

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА
*БИОГЕОХИМИЯ***

**Казань
2008**

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Химический институт им. А.М. Бутлерова
Кафедра неорганической химии

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА
БИОГЕОХИМИЯ

Казань
2008

Печатается по решению
кафедры неорганической химии
Протокол № 7 от 1 февраля 2008 г.
и секции научно – методического совета
Казанского государственного университета

Составители:

доктор химических наук, профессор Н.А.Улахович,
кандидат химических наук, доцент М.П.Кутырева,
доктор химических наук, профессор С.С.Бабкина

Научный редактор

доктор химических наук, профессор Э.П.Медянцева

Учебно-методическое пособие для лекционного курса «Биогеохимия»
/ Н.А.Улахович, М.П.Кутырева, С.С.Бабкина. – Казань: Казанский
государственный университет, 2008. - 47 с.

Учебно-методическое пособие предназначено студентам третьего курса Химического института им. А.М.Бутлерова для углубленного изучения отдельных разделов элективного курса «Биогеохимия». Рассмотрены базовые концепции биогеохимии, этапы ее развития как науки, особенности распределения химических элементов в земной коре, их миграции, дается представление о геохимических классификациях химических элементов. Изложенный материал дополняет также некоторые разделы курса «Неорганической химии», поскольку содержит сведения о формах нахождения многих химических элементов в земной коре, которые на первоначальном этапе обучения не рассматривались. Методическое пособие полезно также студентам смежных факультетов, изучающих геохимию, почвоведение, биологию.

© Казанский государственный
университет, 2008

Оглавление

1. Введение.....	5
2. Базовые концепции биогеохимии.....	5
2.1. Концепция живого вещества.....	5
2.2. Концепция биосферы.....	6
2.3. Биокосные системы.....	7
2.4. Биогеохимические циклы.....	7
3. Этапы развития биогеохимии.....	8
4. Эволюционная биогеохимия.....	11
5. Распределение химических элементов в земной коре.....	13
5.1. Состав литосферы. Кларки и кларки концентрации.....	13
5.2. Почва и развитие биосферы.....	15
6. Формы нахождения химических элементов в земной коре.....	17
6.1. Минералы.....	17
6.2. Рассеянные элементы.....	19
6.2.1. Изоморфизм.....	20
6.2.2. Акцессорные минералы.....	21
7. Состав живого вещества.....	22
7.1. Состав биомассы суши.....	23
7.2. Состав биомассы океана.....	24
7.3. Роль рассеянных химических элементов в функционировании биомассы.....	25
8. Миграция веществ.....	25
8.1. Механическая миграция.....	25
8.2. Физико-химическая миграция.....	26
8.2.1. Внутренние факторы миграции.....	26
8.2.2. Внешние факторы миграции.....	27
8.3. Биогенная миграция.....	29
8.4. Техногенная миграция.....	29
9. Геохимические классификации элементов.....	31
9.1. Геохимическая классификация В.М.Гольдшмидта.....	31
9.2. Геохимическая миграционная классификация.....	32
9.2.1. Воздушные мигранты.....	33
9.2.2. Водные подвижные мигранты.....	35
9.2.3. Малоподвижные водные мигранты.....	37
10. Биологический круговорот химических элементов.....	39
10.1. Интенсивность биологического поглощения.....	40
10.2. Факторы, влияющие на концентрацию микроэлементов в растениях.....	42
Список рекомендуемой литературы.....	44
Краткий словарь терминов.....	45

ВВЕДЕНИЕ

Биогеохимия – это часть геохимии, изучающая геохимические процессы, происходящие в биосфере при участии живого вещества. Как наука биогеохимия возникла в 20-х годах XX века на стыке химии, биологии и геологии. Особое внимание при этом уделялось роли живого вещества в миграции химических элементов. Методологической основой биогеохимии являются разработанные в 1924 г. В.И.Вернадским принципы взаимодействия между живым и косным (неживым) веществом. Биогеохимия изучает как биологическое воздействие на химический состав окружающей среды, так и геохимическое регулирование структуры и функций экологических систем. Термин биогеохимия был впервые использован В.И.Вернадским более 80 лет назад. Однако гносеологические корни этой дисциплины можно проследить в естественных науках еще до подразделения их на биологию, химию и геологию. В настоящее время происходит противоположный процесс. Биогеохимия в определенной степени объединяет многие направления этих дисциплин. Биогеохимия изучает пути миграции химических элементов, географические закономерности распределения элементов, используемых живыми организмами, влияние жизни на историю химических элементов, их накопление, роль в геохимических процессах зоны гипергенеза и почвообразования. Биогеохимия рассматривает биосферу как единую систему живого вещества и минеральных соединений, изучает химический обмен в системе человек – организмы – окружающая среда, а также химический состав живых организмов и роль химических элементов в развитии организмов. Кроме того, в задачи биогеохимии входит анализ биогеохимических циклов миграции, которые будут рассмотрены нами в отдельном учебном пособии.

2. БАЗОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ БИОГЕОХИМИИ

2.1. Концепция живого вещества

Характерной чертой всех живых организмов, независимо от их размера, морфологических и физиологических признаков, является трансформация окружающей среды в процессе их жизнедеятельности. Масса этих организмов представляет очень незначительную часть от массы всех остальных составляющих земной коры, однако, трансформирующий эффект биоты проявляется в глобальном масштабе и затрагивает все биогеохимические циклы. Живые организмы поглощают селективно химические элементы в

соответствии со своими физиологическими потребностями. Среди этих элементов можно выделить углерод, водород, кислород, азот, фосфор, калий, серу, кремний, кальций, магний и железо, которые необходимы организмам в наибольшей степени для построения структурных органов, роста и размножения. Эти элементы также составляют основу химического состава океана, атмосферы и горных пород. Их поглощение живыми организмами приводит к биогенной трансформации земных оболочек и дифференциации элементов в окружающей среде. Более того, выделяемые в атмосферу газообразные метаболиты постепенно изменяют газовый состав атмосферы и появление в ней кислорода является самым характерным примером. Жидкие метаболиты и продукты распада вовлекаются в кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные процессы в природных водах, которые просачиваются через почвы и подстилающие геологические породы и трансформируют их минералогический и химический состав. Далее происходит изменение химического состава воды в морях и океанах. В конечном итоге это сказывается на формировании осадочных пород. Биогеохимические циклы и живое вещество играли особенно заметную роль в формировании биогенных горючих ископаемых.

2.2. Концепция биосферы

Термин биосфера был впервые предложен в конце XIX века австрийским ученым Э.Зюссом (1831-1914), который определил биосферу как внешнюю оболочку Земли, населенную живыми организмами. В начале XX столетия В.И.Вернадский внес уточнение, согласно которому биосфера представляет собой внешнюю оболочку Земли, сформировавшуюся под воздействием жизни и биогеохимической активности. Существенное отличие этого определения заключается в том, что В.И.Вернадский понимал биосферу не только как место сосредоточения живых организмов, но и как глобальную систему взаимодействия живого и неживого вещества. Живое вещество включает в себя все разнообразие живой материи и различных форм жизни, а косное – материю твердой, жидкой и газовой фаз. Примеры образующихся биокосных тел – почва, морская, речная и озерная вода, нефть, битумы. Следовательно, биосфера – это единение живой материи и внешней части земного шара. Живое вещество невозможно без биосферы также, как понятие биосферы бессмысленно без понятия живой материи. Биосфера включает в себя слои тропосферы, гидросферы и литосферы суммарной мощностью около 40 км.

2.3. Биокосные системы

Эти системы, образованные живыми организмами и средой их обитания, включают в себя обмен химическими элементами между живыми организмами и окружающей их средой. Термин «биокосные системы» был предложен В.И.Вернадским в 1944 г. Обмен химическими элементами в биокосных системах ответственен за биогеохимическую организованность биосферы. В.И.Вернадский обозначил процессы, являющиеся по сути геохимическими (например, природная геохимическая миграция элементов), но находящиеся под воздействием двух мощных факторов (геологическим и биологическим воздействием), как биогеохимические процессы. Таким образом, предмет биогеохимии связан с изучением биогеохимических процессов.

2.4. Биогеохимические циклы

Биогеохимические циклы представляют собой уникальное свойство биосферы. Это связано с тем, что процессы биологического обмена являются циклическими по своему характеру. Динамический обмен массами химических элементов поддерживает химический состав как живых организмов, так и основных слагаемых биосферы: геологических пород, почв и воздуха. Универсальность биогеохимических циклов основана на универсальности природы в целом. Круговороты химических элементов в организмах и их сообществах отражают круговорот Земли вокруг своей оси и Солнца, природную эволюцию солнечной энергии, местоположение солнечной системы в нашей Галактике и место Галактики во Вселенной. Таким образом, пространственные и временные циклы массообмена структурируют биосферу. Среди основных биогеохимических принципов В.И.Вернадского находится и положение об обратимости и необратимости биогеохимических циклов. Он считал, что история большинства химических элементов, составляющих 99.7% массы биосферы, определяется в рамках концепции биогеохимических циклов. Эти циклы не являются полностью обратимыми. Неполная обратимость биогеохимических циклов различных элементов и их незамкнутость отражает геохимическую неоднородность Земли и пределы адаптации живых организмов к варьированию содержания элементов.

