусная кислоты, бутиловый спирт. В воде появляются фенолы (причем их концентрация может в 10 раз превышать допустимую санитарную норму), индолсодержащие компоненты, меркаптаны, амины, а рН воды снижается до 4–5 и ниже. Под влиянием поверхностной пленки водорослей усиливается нагрев воды (на 6–8 °С выше нормы), что повышает испарение и способствует переходу летучих водорослевых метаболитов в воздух, вызывая его загрязнение.

Вследствие большой концентрации органических соединений создается неблагоприятная санитарно-эпидемиологическая обстановка, поскольку они служат питательной средой для развития и сохранения патогенной микрофлоры. В результате вода из полноценного и доброкачественного природного продукта превращается в опасную для всего живого жидкость. Особо серьезные последствия возникают там, где к биологическому загрязнению добавляются химическое и тепловое.

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

Николайкин Н. И. Экология : учеб. для вузов / Н. И. Николайкин, Н. Е. Николайкина, О. П. Мелехова. – 7-е изд. – М. : Дрофа, 2009. – 622 с.

Пономарева И. Н. Общая экология : учеб. пособие / И. Н. Пономарева, В. П. Соломин, О. А. Корнилова. – Ростов н/Д : Феникс, 2009. – 538 с.

Коробкин В. И. Экология : учеб. для вузов / В. И. Коробкин, Л. В. Передельский. – 16-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д : Феникс, 2010. – 602 с.

Дополнительная литература

Алексеев В. П. Историческая антропология и этногенез / В. П. Алексеев. – М. : Наука, 1989. – 449 с.

- Баренбаум А. А. Галактическая цикличность земных катастроф / А. А. Баренбаум // Экосистемные перестройки и эволюция биосферы. – 1995. – № 2. – С. 30–34.
- Безуглова О. С. Биогеохимия / О. С. Безуглова, Д. С. Орлов. – Ростов н/Д : Феникс, 2000. – 320 с.
- Большаков В. Н. Экология : учеб. / В. Н. Большаков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Логос, 2005. – 504 с.
- Будыко М. И. Изменения окружающей среды и смены последовательных фаун / М. И. Будыко. – Л. : Гидрометеиздат, 1982. – 78 с.
- Вернадский В. И. Биосфера и ноосфера / Предисловие Р. К. Баландина / В. И. Вернадский. – М. : Айрис-пресс, 2004. – 576 с.
- Григорьев А. А. О периодическом законе географической зональности / А. А. Григорьев, М. И. Будыко // Докл. АН СССР. – 1956. – Т. 110. – Вып. 1. – С. 129–132.
- Данилов-Данильян В. И. Современная глобализация и ее восприятие в мир / В. И. Данилов-Данильян // Век глобализации. – 2008. – № 1. – С. 45–57.
- Еськов К. Ю. История Земли и жизни на ней : от хаоса до человека / К. Ю. Еськов. – М. : ЭНАС, 2004. – 312 с.
- Жмур С. И. Литифицированные остатки микроорганизмов в углистых хондритах / С. И. Жмур, А. Ю. Розанов, В. М. Горленко // Геохимия. – 1993. – № 1. – С. 66–68.
- Заварзин Г. А. Бактериальная палеонтология / Г. А. Заварзин, А. Ю. Розанов // Вестник РАН. – 1997. – Т. 67. – Вып. 3. – С. 241–245.
- Иванов А. В. Происхождение многоклеточных животных. Филогенетические очерки / А. В. Иванов. – Л. : Наука, 1968. – 287 с.
- Камлюк Л. В. Глобальная экология : курс лекций / Л. В. Камлюк. – Минск : БГУ, 2004. – 127 с.
- Козо-Полянский Б. М. Новый принцип биологии. Очерк теории симбиогенеза / Б. М. Козо-Полянский. – Л.-М. : Пучина, 1924. – 147 с.
- Маргелис Л. Роль симбиоза в эволюции клетки / Л. Маргелис. – М. : Мир, 1983. – 352 с.
- Марфенин Н. Н. Устойчивое развитие человечества / Н. Н. Марфенин. – М. : МГУ, 2006. – 624 с.
- Пармон В. Н. Пребиотическая фаза зарождения жизни / В. Н. Пармон // Вестник Российской академии наук. – 2002. – Т. 72. – Вып. 11. – С. 976–983.
- Петров К. М. Биогеография : учеб. для вузов / К. М. Петров. – М. : Академический Проект, 2006. – 400 с.
- Простаков Н. И. Биоэкология / Н. И. Простаков. – Воронеж : ВГУ, 1999. – 270 с.
- Реймерс Н. Ф. Природопользование. Словарь-справочник / Н. Ф. Реймерс. – М. : Мысль, 1990. – 639 с.

