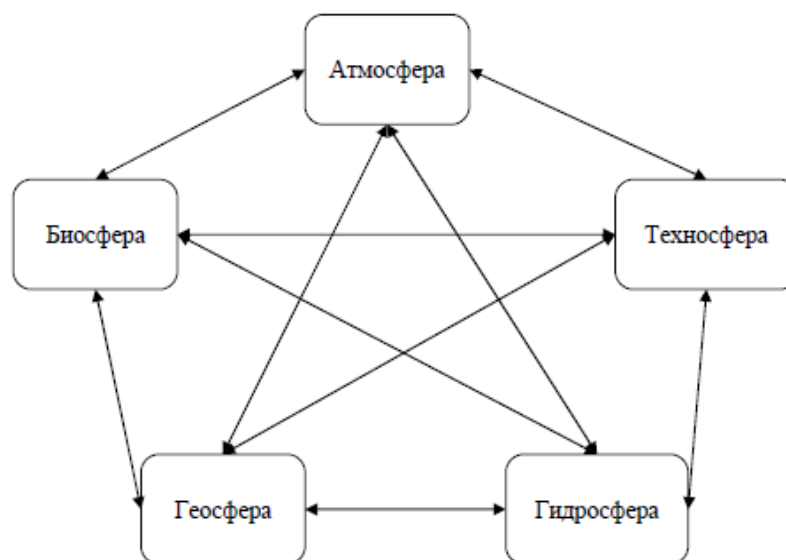


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФГБОУ ВПО «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ИНСТИТУТ МЕДИЦИНЫ, ЭКОЛОГИИ И ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ  
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

О.А. Завальцева

## Основы биогеохимии

Учебное пособие



Ульяновск – 2012

УДК 550.47 (075.8)

ББК 28.072.8 я 73

З-13

Печатается по решению Ученого совета ИМЭиФК  
Ульяновского государственного университета

**Рецензенты:**

Заведующий кафедрой общей экологии Ульяновского государственного университета,  
д.б.н., профессор В.Н. Горбачев  
Заведующий кафедрой химии Ульяновского государственного технического  
университета, д.х.н., профессор Е.С. Климов

**З-13 Завальцева О.А.**

**Основы биогеохимии:** Учебное пособие для студентов, обучающихся по программе бакалавриата специальностей «Почвоведение», «Экология» «Природопользование», «Химия» / Завальцева О.А. – Ульяновск: УлГУ, 2012. – 71 с.

В пособии в доступной форме рассмотрены особенности биосферы как структурной оболочки Земли, эволюция оболочек Земли, их строение, химический состав, миграция веществ и влияние геохимической среды на функционирование живых организмов. Большое внимание уделено биогеохимическим циклам важнейших химических элементов, в том числе и тяжелых металлов.

Учебное пособие может быть использовано студентами для самостоятельной подготовки.

*Учебное пособие содержит результаты, полученные в рамках государственного задания Минобрнауки России.*

© Завальцева О.А., 2012

© Ульяновский государственный университет, 2012

## 1. Введение

### *Предмет изучения биогеохимии*

Биогеохимия как наука была создана в начале XX века основоположником минералогии и геохимии акад. В.И. Вернадским. Формальной датой возникновения биогеохимии принято считать 15 ноября 1932 года, когда на сессии АН СССР В.И. Вернадский сделал доклад «Значение биогеохимии для познания биосферы». Вернадский сформулировал ее как науку, изучающую роль организмов в миграции, концентрировании и рассеивании химических элементов в биосфере или как науку о формировании и развитии геохимической среды и ее влиянии на эволюцию организмов, изменяющей их геохимическое значение.

По современному определению, *биогеохимия* – это научная дисциплина, исследующая роль живых организмов в разрушении горных пород и минералов, миграции, распределении и концентрации химических элементов в биосфере.

Название данной науки показывает, что она находится на стыке трех фундаментальных естественных наук: химии, биологии и географо-геологического комплекса.

Вопрос определения *предмета биогеохимии* достаточно сложен, так как практически каждое определение химического элемента в каком-либо компоненте биосферы уже называется биогеохимическим исследованием. Биогеохимическая природа исследований не должна ограничиваться только познанием химии явлений, важно знание природно-климатических условий, особенностей жизни живых организмов и др.

Биогеохимия предполагает проведение комплексных, многосторонних исследований всех основных объектов биосферы по определенной группе химических элементов с обязательным выяснением реакции живых организмов. В этом заключается сложность понимания биогеохимических исследований.

В целом, *предметом изучения биогеохимии* являются процессы миграции и массообмена химических элементов между живыми организмами и окружающей средой.

Следует отметить *биогеохимические аспекты почвообразования*, которые определяются законом Вернадского, согласно которому миграция химических элементов на земной поверхности и в биосфере в целом осуществляется или при непосредственном участии живого вещества, или же она протекает в среде, геохимические особенности которой преимущественно обусловлены живым веществом.

Представление о биогеохимических циклах как основе организованности биосферы приложимо и к педосфере. Движущей силой почвообразовательного процесса является взаимодействие малого биологического и большого геологического круговоротов веществ и энергетических потоков на Земле. Эти взаимодействия составляют комплекс явлений биогеохимии почвообразования, т.е. миграции и трансформации химических соединений как по вертикали в пределах почвенного профиля и подстилающей толщи горных пород, так и по горизонтали в пределах почвенного покрова планеты в целом.

## *История развития биогеохимии. Роль В.И. Вернадского в разработке основополагающих идей биогеохимии*

В основе биогеохимии лежит учение В.И. Вернадского о живом веществе и биосфере.

Но еще до создания и развития идей Вернадского о геохимической роли живого вещества, в ходе развития естествознания совершались научные открытия, которые во многом и определили в дальнейшем основу развития биогеохимических взглядов.

В конце XVIII в. зарубежные ученые (в Лондоне и Париже) обсуждали роль газов в жизнедеятельности растений. А. Лавуазье изучал процессы обмена  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  растениями и пришел к выводу о существовании круговорота при взаимодействии живых организмов с природой. Им была написана работа «Кругооборот элементов на поверхности земного шара».

В середине XVIII в. Жан-Батист Дюма и Жан-Батист Буссенго окончательно сформулировали идею цикличности газов в системе живые организмы – атмосфера.

Ю. Либих разработал теорию минерального питания растений и положил начало изучению биологического круговорота. В своих экспериментах он показал, что растения способны избирательно поглощать элементы из почвы, но почву он не рассматривал как природное образование, а как массу вне связи с процессом ее возникновения и развития.

М.В. Ломоносов впервые высказал мысль о том, что развитие почвы протекает во времени в результате взаимодействия растений и горных пород.

В конце XIX в. В.В. Докучаев установил, что формирование почвы – это сложный процесс взаимодействия 5-ти факторов почвообразования: климата, рельефа, растительного и животного мира, почвообразующих пород и возраста страны. То есть им было показано единство живых организмов с другими компонентами природы.

Биогеохимия теснейшим образом связана с геохимией, которая изучает распространенность и миграцию химических элементов в геосферах. Геохимический подход позволяет сопоставлять и сравнивать самые разные природные тела и процессы и дает возможность объективно оценить планетарный эффект деятельности живого вещества или отдельных групп живых организмов.

Основателями геохимии считаются Ф. Кларк, В.И. Вернадский, А.Е. Ферсман и В.М. Гольдшмидт.

Ф. Кларк (1847-1931) проводил большое количество анализов горных пород и в 1889 г. привел первую сводную таблицу среднего химического состава земной коры, а в 1924 г. совместно с геологом Г. Вашингтоном публикует последнюю таблицу средних значений элементов в верхнем 16-ти километровом слое Земли.

В.М. Гольдшмидт (1888-1947) в 1924 г. на основании данных о строении атомов и их нахождении в природных телах предложил стройную геохимическую классификацию элементов; он изучал распространенность элементов в разных природных телах.

Многочисленные работы А.Е. Ферсмана (1883-1945) посвящены изучению миграции химических элементов в зависимости от строения их атомов и общих физико-химических свойств. Он выделил факторы миграции химических элементов и дал классификацию геохимических процессов. Ферсман является основателем геохимических методов поиска полезных ископаемых.

Огромная роль в становлении и развитии геохимии, в создании биогеохимии принадлежит В.И. Вернадскому. Работы В.И. Вернадского охватывают практически все разделы геохимии, начиная от состава силикатов и заканчивая составом живых организмов и природных вод. Вернадский создал развернутое учение о биосфере, которое опубликовал в 1926 г. в своем труде «Биосфера». С одной стороны он рассматривал биосферу, как оболочку Земли, в которой существует жизнь, с другой – замечал, что состав биосферы определяется совокупной деятельностью живых организмов в настоящем и прошлом.

Осмыслив научный подход в естествознании В.В. Докучаева, в химии Д.И. Менделеева, А.М. Бутлерова, в физиологии И.П. Павлова, изучив работы Ф. Роде, Т. Мальтуса и др., В.И. Вернадский подошел к первому положению биогеохимии: химические элементы косной и живой материи связаны, ряд элементов жизненно необходим любому живому организму, без их достаточного количества не могут протекать все основные физиолого-биохимические реакции живого организма.

Дальнейшее развитие идеи Вернадского получили в работах акад. А.П. Виноградова, который сформулировал понятие о биогеохимических провинциях и их роли в эволюционном развитии живого вещества, проф. В.В. Ковальского, который в основу биогеохимии положил изучение изменчивости биогеохимических процессов синтеза и активности ферментов, гормонов, витаминов и др. активных соединений живых организмов под влиянием геохимических условий внешней среды, Я.В. Пейве.

### *Связь биогеохимии с другими науками*

Биогеохимия в своей методологической основе тесно связана с геохимией, так как и там, и там – сходные предметы изучения. Разница заключается в том, что биогеохимия изучает миграцию и распределение химических элементов в биосфере, где первостепенна роль живых организмов, а геохимия определяется законами термодинамики, физической химии, кристаллохимии.

Акад. А.Г. Авцын отмечал: «...общепринято считать биогеохимию одним из разделов биохимии и геологии. На самом деле, она не в меньшей степени является бурно развивающейся ветвью медицинской географии и географической патологии». А.М. Овчинников определяет биогеохимию, как один из разделов наук о геохимии.

Биогеохимия тесно связана с геохимией почв и почвенных процессов. Почва непосредственно участвует в миграционных циклах, а Вернадский рассматривал почву как центральное звено биосферы. Принципы биогеохимии используются в генетическом почвоведении в учении о геохимии ландшафта.

Очевидна взаимосвязь биогеохимии и с биологическими науками, так как изучает связь живых организмов со средой их обитания.

Термин «биогеохимия» широко применяется во многих других естественных науках (почвоведении, геологии, гидрохимии, медицине и др.) и приобретает узкий профессионально-направленный смысл, тогда как сам Вернадский подразумевал, прежде всего, комплексный

подход к изучению биосферных явлений, связанных с многообразным и всесторонним взаимодействием живой и неживой материи.

### ***Практическое значение биогеохимии***

Биогеохимия приобрела большое значение в производственной деятельности людей.

Идеи биогеохимии используются геологами в целях поиска месторождений полезных ископаемых по образованию биогеохимических аномалий (участки повышенной концентрации элементов в растениях и верхнем горизонте почвы).

Биогеохимия используется в медико-биологических целях, когда определяется связь между количеством элемента в объекте, а также его компонентах и возникновением и развитием эндемической патологии и других неинфекционных болезней.

Законы и принципы биогеохимии используются в области охраны окружающей природной среды в целях изучения содержания и распределения опасных загрязнителей (ксенобиотиков) и возможностей регулирования их миграционных потоков в биосфере.

### ***Задачи биогеохимии***

*Главными задачами являются:*

1. Изучение путей миграции химических элементов, анализ биогеохимических циклов миграции.
2. Исследование географических закономерностей распределения химических элементов, используемых живыми организмами.
3. Изучение биосферы как единой системы живого вещества и минеральных соединений.
4. Изучение влияния жизни на историю земных химических элементов, их миграцию и накопление, ее участие в геохимических процессах зоны гипергенеза и почвообразования.
5. Изучение химического обмена в системе человек – организмы – окружающая среда.
6. Изучение химического состава живых организмов и роли химических элементов в развитии организмов. Установление оптимальных потребностей живых организмов в различных химических элементах.
7. Изучение влияния технического прогресса на процессы в биосфере.

*Контрольные вопросы:*

1. Что собой представляет биогеохимия, как наука?
2. Назовите предмет биогеохимии.
3. История развития биогеохимии.
4. Какова роль В.И. Вернадского в становлении идей биогеохимии?
5. Как биогеохимия связана с другими науками?
6. В чем заключается практическое значение биогеохимии?

## 2. Геосферы Земли и распространенность химических элементов

### *История возникновения химических элементов и их распространенность*

В настоящее время принято считать, что начало развития вселенной знаменовалось Большим взрывом (Big Bang), с которым связано рождение первых самых легких химических элементов, а точнее их атомных ядер.

В наблюдаемой форме Вселенная возникла около 18 - 20 млрд. лет назад. До этого времени все ее вещество находилось в условиях бесконечно больших температур и плотностей, которые современная физика не в состоянии описать. Такое состояние вещества называется “*сингулярным*”. Теорию расширяющейся Вселенной или “Большого Взрыва” (Big Bang, англ.), впервые была создана А.А.Фридманом в России в 1922 г.

Современная теоретическая физика достоверно описывает процессы “Большого Взрыва”, но только после 1/100 секунды с момента его начала. Так, температура в  $10^{32}$  К была достигнута через 10-43 сек,  $10^{10}$  К – через 1 сек.,  $10^9$  К - через 1 минуту,  $10^4$  К - через 100 тыс. лет, а  $10^3$  К - через 1 миллион лет. Расширяющееся вещество становилось менее плотным и менее горячим. Теорию не только первоначально очень плотной, но и очень горячей Вселенной в конце 40-х годов развивал знаменитый физик Георгий Гамов. Первичный нуклеосинтез стал возможен уже через несколько минут после начала Большого Взрыва, а через 1 млн. лет и формирование атомов.

Спустя примерно 1 млрд. лет после начала Большого Взрыва, в результате сжатия огромных газовых облаков или их протяженных газовых фрагментов, стали формироваться звезды и галактики, скопления миллионов звезд. Образование звезд теоретически рассчитано вполне достоверно. Любая звезда формируется в результате коллапса космического облака газа и пыли. Когда сжатие в центре структуры приведет к очень высоким температурам, в центре “сгустка” начинаются ядерные реакции, т.е. превращение H в He с выделением огромной энергии, в результате излучения которой звезда и светится.

Следует различать две существенные стороны истории вещества:

1. *догалактическая стадия (дозвездная)* – определила примитивный набор элементарных частиц и легких ядер;
2. *галактическая стадия* – характеризовалась возникновением всего известного набора элементов периодической системы Менделеева.

Были выдвинуты различные гипотезы происхождения элементов, основанные на достижениях физики ядра, астрофизики и космологии.

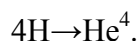
Протопланетное вещество, как родоначальник материала планет, генетически было связано с Солнцем. Первичный протопланетный материал был представлен сильно ионизированными разобщенными атомами, ядрами и электронами. Лишь после значительного падения температуры атомные ядра и многократно ионизированные атомы приобрели путем рекомбинаций нормальные электронные оболочки, что явилось обязательным условием для осуществления реакций и образования первых химических соединений.

Согласно имеющимся данным основную массу вещества нашей Галактики образуют ядра водорода (75%) и гелия (24%). Более сложно устроенные ядра составляют в сумме около 1%. Среди них наиболее часты ядра элементов с порядковыми номерами не выше 27.

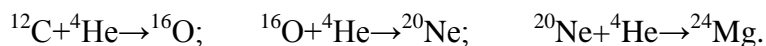
Исследования ядерных реакций привели к заключению, что элементы сформировались в результате наложения ядерных процессов, взаимосвязанных с эволюцией звезд, а исходным материалом для построения всех элементов был водород.

Таким образом, общая картина последовательного генезиса (образования) атомных ядер может быть выражена сочетанием следующих ядерных реакций:

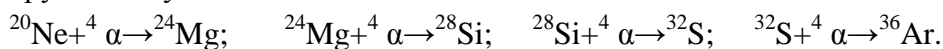
1. Превращение водорода в гелий, который происходит в результате термоядерных реакций с выделением огромной энергии (наиболее обычный и распространенный процесс в звездном небе):



2. Превращение гелия в легкие элементы: осуществляется путем термоядерных реакций гелия с  $^{12}\text{C}$ , который возник при объединении трех ядер гелия. Так могут возникать ядра с массовым числом, кратным 4 и наиболее распространенные среди легких элементов:



3. Реакции с участием  $\alpha$ -частиц (альфа-процесс). При сверхвысоких температурах в результате воздействия жесткой радиации из легких ядер освобождаются быстрые ядра гелия ( $\alpha$ -частицы), которые реагируют с ранее образованными легкими ядрами и формируют следующие изотопы:



4. Равновесный процесс ( $e$ -процесс): протекает как наиболее горячий термоядерный процесс при температурах порядка  $3 \cdot 10^9 \text{K}$ , при которых создается статистическое равновесие между присутствующими ядрами и элементарными частицами. При этом возникают элементы, прилегающие в таблице Менделеева к железу с наиболее прочной удельной ядерной связью.
5. Процесс медленного нейтронного захвата ( $s$ -процесс). Происходит медленный нейтронный захват с образованием элементов до висмута включительно ( $^{209}\text{Bi}$ ,  $Z=83$ ).
6. Процесс быстрого нейтронного захвата ( $r$ -процесс). Происходит с образованием элементов в трансвисмутовой области ( $Z > 83$ ), включая изотопы тория, урана и трансурановых элементов.
7. Процесс протонного захвата ( $p$ -процесс): приводит к образованию ядерных видов с повышенным содержанием протонов по сравнению с минимальным стабильным протонно-нейтронным соотношением. Протоны, необходимые для осуществления ядерных реакций протонного захвата, разгоняются до высоких скоростей в электромагнитных переменных полях звездных атмосфер.
8.  $x$ -процесс, приводит к образованию легких и малораспространенных изотопов, построение которых нельзя объяснить другими указанными процессами нуклеосинтеза.



По расчетам, в целом, энергетически выгодно образование не легких и не тяжелых ядер, а тех, которые соответствуют средним порядковым номерам таблицы Менделеева. Следовательно, степень распространения ядер обусловлена процессами их образования.

Таким образом, как самопроизвольный распад неустойчивых атомов, радиоактивность отражает историю вещества Земли в далеком прошлом, когда происходило образование различных атомов химических элементов, как устойчивых, так и неустойчивых.

Во всех доступных оболочках Земли – литосфере, гидросфере, атмосфере и живом веществе – присутствуют радиоактивные элементы. В зависимости от происхождения они могут быть подразделены на *первичные* и *вторичные*.

К первым относятся те, которые были унаследованы Землей в далекие периоды ее образования от древних космических систем, в которых происходил естественный синтез атомных ядер.

К вторичным относятся те, которые возникают в настоящее время в результате определенных естественных процессов. Первым из них является порождение недолговечных изотопов как членов радиоактивных рядов от распада родоначальных изотопов урана и тория (радий, франций, радон, полоний, астатин). Второй процесс – воздействие космических лучей на вещество биосферы планеты. Возникающие при этом нейтроны легко реагируют с ядрами атомов атмосферных газов, в результате чего возникают в крайне мизерных количествах космогенные радиоактивные изотопы, как изотоп  $^{14}\text{C}$ .

### ***Строение и химический состав оболочек Земли (атмосферы, литосферы, гидросферы)***

Атмосфера и гидросфера относятся к внешним оболочкам Земли, а литосфера – к внутренним. К внешним оболочкам относят также биосферу.

Оболочки проникают одна в другую и находятся в постоянном взаимодействии между собой. Общим свойством внешних оболочек является их высокая подвижность, в результате чего любое изменение состава каждой из оболочек быстро распространяется на всю их массу.

*Гидросфера.* Водная оболочка Земли. Занимает 70,8% поверхности суши. В составе гидросферы выделяют три основных типа природных вод, обладающих различным составом и свойствами:

1. океаносфера (воды морей и океанов);
2. воды суши (реки, озера, ручьи, пруды, воды замкнутых морей);
3. ледники.

Промежуточное положение занимают подземные воды.

Роль гидросферы как мощного геохимического фактора миграции химических элементов связана, в первую очередь, с ее физико-химическими свойствами. Решающее значение имеет способность воды находиться в пределах биосферы в трех агрегатных состояниях (жидкое, твердое, газообразное) и способность растворять химические вещества, в том числе газы. Вода является средой протекания химических реакций. Только с помощью воды происходит обмен веществом между всеми живыми организмами и неорганическими (косными) телами. Любые

воды гидросферы Земли в той или иной степени минерализованы и их можно рассматривать как природные растворы различной концентрации. рН природных вод также различается в зависимости от их происхождения (морская вода – 8, речная – 7, дождевая – 6, болотная – 4, кислые термальные источники ~ 1).

Согласно О.А. Алекину (1966) химический состав природных вод можно условно разделить на пять групп:

1. Главные ионы, присутствующие в наибольшем количестве.
2. Биогенные элементы (С, Н, N, P, Mn, Fe, Si).
3. Микроэлементы.
4. Органические вещества.
5. Растворимые газы (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, углеводороды, инертные газы).

Химический состав природных материковых вод отличается от океанической воды. В пределах земной коры можно выделить *три источника минерализации*:

1. изверженные и метаморфические горные породы;
2. залежи некоторых осадочных пород, состоящие из растворимых солей, представленные известняками, доломитами, каменной солью;
3. соли, рассеянные и адсорбированные в осадочных горных породах, коре выветривания и почве.

Значительный вклад в минерализацию природных вод вносят вулканические извержения.

Основные ионы речных вод: Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>. Химический состав рек испытывает сезонные колебания. Наибольшая минерализация наблюдается зимой (питание рек за счет грунтовых вод). Состав речных вод зависит от физико-географических условий (в зонах избыточного увлажнения – повышенная минерализация).

Масса переносимых рекой на протяжении года твердых частиц называется *твердым стоком*, а масса растворенных веществ – *ионным стоком*. В горных реках твердый сток преобладает над ионным, в равнинных реках – наоборот.

В морской воде подавляющую часть солей составляют не карбонаты, как в речной, а хлориды. Солевой состав морской воды (на всей Земле!) постоянен – это *главная особенность геохимии океана*. Ионы Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Г, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HSO<sub>3</sub><sup>-</sup> составляют ~ 99% от всех ионов в морской воде.

В отличие от материковых и океанических вод геохимическое значение ледников в балансе элементов биосферы незначительно.

Современный химический состав гидросферы представляет собой результат длительной деятельности живых организмов.

Атмосфера. Газовая оболочка Земли. Масса атмосферы составляет около  $5,2 \cdot 10^{15}$  т. Характеризуется резко выраженной неоднородностью строения и состава. Атмосферу подразделяют на тропосферу, стратосферу, ионосферу (мезосферу, термосферу и экзосферу).

*Тропосфера* (от 0 до 8-10 км у полюсов и до 17 км у экватора) – зона интенсивного перемешивания воздушных масс, поэтому химический состав ее однороден. В тропосфере происходят фотохимические реакции, развиваются погодные условия, она является областью

взаимодействия с океаном и сушей, в ней содержится почти весь водяной пар. Верхняя граница тропосферы – *тропопауза*.