Концепция биогеохимической пищевой (трофической) цепи определяет взаимоотношения между организмами, через которые в экосистеме происходит трансформация вещества и энергии. В состав пищевых цепей входят группы особей, связанных друг с другом отношениями «пища-потребитель», следовательно, пищевые цепи представляют собой сумму звеньев, в которой каждое предыдущее звено служит пищей для каждого последующего звена. Пищевая цепь обычно включает в себя от 2 до 5

звеньев. Например, фото- и хемосинтезирующие организмы (продуценты), создающие первичную продукцию в виде органического вещества – растительные животные (фитофаги) как первичные потребители (консументы) – плотоядные животные как вторичные потребители (хищники) – организмы, разрушающие отмирающее органическое вещество (микроорганизмы).

3. ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ БИОГЕОХИМИИ

Истоки биогеохимии следует искать в работах известных химиков, биологов и геологов XVIII – XIX веков. Знаменитый французский химик А.Лавуазье (1743-1794) изучал реакции обмена оксидов углерода и кислорода в растениях и доказал, что важнейший элемент органического вещества углерод поглощается растениями из воздуха и выделяется в атмосферу в процессах разложения органических соединений. Он заложил основы современной геохимии углерода в биосфере, показав универсальность обмена веществ растений и животных со средой обитания. Также во Франции химик-органик Ж.Дюма (1800-1884) и один из основателей агрохимии Ж.Буссинго (1802-1887) разработали концепцию круговорота газов в системе живые организмы – атмосфера. В дальнейшем эти идеи развивались знаменитым немецким химиком Ю.Либихом (1802-1887), который показал, что поглощение химических элементов происходит не только из воздуха, но и из почвы, причем селективно. С точки зрения современной биогеохимии его работы были одними из первых, рассматривающих круговорот элементов в системе почва – растения – почва. Ю.Либих также открыл закон минимума питательных элементов, согласно которому продуктивность растений определяется питательным элементом, находящимся в относительном минимуме в почвенном растворе.

На стыке XIX и XX веков начала стираться граница между традиционными естественными науками такими, как геология, химия и биология. Многие исследования стали выполняться в пограничных областях, что привело к появлению междисциплинарных наук. Появление в России генетического почвоведения в 1880-ых годах является характерным примером подобных исследований. Основателем этого направления был русский ученый В.В.Докучаев (1846-1903). В его понимании генезис (зарождение и развитие) почвы представляет собой комбинацию многих почвообразующих факторов: геологические породы, биологическая активность растений и животных, климатические условия, рельеф, грунтовые воды, физическое и химическое выветривание. В результате почва представляет единение двух различных компонентов: живого (биотического) и неживого (абиотического), будучи биокосным телом. Это отличает почву от

других сходных природных тел, например, геологических пород. К числу биокосных тел принадлежит также кора выветривания и илы.

Другое научное направление, интенсивное развитие которого началось в XIX веке, связано с геохимическими исследованиями, осуществляемыми на стыке химии и геологии. Основной целью геохимии в то время было установление химического состава различных природных объектов в виде составляющих элементов и их соотношения. Это позволяло ученым проводить сравнительный анализ различных природных тел и сопоставлять разнообразные их трансформации. Геохимия развивалась в разных странах различными путями. В США во второй половине XIX века были установлены статистические закономерности распределения химических элементов в геологических породах. В 1880-е годы руководитель химической лаборатории американского геологического комитета Ф.Кларк (1847-1931) определил содержания 10 основных химических элементов в преобладающих геологических породах, природных водах и других средах с использованием имеющихся в то время аналитических методов. В настоящее время термин «кларк» (г/т, %), предложенный советским геохимиком А.Е.Ферсманом (1883-1945), широко используется для характеристики среднего содержания различных химических элементов в земной коре, гидросфере, атмосфере, почве, различных типах горных пород, космических объектах. В Европе геохимия развивалась как раздел минералогии (наука, изучающая условия природного формирования и распространения различных минералов). Такие исследования по глобальному распределению и миграции химических элементов выполнялись В.М.Гольдшмидтом (1888-1947) в университете г.Осло (Норвегия). Им были вычислены размеры ионных радиусов, установлены соотношения между положением элементов в периодической таблице и размерами их атомов и ионов, разработана геохимическая классификация химических элементов, открыт первый закон кристаллохимии и правила изоморфизма. Влияние его идей было так велико, что в 30-е и 40-е годы XX века геохимия развивалась по кристаллохимическому направлению.