Розанов А. Ю. Цианобактерии и, возможно, низшие грибы в метеоритах / А. Ю. Розанов // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 11. – С. 61–65.

Розанов А. Ю. Когда появилась жизнь на Земле? / А. Ю. Розанов // Вестник Российской Академии Наук. – 2010. – Т. 80. – Вып. 5–6. – С. 533–541.

Розанов А. Ю. Бактериально-палеонтологический подход к изучению метеоритов / А. Ю. Розанов // Вестник РАН. – 2000. – Т. 70. – С. 214–233.

Снытников В. Н. Астрокатализ как стартовый этап геобиологических процессов. Жизнь создает планеты? / В. Н. Снытников // Эволюция биосферы и биоразнообразия. К 70-летию А. Ю. Розанова. – М. : Товарищество научных изданий КМК, 2006. – С. 49–59.

Спирин Ф. С. Биосинтез белков, мир РНК и происхождение жизни / Ф. С. Спирин // Вестник Российской Академии Наук. – 2001. – Т. 71. – Вып. 4. – С. 320–328.

Хроники науки [Электронный ресурс] коллективный проект, посвященный научным теориям и фактам. – 2010–2012. – Режим доступа: <http://xroniki-nauki.ru/teorii/aminokisloty-iz-pepla>.

Чернова Н. М. Общая экология : учеб. для студ. педаг. вузов / Н. М. Чернова, А. М. Былова. – М. : Дрофа, 2004. – 416 с.

Шилова Е. И. Основы учения о биосфере : учеб. пособие / Е. И. Шилова, Т. А. Банкина. – СПб. : Изд-во СПб. ун-та, 1994. – 200 с.

Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических молекул / М. Эйген. – М. : Мир, 1973. – 224 с.

Эйген М. Гиперцикл. Принципы самоорганизации макромолекул / М. Эйген, П. Шустер. – М. : Мир, 1982. – 268 с.

Юшкин Н. П. Сингенез, взаимодействие и коэволюция живого и минерального мира : абиогенные и углеводородные кристаллы как модели протобиологических систем. Концепция кристаллизации жизни / Н. П. Юшкин, М. В. Гаврилюк, Е. А. Голубев // Информационный бюллетень РФФИ. – Т. 4. – С. 393.

Учебное издание

ОСНОВЫ УЧЕНИЯ О БИОСФЕРЕ

Учебно-методическое пособие для вузов

Составители

Голуб Виктор Борисович,
Негробов Олег Павлович,
Соболева Виктория Александровна

Редактор О. А. Исаева

Компьютерная верстка Е. Н. Комарчук

Подп. в печ. 11.05.2012. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 8,4. Тираж 100 экз. Заказ 199.

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета.
394000, г. Воронеж, пл. им. Ленина, 10. Тел. (факс): +7 (473) 259-80-26
<http://www.ppc.vsu.ru>; e-mail: pp_center@ppc.vsu.ru

Отпечатано в типографии
Издательско-полиграфического центра
Воронежского государственного университета.
394000, г. Воронеж, ул. Пушкинская, 3. Тел. +7 (473) 220-41-33