Выше тропопаузы расположена *стратосфера* (до 40-50 км). В стратосфере значительно снижается перемешивание воздуха. В нижних слоях температура неизменна (до высоты ~ 25 км), на высоте 25-32 км температура начинает быстро подниматься (до 0<sup>0</sup>С на высоте 50 км). Стратосфера очень бедна водяным паром. Под влиянием УФ-лучей на высоте 22-25 км образуется озон, количество которого изменяется с высотой и зависит от сезона года.

*Ионосфера* (от 80 до 2000 км) – это область сильно разреженного газа с очень высокой степенью ионизации, имеет значительное содержание электронов и ионов, образуемых за счет диссоциации молекул газов под воздействием УФ излучений солнца. В экзосфере (верхняя часть ионосферы) главными составляющими являются нейтральный водород, протоны и электроны. Из экзосферы происходит рассеивание (*диссипация*) легких атомов (водород, гелий) в космическое пространство.

Состав атмосферы сильно отличается от вулканических газов, за счет которых она возникла в прошлом. Современная атмосфера Земли по химическому составу относится к азотно-кислородному типу (78% - N<sub>2</sub>, 21% - O<sub>2</sub>), что в значительной мере обусловлено деятельностью живых организмов и поддерживается за счет биогеохимических циклов. В тропосфере во взвешенном состоянии присутствуют твердые и жидкие частицы (аэрозоли). Главными составными частями атмосферы являются азот, кислород, аргон и углекислота, составляющие 99,9%. Ничтожно содержание инертных газов и молекулярного водорода. Особое место в составе атмосферы занимают коллоидные частицы – пыль различного происхождения (естественная, антропогенная).

Вся тропосфера и большая часть стратосферы имеют, в общем, однородный химический состав.

В.И. Вернадский указывал на наличие «подземных атмосфер», находящихся в горных породах. Состав их связан с составом горных пород и термодинамическими условиями. Существенной частью подземных газов являются инертные, некоторые из которых радиоактивного происхождения. Почти все газы недр Земли, поступая в атмосферу, подвергаются резким изменениям, переходя в другие соединения.

Таким образом, учитывая высокую подвижность приземной атмосферы, она является важным биогеохимическим компонентом в циклах элементов.

*Литосфера*. Внешняя твердая часть земной коры (*рисунок 1*). Рассматривая литосферу как часть биосферы, обычно имеют в виду ее поверхностную часть, подвергающуюся процессам выветривания и содержащую, помимо минерального, также органическое вещество. Эта часть литосферы называется почвой (педосферой).

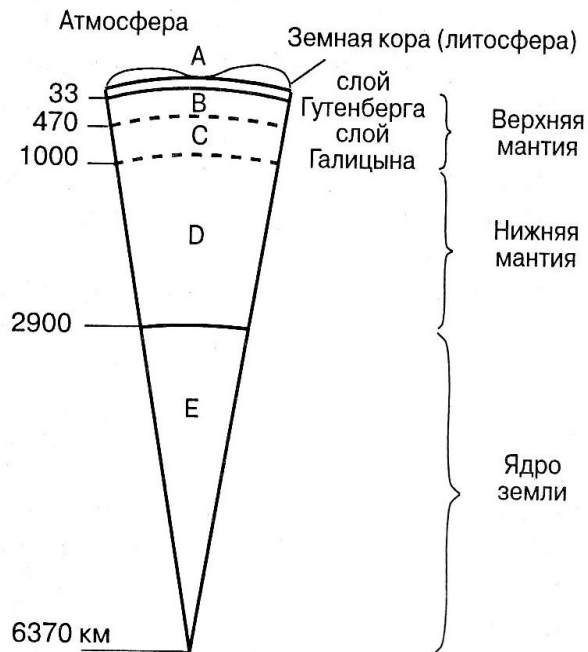


Рис. 1. Строение Земли.

Земная кора, ограниченная снизу поверхностью Мохо (граница Мохоровичича), является продуктом длительного не прекращающегося взаимодействия поверхностных твердых горизонтов планеты с атмосферой, гидросферой и биосферой – с одной стороны и подстилающим ее субстратом – с другой (рисунок 2). Состав ее неоднороден и изменяется непрерывно в различных направлениях и с различной скоростью, что во многом определяется направленностью и скоростью биогеохимического круговорота. В земной коре находится основной резерв химических элементов, которые вовлекаются в миграционные потоки под воздействием живого вещества.

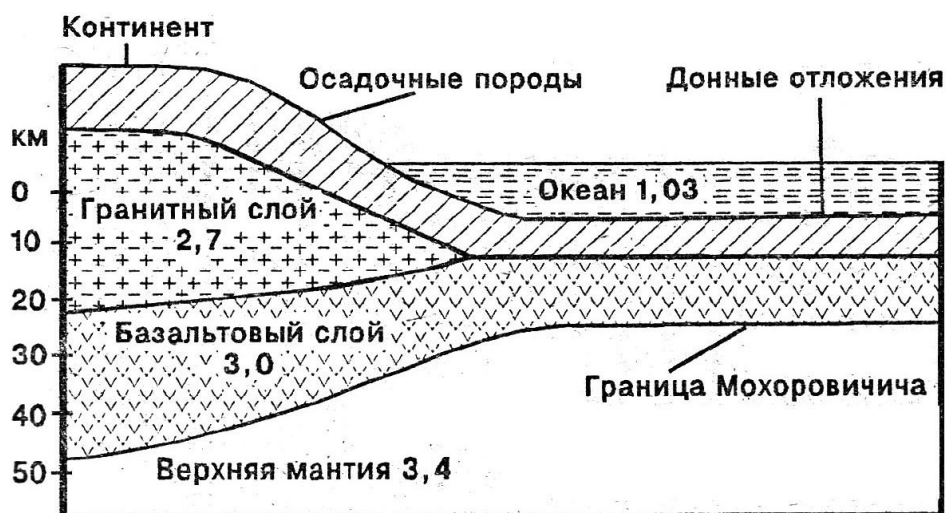


Рис. 2. Строение земной коры (цифры означают плотность материала в г/см<sup>3</sup>).

Преобладают в земной коре O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg. В настоящее время используют различные геохимические классификации элементов, среди которых наиболее часто используемая – классификация Гольдшмидта, согласно которой все элементы земной коры делятся на пять групп по способности концентрироваться в биосфере: атмосферные, литофильные, сидерофильные, биофильные и халькофильные.

- ✓ *Литофильные* (литос – камень, фильно - любовь) – элементы горных пород, имеют специфическое сродство с кислородом и в условиях земной коры образуют минералы типа оксидов, гидроксидов, солей кислородных кислот. Оболочка их ионов восьмиэлектронная, построенная по типу атомов инертных газов. К литофильным относятся 54 элемента: O, S, P, H, Si, Ti, Zr, Hf, F, Cl, Br, J, Su, B, Al, Ga, Se, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tu, Yb, Lu, Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Fe, V, Cr, Mn, Ni, Nb, W, U, C.
- ✓ *Халькофильные* (халькос – серой) – элементы, имеющие склонность давать природные соединения с серой и ее аналогами по периодической системе – селеном и теллуром. Внешняя оболочка их катионов характеризуется 18-электронной конфигурацией. К халькофильным относятся 27 элементов: S, Se, Te, As, Sb, Bi, Ga, In, Tl, Ye, Sn, Pb, Zn, Hg, Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, Co, Ph, Zr, Fe, Rh, Os.
- ✓ *Сидерофильные* (сидеро - железо) – элементы, растворяющиеся в железных расплавах и дающие сплавы с железом. Большинству сидерофильных элементов свойственно самородное состояние. Они представлены атомами, которые дают переходные ионы 9 – 17-электронной конфигурации на внешней оболочке. К сидерофильным относится 21 элемент: Fe, Ni, Co, P, As, C, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au, Ye, Sn, Vo, W, Nb, Ta, Se, Te.
- ✓ *Атмосферные* (атмо – пар, испарение) – элементы земной атмосферы, атомы которых имеют электронную конфигурацию инертных газов – 2- и 8-электронную. В эту группу входит 12 элементов: H, N, C, O, He, Ne, Ar, Cl, Br, I, Kr, Xe.
- ✓ *Биофильные* (биос - жизнь) – элементы в живых организмах. В.М. Гольдшмит (1924 г.) относил 17 элементов: C, H, O, N, P, S, Cl, I, B, Ca, Mg, K, Na, Mn, Fe, Cu.

Таким образом, оболочки Земли (литосфера, атмосфера, гидросфера) являются открытыми системами, между которыми происходит постоянный обмен веществом и энергией, заключенный в биогеохимических взаимодействиях при непосредственном участии живых организмов.

### *Эволюция химического состава оболочек Земли*

Верхние оболочки Земли (атмосфера, литосфера, гидросфера) – это продукты геологического развития планеты, которые стали результатом первичных условий ее (планеты) формирования и последующей химической дифференциации. А возникновение жизни стало мощным геохимическим фактором на планете, который изменил состав ее оболочек.

По имеющимся данным, пары воды и газы *атмосферы* возникли в недрах Земли и поступили на ее поверхность в результате внутреннего разогрева совместно с наиболее легкоплавкими веществами первичной мантии в процессе вулканической деятельности. Следовательно, первичная атмосфера была близка по составу вулканическим и метеоритным газам. В процессе радиоактивного разогрева Земли началась ее дегазация, в которой участвовали наиболее летучие элементы. Вследствие плавления и дегазации мантии на поверхность поступали три фракции мантийного материала: базальтовая магма, растворенные в ней вода и газы. На поверхность первичной Земли поступали газы:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ , а также  $\text{Ar}$  и  $\text{He}$ . Эти газы составили *первичную атмосферу* планеты.

В целом, первичная атмосфера носила восстановительный характер, и в ней практически отсутствовал свободный кислород. Незначительная его часть формировалась в результате фотодиссоциации в верхней атмосфере.

На восстановительную атмосферу воздействовали большие потоки энергии: УФ излучение, ионизирующее излучение Солнца (сейчас экранируется озоновым слоем), электрические разряды (грозы), вулканическая деятельность. В этих условиях мог идти химический синтез, когда из газов атмосферы через промежуточные продукты (этилен, этан, мочевины, формальдегид) образовались сначала мономеры, а затем полимеры. Так как окисления не происходило, то водоемы обогащались аминокислотами, сахарами, карбоновыми кислотами, липидами. Образовался «первичный бульон».

По мере возрастающей потери  $\text{H}_2$  в космическое пространство, атмосфера содержала все бóльшие количества азота, углекислоты и паров воды.

Появление организмов, способных осуществлять фотосинтез, способствовало повышению содержания кислорода в атмосфере. Постепенно система Земли из абиогенной превратилась в биогенно-абиогенную с включением живых организмов в биогеохимические циклы.

*Мировой океан* возник из паров мантийного материала, а первые порции конденсированной воды были кислые. Первые воды поверхности планеты были минерализованы, а пресные воды появились значительно позже. Сильные кислоты в составе ювенильных вод интенсивно разрушали первичные алюмосиликатные породы, извлекая из них щелочные и щелочноземельные металлы, а также соли двухвалентного железа. Первичная поверхность суши омывалась кислыми дождями, в результате чего происходили процессы гидролиза и гидратации первых минералов. Такие же процессы происходили на дне океана. При круговороте воды и выносе  $\text{Na}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$  значительная их часть задерживалась в океане. Процесс круговорота воды положил начало циклической миграции химических элементов в системе суша-океан-суша. Появление цианобактерий в водной среде стало началом фотосинтеза и биогеохимического продуцирования кислорода, вследствие чего происходило уменьшение  $\text{CO}_2$ , что способствовало осаждению карбонатов железа (II), затем магния и кальция. Постепенно восстановленные формы железа, серы и марганца были окислены и состав океанической воды стал хлоридно-сульфатного типа.

*Химическая эволюция земной коры.* Современная континентальная часть земной коры (*сиаль*) эволюционировала в течение геологического времени от основного (базальтового) состава к кислому – гранитному. Этому способствовал ряд процессов. *Первый возможный*

*процесс* – общая первоначальная асимметрическая дифференциация Земли, вероятно, связанная с формированием ядра планеты. Это привело к тому, что излияния первичных базальтов в одном полушарии были более обильными, чем в другом. В течение круговорота и переработки материала верхних горизонтов Земли, прошедших через стадии выветривания, осадкообразования, вторичного переплавления, происходило изменение состава, выразившееся в накоплении  $\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  и потере компонентов, характерных для первичных базальтов. Так происходила постепенная сиализация земной коры и приближение ее к современному составу. *Второй процесс сиализации* коры связан с действием мощного экзогенного круговорота вещества, включающего переработку первичной коры под действием солнечной энергии, гравитации и условий биосферы в целом. Круговорот вещества в пределах биосферы явился важнейшим корообразующим процессом. Огромные массы континентальной коры прошли через состояние осадочных пород, оказались перемыты водой и изменились под действием живого вещества биосферы.

*Контрольные вопросы:*

1. Опишите в общих чертах теорию «Большого взрыва».
2. Какие ядерные реакции описывают последовательность образования атомных ядер?
3. Какие радиоактивные элементы называют первичными, а какие вторичными?
4. Каковы строение и химический состав оболочек Земли (литосферы, атмосферы и гидросферы)?
5. Как происходила эволюция химического состава оболочек земли?

### 3. Основы учения о биосфере

#### *Этапы формирования биосферы*

Термин «биосфера» был впервые введен Э. Зюссом.

В соответствии с учением В.И. Вернадского под биосферой понимается особая оболочка нашей планеты, в пределах которой существуют живые организмы. Всех живых организмов Вернадский объединил одним общим термином – «живое вещество».

В период своего формирования наша планета получила в целом достаточное количество органических соединений, чтобы путем их дальнейшей полимеризации возникли саморегулирующиеся системы, необходимые для живого вещества.

Развитие биосферы Земли можно рассматривать как последовательную смену трех этапов (по Войткевичу, 1996):

1. *Первый этап – восстановительный* – начался еще в космических условиях и завершился на Земле гетеротрофной биосферы.
2. *Второй этап – слабоокислительный* – отмечен появлением фотосинтеза; продолжался до завершения осадконакопления полосчатых железистых формаций докембрия (4000 млн. лет назад).
3. *Третий этап – окислительный* – характеризуется развитием окислительной фотоавтотрофной биосферы.

Видимо, наиболее ранними организмами еще безкислородной планеты были примитивные одноклеточные, использовавшие кислород, абиотическую органику и энергию, связанные в материале космического происхождения.

Субстратом жизни длительное время был океан, затем мелководья и прибрежные зоны. Синезеленые водоросли и лишайники могли существовать на голых скалах суши (находят в осадочных породах возраста 3,5 млрд. лет). Их процветание приходится на период 600 млн. – 2 млрд. лет назад.

Обильные формы жизни сложились ~ 1 – 1,5 млрд. лет назад в основном в океане. Появление развитой жизни было началом формирования биосферы.

Возникновение жизни кардинально изменило геохимический баланс всех оболочек Земли. Возникновение фотосинтезирующих организмов в освещенной зоне моря привело к восстановлению  $H_2O$  и появлению свободного кислорода. Образовалась биосфера окислительного характера. В результате фотосинтеза из атмосферы был удален  $CO_2$ . Образовались огромные толщи известняков и доломитов. Изменились условия миграции и осаднения соединений Fe, Mn, S,  $N_2$ . Свободный кислород вызвал окисление аммиака. В результате окисления аммиака возник свободный азот, поступивший в атмосферу. Так возникла *азотно-кислородная атмосфера* Земли.

Накопление свободного кислорода в атмосфере привело к образованию в ней озонового экрана, что стало предпосылкой возможности появления жизни на суше. 300-500 млн. лет назад растительность стала завоевывать сушу. В силуре, девоне происходила глубокая биологизация суши.



Начал развиваться почвообразовательный процесс. Фотосинтетическая и почвообразующая деятельность древесных привела к формированию в земной коре колоссальных запасов энергии в виде каменного угля, нефти, сланцев, горючих газов.

Эволюция жизни и планеты в целом привели к тому, что различные организмы и их популяции приспособились к условиям среды, а сама среда – преобразована жизнью в биосферу.

### ***Строение, состав, границы биосферы***

Выделение биосферы, как особой оболочки, связано с учетом форм нахождения химических элементов, а точнее – с появлением на поверхности Земли биогенной формы.

Химический состав биосферы в разных местах земной поверхности неодинаков, что особо заметно в характере окружающего ландшафта. Но это различие в составе биосферы и ее частях не случайно, а закономерно, что связано с геологическим характером местности, ее литологическим составом, с геологической картой.

Живыми организмами заселены значительные части литосферы, атмосферы, гидросферы. Именно они и составляют в сумме биосферу, между всеми частями которой есть связь посредством миграции химических элементов, в которой важная роль принадлежит организмам.

Главными компонентами биосферы являются (по Ковда, 1990):

- 1) потоки космической энергии, электромагнитное и гравитационное поля, космическое вещество;
- 2) биомасса живой растительности, способной путем фотосинтеза и роста фиксировать и преобразовывать космическую энергию в химическую потенциальную энергию и сохранять ее в виде органических соединений;
- 3) почвенный покров, обеспечивающий существование растительности;
- 4) биомасса живущих на почве и в почве консументов, потребляющих фитомассу и минерализующих ее;
- 5) гидросфера;
- 6) атмосфера;
- 7) литосфера (оболочка биогенных осадочных пород).

Миграция веществ в горизонтальном направлении (водная, воздушная) является важным звеном в механизме самоуправления биосферы, условиями жизни и элементами питания организмов.

Вещество биосферы по Вернадскому состоит из 7 разнородных частей:

- 1) *живое вещество* – совокупность живых организмов, которая обладает громадной биогеохимической энергией, связана с другим веществом биосферы только биогенной миграцией атомов.
- 2) *биогенное вещество* – вещество, создаваемое и перерабатываемое живыми организмами; источник мощной потенциальной энергии (каменный уголь, битумы, известняки, нефть и т.д.)

- 3) *косное вещество* – вещество, в процессах образования которого живое вещество не участвует;
- 4) *биокосное вещество* – создается одновременно живыми организмами и косными процессами, является сложным, динамически равновесным; в нем резко проявляется геохимическая энергия живого вещества – биогеохимическая энергия;
- 5) *радиоактивное вещество* – является одной из самых мощных сил;
- 6) *рассеянные атомы*;
- 7) *вещество космического происхождения* – атомы, входящие в ионосферу из электромагнитного поля Солнца, а также поток атомов из космического пространства; космическая пыль, метеориты и т.д.

Живое и биокосное вещество встречаются на нашей планете только в биосфере.

Основной признак биосферы – участие во всех ее процессах живого вещества, при этом одну из важнейших ролей играет вода.

В функциях биосферы Гольдшмидт называл 4 главные закономерности:

- 1) сохранение и максимальное использование всего, что захватывается организмами экосистем;
- 2) достижение экосистемами во времени состояния зрелости и устойчивости во взаимоотношениях со средой;
- 3) организованность и самоуправляемость экосистем;
- 4) спонтанное саморазвитие в направлении более сложного и эффективного состояния.

К этому необходимо добавить способность изменять среду.

*Границы биосферы.* Они определяются границами распространения жизни на Земле. Следовательно, это вся толща мирового океана, в атмосфере жизнь ограничивается озоновым слоем, в литосфере – в основном жизнь распространена в почвенном покрове, но живые организмы могут встречаться в земной коре в среднем до глубины 4 км.

### ***Живое вещество биосферы и его химический состав***

Живые организмы являются функцией биосферы и теснейшим образом материально и энергетически с ней связаны, являются огромной геологической силой, ее определяющей. В ходе эволюции роль живого вещества непрерывно возрастала, что выражается в его биогеохимических функциях.

Развитие жизни на Земле основательно изменило миграцию химических элементов в биосфере. Процессы жизнедеятельности организмов в значительной мере осуществляют связь между верхними частями земной коры, атмосферой и гидросферой.

Живые организмы избирательно используют элементы из внешней среды в соответствии со своими физиологическими потребностями.

Живые организмы в основном состоят из элементов, образующих газообразные (воздушные мигранты) и растворимые (водные мигранты) соединения. Главную массу живого вещества составляют воздушные мигранты –  $O_2$ ,  $C$ ,  $H_2$ ,  $N_2$  (~ 98%). Большая часть кислорода связана с водородом и образует воду, количество которой обычно превышает 50%, особенно

много ее в водных организмах (> 90%). Только споры и семена содержат обычно не более 15% воды.

Из водных мигрантов в организмах преобладают наиболее подвижные элементы – К и Са, причем кальция больше, чем Al и Fe, а К больше, чем Si (в земной коре наоборот).

В живых организмах в целом мало токсичных элементов (Se, Hg, U и др.), малоподвижных элементов.

По данным Виноградова (1957), на долю O<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> в составе живого вещества приходится ~ 80%; С, N<sub>2</sub>, Са – 1-10%; S, P, К – 0,1-1%; Fe, Na, Mg, Al – 0,1-0,01%.

Большое значение имеет способность живых организмов концентрировать в своих телах отдельные химические элементы из окружающей среды (концентрационная функция). Концентрирование особо велико для металлов переходных групп таблицы Менделеева (Ti, Cr, Co, Mn, Ni и др.).

Химический состав живого вещества разных групп организмов сильно различается. Также сильно различаются по составу организмы, обитающие в океане и на суше. Средний химический состав живого вещества того или иного ландшафта также является важным систематическим признаком ландшафта.

### ***Биогеохимические функции живого вещества и биогеохимические принципы***

***В.И. Вернадского***

Биогеохимические функции живого вещества распространяются на всю планету и являются результатом закономерного проявления миллиардов живых, неделимых, взятых в совокупности в определенных химических процессах. Такие функции могут быть разделены на 5 групп (по Вернадскому):

- 1) *Газовые функции.* В результате суммарного действия живого вещества создаются все основные газы тропосферы и более высоких газовых оболочек (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub> и др.), т.е. живое вещество поддерживает состояние тропосферы в динамическом равновесии. Каждый хлорофильный организм выполняет кислородно-углекислородную функцию. Живые организмы участвуют в образовании азотистых соединений (газов); в образовании озона. Биогенный круговорот воды также относится к газовой функции.
- 2) *Концентрационные функции.* Это захват живым веществом тех химических элементов, соединения которых встречаются в телах всех без исключения организмов, а также накопление элементов организмами-концентраторами. Многие соединения (белки, жиры, углеводы и др.) образуются только в живых организмах. Создаваемое живым веществом многообразие химических соединений не может быть создано в неорганическом мире.
- 3) *Окислительно-восстановительная функция.* Биогенные процессы окисления и восстановления имеют мощное развитие на земной поверхности. Окислительная функция – окисление более бедных кислородом соединений (в почвах, коре выветривания, гидросфере) – солей закиси Fe, Mn, нитратов, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub> и др.

Окислительная функция особо характерна для бактерий. Восстановительная функция – резко выражена для сульфатов созданием  $H_2S$ ,  $FeS$ ,  $FeS_2$ .

- 4) *Биохимическая функция.* Связана с телами живых организмов, так как биохимические процессы протекают в системах тела. Различают: 1 – функции, связанные с питанием, дыханием, размножением; 2 – функции, связанные с разрушением отмерших органов и тканей.
- 5) *Биогеохимическая функция человека.* Проявляется прежде всего в биогенной миграции атомов. Человек производит колоссальную геологическую деятельность. Велико антропогенное влияние на все сферы и среды жизни. В результате деятельности человека биосфера перешла в новое состояние – ноосферу.