В России В.И.Вернадский (1863-1945) примерно в это же время проводил минералогические исследования в Московском университете. Он изучал происхождение минералов, миграцию химических элементов, роль изоморфизма в распределении элементов в земной коре, установил на основании обобщения огромного фактического материала изоморфные ряды элементов для различных термодинамических оболочек земного шара, которые в геологической литературе известны под названием «эмпирических изоморфных рядов Вернадского». Таким образом, В.И.Вернадский внес генетический подход в минералогию, тесно связывая форму кристаллизации, твердость, цвет и другие физические свойства минералов с их химическим составом и условиями образования. Отсюда возник естественный интерес ученого к химии отдельных элементов не только в земной коре, но и в других оболочках Земли. В.И.Вернадский впервые полностью включил в таблицу

кларков химический состав гидросферы, атмосферы и биосферы, внес существенные поправки в величины кларков некоторых органогенных элементов в связи с изучением живого вещества. Эти исследования во многом определили возникновение биогеохимии. Базовым ядром научной концепции В.И.Вернадского, положенным в основу генетической минералогии, геохимии и биогеохимии, была научная идея о тесном переплетении всех природных факторов и о преобладающей роли живого вещества в формировании биосферы в целом. В.И.Вернадский опубликовал ряд работ, имевших огромное значение в становлении биогеохимии как науки В 1926 г. вышла в свет его «Биосфера», в 1927 г. – «Очерки геохимии», в 1940 г. – «Биогеохимические очерки». Под влиянием трудов В.И.Вернадского биогеохимические исследования стали проводить во Франции, США и в других странах. В 1928 г. была организована Биогеохимическая лаборатория АН СССР, которую возглавил В.И.Вернадский. Научная программа лаборатории по количественной оценке химического состава живых организмов послужила основой широких биогеохимических исследований. Методологически биогеохимические подходы тесно переплетаются с геохимическими. Обе эти дисциплины изучают распределение химических элементов в пространстве и во времени, включая их трансформацию, миграцию и рассеивание. Идеи В.И.Вернадского о планетарной роли живого вещества были положены в основу геохимической теории формирования горючих ископаемых. Биогеохимия тесно переплетена с другими науками о Земле, особенно, изучающими состав геологических пород, минералов, природных вод и газов, а также с биологическими науками, исследующими взаимосвязи между организмами и средой их обитания, например, экологией. При изучении экосистем основное внимание уделяется массообмену и миграции элементов в биогеохимических пищевых цепях.

Принципы биогеохимии нашли широкое применение и в микробиологии. Состав микроорганизмов и среды тесно взаимосвязаны. Поэтому биогеохимические исследования широко используются многими микробиологами. Так называемая «бактериальная биогеохимия» является примером применения биогеохимических подходов для оценки воздействия бактерий на состав атмосферы, природных вод и почв, а также на процессы миграции и глобальные биогеохимические циклы различных элементов.

Практическое приложение биогеохимических идей и методов развивается в геологии, геохимической экологии и биотехнологии. Среди этих направлений наибольшее развитие получили: применение биогеохимических методов при поиске полезных ископаемых, количественная характеристика геохимических условий для оценки здоровья человека и животных и применение биогеохимических стандартов для минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду. Биогеохимические методы поиска рудных тел включают в себя идентификацию геоботанических зон, где растения и их метаболиты содержат повышенные количества тех или иных

рудных металлов. Этот метод начал использовать в геологоразведке ученик В.И Вернадского А.П.Виноградов (1895-1975).

Вторым практически важным направлением в применении биогеохимических исследований является геохимическая экология, изучающая биогеохимические аномалии, в которых наблюдается дефицитное или избыточное содержание жизненно важных элементов в пищевых цепях, отражающееся на здоровье людей и животных. Например, продуктивность сельскохозяйственных животных коррелирует с содержанием в кормах бора, кобальта, меди, молибдена, селена и других элементов.

Среди направлений прикладной биогеохимии необходимо отметить исследования в области микробной биогеохимии, направленные на повышение нефтеотдачи скважин, предотвращение метанообразования в шахтах и микробную экстракцию металлов из геологических пород.

В настоящее время биогеохимия известна как приоритетная научная дисциплина, объединяющая многие естественные науки такие, как биология, геология и химия по определению, математику и физику по используемым методам, медицину и социальные науки по сфере применения научных результатов и практическим выводам.