Исходя из биогеохимических функций, Вернадский сделал обобщения, которые назвал биогеохимическими принципами:

- 1) Биогенная миграция атомов химических элементов в биосфере всегда стремится к максимальному своему проявлению.
- 2) Эволюция видов в ходе геологического времени, приводящая к созданию форм жизни устойчивых в биосфере, идет в направлении, увеличивающем биогенную миграцию атомов биосферы.
- 3) В течение всего геологического времени заселение планеты должно было быть максимально возможным для всего живого вещества, которое тогда существовало.

### ***Роль живых организмов в распределении вещества и энергии в биосфере и почвенном покрове***

В ходе эволюции земной коры непрерывно возрастала роль живых организмов, в первую очередь, отражаясь на процессах седиментации и рудообразования. Для каждого организма обмен с внешней средой стал непременным условием его существования.

Роль живых организмов в распределении веществ во многом определяется их биогеохимическими функциями.

Полынов выделяет *три аспекта геохимической деятельности организмов*:

1. организмы, как непосредственные концентраторы элементов: в результате их деятельности образуются горные породы с органоморфной структурой и текстурой (угли, коралловые известняки, диатомиты, торф и т.д.);
2. живое вещество, как фактор, определяющий физико-химические условия миграции элементов в данной природной системе – почве, ландшафте, водоносном горизонте и т.д. (например, восстановительная среда в местах гниения органических остатков или окислительная - в зоне фотосинтеза и др.);
3. суммарный эффект деятельности живого вещества за весь период деятельности геологической истории – выступает в качестве важнейшего фактора миграции элементов в земной коре, определяющего всю его геохимию.

Живое вещество преобразует энергию солнечных лучей в потенциальную энергию химических связей органических веществ, а затем и в кинетическую энергию геохимических

процессов. Живые организмы являются своего рода агентами сортировки и перераспределения атомов.

Процесс фотосинтеза лежит в основе всего живого на Земле и в планетарном масштабе представляет собой мощный процесс, вовлекающий в годовой круговорот огромные массы вещества и определяющий высокий кислородный потенциал биосферы. Таким образом, фотосинтез выступает как регулятор подавляющего большинства гипергенных (охватывают то пространство верхних оболочек Земли, которое входит в биосферу) геохимических процессов, как фактор, определяющий наличие свободной энергии верхних оболочек планеты.

Фотосинтез создает огромный геохимический эффект, который обычно определяется как сумма всей массы углерода, ежегодно вовлекаемой в построение органического вещества биосферы. То есть фотосинтез – это связующее звено между живой и неживой природой.

Фотосинтез представляет собой окислительно-восстановительную реакцию, протекающую по схеме:



Фотосинтез происходит на бóльшей части поверхности Земли. Интенсивность фотосинтеза может быть выражена в количестве масс углекислоты и воды, потребляемых растениями планеты в течение года. В общем, около 480 млрд. т. веществ ежегодно потребляется фотосинтезом. Расчеты показывают, что за 10 млн. лет фотосинтез переработал массу воды, равную всей гидросфере. В течение 6-7 лет поглощается вся углекислота атмосферы, примерно за 4000 лет весь кислород атмосферы может обновиться за счет фотосинтеза. Следует помнить, что в процессе фотосинтеза прямо или косвенно участвуют и другие биофильные элементы (N, P, S), а также металлы – K, Si, Ca, Mg, Na.

### ***Функциональные связи в биосфере***

Гидросфера, литосфера и атмосфера тесно связаны друг с другом, составляя вместе единую функциональную систему.

Почву с гидросферой связывает постоянный вынос почвенных вод в водоемы разных типов, при этом именно на уровне почвы поверхностные воды трансформируются в грунтовые, которые участвуют в формировании речного стока. Сорбционные свойства почв являются своеобразным барьером, защищающим водоемы от загрязнений.

Почва выступает как мощный фактор энергетического баланса биосферы и связывается с атмосферными процессами (регулирование газового режима, влагооборота и т.д.).

Почва напрямую связана с литосферой, как с субстратом своего образования, способствует геохимическому преобразованию верхних слоев литосферы. Почва служит источником вещества для образования минералов, горных пород, полезных ископаемых и т.д. Таким образом, почва является связующим звеном биологического и геологического круговоротов.

Функциональная взаимосвязь составных частей биосферы включает и взаимодействия процессов, происходящих в атмосфере и гидросфере. Это, во-первых, круговорот воды, во-вторых, энергетические связи (тепловое излучение, процесс фотосинтеза), в третьих, растворение в воде  $O_2$  и  $CO_2$ .

Функциональные связи составных частей биосферы превращают ее в генеральную саморегулирующуюся систему, обеспечивающую устойчивый глобальный круговорот веществ. При этом особое положение в этой системе занимают живые организмы, что выражается в их высокой химической активности, на которой основываются и регуляторные процессы в биосфере.

### ***Биогеоценоз, как основная структурно-функциональная единица биосферы***

*Биогеоценоз* – это сложная природная система, объединяющая на основе обмена веществ и энергии совокупность живых организмов (биоценозов) с неживыми компонентами – условиями обитания, что и определяет биогеоценоз, как основную структурно-функциональную единицу биосферы.

Термины «биогеоценоз» и «экосистема» часто используются как синонимы. Но понятие «биогеоценоз» (предложен В.Н. Сукачевым) имеет определенные территориальные границы, а понятие «экосистема» – безразмерное и может включать пространство любой протяженности (от капли воды до всей биосферы в целом). Таким образом, понятие «биогеоценоз» по отношению к понятию «экосистема» более частное.

К живым компонентам биогеоценоза относятся автотрофные и гетеротрофные организмы. Биогеоценоз является природной системой, способной устойчиво поддерживать биогенный круговорот веществ в конкретных географических условиях. Границы биогеоценоза определяются границей распространения растительного сообщества.

Биогеоценозы являются частями земной или водной поверхности, однородной с точки зрения топографических, микроклиматических, ботанических, зоологических, почвенных, гидрологических и геохимических условий. В этой системе круговорот веществ и поток энергии характеризуются определенной интенсивностью и направленностью. Отправной точкой круговорота веществ являются фотосинтез и создание фитобиомассы растениями.

Биогеоценоз относительно устойчив во времени и термодинамически открыт в отношении притока и оттока вещества и энергии.

Саморегулирующийся характер биосферы и биогеоценозов является результатом автокаталитического свойства живого вещества, его способности поглощать и обменивать вещества, расти и размножаться.

Основным положением энергетики экосистем является *необратимость биоэнергетических процессов*. Поэтому в применении к экосистемам (и в частности, к почвам) нельзя применять выражение «круговорот энергии», подобно тому, как в биогеохимии и в почвоведении о круговороте веществ. Единственно правильный термин – «поток энергии», так как энергия первичной биологической продукции в дальнейшем только расходуется. Для пополнения и возобновления биомассы в экосистеме необходим постоянный приток энергии

извне, в то время как приток атомов вещества может и не быть. Одни и те же атомы могут многократно циркулировать в биогеоценозе.

### *Понятие о ноосфере и техносфере*

В настоящее время антропогенная деятельность по своим эколого-геохимическим последствиям в биосфере может быть сопоставима с глобальными природными процессами.

А.Е. Ферсман все антропогенные процессы, вызывающие миграцию вещества, были объединены под термином «техногенез».

Непрерывное усиление техногенеза начало приводить к ряду существенных эколого-геохимических изменений в биосфере. Первым на это обратил внимание В.И. Вернадский, который отметил, что под влиянием антропогенной деятельности биосфера начала переходить в новое состояние. Таким образом, вместо биосферы, подчиняющейся в своем развитии природным закономерностям, возникает новая сфера. Эта сфера, как и биосфера, «пронизана жизнью», но в своем развитии подчиняется не только природным закономерностям, но и техногенезу. Эта сфера называется *ноосферой – сферой разума*. Как писал Вернадский, «ноосфера - ... это новое геологическое явление нашей планеты. В ней впервые человек становится крупнейшей геологической силой».

Соответственно, *техносфера* – это часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком в технические и техногенные объекты (здания, дороги, механизмы и т.п.). Таким образом, техносфера потенциально становится частью ноосферы.

#### *Контрольные вопросы:*

6. Назовите этапы развития биосферы.
7. Назовите главные компоненты биосферы.
8. Из каких разнородных веществ состоит вещество биосферы по В.И. Вернадскому?
9. Что собой представляет живое вещество биосферы и его химический состав?
10. Каковы биогеохимические функции живого вещества?
11. Какие биогеохимические функции выделил В.И. Вернадский?
12. Каковы аспекты геохимической деятельности организмов по Польшину?
13. Какова роль живых организмов в распределении вещества и энергии в биосфере и почвенном покрове?
14. Опишите функциональные связи в биосфере.
15. Расскажите о биогеоценозе, как о структурно-функциональной единице биосферы.
16. Дайте понятия «ноосферы» и «техносферы».

#### 4. Основные показатели биогеохимических систем

##### *Форма нахождения химических элементов*

К числу показателей, наиболее отвечающих задачам биогеохимии и экологии, следует отнести такой, как *форма нахождения химических элементов*, под которой понимают относительно устойчивые и большие системы химических равновесий элементов, то есть, форма нахождения определяется состоянием атома данного элемента в природных растворах, включениях, кристаллической решетке минералов и т.д.

Поведение различных химических элементов в разных термодинамических условиях земной коры существенно зависит от формы их нахождения. В течение времени разной продолжительности идет непрерывный переход элементов из одной формы нахождения в другую.

Отдельные формы нахождения являются более или менее независимыми друг от друга. Сочетание элементов в каждой из них подчиняется различным физико-химическим закономерностям и является возможным только при определенных внешних условиях (внешних факторах миграции).

А.И. Перельман (1986) выделил подвижные и инертные формы нахождения химических элементов в литосфере.

Первоначально формы нахождения химических элементов в земной коре были объединены Вернадским в 4 главнейших:

1. горные породы и минералы (к ним были отнесены природные воды и газы);
2. живое вещество;
3. магматические расплавы (преимущественно силикатные);
4. состояние рассеяния.

Б.А. Гаврусевич предложил дополнительно выделять, как отдельные формы нахождения, изоморфные примеси, водные растворы и газовые смеси.

При изучении эколого-геохимических изменений, происходящих в верхних частях земной коры, В.А. Алексеенко выделил еще три формы нахождения и, в целом, рассматривает 8 *форм нахождения*:

- 1) состояние рассеяния;
- 2) самостоятельные минеральные виды;
- 3) изоморфные примеси;
- 4) водные растворы;
- 5) газовые смеси;
- 6) коллоидная и сорбированная форма;
- 7) биогенная форма;
- 8) техногенные соединения, не имеющие природных аналогов.

*Биогенная форма* является одной из наиболее сложных. Она представляет собой системы химических равновесий элементов, образующих животные и растительные организмы. В этой форме можно выделить отдельно другие формы – состояние рассеяния, водные растворы,



газовые смеси, минеральную форму и изоморфную, но все они тесно связаны между собой процессами жизнедеятельности организмов и пока эти процессы идут простые формы объединяются в одну – биогенную.

*Коллоидная и сорбированная коллоидами форма.* В этой форме химические элементы находятся только в верхних частях земной коры. Значительную роль в образовании этой формы нахождения играют живые организмы, в том числе и человек (дробление горных пород при разработке месторождений и при строительстве, при сжигании топлива и т.д.). В последнее время роль данной формы нахождения в миграции химических элементов на поверхности Земли значительно возросла.

*Техногенные соединения.* Эта форма нахождения химических элементов напрямую связана с антропогенной деятельностью. Такие соединения не имеют природных аналогов, оказывают все большее воздействие на эколого-геохимическую обстановку в биосфере (использование ДДТ, влияние фреонов на озоновый слой, накопление металлов в почвах промышленных регионов и т.д.).

подавляющая часть массы земной коры имеет кристаллическое строение. Основная форма нахождения элементов в земной коре связана с узлами кристаллических решеток, которые могут быть заняты как непосредственно главными элементами данного минерала, входящими в его кристаллическую структуру, так и *изоморфными примесями*. Под *изоморфизмом* понимается свойство элементов замещать друг друга в структуре минерала благодаря близким значениям их радиусов. В результате изоморфизма рассеянные элементы закономерно накапливаются в определенных минералах. Полевые шпаты служат носителями бария, стронция, свинца, оливины – никеля и кобальта, цирконы – гафния и т.д.

В любом природном объекте (горной породе, почве и т.д.) можно выделить химические элементы, содержащиеся в значительном количестве и в очень малом. Первые образуют химические соединения, слагающие как мелкие, так и крупные физически однородные тела. Вторые рассеяны в массе соединений главных химических элементов. Причем один и тот же элемент в разных условиях может относиться и к первой и ко второй группе. *Рассеянные элементы* проявляют себя не одинаково в разных природных системах и средах и в определенных условиях могут проявлять высокую геохимическую активность.

Можно выделить следующие *формы нахождения рассеянных элементов* в кристаллическом веществе земной коры (Добровольский, 1983):

1) Микроминералогические формы:

- а) элементы, входящие в акцессорные минералы (*акцессорные минералы* – минералы, образующие ничтожную примесь в горных породах);
- б) элементы, содержащиеся в микроскопических выделениях в результате распада твердых растворов;
- в) элементы, находящиеся во включениях остаточных растворов.

2) Неминералогические формы:

- а) элементы, сорбированные поверхностью дефектов реальных кристаллов;
- б) элементы, входящие в структуру минерала-носителя по законам изоморфизма;
- в) элементы, находящиеся в структуре минерала-носителя в неупорядоченном состоянии.

### *Понятие о кларках (редкие, редкие рассеянные, типоморфные элементы)*

При рассмотрении биогеохимического состояния систем часто приходится сталкиваться с *законом Кларка-Вернадского*, который говорит о том, что в любом объекте Земли содержатся все химические элементы, находящиеся в коре. Однако, различные элементы распределены, как правило, крайне неравномерно и содержание одних существенно выше, чем других. Одни элементы (резко преобладающие) составляют основу системы, другие находятся в ней в виде своеобразных примесей (механических, изоморфных и т.д.). Концентрации элементов в геохимических системах могут колебаться лишь в конкретных, определенных для каждой системы, пределах.

В биогеохимических системах содержания всех химических элементов являются важными показателями, определяющими каждую из систем. Среднее содержание какого-либо элемента в данной природной системе называют *кларком* элемента (синоним – «распространенность»). Сопоставление кларков какого-либо химического элемента в разных системах дает возможность объективно судить о перераспределении этого элемента в процессе формирования оболочек.

Элементы с низкими кларками (менее 0,01-0,001%) в геохимии называют *редкими*. Некоторые из них концентрируются в земной коре (месторождения меди, цинка и др.).

Элементы, которые обладают и низкими кларками и малой способностью к концентрированию, рассеяны в земной коре и во всех породах, почвах, минералах встречаются в ничтожных количествах. Такие элементы называют *редкими рассеянными*. Их роль в ландшафте всегда второстепенна (Ra, Sc, Cd, Re, In и др.).

Распространенные химические элементы, определяющие существенные и характерные особенности данного ландшафта называют *типоморфными* (Ca, H, Fe, S, Cl и др.). Различия в кларках приводит к тому, что химическое сходство элементов совсем не означает их геохимическое сходство.

Чем больше кларк элемента, тем при сходных химических свойствах выше его содержание в природных водах, а следовательно, и больше вероятность образования насыщенных растворов, осаждения минералов.

Редкие и особенно редкие рассеянные элементы, как правило, не насыщают природные воды, в связи с чем, число их минералов не велико. Например, для Ca известно 385 минералов (кларк 2,96), а его химический аналог Ra (кларк около  $10^{-10}$ ) не образует ни одного собственного минерала; K – 106 минералов, его аналог Rb – 0.

Следовательно, способность к минералообразованию зависит не только от химических свойств, но и от их кларков.

## *Распространенность химических элементов в геохимических системах*

К числу важнейших геохимических показателей, определяющих поведение химических элементов в отдельных системах и характеризующих эти системы, относится *распространенность химических элементов*.

В земной коре распространенность химических элементов характеризуется величиной их кларков. Так как кларки земной коры контролируют геохимические особенности среды, в которой возникло и развивается живое вещество, то они должны оказывать влияние на состав живого вещества.

Неравномерность распространения элементов в земной коре в еще большей мере характерна для организмов. Так, если в земной коре на долю восьми наиболее распространенных элементов (O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K) приходится 98% ее массы, то в живом веществе уже только три элемента (O, C, H) составляют 98,5% массы организмов. В обеих системах преобладают более легкие химические элементы.

Кроме кларков земной коры, к настоящему времени определены кларковые содержания для основных типов горных пород и почв.

Для характеристики неоднородных систем В.А. Алексеенко (1997) был предложен геохимический показатель – *абсолютный разброс химических элементов*. Этот показатель представляет собой отношение максимального фонового содержания элемента в одной составной части неоднородной геохимической системе к минимальному фоновому содержанию этого же элемента в другой составной части этой же системы.

Миграция приводит к значительному перераспределению элементов в биосфере. Их содержание в почвах, коре выветривания, водах, организмах, как правило, отличается от кларка. Поэтому необходимо учитывать способность их концентрироваться или рассеиваться в различных объектах. Чтобы количественно оценить неоднородность распределения химических элементов в земной коре, В.И. Вернадский ввел специальный показатель – *кларк концентрации* ( $K_K$ ). Его величина характеризует отклонение содержания элементов в данном объекте от кларка литосферы:

$$K_K = \frac{A}{K},$$

где  $A$  – содержание химического элемента в горной породе, руде, минерале и пр.;  $K$  – кларк этого элемента в земной коре.

Если кларк концентрации больше 1, то это указывает на обогащение элемента, если меньше – это означает снижение его содержания по сравнению с данными для земной коры в целом.

В настоящее время огромное влияние на миграцию и перераспределение химических элементов в компонентах биосфере оказывает техногенная деятельность.

Для примера рассмотрим некоторые показатели, характеризующие распределение химических элементов в биогеохимической системе на примере Куйбышевского водохранилища в пределах г. Ульяновска. К таким показателям относятся: *коэффициент концентрации химического элемента* –  $K_C$ , позволяющий написать формулу геохимической

ассоциации элементов; коэффициент среднего накопления химических элементов –  $R_x$ ; суммарный показатель загрязнения –  $Z_C$ .

Группу элементов, отражающую состав аномалий и характеризующую определенный геохимический поток, связанный с источником или несколькими источниками воздействия, называют «*геохимической ассоциацией*». Выявление и оценка геохимических аномалий основаны на изучении геохимических выборок, отвечающих определенным участкам территории, испытывающим воздействие источника (группы источников) загрязнения или находящимся в фоновых условиях (Янин, 2003).

Многие элементы в зонах загрязнения отличаются неоднородным распределением.

Для характеристики техногенных геохимических аномалий в донных отложениях рек предлагается использовать следующие показатели (в случае «положительных» аномалий) (Янин, 2003):

1. **Коэффициент концентрации химического элемента –  $K_C$** , характеризует степень концентрирования элемента (уровень аномальности, интенсивность аномалии) в донных отложениях относительно фонового содержания. В геохимическую ассоциацию включаются элементы со значением  $K_C$ , не менее 1,5, т.е. концентрация элемента в 1,5 раза превышающая фон, является минимально-аномальным содержанием.

$$K_C = \frac{C_i}{C_\phi},$$

$C_i$  – средняя концентрация  $i$ -го элемента в исследуемом объекте;  $C_\phi$  – фоновое содержание этого элемента.

Был проведен анализ содержания подвижных форм тяжелых металлов в донных отложениях Куйбышевского водохранилища в пределах г. Ульяновска. В *таблице 1* представлены рассчитанные коэффициенты концентрации  $K(C)$  **подвижных форм металлов** в пробах донных отложений.

Таблица 1

*Коэффициенты концентрации  $K(C)$  подвижных форм металлов в пробах донных отложений Куйбышевского водохранилища*

| элемент<br>проба | алюминий | кобальт | медь | железо | марганец | никель | цинк |
|------------------|----------|---------|------|--------|----------|--------|------|
| 1                | -        | -       | -    | 2,6    | 3,0      | -      | 0,6  |
| 2                | 1,5      | -       | -    | -      | -        | -      | 1,5  |
| 3                | 6,0      | -       | 1,1  | 17,1   | 7,6      | -      | -    |
| 4                | 1,5      | -       | -    | 8,7    | 1,8      | -      | 3,0  |
| 5                | 8,6      | 1,5     | 2,1  | 20,4   | 6,5      | 2,8    | 4,4  |
| 6                | 19,3     | 1,2     | -    | 22,0   | 13,0     | 2,7    | 7,2  |

По результатам определения коэффициента концентрации можно написать **формулу геохимической ассоциации**, характеризующую качественный состав и структуру возможной геохимической аномалии. Например, формулой геохимической ассоциации для проб №5 и 6:

Проба №5: Fe<sub>20,44</sub> – Al<sub>8,64</sub> – Mn<sub>6,5</sub> – Zn<sub>4,4</sub> – Ni<sub>2,8</sub> – Cu<sub>2,1</sub> – Co<sub>1,5</sub>

Проба №6: Fe<sub>22</sub> – Al<sub>19,3</sub> – Mn<sub>13</sub> – Zn<sub>7,2</sub> – Ni<sub>2,7</sub>

Средний коэффициент концентрации элементов донных отложений по результатам расчетов: алюминий – 7,4; кобальт – 1,3; медь – 1,7; железо – 14,2; марганец – 6,4; никель – 2,8; цинк – 3,5. Геохимическая ассоциация: Fe<sub>14,2</sub> – Al<sub>7,4</sub> – Mn<sub>6,4</sub> – Zn<sub>3,5</sub> – Ni<sub>2,8</sub> – Cu<sub>1,7</sub>.

2. **Коэффициент среднего накопления химических элементов  $R_x$** , являющийся вариантом коэффициента накопления Моксхэма, представляет собой среднее арифметическое суммы значений  $K_C$  элементов, входящих в геохимическую ассоциацию, и характеризует среднюю интенсивность аномалии.

$$R_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i}{C_\phi} \right),$$

Где  $C_i$  – концентрация  $i$ -го элемента в изучаемом компоненте,  $C_\phi$  – его фоновое содержание,  $n$  – количество элементов, входящих в ассоциацию ( $N_\Sigma$ ), у которых  $K_C$  не менее 1,5.

Коэффициент среднего накопления химических элементов (подвижные формы тяжелых металлов) для исследованных проб донных отложений Куйбышевского водохранилища  $R_x = 6$ .

3. **Суммарный показатель загрязнения  $Z_C$** , представляющий собой сумму коэффициентов концентрации  $K_C$  элементов (за вычетом фона), входящих в геохимическую ассоциацию. Отражает аддитивное превышение фонового уровня группой ассоциирующихся элементов.

$$Z_C = \sum_{i=1}^n K_C - (n - 1),$$

Где  $K_C$  – коэффициент концентрации  $i$ -го элемента,  $n$  – количество элементов, входящих в ассоциацию ( $N_\Sigma$ ).

Для исследованных проб донных отложений суммарный показатель загрязнения (по подвижной форме металлов) составил  $Z_C = 31$ .

В таблице 2 представлены уровни загрязнения и оценка экологической обстановки в зависимости от суммарного показателя загрязнения.