4. ЭВОЛЮЦИОННАЯ БИОГЕОХИМИЯ

Эволюционная биогеохимия имеет дело с анализом происхождения и эволюции биогеохимических циклов в течение геологической истории Земли. Подобный анализ в конечном итоге должен быть направлен на рассмотрение происхождения живых организмов, активность которых определяется круговоротом большинства химических элементов. Результаты исследований последних лет показывают, что первые признаки жизни отмечены более 3.5-3.8 миллиардов лет назад. С тех пор постоянно возрастает роль биологических процессов в перераспределении химических элементов и их соединений. Жизнь на планете с большой вероятностью могла возникнуть в последовательности геохимических и фотохимических реакций. Возникнув, живые организмы стали влиять на изменение химического состава протобиотической Земли. Это было связано и с изменением метаболизма живых организмов, и с их адаптацией к разнообразной окружающей среде.

В настоящее время известно, что Солнечная система развивалась из вращающейся дисковидной небулы, температура и давление во внутренней части которой составляли около 1400К и 10Па. На первых стадиях конденсации происходило формирование оксидов кальция, алюминия, титана и силикатов, металлов платиновой группы, железа и никеля. Эта конденсация началась при температуре около 1360 К. При снижении температуры до 1200К происходил синтез силикатов магния. Объем прото-Земли образовался в течение ранних стадий конденсации солнечной небулы. В результате

произошло выделение из прото-Земли относительно затвердевших слоев железа, расположенных над слоями мантии из силикатов магния. Более поздние стадии конденсации происходили, когда небула остыла до относительно низкой температуры, порядка 400К. Образовавшийся равновесный конденсат содержал железо, сульфиды железа, гидратированные силикаты магния и некоторые летучие вещества. Смесь этих веществ с конденсатами, образовавшимися при более высоких температурах, как полагают, существовала на Земле в течение долгого времени до образования системы верхняя мантия – кора. Четыре миллиарда лет назад Земля испытала дегазацию, что привело к образованию прото-атмосферы и прото-гидросферы. Последующая эволюция Земли была связана с температурными изменениями. Рассеянный материал коры и обогащенные железом глины аккумуляровались в эфемерной коре океана, которая состояла из обедненных щелочами базальтов и габбро. Ранее четырех миллиардов лет назад интенсивный вулканизм и огромные тектонические давления препятствовали появлению континентно-подобных образований коры. В то время могли возникать лишь небольшие «лужайки» до нескольких сотен километров в поперечнике как прото-континенты. Наиболее старые сохранившиеся породы имеют возраст около 3.8 миллиардов лет.

Земной шар подразделяют на кору, мантию и ядро. На основании современных геохимических данных предложена следующая модель строения Земли: кора глубиной от 10 до 70 км, верхняя мантия глубиной до 400 км, транзитная зона глубиной от 400 до 1000 км, нижняя мантия глубиной от 1000 до 2900 км, жидкое внутреннее ядро глубиной до 4600 км, вторая транзитная зона глубиной от 4600 до 5150 км, твердое внутреннее ядро глубиной от 5150 до 6371 км. Кора состоит из двух силикатных слоев: сиалического, обогащенного алюминием, и симатического, обогащенного магнием и железом. Континенты в основном сложены сиалическими материалами, подстилаемыми симатическим субстратом. Земную кору и верхнюю часть подстилающей ее верхней мантии называют литосферой. Слой ниже литосферы (80-100 км) представляет собой так называемую астеносферу, которую геофизики определяют как слой пониженной твердости, прочности и вязкости в верхней мантии Земли. Вещество астеносферы считается частично расплавленным и представляет собой «смазку», по которой перемещаются геологические платформы. Нижняя мантия состоит из железо-магниевых силикатов, тогда как ядро считается состоящим из железа и никеля. Более легкие элементы (сера и кремний) также входят в астеносферу. В дальнейшей эволюции земной литосферы можно выделить три цикла между 4.0 и 2.5 миллиардами лет назад. Наиболее древние геологические породы (гнейсы западной Гренландии) содержат включения metabазальтовых и метаседиментационных пород, которые имеют возраст около 4.0 миллиардов лет. Глобальная стабилизация континентальной коры (кратонизация) произошла примерно 3 миллиарда лет назад.

5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

5.1. Состав литосферы, кларки и кларки концентрации

Более 92% массы литосферы приходится на долю четырех элементов: кислорода, кремния, железа и магния. Больше всего кислорода и кремния. Эти элементы вместе с алюминием образуют самые распространенные в коре соединения (силикаты и алюмосиликаты). Более 90 процентов земной коры сложено из силикатов алюминия, железа, кальция, магния, калия, натрия, а также оксида кремния. Верхняя мантия преимущественно состоит из тяжелых минералов, обогащенных силикатами железа и магния. Как уже отмечалось, для характеристики распространенности химических элементов в земной коре используют понятие «кларк» (среднее значение относительного содержания химического элемента). Различия в кларках химических элементов очень велики. Условно элементы делят на две группы в зависимости от их кларков, выраженных в данном случае в процентах: главные (кислород – 48.1, кремний – 39.9, алюминий – 8.0, железо – 3.6, калий – 2.7, кальций – 2.5, натрий – 2.2, магний – 1.2, титан – 0.33, водород – 0.1) и рассеянные, кларки которых составляют менее 0.1 процента. Главные элементы образуют самостоятельные химические соединения (минералы). Вторая группа химических элементов рассеяна в минералах. Особенность распределения рассеянных элементов в земной коре заключается в их способности образовывать скопления (месторождения), в которых содержание элемента в сотни и тысячи раз превышает кларковые количества.

Для количественной характеристики неоднородности распределения элементов В.И.Вернадский ввел понятие «кларк концентрации»:

$$K = A/K,$$

где A – содержание элемента в объекте (минерале),
 K – его кларк.

Если K меньше 1, то наблюдается обеднение по сравнению со средним значением. В случае, когда K превышает 1, происходит обогащение объекта химическим элементом. Среднее содержание рассеянного химического элемента в данном регионе формирует его геохимический фон. Участки с повышенной концентрацией называются геохимическими аномалиями (залёжи руд).

Важной составляющей литосферы являются подземные воды. Это физико-химическая система, находящаяся в равновесии с вмещающими породами. Только два процента подземных вод являются пресными. По мере

увеличения глубины залегания в подземных водах увеличивается концентрация газов глубинного происхождения (углекислый газ, гелий, метан и другие). Кроме растворенных в подземных водах и нефти, в литосфере Земли содержится большое количество других газообразных компонентов. Это газы микротрещин и пор, сорбированные минералами и горными породами.

Земная кора постоянно подвергается различного рода воздействиям как внутреннего (эндогенного), так и внешнего (экзогенного) характера. Движущей силой эндогенных процессов является внутренняя энергия Земли. Экзогенные факторы – это лунно-суточные приливные движения, взаимодействие с ионосферой Земли, выветривание горных пород, изменение рельефа реками, движущиеся ледники. Поверхность континентов покрыта продуктами гипергенеза (выветривания) горных пород. Эта оболочка литосферы составляет от десятков сантиметров до сотен метров и служит источником рассеянных элементов. В течение геологического времени обломочный материал подвергался глубокой трансформации. В результате вулканические породы (железomagнезиальные силикаты) и полевые шпаты разрушались и превращались в гипергенные силикаты. Это минералы глины – каолинит, монтмориллонит, гидрослюда и другие. Такое преобразование приводит к переходу рассеянных химических элементов в гидросферу.

Включению элементов в миграционные процессы способствуют и живые организмы. Древесные растения, например, извлекают из глубин рудные элементы, включая тяжелые металлы. Разложение листового опада и мертвой древесины приводит к обогащению поверхностного слоя почвы этими элементами. В.М. Гольдшмидт ввел понятие биогеохимического насоса. Благодаря этому на поверхности и образуются геохимические аномалии. В результате разложения растительного опада появляются водорастворимые кислые метаболиты и гумусовые кислоты. Они выщелачивают слабосорбированные на дефектах кристаллов элементы, а также разрушают различные минералы. Например, пиролюзит под их воздействием переходит в воду, восстанавливаясь до марганца (II). Способность гумусовых кислот растворять сульфиды тяжелых металлов изменяется в ряду: $Ni < Zn < Cu < Co < Mn$. Иной порядок обнаружен для карбонатов: $Mn < Cu < Zn < Ni < Co$. Большую роль в зонах сульфидной минерализации играет микробиологическое выщелачивание. Скорость его примерно в 1000 раз превышает скорость химического разрушения минералов и горных пород. Участвуют в этом процессе тионовые бактерии (*thiobacillus*). Один из представителей этого рода – *thiobacillus ferrooxidans* окисляет железосодержащие сульфидные минералы (пирит, халькопирит, арсенопирит). Однако этот микроорганизм не специфичен, так как способен разрушать и сульфиды других металлов (сфалерин, халькозин, ковелин). Микробиологическое выщелачивание рассеянных элементов происходит не только путем окисления, но и при восстановлении окисленных руд. В этих

процессах принимают участие микроорганизмы различных систематических групп. Так, восстановление железа (III) до железа (II) и марганца (IV) до марганца (II) осуществляется бактериями родов *Bacillus* и *Pseudomonas*. Например, *Bacillus polymyxa* и *Bacillus circulans* легко восстанавливают марганец в составе пиролюзита.