Таблица 2

Оценка экологической обстановки по суммарному показателю загрязнения  
(Крутский, Кричевцова, 2011)

| $Z_C$        | Уровень загрязнения | Оценка экологической обстановки | Количество соответствующих проб |
|--------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <8           | Минимальный         | Относительно удовлетворительная | 1                               |
| От 8 до 16   | Слабый              |                                 | 4                               |
| От 16 до 32  | Средний             | Напряженная                     | 7                               |
| От 32 до 128 | Высокий             | Критическая                     | 1                               |
| >128         | Максимальный        | Катастрофическая                | –                               |

В соответствии с таблицей 2, уровень загрязнения донных отложений Куйбышевского водохранилища в пределах г. Ульяновска *средний* (по подвижным формам металлов), а *экологическая обстановка – напряженная*.

Таким образом, использование различных геохимических показателей позволяет судить о распространенности химических элементов в геохимических системах и выявлять и прогнозировать появление различных геохимических аномалий, приводящих к ухудшению экологической обстановки.

*Контрольные вопросы:*

1. Что понимают под «формой нахождения химических элементов»?
2. Какие формы нахождения химических элементов выделяют?
3. О чем говорит закон Кларка-Вернадского?
4. Что такое кларк элемента?
5. Какие элементы называют редкими, редкими рассеянными, типоморфными?
6. Что такое распространенность химических элементов, и какой величиной она характеризуется?
7. Что такое абсолютный разброс химических элементов?
8. Что собой представляет кларк концентрации?
9. Какие показатели можно использовать для выявления геохимических аномалий в природных системах?

## 5. Миграция элементов в ландшафтах

### *Кора выветривания и продукты выветривания*

Горизонты горных пород, где протекают процессы выветривания, называются корой выветривания. В ней различают зону поверхностного (современного) выветривания и зону глубинного (древнего) выветривания. Мощность коры современного выветривания, в которой может протекать почвообразовательный процесс, колеблется от нескольких сантиметров до 2-10 м. В коре выветривания встречается резкая форма литологической неоднородности биосферы.

По минералогическому составу коры выветривания делят на два типа:

1. *Сиаллитную*: распространена в регионах с умеренно влажным климатом, для нее характерно образование глинистых минералов, преимущественно монтмориллонитовой группы и гидрослюд, сохранение наиболее устойчивых минералов.
2. *Аллитную*: формируется в условиях влажного тропического и субтропического климата, для нее характерно господство вторичных минералов группы гидроокисей железа и алюминия, почти полное разрушение первичных минералов (кроме кварца), вынос оснований и кремнезема; в составе глинистых минералов преобладают каолинит и галлуазит.

По генезису коры выветривания делят на:

1. *Остаточные (элювиальные)*: представляет собой совокупность остаточных продуктов выветривания различных по составу элювиальных образований в верхнем слое литосферы (т.е. продукты выветривания остаются в верхнем слое литосферы на месте выветривания).
2. *Аккумулятивные (переотложенные)*: представляют собой продукты выветривания, перемещенные водой, ветром, льдом.

От исходной породы кора выветривания отличается рядом свойств: обменная поглотительная способность, влагоемкость, водопроницаемость, накопление элементов минерального питания растений и др.

### ***Особенности биогеохимической миграции продуктов выветривания и почвообразования***

Продукты выветривания и почвообразования, образующиеся на суше, редко остаются и сохраняются на месте возникновения (*in situ*).

Различия между абсолютными отметками суши и океана создают колоссальные запасы потенциальной и кинетической энергии на континентах и их горных регионах, способны выполнять огромную геологическую, геохимическую, почвообразовательную работу. Возникает общеземной биогеохимический перенос – поток водных масс, обломочного

материала, твердых, растворенных и газообразных продуктов выветривания и почвообразования от горных регионов и высоких плато к низменностям, морям и океану.

Примерно на 30-ти процентах поверхности суши биогеохимический поток вещества и связанной в нем энергии направлен не в океан, а в бессточные материковые низменности и депрессии.

Области тектонических поднятий суши (высокие плато, расчлененные горы) характеризуются отрицательным балансом продуктов выветривания и эрозионно-промывным водным режимом. Они являются источником питания и стока наземных и подземных вод, взвешенных и растворенных минеральных и органических веществ, мигрирующих в направлении низменностей, морей, океана.

Горы и высокие плато окружены неравномерной полосой делювиальных и пролювиальных покровов, конусов, шлейфов, сухих дельт, образующих наклонные подгорные транзитные равнины. Равнинные области тектонических погружений, бессточные и береговые низменности, долины нижнего течения, поймы и особенно дельты рек, мелководья эстуариев, заливов, шельфа являются областями аккумуляции механических и растворенных продуктов, принесенных под влиянием сил гравитации водами временных потоков, рек, выклинивающихся подземных вод. Это современные гидроморфные, субаквальные, земноводные ландшафты наиболее активного накопления и положительного биогеохимического баланса продуктов выветривания и почвообразования, приносимых со стороны гор и высоких плато.

Между горными и платообразными эрозионно-денудационными областями суши (примерно 20-30% поверхности суши) и современными аккумулятивными низменностями внутриматериковых депрессий, береговых, дельтовых, шельфовых мелководий расположены переходные транзитные области, в которых могут выпадать полностью или проявляться в ослабленной степени черты, свойственные как горно-эрозионным, так и аккумулятивным ландшафтам. На равнинах суши преобладают главным образом территории переходного типа (область высот ниже 100-500 м над уровнем моря).

Указанные основные *почвенно-геохимические макротипы* территории суши связаны друг с другом гидрогеологически, геохимически, генетически и исторически. Они представляют собой главные формы проявления глобальной литологии и геохимии поверхности суши и почв: генерирование минерального и органогенного (биогенного) мелкозема, дисперсных масс и растворов, их вынос, транспорт, транзит, перераспределение, дифференциацию, частичную и основную аккумуляцию.

Надо помнить, что газообразные и летучие продукты вулканизма, выветривания, почвообразования и биогенеза будут в своем движении в значительной мере отклоняться от путей миграции и аккумуляции, свойственных механическим взвесям и водным растворам.

### ***Компоненты миграции. Внутренние и внешние факторы миграции***

Биогеохимические процессы выражаются в непрерывном и прерывистом перемещении масс веществ в оболочках Земли – *миграциях химических элементов*.



Миграционные процессы в биосфере протекают в соответствии с *законом В.И. Вернадского*: миграция химических элементов в биосфере происходит при непосредственном участии живого вещества, или же она протекает в среде, геохимические особенности которой обусловлены живым веществом, существовавшим и существующим в биосфере со времени ее образования.

Постоянными *компонентами* процессов биогеохимической миграции и дифференциации вещества на суше являются продукты механического и химического разрушения, суспензии, коллоиды, молекулярные, ионные растворы, аэрозоли, летучие соединения и газы.

Горизонтальный перенос механического обломочного материала по уклону местности происходит под влиянием сил гравитации, движения льда и воды тем дальше и интенсивнее, чем выше степень его дисперсности и чем больше скорость движения. Перенос водорастворимых продуктов выветривания и почвообразования в виде водных растворов происходит в трех направлениях. В горизонтальном – по уклону местности; в нисходящем – в глубь породы и почв с фильтрационной водой; в восходящем направлении – в виде капиллярно-пленочной влаги, способной подниматься в суглинистых и глинистых грунтах на несколько метров.

А.Е. Ферсман выделил *внутренние и внешние факторы* миграции. К первым относятся свойства атомов и их соединений. Ко вторым – физико-химические условия среды, в которой происходит миграция элементов.

*Внутренние факторы миграции:*

1. термические свойства элементов, их летучесть или тугоплавкость;
2. химические свойства соединений элементов;
3. энергетические свойства ионов, определяемые их кристаллохимическими параметрами и связанные с ними явления изоморфизма;
4. гравитационные свойства – массы атомов, плотности различных элементов и их соединений;
5. радиоактивные свойства, определяющие вековое изменение изотопного состава радиоактивных и радиогенных элементов.

*Внешние факторы миграции:*

1. температура;
2. давление;
3. концентрация вещества, определяющая ход событий согласно закону действующих масс;
4. степень ионизации растворов и расплавов;
5. концентрация водородных ионов, величина pH;
6. окислительно-восстановительный потенциал (Eh) растворов;
7. поверхностные силы природных коллоидных систем и связанные с ними явления адсорбции элементов и их соединений;
8. равновесие фаз;
9. действие живых организмов.

Указанные факторы миграции действуют совместно, переплетаясь друг с другом.

В *таблице 3* показаны компоненты и факторы геохимического переноса

Характеристикой миграции может служить работа, совершаемая при перемещении химических элементов. Она выражается двумя типами параметров – экстенсивными (Е) и интенсивными (И):

$$A = f(E, I).$$

К «Е»-параметрам относится расстояние, на которое мигрируют элемент и масса перемещенного элемента.

К «И»-параметрам относятся различные показатели, главным образом скорость миграции.

Миграционная способность растворимых продуктов выветривания возрастает с увеличением их растворимости. Малорастворимые соединения не могут мигрировать на большие расстояния от места образования (силикаты, карбонаты, фосфаты и др.). При этом на растворимость влияет реакция среды, температура, присутствие других соединений, окислительно-восстановительная обстановка.

Таблица 3

*Компоненты и факторы геохимического переноса*

| возрастание миграционной способности ↓ | компонент   | фактор  |
|--|---|---|
|  | массивы, глыбы, грубообломочный материал  | ледники и морены, осыпи, оползни, волочение по дну рек  |
|  | гравий, песок, пыль   | водные и воздушные потоки   |
|  | дисперсные глины  | водные суспензии  |
|  | гумус, органические остатки   | ионные и коллоидные растворы; тонкие суспензии, взвеси, хлопья                                      |
|  | соединения Al, Fe, Mn, Ni, Co, Cd, Pb   | окислы разной степени гидратированности, хелаты, бикарбонаты, коллоидные растворы, тонкие суспензии |
|  | SiO <sub>2</sub> (подвижн.)   | ионные, молекулярные, коллоидные растворы; тонкие водные суспензии и аэрозоли кремнезема            |
|  | соли, минеральные удобрения   | водные растворы; тонкие суспензии кристаллов; эоловые взвеси  |
|  | газы, дым, пары, смог, летучие соединения: SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , Cl, Br, I, CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> и др. | воздушные потоки и растворы   |

Компоненты, которые химически сравнительно пассивны и не реагируют друг с другом, обладают наиболее высокой миграционной способностью, оставаясь в растворе и перемещаясь почвенными, грунтовыми или речными водами (Na, Cl, MgSO<sub>4</sub> и др.).

Продукты выветривания и почвообразования можно объединить в группы и ряды геохимической подвижности.

Б.Б. Польшов установил пять *групп относительной подвижности элементов* при выветривании и почвообразовании с относительным значением их геохимической подвижности:

- 1) энергично выносимые: Cl, Br, I, S – 10;

- 2) легко выносимые: Ca, Na, K, Mg – 1;
- 3) подвижные: SiO<sub>2</sub>, P, Mn – 0,1;
- 4) слабоподвижные: Fe, Al, Ti – 0,01;
- 5) инертные: SiO<sub>2</sub> (кварца) – 0.

### *Виды миграции химических элементов, их значение*

Гипергенез объединяет целую группу процессов, протекающих в самых верхних горизонтах твердого тела Земли, на границе литосферы, гидросферы и атмосферы. Они охватывают то пространство верхних оболочек планеты, которое входит в биосферу.

В зоне гипергенеза в первую очередь происходит коренное перераспределение главных строителей земной коры – восьми ведущих химических элементов (O, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K), способствующее образованию новых минеральных ассоциаций.

А.И. Перельманом все многообразие миграций было разделено в зависимости от формы движения материи, с которой связано перемещение атомов:

1. *механическая миграция (водная, воздушная и гравитационная)*: подчиняется законам механики (образование россыпей, ветровая и водная эрозия и др.); зависит преимущественно от величины частиц минералов и пород, их плотности, скорости движения вод, ветра; химические свойства элемента не имеют значения.
2. *физико-химическая миграция (водная и воздушная)*: к ней относятся сложные процессы, сущность которых определяется законами физики и химии – диффузией, растворением, осаждением, сорбцией и т.д. Лучшее всего изучена миграция в водных растворах в виде ионов (ионная миграция), зависящая от растворимости солей, pH, окислительно-восстановительного потенциала. Иным законам подчиняется коллоидная миграция, миграция газов.
3. *биогенная миграция*: связана с деятельностью живых организмов. Приводит к образованию органических компонентов в осадочных породах, а в последствии всех горючих полезных ископаемых. Этот вид миграции не может анализироваться только на основе общих законов физики и химии. Организмы существуют в особом информационном поле, для них характерны процессы управления, переработки информации, отсутствующие в неживой природе.
4. *техногенная миграция*: связана с общественной деятельностью. Происходит в результате сочетания геохимических процессов, вызванных промышленной деятельностью человека (нефтепроводы, выработка месторождений полезных ископаемых и др.).

Значение видов миграции для разных элементов не одинаково. Например, если для K и P особенно большую роль играет биогенная миграция, то для Na и Cl – физико-химическая, для Ti, Sn, Au, Pt – механическая.

В разных ландшафтах соотношение видов миграции также неодинаково. В пустыне возрастает роль механической миграции, во влажных тропиках – физико-химической и

биогенной. Тем не менее, виды миграции не существуют в ландшафте изолированно, но ведущее значение имеет наиболее сложный вид миграции.

Таким образом, геохимическое поведение химических элементов (их соединений) в биосфере (содержание, распределение, форма нахождения в отдельных частях ландшафта) определяется в основном ландшафтно-геохимическими особенностями данного участка биосферы.

Основные черты миграции главных химических элементов земной коры в условиях гипергенеза, показаны в *таблице 4*.

Таблица 4

*Классификация миграции главных элементов литосферы в гипергенных процессах (по В.М. Гольдшмидту)*

| Способ миграции   | Природные образования  | Ведущий элемент |
|---|--|-----------------|
| Элемент не участвует или почти не участвует в явлениях химического переноса – остающиеся на месте (резюваты)                        | Элювиальные отложения, россыпи и другие продукты, которые могут быть перенесены только механически | Si              |
| Концентрация элементов гидролиза (гидролизаты). Выпадение элементов в результате недостаточной кислотности растворов                | Образование глинистых минералов, и в частности бокситов  | Al              |
| Концентрирование элемента в результате окисления (оксидаты)<br>$Fe^{2+}$ (не гидролизуется) $\rightarrow$ $Fe^{3+}$ (гидролизуется) | Отложение бурых железняков и марганцевых руд (пирролюзит и вад)                                    | Fe<br>Mn        |
| Осаждение элементов в виде углекислых солей (карбонатным ионом, группа карбонатов)  | Отложение известняков, доломитов и магнезитов (также олигонитов)                                   | Ca<br>Mg        |
| Концентрация элементов путем испарения содержащих их растворов (эвапориты)  | Испарение водных растворов в замкнутых водоемах, образование соляных месторождений                 | Na<br>Mg<br>K   |

Миграционные потоки на земной поверхности непосредственно связаны с почвенным покровом, так как через них почва получает и отдает те или иные вещества, а современная почва – это всегда баланс между приходом и расходом вещества.

***Геохимические барьеры и их классификация. Ареалы аккумуляции***

Скорость движения веществ, их подвижность в глобальных региональных и локальных технобиогеохимических потоках зависит как от характеристик самих веществ (биофильность, растворимость, геохимическая активность и др.), так и от свойств вмещающей среды потоков, то есть от ее физико-химических параметров (термодинамических) на всем пути потока. Участки биосферы, на которых в миграционном потоке на коротком расстоянии резко уменьшается интенсивность миграции химических элементов, и как следствие этого процесса, повышается их концентрация, называют **геохимическими барьерами**. Данный термин был предложен А.И. Перельманом.

Обычно на барьере концентрируется целый комплекс элементов, образующий *парагенную ассоциацию* (*парагенезис* – совместное образование некоторых групп элементов или минералов, встречающихся вместе в земной коре). По обнаруженной парагенной ассоциации часто можно установить и тип барьера.

В зависимости от факторов миграции и геохимической обстановки геохимические барьеры биосферы разделяют на два типа – *природные (биогенные и абиогенные) и техногенные*.

Оба типа геохимических барьеров подразделяются в зависимости от вида миграции на: *физико-химические; биогеохимические; механические; техногенные*.

*Механические барьеры* представляют собой участки с резким уменьшением интенсивности механического перемещения веществ и соответственно их отложения. В биосфере механические барьеры связаны в основном с миграцией элементов минеральной или коллоидной форме. Миграция чаще всего происходит в воздушной и водной средах, а также на границах сред. В воздушной среде механическими барьерами являются горные системы, лесополосы (особенно для дисперсных частиц).

Во многих случаях создаются техногенные механические барьеры. Например, речные и противоселевые плотины.

*Биогеохимические барьеры* представляют собой накопление химических элементов растительными и животными организмами (например, аккумуляция тяжелых металлов сельхозкультурами). Биогеохимические барьеры могут задерживать поступление токсикантов из атмосферы (например, зеленые насаждения в селитебной зоне или около промышленного предприятия).

На *физико-химических барьерах* изменение концентрации веществ связано с их отложением из растворов при изменении физико-химической обстановки. Среди данных барьеров наибольшее площадное развитие получили *испарительные*. Например, засоление почв на сельскохозяйственных угодьях. При этом на барьерах идет накопление многих элементов.

*Техногенные барьеры* встречаются в настоящее время повсеместно. К ним относятся, например, различные сооружения (плотины, здания и др.)

Большие площади занимают *кислородные барьеры*, которые образуются при осушении болот. Они контролируют миграцию Fe, Mn, Co.

Важно подчеркнуть, что геохимические барьеры формируются на земной поверхности не хаотично, а образуют закономерную систему, которая связана с общей географической зональностью природных условий планеты и с закономерной геохимической дифференциацией конкретных геосистем. Например, для арктической зоны характерны окислительные и испарительные барьеры; для тундровой – восстановительные и кислые; для мерзлотно-таежной – окислительные, восстановительные и кислые; для хвойно-широколиственной зоны – окислительные, восстановительные, кислые и адсорбционные; для степей и сухостепей – сульфатные, карбонатные и адсорбционные; для территории с засоленными и щелочными почвами – сульфатные, карбонатные, щелочные и испарительные. Комплексными геохимическими барьерами являются поймы рек.

Геохимические барьеры бывают линейного и площадного характера. Результатом действия барьеров является пространственная дифференциация веществ на земной поверхности и образование *ареалов аккумуляции* различных элементов, их ассоциаций и соединений.

Понятие «ареал аккумуляции» был введен В.А. Ковдой, под которых он понимал территории, охватывающие совокупность ландшафтов и природных областей, где происходит образование однотипных вторичных почвенных соединений, их перемещение, осаждение и накопление в почвах, грунтовых водах и коре выветривания. В отличие от геохимических барьеров ареалы аккумуляции характеризуются не только абсолютной (путем приноса со стороны) аккумуляцией веществ, но и относительной, остаточной аккумуляцией.

### ***Биологический круговорот химических элементов и его значение в формировании почвенного покрова***

Большое значение для почвообразования имеет *биологический круговорот веществ (БИК)*, который обеспечивает циклическую динамику биогеохимии почвообразования.

В понятие «биологический круговорот» В.А. Ковда включает «сумму циклических процессов обмена веществ и энергии между средой и совокупностью растительных и животных организмов» (рисунк 3).

Роль БИК зависит от массы живого вещества. Следовательно, важнейшая часть БИК связана с растительными организмами и в значительной мере с лесами, так как на их долю приходится основная масса живого вещества. К настоящему времени в массе живого вещества только 2% приходится на животные и микроорганизмы.

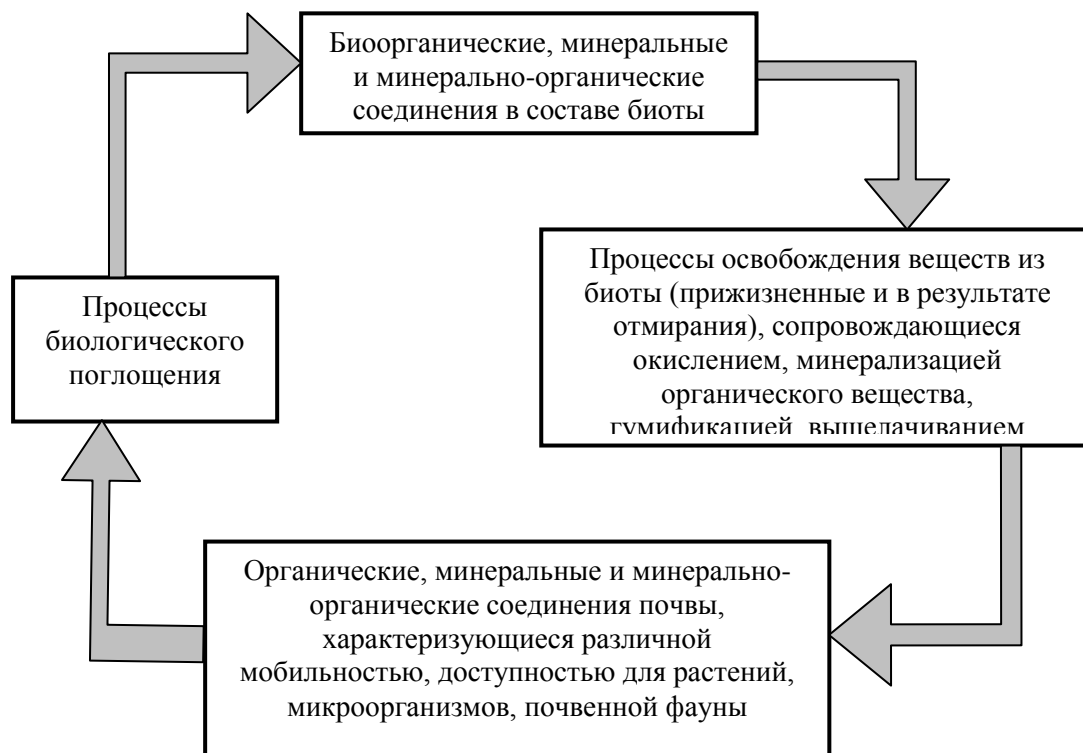


Рис. 3. Схема биологического круговорота (по Ковда, 1989).

Ежегодное отмирание и возобновление растительности сопровождается циклической миграцией огромных масс химических элементов. Зольные элементы потребляются растениями из почвы, участвуют в биохимических реакциях и возвращаются в почву после отмирания растений. Более сложны циклы углерода и азота, затрагивающие атмосферу. Часть освобождаемых при отмирании организмов элементов возвращаются в большой геологический круговорот через атмосферу и гидросферу, но посредством выветривания и почвообразования в биологический круговорот вовлекаются новые порции элементов.

По расчетам А.И. Перельмана, за 500 млн. лет (с ордовика и до нашего времени) суммарная продукция живого вещества, т.е. масса химических элементов, прошедшая в результате биологического круговорота через живое вещество, превысила массу земной коры.

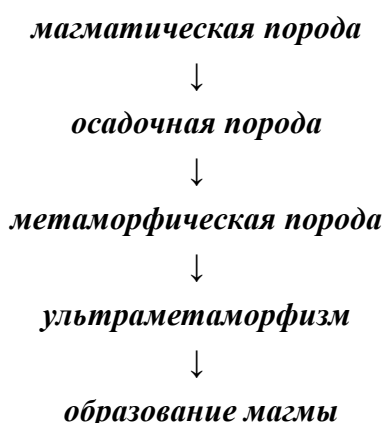
Объем (емкость) биологического круговорота в отношении того или иного элемента определяется, во-первых, характером его потребления организмами (степень биофильности элемента) и, во-вторых, запасом его доступных организмам форм.

Следует указать две важные особенности биологического круговорота:

- 1) избирательность поглощения элементов;
- 2) цикличность, связанная с цикличностью поступления на поверхность Земли солнечной радиации и, соответственно, с циклами развития растений.

### ***Большой геологический круговорот веществ***

Геохимическая история любого элемента может быть представлена как участие его в общем круговороте вещества в пределах верхних оболочек. Крупные концентрации элементов дают месторождения различного типа и генезиса. Наиболее распространенные элементы определяют химизм земной коры в целом и участвуют в большом геологическом круговороте:



Протекающие на земном шаре глобальные процессы вовлекают в различные преобразования и перемещения земного вещества огромные массы элементов, циркуляция и замкнутость глобальных циклов которых создают основу для превращения конечного содержания элементов на Земле в бесконечные глобальные миграционно-трансформационные циклы. В ранний абиотический период геологической истории это были *геохимические циклы*; с

появлением жизни на Земле они трансформировались в *биогеохимические*, а с появлением человека и образованием техносферы – в *технобиогеохимические*, играющие все возрастающую роль в глобальной циркуляции веществ.

Большой геологический круговорот веществ состоит из ряда самостоятельных биогенных, абиотических, геологических и техногенных циклов. Главные циклы (этапы): появление изверженных пород на земной поверхности – выветривание – почвообразование – эрозия и денудация – накопление континентальных и океанических осадков – метаморфизм осадков – выход на поверхность осадочных пород с новым циклом выветривания, почвообразования, денудации и осадконакопления либо их опускание в геосинклинальных<sup>1</sup> областях в мантию и переплавка, после чего опять выход на поверхность в новом цикле вулканизма. На *рисунке 4* показана связь малого биологического круговорота веществ и большого геологического круговорота.

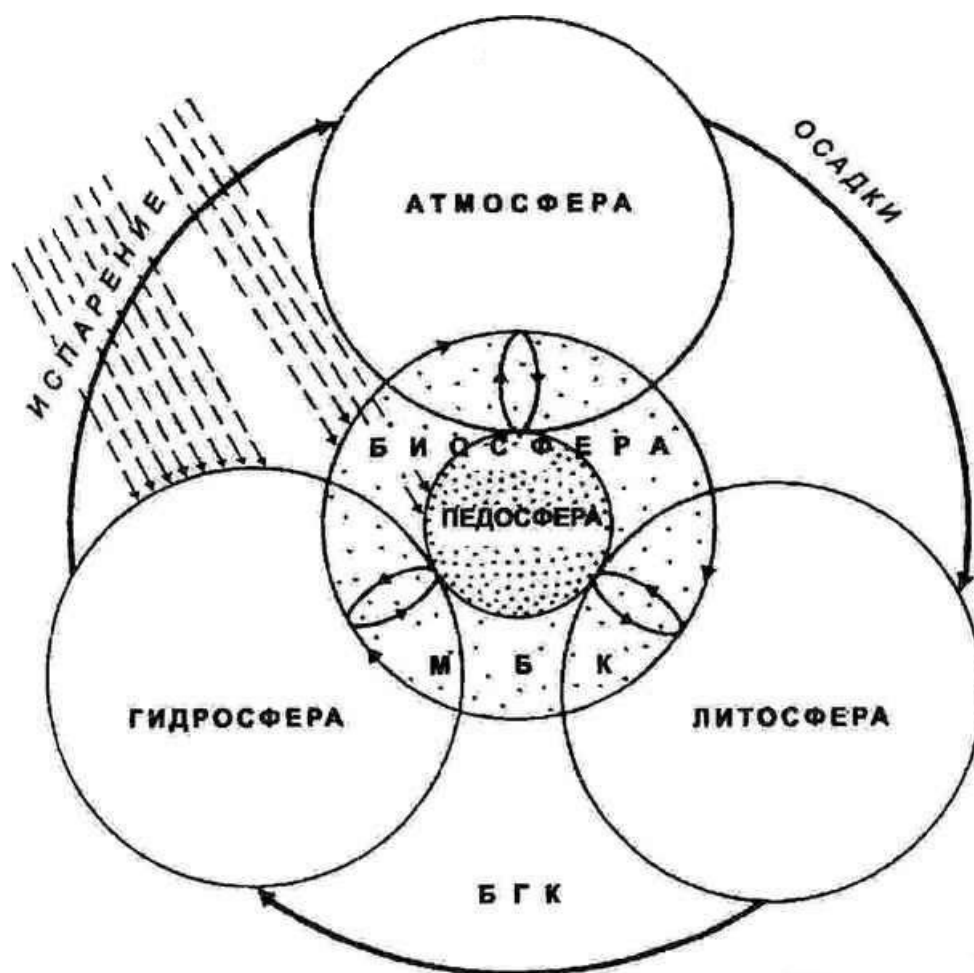


Рис. 4. Связь малого биологического круговорота и большого геологического.

Геологический круговорот может протекать и без участия процессов, связанных с почвообразованием. Однако при наличии биосферы и почв последние играют существенную

<sup>1</sup> Геосинклинали – обширные подвижные участки земной коры с разнообразными по интенсивности и направленности тектоническими движениями.



роль в формировании поверхностного и грунтового стоков, в образовании осадочных, поверхностных и донных отложений и т.д.

В процессе круговорота, который носит относительно циклический характер, более легкие молекулы, радикалы, атомы и ионы проходят меньший путь и затрачивают меньше времени на свое передвижение, чем более тяжелые вещества.

Таким образом, геохимический круговорот вещества на Земле в целом складывается из повторяющихся элементарных циклов превращения и перемещения, которые достаточно сложны. В разной степени он проявляется в вековой химической дифференциации всей планеты, главным образом ее верхней мантии.

*Контрольные вопросы:*

1. Что называют корой выветривания?
2. Какие бывают коры выветривания по минералогическому составу?
3. Какие бывают коры выветривания по генезису?
4. Расскажите об особенностях биогеохимической миграции продуктов выветривания и почвообразования.
5. О чем говорит закон В.И. Вернадского?
6. Что относят к компонентам миграции?
7. Назовите внутренние и внешние факторы миграции.
8. Какие виды миграции бывают?
9. Что называют геохимическими барьерами?
10. Что такое «парагенная ассоциация»?
11. Какие типы геохимических барьеров бывают?
12. Что собой представляет ареал аккумуляции?
13. Что собой представляет биологический круговорот химических элементов? Назовите его особенности.
14. Что собой представляет большой геологический круговорот веществ?
15. Что связывает малый биологический и большой геологический круговороты веществ?

## 6. Почвенно-геохимические ландшафты

### *Понятие о геохимических ландшафтах, их классификация и биогеохимические особенности*

В пределах плато и водоразделов, склонов и террас, низменностей и депрессий обособляются территориальные геохимические единицы – ландшафты, определяемые границами однородных по генезису и формам рельефа однотипных почв биоценозов. Эти территориальные единицы связаны особенностями и элементами водного режима, обменом продуктами биогенеза, выветривания и почвообразования и представляют собой закономерную пространственно-генетическую совокупность почвенного покрова и биогеохимических процессов. Поэтому их целесообразно называть *почвенно-геохимическими ландшафтами*.

То есть, *геохимические ландшафты* – это парагенетическая ассоциация закономерно сочетающихся элементарных ландшафтов, связанных между собой миграцией элементов.

Почвенные геохимические ландшафты характеризуются определенной историей и направленностью почвенных процессов и сложившимся типом баланса продуктов выветривания и почвообразования.

Различают следующие основные группы ландшафтов:

1. *Автоморфные (автономные, элювиальные) ландшафты*. Формируются на плато, водоразделах или на древних высоких террасах. Характеризуются глубоким уровнем грунтовых вод, отсутствием поступлений растворенных веществ из грунтовых вод в почвенные горизонты, преобладанием геохимического выноса над аккумуляцией, противоречивым сочетанием биологического круговорота веществ, ведущего к аккумуляции органогенов в гумусовой оболочке, и геохимического выноса, ведущего к обеднению почв и коры выветривания.
2. *Гидроморфные транзитные (капиллярно-гидроморфные, супераквальные) ландшафты*. Формируются обычно на I и II аккумулятивных речных, приморских или озерных террасах или эквивалентных им низменностях. Грунтовые воды находятся обычно близко к поверхности (< 3-4 м) и в той или иной мере оказывают влияние на почвообразовательные процессы. В этих условиях происходит частичная аккумуляция продуктов выветривания, почвообразования и биогенеза, выносимых грунтовыми водами из автоморфных ландшафтов водораздела и высоких террас.

Гидроморфные ландшафты являются переходными. Здесь происходит частичное суммирование деятельности биологического круговорота, аккумулирующего органогенные соединения в почвах, и геохимических процессов накопления продуктов, приносимых грунтовыми водами со стороны.

3. *Аккумулятивные гидроморфные ландшафты*. Формируются на отрицательных элементах рельефа, в дельтах и поймах, первых надпойменных террасах, в зоне подтопления суши, в подводных условиях лагун и др., то есть на низких затопляемых террасах с близкими грунтовыми водами. В почвенно-геохимическом отношении они не являются самостоятельными, так как получают большую часть

продуктов выветривания, почвообразования и биогенеза со стороны с водным твердым и химическим стоком, а также в виде эоловых и атмосферных отложений. Направление биологического круговорота веществ и направление геохимических процессов здесь совпадают полностью. Всё это приводит к обогащению ландшафта элементами минерального питания растений и подвижными соединениями разного типа.

*В зависимости от вида миграции* выделяют три основных рода элементарных и геохимических ландшафтов:

1. *абиогенные ландшафты*: характерна только механическая и физико-химическая миграция;
2. *биоогенные ландшафты*: ведущая роль принадлежит биоогенной миграции, подчиненная – у физико-химической и механической;
3. *культурные ландшафты*: главная роль – у техногенной миграции, но присутствуют и все остальные.

Различают также две разновидности ландшафтов:

1. *бессточные (недренированные)*, когда все продукты водного твердого и химического стока, поступающие со стороны, сохраняются в пределах ландшафта и накапливаются в нем;
2. *частично дренированные*, когда часть наиболее подвижных продуктов выносятся водами поверхностного или подземного стока.

Дифференциация продуктов выветривания и почвообразования не исчерпывается особенностями макроландшафтов. Горизонтальная и вертикальная дифференциация продуктов выветривания и почвообразования резко выражена в таких генетически и геоморфологически целостных образованиях, как поймы, дельты или водоразделы. Здесь дифференциация идет уже в пределах элементов микро- и мезорельефа и обуславливает комплексность почвенного покрова.

От геохимического ландшафта, в котором формируется почва, зависит баланс веществ в почве.

Положительный баланс приводит к аккумуляции веществ в почве, которая может быть абсолютной, относительной и остаточной. Глобальное значение имеет *абсолютная аккумуляция* в почве углерода и азота. *При относительной аккумуляции* происходит обогащение верхней части профиля почвы минеральными биофильными элементами вследствие перекачки этих элементов растениями из всей почвенной толщи в верхние горизонты, хотя почва в целом никаких веществ не накапливает. *При остаточной аккумуляции* относительно накапливаются в почве вещества, остающиеся на месте при выносе других, более подвижных компонентов.

Отрицательный баланс веществ обусловлен превышением уровня выноса над их приносом. Причем обеднение почв веществами может быть как общепрофильным, так и частичным.

При нулевом балансе вынос и приток веществ скомпенсированы.

Результатом действия глобальных, региональных и локальных технобиогеохимических потоков, прежде всего в рамках *каскадных ландшафтно-геохимических систем* (пояс выноса, пояс транзита и пояс аккумуляции) с разнообразием их геохимических барьеров, на

поверхности суши является формирование различных *геохимических провинций* (А.П. Виноградов), *биогеохимических провинций* (В.В. Ковальский), *техногенных геохимических аномалий* (А.И. Перельман). Первые и вторые формируются природными биогеохимическими миграционными потоками в ландшафтно-геохимических системах под влиянием природных геохимических барьеров; вторые – техногенными или технобиогеохимическими потоками под влиянием как природных, так и техногенных геохимических барьеров (часто вне каскадных ландшафтно-геохимических систем).

В целом все геохимические ландшафты делятся на *ландшафты суши* и *аквальные (водные)*, для которых разработаны подробные классификации.

Остановимся только на ландшафтах суши!

Рассмотрим классификацию, разработанную В.А. Алексеенко, которая базируется на ряде таксономических уровней, на каждом из которых учитываются определенные ландшафтно-геохимические особенности внешних факторов разных типов и видов миграции химических элементов.

*На первом таксономическом уровне*, согласно разработкам А.И. Перельмана, предложено учитывать основные формы движения материи. В соответствии с этим ландшафты объединяют в три группы: биогенные, абиогенные и техногенные.

*На втором уровне* ландшафты объединяются, исходя из особенностей ведущего вида миграции.

*На третьем уровне* ландшафты объединяются в зависимости от особенностей миграции химических элементов в почвах. При этом учитываются окислительно-восстановительная обстановка, кислотнo-щелочные условия, набор типоморфных элементов и содержание органических веществ.

*Четвертый уровень* предусматривает учет влияния на миграцию химических элементов в ландшафте геохимических особенностей подземных вод. Объединение ландшафтов на этом уровне проводится довольно редко и, как правило, при недавно происшедшем загрязнении вод.

*На пятом классификационном уровне* биогенные и техногенные ландшафты объединяются с учетом особенностей воздушной миграции элементов. Здесь целесообразно объединять ландшафты: 1) подверженные воздушной эрозии; 2) не подверженные воздушной эрозии; 3) с современным отложением эолового материала.

*На шестом классификационном уровне* учитываются факторы миграции, связанные с развитием (отсутствием) многолетней мерзлоты.

*На седьмом классификационном уровне* ландшафты объединяются с учетом геоморфологических особенностей регионов. Здесь выделяют ландшафты:

- 1) равнинных областей;
- 2) низкогорья и среднегорья;
- 3) высокогорных областей.

Эти ландшафты различаются по интенсивности процессов миграции, определяющейся в основном силами гравитации. Все выделенные здесь ландшафты целесообразно классифицировать на *элювиальные* (водораздельные), *транселювиальные* (верхних частей склонов), *трансаккумулятивные* (нижних частей склонов), *транссупераквальные*, на участках склонов надводных ландшафтов, *супераквальные* (надводные) и *субаквальные* (подводные).

*Контрольные вопросы:*

1. Что собой представляют почвенно-геохимические ландшафты?
2. Расскажите об основных группах ландшафтов: автоморфные, гидроморфные транзитные, аккумулятивные гидроморфные.
3. Как подразделяют ландшафты в зависимости от вида миграции?
4. Расскажите о балансе веществ в почве (положительный, отрицательный, нулевой).

## 7. Биогеохимические циклы элементов

### *Понятие о циклах элементов и их распределение в биосфере*

Почва, по своему положению, находится на стыке двух природных циклов – *большого геологического круговорота* (геохимический процесс миграции химических элементов от выветривающихся на суше горных пород к осадочным отложениям моря, которые в дальнейшем вновь подвергаются выветриванию) и *малого биологического* (миграция химических элементов в системе почва – растение – почва). С одной стороны, химический состав почвы определяется химическим составом почвообразующих пород, с другой – энергичным перераспределением элементов под влиянием факторов почвообразования и главным образом жизнедеятельности растений и животных. То есть, почва – это важное связующее звено между литосферой, гидросферой, атмосферой и биосферой. Поэтому крайне опасно глобальное техногенное изменение химизма почв, что приводит к нарушению всех естественных геохимических циклов элементов.

Согласно Ю. Одуму, *биогеохимические циклы разделяются на два типа*: круговорот газообразных веществ с резервным фондом в атмосфере или гидросфере; осадочный цикл с резервным фондом в земной коре.

Понятие «геохимический цикл» включает совокупность явлений и процессов, приводящих к круговороту химических элементов и соединений в различных сферах Земли. Циклы элементов позволяют воссоздать геологическую историю химических элементов, связав между собой многообразные химические процессы. Выделяют *частные циклы*, развивающиеся в единой геологической оболочке, а также *общий геохимический цикл*, охватывающий все геосферы. Важной особенностью всех циклов является их незамкнутость. На *рисунке 5* представлена общая схема биогеохимического круговорота веществ.

Важным фактором изменения глобальных циклов массообмена и перераспределения элементов в биосфере является живое вещество, которое играет роль регулятора и перераспределителя масс элементов, участвующих в глобальном обмене вещества на поверхности Земли.

В процессе эволюции Земли и ее оболочек круговорот изменялся от чисто абиотического к биогеохимическому. Одновременно шла качественная и количественная перестройка структурных составляющих круговорота. Изменялось количество и соотношение элементов, захваченных живыми организмами, скорости круговорота.

Совершенствование соотношения автотрофов и гетеротрофов привело к относительно замкнутому круговороту. Появление автотрофов обусловило разделение среды на резко окислительную и восстановительную, что увеличило разнообразие путей и форм миграции элементов.

По мере развития биогеохимических циклов происходит не только усложнение связей между их компонентами, но и возникновение новых элементов в экосистеме.



Рис. 5. Общая схема биогеохимического круговорота веществ

Изучение геохимических циклов элементов значительно сдерживается возможностями аналитики, ограниченностью данных о формах миграции и условиях накопления элементов. Имеются лишь общие, чаще всего обрывочные данные о циклах химических элементов. Поэтому, одной из важнейших задач является количественное моделирование геохимических циклов.

В процессе геологического круговорота в миграцию вовлекаются химические элементы почвы, миграционная способность которых различна. Наиболее энергично выносятся из почвы элементы, обладающие большой миграционной способностью – Cl, Br, I, Ca, S, K, Na.

Поведение того или иного элемента в конкретных экосистемах биосферы и почвах определяется комплексом миграционных параметров, связанных с химическими свойствами элемента и его соединений, его кларком в земной коре, ролью в технобиогеохимических процессах (биофильность, технофильность, геохимическая активность, миграционная способность в растворах), соотношением между его биологическим, геологическим и техногенным циклами.

Баланс элемента в экосистеме может быть как положительным (прогрессивная аккумуляция, абсолютная или относительная, остаточная), так и отрицательным (прогрессивный вынос). Технобиогеохимические потоки приводят к существенному перераспределению вещества на земной поверхности, являясь причиной ее пространственной геохимической дифференциации. В результате образуются зоны концентрации тех или иных

элементов и соединений, и наоборот, зоны обеднения, то есть, различные геохимические провинции, что непосредственно отражается на химизме почв и почвенных процессов.

Таким образом, почва, как многокомпонентная система всегда является центром биологического круговорота. Она обеспечивает его протекание работой различных механизмов. Среди них не только механизмы выветривания, снабжающие элементами питания живые организмы на ранних стадиях круговорота, но и механизм удержания биофильных элементов, что обуславливается глинистыми минералами. В почве создаются и удерживаются новые биогенные тела природы (подстилка, гумус). Почва одновременно может являться транзитной системой для поступления биофильных элементов, участвующих в круговороте (например, внеландшафтное поступление веществ из атмосферы, из почвенно-грунтовых вод).

### ***Биогеохимические циклы углерода, азота, серы, кислорода, водорода. Особенности биогеохимии углерода и азота в почве***

Живое вещество Земли с биогеохимической точки зрения – это высокоорганизованная система соединений С, О<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>. История жизни, биосферы и почвенного покрова на планете в значительной мере протекала совместно с историей соединений Н, О, С, N, P, S, Ca, K в литосфере, атмосфере, гидросфере.

#### ***Биогеохимический цикл углерода***

С углеродом связан процесс возникновения и развития биосферы, возникновения большого разнообразия органических веществ различного строения. Главной формой нахождения углерода в земной коре является углерод карбонатов, средняя концентрация которого на порядок выше, чем органического углерода. И карбонатные и органические соединения углерода имеют биогенную природу. Связующим звеном между этими формами углерода служит углекислый газ, который является важнейшим компонентом биогеохимического цикла углерода. В настоящее время запасы углерода в атмосфере в виде СО<sub>2</sub> относительно невелики в сравнении с его запасами в океанах и земной коре (в земной коре углерода содержится 0,35%, в живом веществе около 18% - согласно Виноградову, 1964; 2-3% в почвенном покрове – по Перельману).

Циркуляция углерода в биосфере основана на поступлении СО<sub>2</sub> в атмосферу и его потреблении. На *рисунке 6* представлена схема круговорота углерода в природе.

*Поступление СО<sub>2</sub> в атмосферу* в современных условиях происходит в результате: 1) дыхания организмов; 2) минерализации органических веществ; 3) выделения из осадочных пород, имеющих биогенное происхождение; 4) выделение из мантии Земли при вулканических извержениях; 5) сжигании топлива.

*Потребление СО<sub>2</sub>* происходит главным образом в результате: 1) процесса фотосинтеза; 2) реакций СО<sub>2</sub> с карбонатами в океане; 3) при выветривании горных пород.



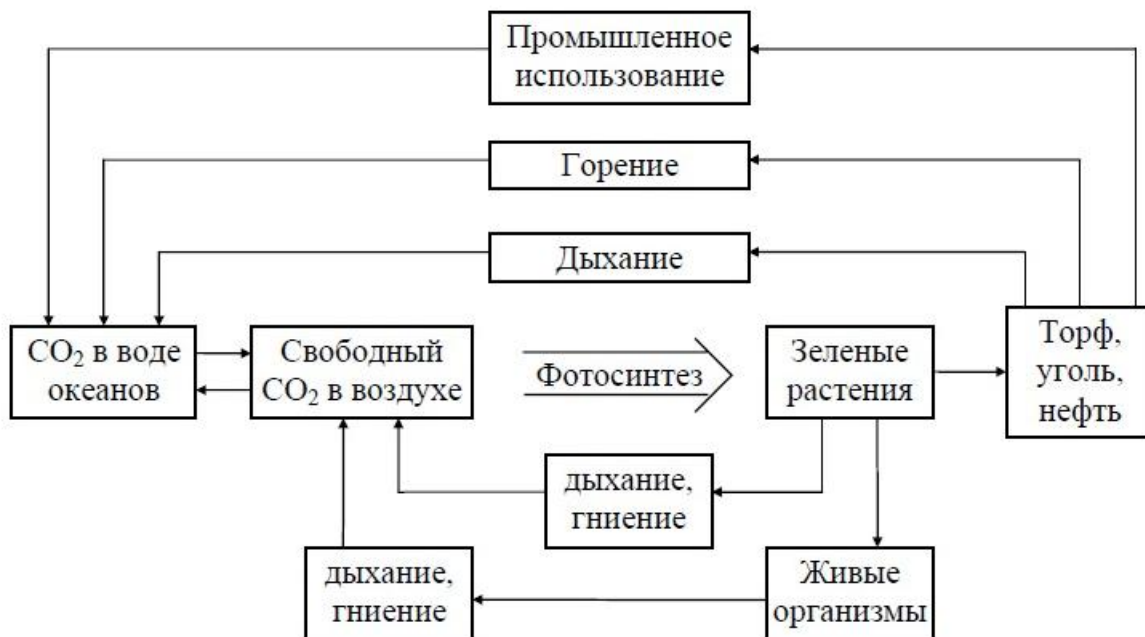


Рис. 6. Общая схема круговорота углерода в природе.