5.2. Почва и развитие биосферы

Значительным экзогенным фактором, воздействующим на земную кору, в настоящее время стала деятельность человека. До половины XX века недра использовались исключительно для добычи полезных ископаемых (частично для питьевого снабжения). Сейчас в недрах Земли создают хранилища нефти и газа, производят захоронение отходов химической и ядерной промышленности. Добыча полезных ископаемых также остается важнейшим фактором воздействия на земную кору. В наибольшей степени деятельность человека влияет на состояние самого верхнего горизонта твердой Земли – педосферы (почвенного покрова). Почва рассматривается как особое природное тело, играющее ключевую роль в глобальных биогеохимических процессах. Почва является трехфазной: твердая, жидкая, газовая фазы. Кроме того, почва является органоминеральной, полидисперсной. Это структурно-гетерогенная система. Почва состоит из генетически связанных горизонтов, образующих почвенный профиль: подстилка, перегнойно-аккумулятивный горизонт (гумусовый), элювиальный горизонт (продукты выветривания), иллювиальный (метаморфический) горизонт, содержащий выщелоченные дождевыми водами из верхних горизонтов вещества, и материнская порода. Почвенные поры частично заполнены воздухом, частично – водой. Заполненные водой поры становятся местом обитания анаэробных микроорганизмов. Минералогический состав почвы, определяющий плодородие, варьируется в широких пределах. Большинство элементов находится в ней в окисленном состоянии. В состав твердой части почвы входят переменные количества органического вещества. В основном это гумус – гуминовые и фульвокислоты и их координационные соединения с металлами.

Гуминовые и фульвокислоты образуются при микробиологическом (биохимическом) разложении растительных остатков. Исходным материалом для образования гумуса служит растительный опад. Основная часть листвы состоит из лигноцеллюлозы. Агентами разложения этих биополимеров являются почвенные грибы. Они выделяют в окружающую среду экзоферменты (целлюлазы), которые легко гидролизуют углеводы. В наибольших количествах гумусовые кислоты содержатся в черноземах (до 10 процентов). Химический состав этих ВМС непостоянен и зависит от условий образования в почве. Их молекулярные массы изменяются в значительных

пределах. В составе гумусовых соединений условно выделяют «структурные ячейки», отличающиеся по элементному составу для различных почв. Дерново-подзолистые почвы характеризуются следующим составом $C_{173}H_{183}O_{86}N_{11}$, чернозем - $C_{73}H_{61}O_{32}N_4$. Ячейки фульвокислот различаются в меньшей степени. Их молекулы содержат большее число гидрофильных групп, чем гуминовые кислоты, и поэтому лучше растворяются в воде. Растворы имеют сильноокислую реакцию (рН 2.6-2.8). Фульвокислоты обладают более высокой способностью к комплексообразованию с ионами поливалентных металлов по сравнению с гуминовыми кислотами. Комплексные соединения фульвокислот с металлами активно мигрируют в природных водах в таких условиях, в которых свободные катионы металлов выпадают в осадок. Селективное соединение рассеянных металлов с водорастворимыми компонентами гумуса или с неподвижными гелями гуминовых кислот имеет очень важное значение для вовлечения металлов в миграционные потоки или, наоборот, выведения их из циклов миграции и закрепления в почве.