В биосфере фотосинтез является не только основным продуцентом кислорода, но и основным потребителем CO<sub>2</sub>. Главными хранителями углерода являются живая биомасса, гумус, известковые осадочные породы. Техногенная углекислота составляет 20·10<sup>9</sup> т, что намного меньше, чем природное поступление, соответственно, ее роль в круговороте незначительна.

Зеленые растения в процессе фотосинтеза накапливают углерод в виде сложных углеводов (имеют общую формулу –СНОН–): крахмала, гликогена, протеидов, липидов и др., которые формируют ткани фотосинтезирующих организмов и служат источником органических веществ для животных. Этот восстановительный процесс сопровождается накоплением (поглощением) энергии. В итоге менее, чем за 28 лет фотосинтезом полностью потребляется количество углекислого газа, содержащегося в атмосфере.

В процессе дыхания происходит обратный процесс – окисление фиксированного в живом веществе углерода в CO<sub>2</sub>, который вновь поступает в атмосферу. Данный процесс идет с выделением энергии. Поступивший в атмосферу CO<sub>2</sub> вновь потребляется фотосинтезом. Таким образом, осуществляется биологический цикл углерода в окружающей среде, который схематично можно изобразить как:



Органические соединения тканей живых организмов после их смерти подвергаются биологическому разложению организмами-редуцентами, в результате чего, углерод в форме CO<sub>2</sub> вновь поступает в круговорот. Этот процесс составляет сущность *почвенного дыхания*. Эмиссия CO<sub>2</sub> из почвы в атмосферу значительно колеблется в зависимости от особенностей почвы и климатических условий, в том числе от содержания органического вещества в почве, влажности, температуры.

Общая продуктивность фотосинтеза огромна: ежегодно растительность Земли связывает 170 млрд. т углерода. В течение 3-4 лет растения усваивают столько углерода, сколько его содержится в атмосфере. Цикл оборота углерода гумосферы составляет 300-400 лет. Но в целом цикл биологического круговорота углерода не замкнут: углерод может выходить из круговорота в виде карбонатов, торфов, сапропелей, углей, гумуса. Происходит это следующим образом.

При определенных условиях в почве разложение органических остатков идет замедленным темпом – через образование сапрофагами гумуса, минерализация которого также может идти с разной, в том числе и с замедленной, скоростью. В некоторых случаях цепь разложения органического вещества бывает неполной. Например, при недостатке кислорода или повышенной кислотности, происходит подавление деятельности сапрофагов. В этом случае органические остатки накапливаются в виде торфа, углерод, в составе которого не высвобождается и круговорот приостанавливается.

Органическое вещество, являющееся аккумулятором солнечной энергии, в определенных условиях после гибели живых организмов может быть преобразовано в ископаемые, обогащенные углеродом, твердые и жидкие органические продукты, концентрирующие энергию, аккумулярованную живым веществом. Это каменный уголь и нефть. Их образование происходило в результате захоронения органических остатков в осадочных породах, где не было доступа кислорода.

Необходимо отметить, что в пределах одного и того же региона накопление, трансформация и миграция углерода различны в элювиальном, транзитном и аккумулятивном ландшафтах, в естественных биоценозах и агроценозах.

### *Биогеохимический цикл азота*

Азот является одним из важнейших элементов питания растений. Он входит в состав белков, нуклеиновых кислот, хлорофилла, фосфатидов, нуклеопротеидов и др. органических соединений. Биофильность азота сравнима с биофильностью углерода. Азот и его соединения играют важную роль в процессах фотосинтеза, обмена веществ, образования новых клеток, в формировании почвенного покрова и плодородия экосистем, в повышении продуктивности агроценозов. Азот преимущественно накапливается в живых организмах и почвах и не накапливается в изверженных и осадочных породах, что обусловлено неустойчивостью соединений азота вне живых систем, их быстрым разложением и активной миграцией в биосфере. В биосфере азот присутствует в форме газов ( $N_2$ ,  $NH_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ), в виде соединений азотной и азотистой кислот, солей аммония.

Преобладающая часть азота почвы представлена органическими соединениями, на которые приходится 93-99% всего азота почвы. При этом главный источник азота органических соединений – *молекулярный азот* в составе атмосферы (74-80%). Осадочные породы земной коры содержат азота около  $6 \cdot 10^{14}$  т, океан –  $2 \cdot 10^{13}$  т. Изверженные породы практически не содержат азота.

Планетарные запасы азота в почвенном гумусе составляют  $6 \cdot 10^{10}$  т, однако он находится в недоступной для растений форме и непосредственно для их питания не используется. Переход азота в доступные для живых организмов соединения осуществляется разными путями. Электрические и фотохимические реакции в высоких слоях атмосферы приводят к заметному поступлению соединений азота (например, в виде оксидов азота) на сушу и океан с атмосферными осадками. В результате грозových разрядов может поступать до 5-10 кг азота на гектар. Этот азот включается в общий биогеохимический цикл растворенных соединений, которые мигрируют с водными массами, участвуют в процессах почвообразования, в формировании биомассы растений.

На *рисунке 7* представлен цикл азота в сухопутных системах.

Процессы денитрификации соединений азота, в конечном счете, уводят большую часть поступающего в биосферу азота в виде  $N_2$ ,  $NH_3$  и окислов. При этом значительная часть соединений азота находится вместе с углеродом в составе живой биомассы, в мертвом органическом веществе, в составе почв, вод, торфа, донных отложений, в составе углей, нефти, газа. Определенная часть минеральных соединений азота остается в водных растворах и мигрирует с ними, вызывая эвтрофикацию вод.

Нитратный азот не сорбируется почвами и легко вымывается водами, легко восстанавливается в газообразные формы и поэтому в больших количествах теряется для растений (20-40%).

Наиболее эффективная фиксация азота осуществляется симбиотическими и свободноживущими микроорганизмами, водорослями, лишайниками, микоризой. При фиксации азота он попадает в растения в форме нитритов. Азотфиксация ежегодно переводит в почву из атмосферы 20-300 кг/га. Для почв характерен круговорот азота, осуществляемый только микроорганизмами.

Выделения живых организмов, а также мертвые организмы составляют базу цепей питания сапрофагов, которые разлагают органические соединения с постепенным превращением органических азотсодержащих веществ в неорганические (то есть протекают процессы минерализации соединений азота). Затем аммонифицирующие организмы переводят минеральный азот в аммиак ( $NH_4^+$ ), который может войти в цикл нитрификации, где происходит постепенное окисление аммиака в нитриты ( $NO_2$ ), а затем в нитраты ( $NO_3$ ). Окисление аммиака идет в окислительных условиях. Нитраты и нитриты легко растворимы и быстро вымываются из почвы. Реакция превращения нитритов в нитраты протекает намного быстрее, чем превращения аммиака в нитриты, поэтому в почве содержатся в основном нитраты.

В то же время происходят постоянные превращения нитратов в молекулярный азот под действием организмов-денитрификаторов (восстановление нитратов) и газообразные соединения азота возвращаются в атмосферу в виде  $N_2$  и  $N_2O$ . Денитрификация интенсивно протекает в переувлажненных почвах в восстановительных условиях при температуре  $25^{\circ}C$ . За вегетационный период в атмосферу может выделиться до 7,5 кг/га  $N_2O$ . Внесение азота может увеличить эмиссию  $N_2O$  в 30-40 раз.

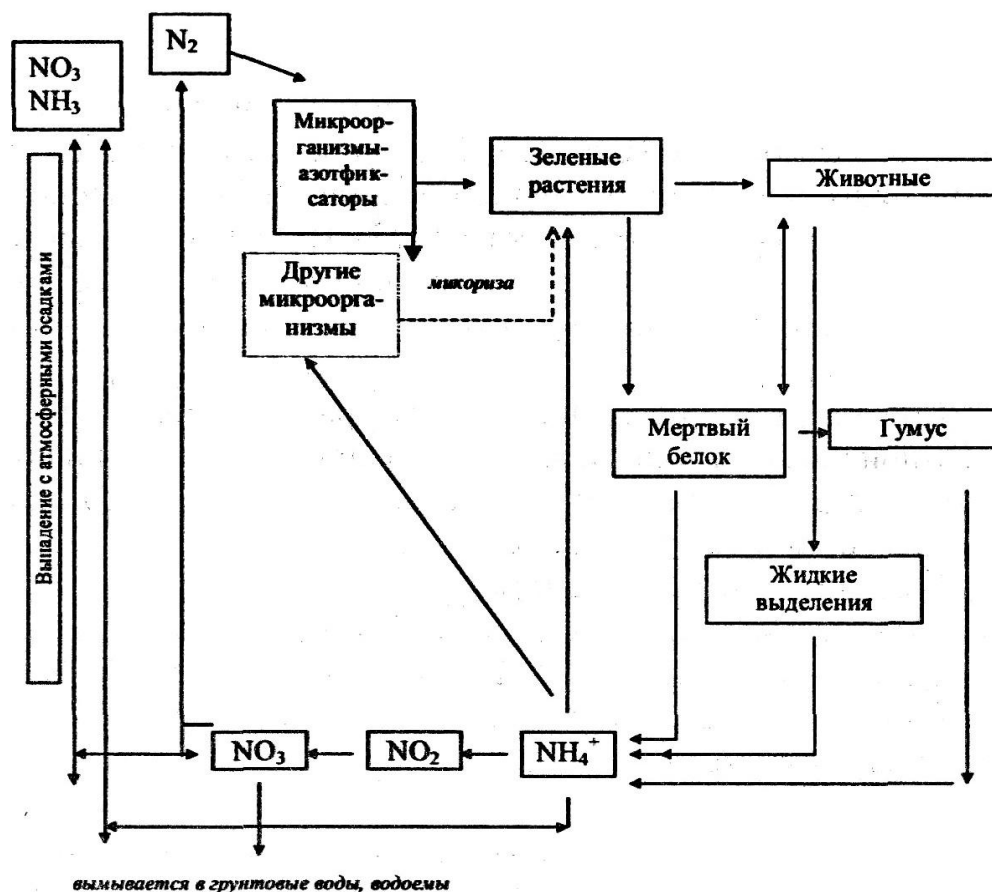


Рис. 7. Схема цикла азота в сухопутных системах  
(составлена Ellenberg, 1971, цит. По Ковда, 1985)

Таким образом, процессы денитрификации, фиксации, аммонификации и нитрификации обеспечивают глобальный круговорот азота на планете. На *рисунке 8* представлена схема круговорота азота.

Азот может выключаться из круговорота путем аккумуляции в осадках океана, рек, озер, горючих ископаемых.

В целом, трансформация соединений азота в почвах включает следующие процессы:

1. фиксацию атмосферного азота свободноживущими и клубеньковыми бактериями;
2. превращение азотсодержащих соединений органических остатков в гумусовые кислоты;
3. аммонификацию органических азотсодержащих соединений;
4. процессы нитрификации;
5. денитрификацию и потерю азота в атмосферу;
6. фиксацию иона  $NH_4^+$  глинистыми минералами;
7. вымывание различных соединений азота с внутрипочвенным и поверхностным стоками.

Продолжительность отдельных микроциклов общеземного биогеохимического круговорота азота колеблется в настоящую эпоху от малой (дни, недели, месяцы) в тканях

микроорганизмов до значительной (годы) в экосистемах травянистой растительности и до большой (десятилетия, столетия, тысячелетия) в древесных экосистемах и почвенном гумусе. Полные земные циклы азота, оказавшегося в осадках рек, озер, морей, горючих ископаемых, охватывает время порядка десятков тысячелетий, сотен тысяч и миллионов лет.

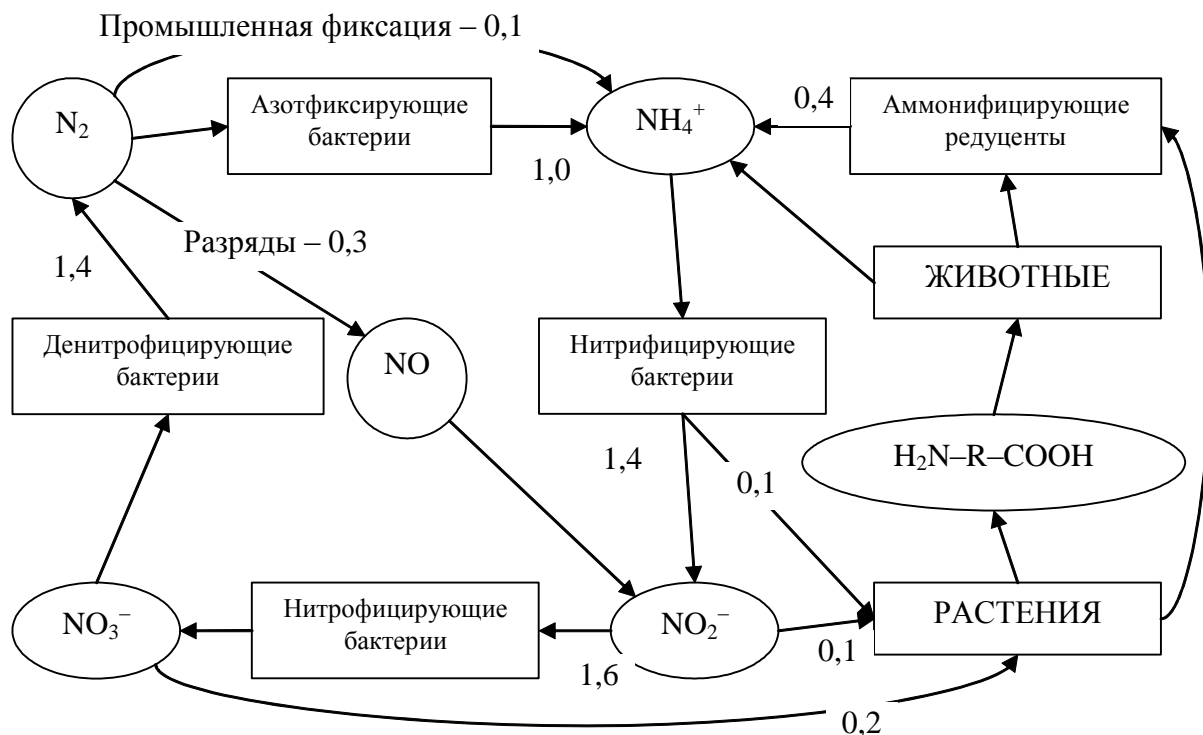


Рис. 8. Круговорот азота (в Гт год<sup>-1</sup>) (по Е.А. Зиллову, 2006 ).

Таким образом, можно выделить следующие главные формы *поступления соединений азота*:

1. биогенная фиксация азота в почвах микроорганизмами симбиотического и несимбиотического типа;
2. поступление в растворы с метаболитами пищевых цепей, с отмершим органическим веществом, с продуктами минерализации органических веществ почв;
3. поступление окислов азота из продуктов сжигания горючих ископаемых;
4. внесение соединений азота в почвы в виде органических и минеральных удобрений;
5. перенос и накопление нитритов при испарении грунтовых вод.

*Расходные статьи* баланса азота на суше состоят из:

1. поглощение соединений минерального азота растениями и уход их в пищевые цепи экосистем;
2. переход соединений азота в органические формы с образованием гумуса;

3. денитрификация и возвращение, в конечном счете, в атмосферу большей части азота в молекулярной форме и частично в форме окислов и аммиака;
4. смыв, вынос и отчуждение соединений азота из биологических циклов в геологические; захоронение на геологически длительное время в осадочных породах, в горючих ископаемых или соляных месторождениях.

### *Биогеохимический цикл кислорода*

Кислород является самым распространенным элементом земной коры: его кларк равен 47. В земной коре кислород присутствует в виде соединений с другими элементами: вода, силикаты, оксиды и образует более 1500 минеральных видов. Кислород не образует соединений только с инертными газами.

Содержание кислорода в мировом океане – 85,7%, в живом веществе – 70%. Благодаря высокой химической активности, кислород играет особо важную роль в земной коре. Он определяет окислительно-восстановительные, кислотнo-щелочные условия объектов среды, формирование геохимических объектов. Для него характерна как ионная, так и не ионная форма миграции в растворах.

Единственным источником поступления кислорода в окружающую среду являются процессы фотосинтеза. Зеленые растения биосферы ежегодно выделяют в атмосферу около  $4,67 \cdot 10^{17}$  т. Следовательно, растения играют исключительно важную роль в накоплении кислорода в атмосфере. Круговорот кислорода связан с биогеохимическим круговоротом углерода: процесс восстановления  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  посредством реакции фотосинтеза приводит к образованию свободного кислорода. Выделение кислорода в процессе фотосинтеза продолжается миллиарды лет и в настоящее время количество кислорода в атмосфере равно  $1,185 \cdot 10^{15}$  т. Указанное содержание кислорода, при сохранении темпа его продуцирования, могло бы быть удвоено примерно за 4000 лет. Но этого не происходит, так как кислород поглощается в процессах разложения органических веществ, при окислении соединений закисного железа,  $\text{Mn(II)}$  (с образованием  $\text{MnO}_2$ ), сульфидов и т.д. Деятельность человека также направлена на уменьшение содержания кислорода в атмосфере (сжигание топлива, выбросы предприятий, вырубка лесов и др.). Тем не менее, свободный кислород постепенно накапливается, так как не вся его продуцируемая за год часть, расходуется на окисление тех или иных продуктов за тот же период времени.

Свободный кислород участвует также в миграционном цикле системы природные воды – тропосфера. Холодная вода высоких широт поглощает кислород, который с морскими течениями поступает в тропический пояс, где и выделяется. Изменение температуры в течение сезона также влияет на поглощение и выделение кислорода.

Химически связанный в литосфере и гидросфере кислород фактически исключается из активного геохимического круговорота. На *рисунке 9* представлена схема круговорота кислорода.

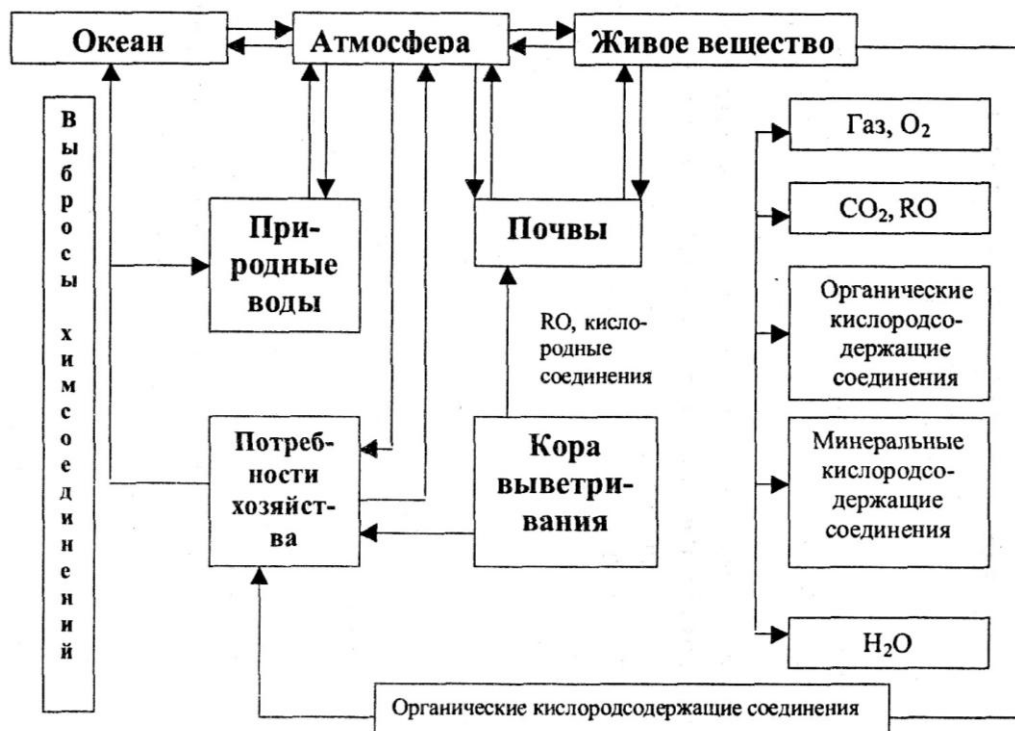


Рис. 9. Круговорот кислорода в природе

Природный водород содержит изотоп  $^1\text{H}$  (протий) с примесью стабильного изотопа  $^2\text{H}$  (дейтерий D, преобладает) и радиоактивного изотопа  $^3\text{H}$  (тритий T, следы).

#### Биогеохимический цикл водорода

Содержание свободного водорода в атмосфере ничтожно  $0,2 \cdot 10^{15}$  г. Его источником являются вулканические процессы, многие магматические и осадочные породы, некоторые биогенные процессы, идущие при участии водородообразующих бактерий. В атмосфере водород неустойчив и легко соединяется с кислородом, образуя воду. В результате диссипации водород может уходить из атмосферы в космическое пространство.

Содержание водорода в земной коре также невелико: кларк гранитоидов составляет 0,15%. В земной коре водород входит в состав воды, углей, нефти, горючих газов, глинистых минералов, живых организмов. Организмы закрепляют водород биосферы, связывая его не только в органическом веществе, но и участвуя в фиксации водорода минеральным веществом почвы (это происходит в результате диссоциации кислотных продуктов метаболизма с высвобождением иона  $\text{H}^+$ ).

Один из наиболее мощных циклических процессов в верхних оболочках Земли – круговорот воды (ежегодно через атмосферу проходит более 520 тыс. м<sup>3</sup> воды). В процессе круговорота воды в биосфере происходит фракционирование водорода и кислорода. В течение года фотосинтезирующими организмами расщепляется около  $200 \cdot 10^9$  т воды и в органическом веществе связывается порядка  $30\text{--}35 \cdot 10^9$  т водорода.

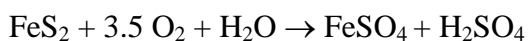
Сера является биогенным элементом, необходимым для жизнедеятельности живых организмов, она определяет важные биохимические процессы живой клетки, является компонентом питания живых организмов.

В почвах сера представлена органическими и неорганическими соединениями, которые участвуют в формировании химического состава почв. В почвах встречается также элементарная сера (как продукт трансформации серосодержащих соединений, либо наследуется от материнской породы). В значительных количествах сера встречается в подземных водах, что играет важную роль в процессах засоления почв. В засоленных почвах содержание серы может достигать целых процентов.

Содержание серы в земной коре составляет  $4,7 \cdot 10^{-2}\%$ , в почве –  $8,5 \cdot 10^{-2}\%$ , в океане –  $8,8 \cdot 10^{-2}\%$  (Виноградов, 1962; Ковда, 1985).

Среди природных соединений серы распространены следующие изотопы:  $^{32}\text{S}$  (95,06%) и  $^{34}\text{S}$  (4,18%).

Основной источник серы – выветривание, благодаря которому сера вовлекается в кругооборот из своего осадочного резервного фонда (сульфидсодержащих горных пород):



Интенсивный биологический круговорот серы в почвах охватывает только ее верхние слои. Но в круговороте серы принимают участие и почвенно-грунтовые и подземные воды (рисунки 10).

В зоне гипергенеза сера проявляет все известные для нее степени окисления: -2, +4, +6, из которых наиболее характерны -2 и +6. Это обуславливает существенную роль окислительно-восстановительных реакций и разнообразие процессов миграции.

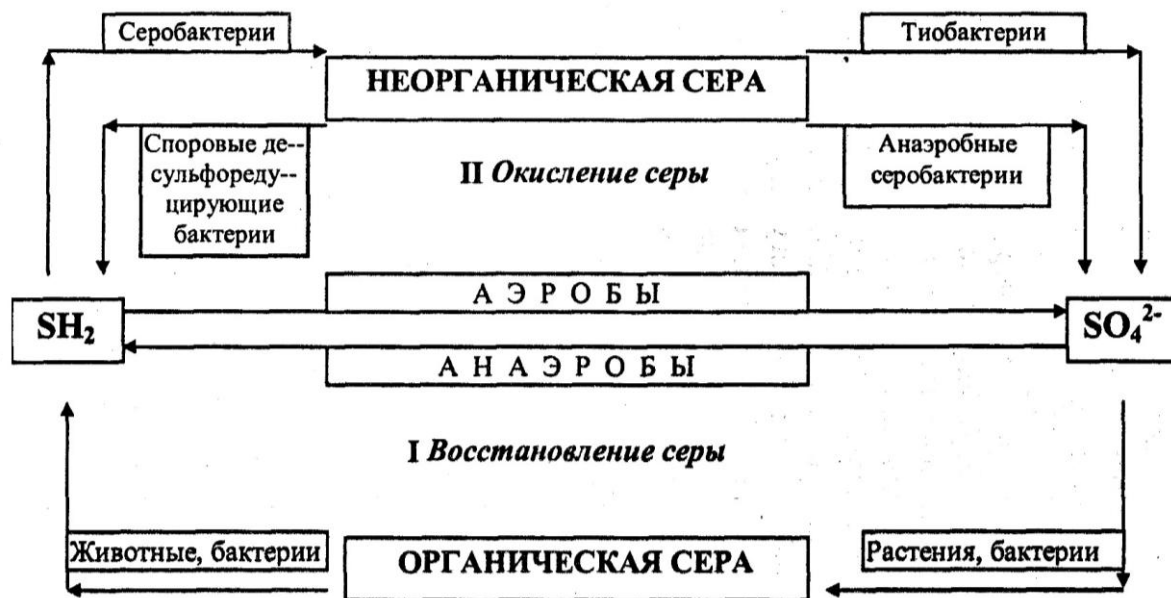
В почву сера попадает в результате естественного разложения некоторых минералов (серный колчедан  $\text{FeS}_2$ , медный колчедан  $\text{CuFeS}_2$ , мирабилит  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  и др.), а также как продукт разложения органических веществ.

В атмосферу соединения серы попадают в результате процессов бактериального разложения органических веществ, некоторое количество сероводорода поступает с вулканическими газами, с термальными источниками. В настоящее время значительное количество серы поступает в атмосферу техногенным путем (выбросы предприятий).

Несмотря на значительную роль соединений серы в функционировании биосферы, информации о ее биогеохимической циркуляции и балансе недостаточно.

В почвах превращения серы представлены: *минерализацией, иммобилизацией, окислением и восстановлением*. Под *минерализацией* понимают превращение органических соединений серы в ее минеральные формы (сульфаты) (в результате деятельности микроорганизмов). *Иммобилизацией* называют превращение неорганических соединений серы в органические в результате деятельности микроорганизмов – это процесс обратный минерализации. Используемая при этом сера сульфатов переходит в восстановленную форму и закрепляется в клетках в виде серосодержащих аминокислот. Важное значение имеют процессы *окисления* и *восстановления*, которые осуществляются химическим или биохимическим путем.

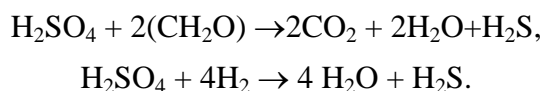




I – минерализации органической серы живыми организмами до  $\text{H}_2\text{S}$ ;  
 II – дессульфификация

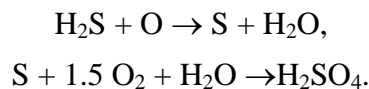
Рис. 10. Биогеохимический цикл серы (по Ф.Я. Шипунову, 1980)

Существенную роль в круговороте серы играют микроорганизмы. Сульфатредуцирующие бактерии, использующие серу в качестве акцептора электронов (как мы – кислород) для извлечения необходимой им энергии из органических веществ, образуют сероводород в отсутствие кислорода:

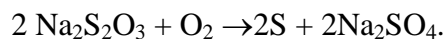


Примером таких бактерий является облигатный анаэроб *Desulfovibrio*.

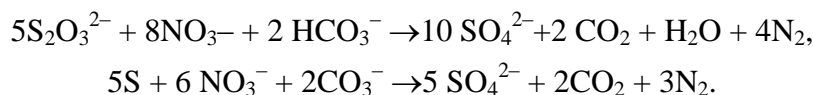
В присутствии кислорода целый ряд серных бактерий окисляет сероводород до серы и серной кислоты:



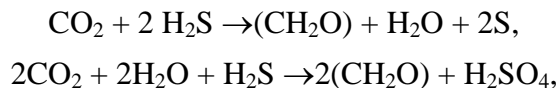
Это, например, *Beggiatoa*, и *Thiothrix*, которые накапливают серу внутри своих клеток. Бактерии рода *Thiobacillus* также окисляют сульфиты до серы и сульфатов, откладывая серу снаружи клеток:



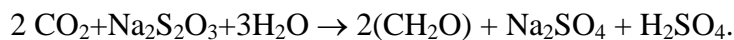
Главным образом, благодаря этим и подобным им бактериям и сформировались современные запасы самородной серы. В отсутствие кислорода бактерия *Thiobacillus denitrificans* окисляет серу и сульфиты до сульфатов, используя нитраты. Здесь мы видим связь циклов азота и серы:



Существуют и бактерии, использующие серу в хемосинтезе органического вещества – зеленые серные бактерии:



и пурпурные бактерии:



В целом *биогеохимический цикл серы* состоит из четырех стадий:

1. Усвоение минеральных соединений серы живыми организмами (бактерии, растения) и включение серы в состав белков и аминокислот.
2. Превращение органической серы живыми организмами (бактерии, животные) в конечный продукт –  $\text{H}_2\text{S}$ .
3. Окисление минеральной серы живыми организмами (серобактерии, тионовые бактерии) (*сульфатредуцирование*). Окисляется сероводород, элементарная сера и ее тио- и тетра- соединения.
4. Восстановление минеральной серы живыми организмами (бактериями) до  $\text{H}_2\text{S}$ .

Антропогенное поступление серы существенно меняет ее круговорот.

Выход серы из круговорота осуществляется в виде образования осадочных отложений сульфидов и сульфатов.

Таким образом, *основные черты круговорота серы* сводятся к следующему:

1. обширный резервный фонд в почвах и отложениях и меньший – в атмосфере;
2. ключевая роль в круговороте принадлежит специализированным микроорганизмам;
3. взаимодействие геохимических и климатических процессов (осадкообразование, эрозия, дождь, выщелачивание) с сугубо биологическими процессами (продукция и разложение).

### ***Биогеохимические циклы элементов, поступивших в биосферу из земной коры (фосфор, кремний, калий, натрий, кальций, магний)***

Для большинства химических элементов и соединений, которые обычно связаны с лито- и гидросферой, а не с атмосферой, характерны осадочные циклы. Циркуляция таких элементов осуществляется путем эрозии, осадкообразования, горообразования, вулканической деятельности переноса веществ организмами. Твердые вещества, переносимые по воздуху как пыль, выпадают на землю в виде сухих осадков или с дождем.

Живым сообществам биосферы доступны в основном те химические элементы, которые входят в состав пород, расположенных на поверхности земли.

Фосфор – один из важнейших биогенных элементов. Он входит в состав нуклеиновых кислот, клеточных мембран, ферментов, костной ткани, активно участвует в процессах обмена веществ и синтезе белка, определяет энергетику клетки, влияет на рост растений.

Для фосфора наиболее характерны степени окисления -3 (например, фосфин  $\text{PH}_3$ ), +3 (напр.,  $\text{PCl}_3$ ) и +5 (ортофосфорная кислота  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). В природе в виде минералов встречаются практически только производные ортофосфорной кислоты – ортофосфаты. Причем около 95% всех природных фосфатов – это фосфаты кальция.

Основная масса вещества фосфора сосредоточена в малоактивном и малоподвижном резервном фонде, депонированном в земной коре, то есть значительная часть фосфора не участвует в циркуляции.

Круговорот фосфора в природе (рисунок 11) сильно отличается от биогеохимических циклов углерода, кислорода, азота и серы, так как газообразная форма фосфора (например,  $\text{PH}_3$ ) практически не участвует в биогеохимическом цикле фосфора.

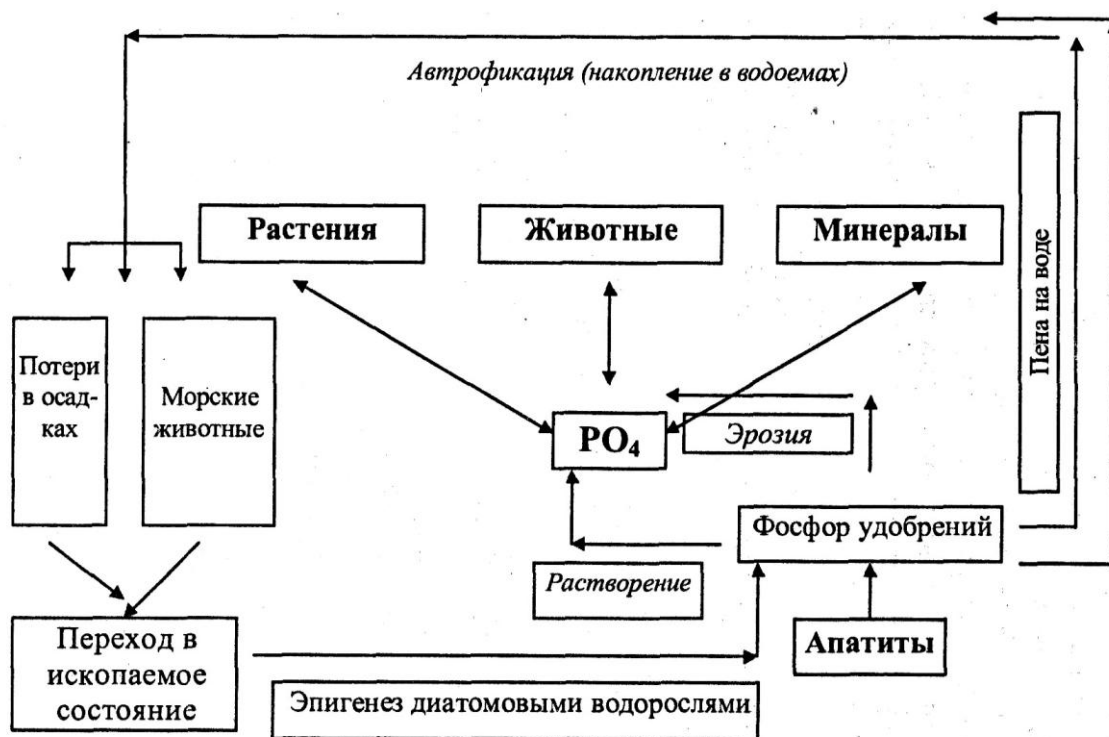


Рис. 11. Глобальный цикл фосфора в биосфере (по Duvigneaud, 1974)

В почву и другие компоненты биосферы фосфор поступает с растительными и животными остатками, удобрениями; значительная часть его привносится почвообразующей породой. Некоторая часть фосфора привносится с атмосферными осадками, с космической и атмосферной пылью. В почву фосфор поступает и техногенным путем; например, в результате применения инсектицидов, фунгицидов и др.

Главная роль в биогеохимическом круговороте фосфора принадлежит живым организмам (в процессах их питания, размножения, передвижения). Для растений наиболее доступным является фосфор неспецифических органических соединений и гумуса. В составе гуминовых кислот может находиться от 2 – 3 до 50 – 80% всего органического фосфора почвы. Именно гумус играет главную роль в малом (локальном) биологическом цикле фосфора.

Соединения фосфора в почвах подвергаются различным превращениям. Из них наибольшее значение для генезиса и плодородия почв имеют:

- *минерализация* органических соединений фосфора: превращение органических соединений фосфора в минеральные в результате жизнедеятельности микроорганизмов;
- *изменение подвижности* фосфорных соединений (*мобилизация*): превращение труднорастворимых соединений фосфора в более легко растворимые или переход их в почвенный раствор;
- *иммобилизация* фосфора: превращение неорганических соединений фосфора в органические формы микробных клеток, что приводит к недоступности фосфора другим организмам;
- *фиксация* фосфатов: потеря растворимости фосфорсодержащих соединений за счет образования прочных связей с минеральными компонентами почвы.

Фиксированный фосфор может на 40-50% быть десорбирован и использован растениями, что зависит от условий среды: повышенная кислотность способствует десорбции и увеличению скорости миграции фосфорных соединений.

Миграция фосфора возможна также за счет водной и ветровой эрозии. Поэтому биогеохимический цикл фосфора является незамкнутым и менее обратимым, чем циклы углерода и азота. При этом окружающая среда очень чувствительна к загрязнению соединениями фосфора.

Избыток фосфатных удобрений может оказаться столь же невыгодным, как и их недостаток. Если в почву вносится больше вещества, чем его могут использовать в данный момент времени живые организмы, то его избыток быстро связывается почвой и отложениями, становясь недоступными именно в тот момент, когда он наиболее необходим организмам. А накапливаясь и попадая в водные объекты соединения фосфора приводят к эвтрофикации.

Механизмы возвращения фосфора в круговорот в природе недостаточно эффективны и не возмещают потерь. Сохранение цикличности круговорота фосфора очень важно, так как из всех биогенных веществ, необходимых организмам в больших количествах, фосфор – один из наименее доступных элементов на земле. При этом, в настоящее время сформировался новый процесс антропогенного происхождения – «фосфотизация» суши, то есть возрастание общего содержания соединений фосфора в окружающей среде (особенно водоемах, что приводит к их эвтрофикации - цветению).

Таким образом, возникла противоречивая проблема – дефицит фосфора и эвтрофикация водоемов, которая требует срочного решения.

Кремний относится к одному из самых распространенных элементов в земной коре. Его кларк в земной коре составляет 29,5; в почве – 33; в океане –  $5 \cdot 10^{-5}$ . Кремний вместе с кислородом составляет 55% веса земной коры. Кварц и силикаты составляют 87% всей литосферы. Кремний образует более 430 минеральных видов, в основном представленных силикатами. Силикаты выступают как главные составные части изверженных, метаморфических (за исключением мраморов и кристаллических известняков), осадочных пород – глинистых отложений. Несмотря на такую распространенность, биогеохимические циклы кремния изучены недостаточно хорошо. На *рисунке 12* представлен биогеохимический цикл кремнезема.



Рис. 12. Биогеохимический цикл кремнезема (по А.Г. Назарову, 1976).

Во всей геохимической истории кремний практически никогда не расстается с кислородом и мигрирует вместе с ним. Исключительно велико значение в химии земной коры окиси кремния, которая выступает в разных полиморфных модификациях (чаще в виде кварца).

В процессе остывания магмы происходит комбинация кремнекислородных тетраэдров  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  путем последовательной кристаллизации с формированием различных минеральных форм (сначала оливин, затем пироксенов, далее амфиболов и на заключительных этапах кристаллизации магмы выделяется кремнезем в виде кварца). Параллельно происходит образование термальных минерализованных растворов, выносящих растворенный кремнезем, который в дальнейшем отлагается в виде кварцевых жил различной формы, а также

окварцевание соседних боковых вмещающих пород, часто в больших масштабах. Кварц выступает главным породообразующим минералом во многих рудных жилах.

При выветривании горных пород в условиях умеренного влажного климата кварц остается в нерастворимом остатке, в то время как кремнезем разложившихся силикатов уносится проточными водами. В условиях тропического влажного климата вынос кремнезема быстро возрастает.

В процессе круговорота воды подземные воды и реки, омывающие сушу, выносят огромные количества кремнезема в виде взвесей глинистых частиц, обломков алюмосиликатов и растворов. В морской воде значительная часть крупнообломочного материала осаждается недалеко от берега, образуя *терригенные отложения*.

В океанической воде происходит сложная миграция кремнезема. В целом содержание кремнезема в природных водах незначительное – 0,5-3 мг/л – в морской воде и 10-30 мг/л – в речной и озерной, так как основное количество кремнезема поглощается в верхних горизонтах океана и других водных объектов водорослями, микроорганизмами и др. Например, диатомовые водоросли извлекают 70-80% кремнезема из воды. Многие простейшие (кораллы, губки, радиолярии) строят кремниевые скелеты. После гибели диатомовые водоросли медленно опускаются на дно, но на глубине 2000-2500 м постепенно растворяются и кремний высвобождается, переходя в растворимую форму. Нерастворимые части оседают на дне, образуя обширные отложения диатомовых илов. Так формируется биогеохимический цикл кремния. Этот процесс длится на протяжении многих веков геологической истории Земли.

В осадочных породах разного геологического возраста кремнезем присутствует в виде кварца, возникшего при механическом разрушении кварцсодержащих магматических пород. Образование частых отложений кварца связано с интенсивностью выветривания и перемывом соответствующего материала. Чистые кварцевые пески встречаются редко. Огромные массы кремния осаждались в коллоидной форме в виде разнообразных глинистых минералов.

Таким образом, наиболее важным и более динамичным является направление круговорота кремнезема, связанное с его многократным в году переходом из организмов в окружающую среду и обратно. При этих микроциклических переходах проявляется важная функция водного биогеохимического цикла  $\text{SiO}_2$  – энерго- и массоперенос вещества из поверхностных в глубинные зоны Мирового океана (так как вместе с кремнием аккумулируются и переносятся соединения многих элементов в труднорастворимой форме).

Гидробиогеохимическая миграция кремния является частью глобального цикла. Континентальная часть круговорота кремния достаточно разнообразна и сложна и связана с трансформацией кремнийсодержащих соединений в природных ландшафтах, почвах, растительности, грунтовых водах. Миграция кремнезема тесно связана с ландшафтно-геохимическими условиями – составом растительности и литологией подстилающих отложений, условия среды миграции (температура, pH, наличие сульфатов, карбонатов). В сильнощелочных условиях, как и в сильнокислых растворимость, а значит и миграция кремнезема возрастает. Наличие сульфатов, карбонатов снижают растворимость кремнезема, а значит и его миграцию.

Значительная часть  $\text{SiO}_2$  суши расходуется на образование глинистых алюмосиликатных минералов. В процессе жизнедеятельности живых организмов образуются минералы внутри

организмов – *биолиты (фитолиты)* – отложения в клеточных оболочках, вакуолях, цитоплазме и др. Биолиты неустойчивы вне тканей живых организмов и после отмирания растений, попадая в другие термодинамические условия, последовательно проходят стадии кристаллизации опала в мелкокристаллический халцедон и далее во вторичный кварц. Затем кремнезем из биолитов снова включается в активную миграцию в почвенно-грунтовых водах в форме коллоидных и истинных растворов.

#### *Биогеохимический цикл кальция*

Кларк кальция в земной коре составляет 2,96% и в океане – 0,041% (по данным А.П. Виноградова). В карбонатных породах его среднее содержание составляет 30,23% (масс.), в песчаниках – 3,96% (масс.) и в почвах – 1,37% (масс.).

В водные объекты кальций поступает в результате выщелачивания из пород и почв. При этом содержание кальция в воде лимитируется концентрацией  $\text{CO}_2$ . Поверхностные воды при равновесии с атмосферным  $\text{CO}_2$  могут содержать 20-30 мг/л кальция при насыщении. Содержание кальция в поверхностных водах увеличивается до 40-50 мг/л за счет комплекса двуокиси углерода, гидрокарбоната и карбоната кальция. В сульфатных водах содержание кальция определяется растворимостью сульфата кальция и может быть довольно высоким (до 600 мг/л).

Кальций выполняет конституционную роль в почвах. Он входит в состав многих соединений (силикаты, сульфаты, фосфаты, карбонаты, хлориды и другие минералы). Кальций выполняет важную роль в почвообразовательных процессах, входит в состав ППК, участвует в обменных реакциях, определяет карбонатную буферную способность почв, входит в состав гумусовых соединений и т.д.

Силикаты кальция не устойчивы в зоне гипергенеза и при выветривании горных пород разрушаются в первую очередь, что приводит к активному вовлечению кальция в процессы геологического круговорота (*рисунок 13*).

Кальций обладает достаточно высокой миграционной способностью, которая во многом зависит от климатических условий. В гумидных районах при активном развитии в почвах процесса выщелачивания кальций выносится в реки, озера, моря, где он потребляется живыми организмами и после их отмирания накапливается в виде карбонатных отложений. В засушливом климате (аридном и супераридном) кальций выпадает из раствора в виде карбонатов в осадок, формируя мощные толщи карбонатных отложений и иллювиально-карбонатные горизонты почв.

В кислых почвах наблюдается биогенное накопление кальция в подстилке и аккумулятивных поверхностных горизонтах, что объясняется его биофильностью, а так как кальций необходимый для живых организмов элемент, то он активно участвует в биологическом круговороте. Размеры вовлечения его в биологический круговорот значительно варьируют в разных природных зонах. В лесостепной зоне растительность ежегодно потребляет ~ 100 кг/га кальция, в тундровой – 8,6 кг/га (по данным Евдокимовой Т.И. с соавт.). В

настоящее время биологический круговорот кальция не является замкнутым, так как значительная его часть выносится с урожаем.

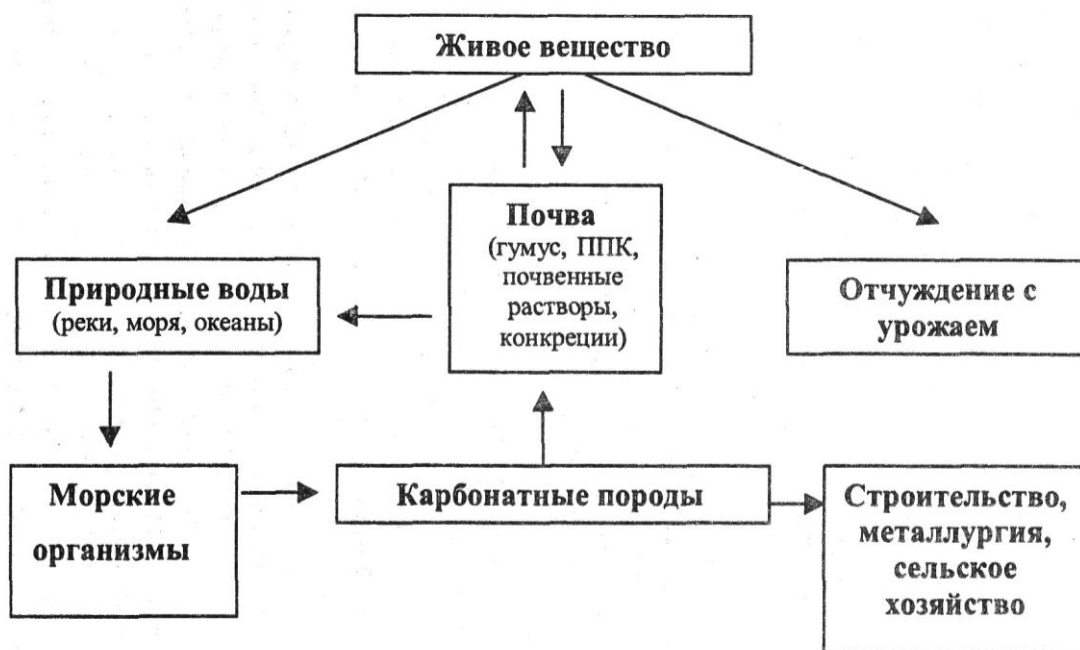


Рис. 13. Биогеохимический цикл кальция (по О.С. Безуглова, Д.С. Орлов, 2000)

Кальций также извлекается из круговорота за счет использования карбонатных пород в строительстве, сельском хозяйстве, промышленности, что также приводит к нарушению круговорота.

#### *Биогеохимический цикл магния*

Кларк магния в земной коре составляет 1,87%. Его распределение в разных породах неоднородно: в основных породах – 4,6%, в кислых – 0,2-1%, в ультраосновных – 20,4 – 25,9%. Содержание магния в песчаниках – 0,7%, в карбонатных породах – 4,7%, в почвах – 0,63%.

Магний обладает малым ионным радиусом, благодаря чему легко входит в кристаллическую решетку глинистых минералов, образуя магнезиальные силикаты и алюмосиликаты.

Магний проявляет изоморфизм (с  $Fe^{2+}$  и  $Ni^{2+}$ ) и входит в состав оливин и пироксенов.

По своим геохимическим свойствам магний близок к кальцию, а по миграционной способности приближается также к калию и натрию, что обусловлено хорошей растворимостью хлоридов и сульфатов магния.

Концентрация магния в воде обычно составляет 1 – 40 мг/л. Растворимость карбоната магния в природных водах, как и кальция, зависит от концентрации  $CO_2$ . В равновесных условиях в природные воды поступает до 190 мг/л магния. При увеличении содержания  $CO_2$



концентрация растворенного магния в воде возрастает. Воды, контактирующие с породами, богатыми магнием, могут содержать до 100 мг/л этого элемента.

Магний является биофильным элементом, входит в состав хлорофилла. Его кларк в живом веществе 0,02, но биофильность магния ниже, чем кальция и калия.

По сравнению с кальцием подвижность магния ниже, так как он активно используется живыми организмами, входит в кристаллические решетки вторичных силикатов, а также сорбируется глинистыми коллоидами и гумусом (т.е. данные показатели являются геохимическими барьерами для магния). Тем не менее, в гумидных ландшафтах он также выщелачивается, значительная его часть выносится стоком в водные объекты.

На миграцию магния в аридных ландшафтах оказывает влияние растворимость его хлоридов и сульфатов. В результате на испарительных барьерах наблюдается концентрирование этих солей и формирование солончаков.

Техногенное влияние на биогеохимическую миграцию магния несущественно. Некоторое накопление магния наблюдается за счет внесения магниевых удобрений только в обедненных данным элементом ландшафтах.

В целом цикл магния, как и кальция незамкнут, что проявляется в их интенсивной аккумуляции в океанических осадках.

#### *Биогеохимический цикл натрия*

Кларк натрия в земной коре составляет 2,64%, в почвах – 0,63%, в живом веществе – 0,008%, в гидросфере в виде растворимых солей натрия содержится 2,9% (при общей концентрации солей морской воде 3,5 – 3,7%), общее содержание натрия в морской воде составляет  $1,5 \cdot 10^{16}$  т. Основным источником подвижного натрия в биосфере – выветривающиеся изверженные породы.

В природе натрий находится только в виде солей. Важнейшие минералы натрия – галит (NaCl), мирабилит (глауберова соль,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), тенардит ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) и другие, а также природные силикаты – альбит ( $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ), нефелин ( $\text{Na}[\text{AlSiO}_4]$ ), содержащие помимо натрия и другие элементы.

Несмотря на незначительное содержание натрия в живых организмах (в основном в виде NaCl), натрий является необходимым для них элементом, поэтому он выполняет существенную роль в биологическом круговороте. Но в условиях влажного климата натрий легко выходит из круговорота и выносится стоком за пределы ландшафта, который в результате этого обедняется натрием. В засушливом климате натрий концентрируется в грунтовых и озерных водах, накапливается в солончаках.

В отличие от растений животные сильнее нуждаются в повышенных количествах натрия, так как он участвует во многих физиологических процессах (деятельность сердечно-сосудистой системы, почек).

Роль биологического круговорота натрия сравнительно не велика. Но натрий является активным водным мигрантом, образует легко растворимые соли и накапливается в океане.

В настоящее время на биогеохимические пути миграции натрия существенное влияние оказывает деятельность человека (техногенез). Это проявляется в добыче поваренной соли, соды, мирабилита, а также орошении земель в аридных регионах.

### *Биогеохимический цикл калия*

Кларк калия в земной коре составляет 2,41%, в почвах – 1,36%, в живом веществе – 0,3%. Калий состоит из двух стабильных изотопов  $^{39}\text{K}$  (93,259%) и  $^{41}\text{K}$  (6,729%), а также радиоактивного изотопа  $^{40}\text{K}$ . Калий входит в состав многих минералов (ортоклаз, мусковит, карналлит и др.), поэтому он прочнее удерживается в пределах суши, чем натрий и кальций, но все же частичное высвобождение ионов калия происходит и он вовлекается в биологический круговорот.

Калий относится к важнейшим для живых организмов элементом. Он участвует в фотосинтезе, влияет на белковый и углеводный обмен и др.

Ежегодно в биологический круговорот на суше вовлекается около  $1,8 \cdot 10^9$  т калия. В ходе биологического круговорота на суше часть калия высвобождается и задерживается в мертвом органическом веществе, а также сорбируется минеральной частью почвы, частично вовлекается в водную миграцию. Ежегодно с континентальным стоком в океан поступает более  $61 \cdot 10^6$  т калия в виде свободных ионов и  $283 \cdot 10^6$  т – в составе взвесей.

Калий активно мигрирует в системе поверхность океана – атмосфера в составе аэрозоля. Значительное количество калия переносится с пылью с суши в океан.

### *Биогеохимия микроэлементов. Техногенные циклы элементов*

К микроэлементам (рассеянные элементы, следовые, редкие) относят химические элементы, облигатные (обязательные) для живых организмов, содержание которых измеряется величинами порядка  $n \cdot 10^{-2}$ - $n \cdot 10^{-5}\%$  (Cu, Ni, Co, Mn, Cr, Zn, Se, Mo, Sn, I, V, Ti и др.) Такое количественное определение является условным, так как некоторые элементы одновременно могут быть и микро- и макроэлементами.

Они выполняют важные физиологические функции, но их концентрация может играть как положительную, так и отрицательную роль для живых организмов. То есть, следует понимать, что нет токсичных элементов, а есть токсичные концентрации.

Микроэлементы имеют различные химические свойства и неодинаковую способность к образованию минералов. Их концентрация в горных породах значительно варьирует, следовательно, в земной коре они также находятся в разных формах. Самой грубодисперсной формой являются акцессорные минералы, которые образуют механические включения в породообразующих минералах. В целом все породообразующие минералы являются носителями рассеянных элементов.

В процессе гипергенеза мобилизуется огромное количество элементов, которые переходят из неподвижного состояния в активное и мигрируют в природных водах в виде

растворов. Одновременно в движение вовлекается огромное количество твердых частиц разной степени дисперсности. Это также сопровождается закономерным перераспределением элементов.

Поведение рассеянных элементов при гипергенезе прежде всего зависит от формы их нахождения и устойчивости минерала-носителя. В целом, гипергенное преобразование кристаллического вещества земной коры сопровождается мобилизацией крупных масс рассеянных элементов. При этом важное значение имеют физико-химические параметры условий среды (рН, Ох-Red, химический состав водных растворов и др.). Освобождающиеся из минерала-носителя ионы рассеянных элементов в соответствии со своими химическими свойствами попадают под воздействие условий среды. Они могут сохраняться в растворе и выноситься из коры выветривания или соосаждаться с выпадающими из растворов соединениями микроэлементов.

При гипергенезе происходит не только рассеяние химических элементов, но и их закономерная аккумуляция.

Кларки микроэлементов в живых организмах сильно различаются, но в целом, их концентрация низкая. Но в суммарной массе живого вещества Земли количество микроэлементов значительно. В растительности суши связаны сотни млн. т. марганца, примерно 100 млн. т. цинка и стронция (каждого), десятки млн. т. меди, брома, титана и др.

Живое вещество Мирового океана значительно интенсивнее поглощает рассеянные элементы (микроэлементы), чем организмы суши. Для растений источником и резервом подавляющей части микроэлементов служит почвообразующая порода, в водной среде источником элементов для живых организмов является вода.

В почвах большая часть микроэлементов прочно связана в минералах и освобождается только после их разрушения. Небольшая часть находится в поглощенном состоянии на поверхности глинистых минералов и может вовлекаться в катионный обмен. В обменно-поглощенном состоянии микроэлементы доступны растениям.

В целом распределение микроэлементов на поверхности суши очень неравномерно. Районы, в которых концентрация микроэлементов в силу природных причин оказывается выше или ниже кларкового уровня, называют **биогеохимическими провинциями**. Их формирование обусловлено особенностями почвообразующих пород, процессом почвообразования, а также наличием рудных аномалий.

В настоящее время влияние человеческой деятельности привело к значительному изменению многих биогеохимических циклов элементов. Загрязнение биосферы приводит к формированию **техногенных аномалий**, где содержание химических элементов в 10 и более раз превышает фоновое.

*Участие человека в изменении природных циклов сводится к двум формам:*

1. изменения в природных круговоротах в результате добавления или удаления присутствующих в них химических веществ из-за вызванных человеком воздействий;
2. поступление в окружающую среду необычных для природы соединений в результате промышленного синтеза и производства новых веществ.

Процесс трансформации поступивших в почву в процессе техногенеза тяжелых металлов включает следующие стадии (рисунок 14):

- преобразование оксидов металлов в гидроксиды (карбонаты, гидрокарбонаты);
- растворение гидроксидов (карбонатов, гидрокарбонатов) тяжелых металлов и адсорбция соответствующих катионов металлов твердыми фазами почв;
- образование фосфатов тяжелых металлов и их соединений с органическим веществом почвы.

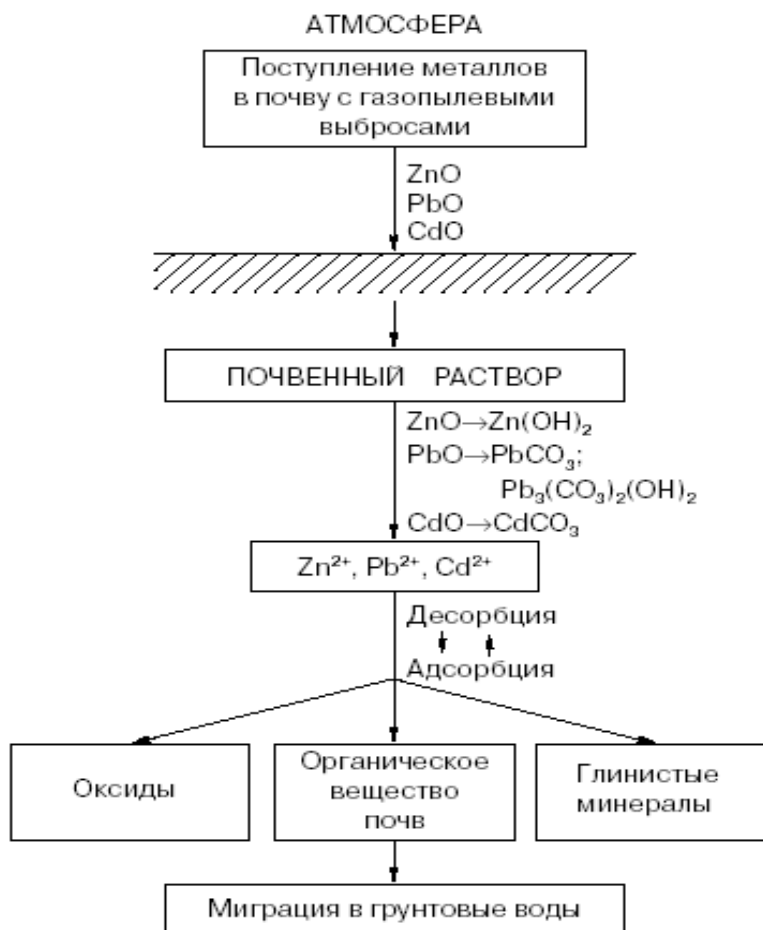


Рис. 14. Циклы превращений тяжелых металлов, поступающих из атмосферы в почву

Из почвы тяжелые металлы мигрируют в грунтовые воды и открытые водоемы, приводя к их загрязнению.

На рисунке 15 приведена общая схема биогеохимического цикла тяжелых металлов.

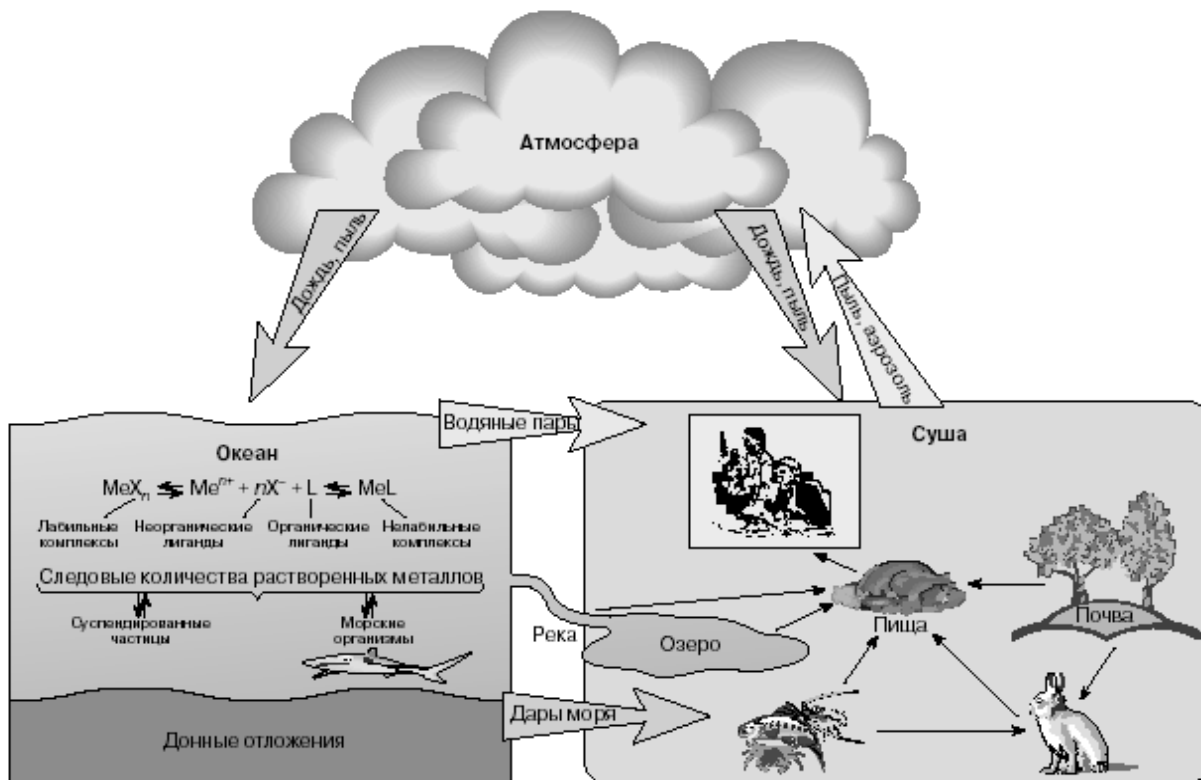


Рис. 15. Биогеохимический цикл тяжелых металлов

Таким образом, почвы играют критическую роль в циклах микроэлементов, поведение которых во многом связано с основными свойствами почвенных биосистем.

*Контрольные вопросы:*

1. Какие типы биогеохимических циклов выделил Ю. Одум?
2. Что понимают под геохимическим циклом?
3. Какова роль почвы в круговороте веществ?
4. Расскажите о биогеохимическом цикле углерода.
5. Расскажите о биогеохимическом цикле азота.
6. Назовите основные процессы трансформации соединений азота в почве.
7. Каковы особенности биогеохимического цикла кислорода?
8. Расскажите о биогеохимическом цикле водорода.
9. Что собой представляет биогеохимический цикл серы?
10. Какова роль микроорганизмов в круговороте серы?
11. Расскажите об особенностях биогеохимического круговорота фосфора.
12. Назовите основные процессы трансформации соединений фосфора в почвах.
13. Расскажите о биогеохимическом цикле кремния.
14. Каковы особенности биогеохимического цикла кальция и магния?
15. Расскажите о биогеохимических циклах натрия и калия.
16. Расскажите о биогеохимическом круговороте микроэлементов.
17. какова роль человека в изменении природных циклов?
18. Назовите процессы трансформации тяжелых металлов в почвах.

### Рекомендуемая литература

1. Алексеенко В.А. Геохимические системы биосферы. Эколого-геохимическое состояние. – Краснодар: Издательство КубГТУ, 2003. – 194 с.
2. Безуглова О.С. Биогеохимия / О.С. Безуглова, Д.С. Орлов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2000. – 320 с.
3. Богдановский Г.А. Химическая экология: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 237 с.
4. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. – М.: Наука, 1989. – 261 с.
5. Вернадский В.И. Живое вещество и биосфера. – М.: Наука, 1994. – 671 с.
6. Вернадский В.И. Очерки геохимии. – М.: Наука, 1983. – 422 с.
7. Вернадский В.И. Труды по биогеохимии и геохимии почв. – М.: Наука, 1992. – 434 с.
8. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. – М.: Наука, 1987. – 338 с.
9. Войткевич Г.В. Основы геохимии / Г.В. Войткевич, А.В. Закруткин. – М.: Высшая школа, 1976. – 368 с.
10. Войткевич Г.В. Основы учения о биосфере / Г.В. Войткевич, В.А. Вронский. – М.: Просвещение, 1989. – 159 с.
11. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. – М.: Мысль, 1983. – 246 с.
12. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.
13. Добровольский Г.В. Функции почв в биосфере и экосистемах / Г.В. Добровольский, Е.Д. Никитин. – М.: Наука, 1990. – 258 с.
14. Зилев Е. А. Химия окружающей среды: Учебное пособие / Е. А. Зилев. – Иркутск: Иркут. ун-т, 2006. – 148 с.
15. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. – М.: Наука, 1985. – 263 с.
16. Орлов Д.С. Биогеохимия / Д.С. Орлов, О.С. Безуглова. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2000. – 320 с.
17. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. – М.: Высшая школа, 1975. – 392 с.
18. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
19. Судницын И.И. Рождение биогеохимии (тайны гениев). – М.: Изд-во Московского университета, 2002. – 48 с.
20. Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы: Труды биогеохимической лаборатории. – М.: Наука, 2003. – 351 с.
21. Фортескью Дж. А. Геохимия окружающей среды. – М.: Прогресс, 1985. – 360 с.

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| 1. Введение .....  | 3  |
| <i>Предмет изучения биогеохимии</i> .....  | 3  |
| <i>История развития биогеохимии. Роль В.И. Вернадского в разработке основополагающих идей биогеохимии</i> .....                        | 4  |
| <i>Связь биогеохимии с другими науками</i> .....   | 5  |
| <i>Практическое значение биогеохимии</i> .....   | 6  |
| <i>Задачи биогеохимии</i> .....  | 6  |
| 2. Геосферы Земли и распространенность химических элементов .....  | 7  |
| <i>История возникновения химических элементов и их распространенность</i> .....  | 7  |
| <i>Строение и химический состав оболочек Земли (атмосферы, литосферы, гидросферы)</i> .....  | 9  |
| <i>Эволюция химического состава оболочек Земли</i> .....   | 13 |
| 3. Основы учения о биосфере .....  | 16 |
| <i>Этапы формирования биосферы</i> .....   | 16 |
| <i>Строение, состав, границы биосферы</i> .....  | 17 |
| <i>Живое вещество биосферы и его химический состав</i> .....   | 18 |
| <i>Биогеохимические функции живого вещества и биогеохимические принципы В.И. Вернадского</i> .....                                     | 19 |
| <i>Роль живых организмов в распределении вещества и энергии в биосфере и почвенном покрове</i> .....                                   | 20 |
| <i>Функциональные связи в биосфере</i> .....   | 21 |
| <i>Биогеоценоз, как основная структурно-функциональная единица биосферы</i> .....  | 22 |
| <i>Понятие о ноосфере и техносфере</i> .....   | 23 |
| 4. Основные показатели биогеохимических систем .....   | 24 |
| <i>Форма нахождения химических элементов</i> .....   | 24 |
| <i>Понятие о кларках (редкие, редкие рассеянные, типоморфные элементы)</i> .....   | 26 |
| <i>Распространенность химических элементов в геохимических системах</i> .....  | 27 |
| 5. Миграция элементов в ландшафтах .....   | 31 |
| <i>Кора выветривания и продукты выветривания</i> .....   | 31 |
| <i>Особенности биогеохимической миграции продуктов выветривания и почвообразования</i> .....   | 31 |
| <i>Компоненты миграции. Внутренние и внешние факторы миграции</i> .....  | 32 |
| <i>Виды миграции химических элементов, их значение</i> .....   | 35 |
| <i>Геохимические барьеры и их классификация. Ареалы аккумуляции</i> .....  | 36 |
| <i>Биологический круговорот химических элементов и его значение в формировании почвенного покрова</i> .....                            | 38 |
| <i>Большой геологический круговорот веществ</i> .....  | 39 |
| 6. Почвенно-геохимические ландшафты .....  | 42 |
| <i>Понятие о геохимических ландшафтах, их классификация и</i> .....  | 42 |
| 7. Биогеохимические циклы элементов .....  | 46 |
| <i>Понятие о циклах элементов и их распределение в биосфере</i> .....  | 46 |
| <i>Биогеохимические циклы углерода, азота, серы, кислорода, водорода. Особенности биогеохимии углерода и азота в почве</i> .....       | 48 |
| <i>Биогеохимический цикл углерода</i> .....  | 48 |
| <i>Биогеохимический цикл азота</i> .....   | 50 |
| <i>Биогеохимический цикл кислорода</i> .....   | 54 |
| <i>Биогеохимический цикл водорода</i> .....  | 55 |
| <i>Биогеохимический цикл серы</i> .....  | 56 |
| <i>Биогеохимические циклы элементов, поступивших в биосферу из земной коры (фосфор, кремний, калий, натрий, кальций, магний)</i> ..... | 58 |
| <i>Биогеохимический цикл фосфора</i> .....   | 59 |
| <i>Биогеохимический цикл кремния</i> .....   | 61 |
| <i>Биогеохимический цикл кальция</i> .....   | 63 |
| <i>Биогеохимический цикл магния</i> .....  | 64 |
| <i>Биогеохимический цикл натрия</i> .....  | 65 |
| <i>Биогеохимический цикл калия</i> .....   | 66 |
| <i>Биогеохимия микроэлементов. Техногенные циклы элементов</i> .....   | 66 |
| Рекомендуемая литература .....   | 70 |

---

Подписано в печать .2012.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л.

Тираж 50 экз. Заказ №

---

Отпечатано с оригинал-макета  
в типографии Ульяновского государственного университета  
432000, г. Ульяновск, ул. Университетская набережная, 11а