Почва является важной составной частью биогеоценоза (взаимообусловленный комплекс живых и косных компонентов, связанных между собой обменом вещества и энергии). Почва как компонент биогеоценоза находится в динамическом равновесии с другими его компонентами. Биогеоценоз также представляет собой динамическую систему, непрерывно изменяющуюся во времени и в пространстве. Однако из всех компонентов биогеоценоза почва представляет собой одну из самых консервативных составляющих. Она играет буферную роль в биогеоценозе, ослабляя воздействие на него внешних факторов. Почва служит своеобразным экраном, фильтром, изменяющим состав проходящих через нее потоков вещества. Часть веществ, необходимых для жизнедеятельности растительности, микроорганизмов и других живых существ в почве, задерживается, часть фильтруется через почвенную толщу и рыхлые породы и сбрасывается в гидрологическую сеть. Таким образом, почва оказывает определенное влияние на формирование качества воды в окружающей среде. В современный период, когда антропогенное воздействие на окружающую среду становится все большим и геохимическая деятельность человека не уступает по мощности природным процессам, роль почвы в нормальном функционировании биогеоценоза становится практически важной. Техногенные вещества, поступающие на поверхность почвы, дифференцируются в пределах ее профиля в соответствии с природой почвенных генетических горизонтов и химическим составом загрязняющих веществ. Последние включаются в миграционные потоки, и происходит перераспределение их в почве и ландшафтах. Коэффициент концентрации загрязняющих веществ в почвах аккумулятивных ландшафтов значительно выше, чем в элювиальных.

Рассматривая роль почвы в развитии биосферы, необходимо отметить еще одно явление, имеющее огромное значение в создании современного облика планеты. Биогенное накопление многих химических элементов (фосфора, серы, кальция, калия, бериллия, кобальта, никеля, цинка и др.) в верхнем слое почвы, впервые обнаруженное в 30-х годах XX века В.М. Гольдшмидтом, обязано своим происхождением растениям, которые действуют как насос, перекачивающий элементы из нижних горизонтов почвы в верхние. Но это явление обусловлено и существованием такого свойства почвы как поглощательная способность. Поглощая катионы, корни непрерывно выделяют в почвенную среду водород, являющийся важным фактором выветривания. Наряду с биогенной аккумуляцией в почве наблюдается и вынос (миграция) веществ с нисходящими потоками влаги (выщелачивание). Поэтому реальное распределение химических элементов в почвенном профиле определяется соотношением этих двух процессов.

6. ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

6.1. Минералы

Горные породы (граниты, сланцы, известняки, глины) состоят, как известно, из минералов. Минерал – это природное химическое соединение кристаллической структуры, образовавшееся на Земле как результат геологических и геохимических процессов или эквивалентных процессов на внеземных телах Вселенной. Общее количество минералов составляет 2-3 тысячи видов. Число минералов, образующих распространенные горные породы литосферы невелико. Более 80 процентов массы земной коры представлено силикатами алюминия, железа, кальция, магния, калия и натрия. Около 12 процентов составляет оксид кремния (табл.1).

Наряду с минералами – продуктами неживой природы на Земле имеются биогенные минералы. К ним относятся три типа кристаллических химических соединений. Одни образовались как прямой результат участия живых существ в геохимических процессах. Особенно типичны такие явления для придонных осадков озер, морей и океанов. В них, в илах и в постепенно каменеющем тонкодисперсном осадочном материале бактерии и другие живые организмы способствуют появлению тех форм и локальных концентраций вещества, которые достаточны для начала кристаллизации минералов.

Химический состав главных минералов Земли

Минералы	Формула
Полевые шпаты	$K(AlSi_3O_8)$ $Na(AlSi_3O_8)$ $Ca(Al_2Si_2O_8)$
Пироксены	$CaMg(Si_2O_6)$ $CaFe(Si_2O_6)$ $Mg_2(Si_2O_6)$ $Fe_2(Si_2O_6)$
Слоистые силикаты	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ $Al_2(Si_4O_{10})(OH)_4$ $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
Кварц	SiO_2
Оливины	$Mg_2(SiO_4)$ $Fe_2(SiO_4)$
Гранаты	$Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$ $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$
Карбонаты	$CaCO_3$ $CaMg(CO_3)_2$

С деятельностью бактерий связано образование химически чистой серы в глинах и известняках, залегающих над месторождениями нефти. В тех случаях, когда воды, пропитывающие эти породы, содержали сернистый газ или сероводород (за счет их проникновения из лежащих ниже скоплений нефти), сера выделялась бактериями как побочный продукт их жизнедеятельности. Затем тонкодисперсная сера легко подвергалась перекристаллизации. Так в глине и мраморе выростали нередко крупные и красивые природные кристаллы серы.

Другой тип веществ можно проиллюстрировать на примере фосфоритов в карстовых пещерах. Фосфориты – это округлые, почковидные, бесформенные агрегаты разных фосфатов, среди них главным является апатит состава

$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$. Источником фосфора были экскременты летучих мышей, кальций извлекался водами из известняков.

Третий тип биогенных минералов – это кристаллические вещества в твердых тканях живых организмов. Кальцит (карбонат кальция) в раковине аммонита или кораллах из отложений мелового периода является типичным примером подобного минерала. Известно, что в живых организмах существуют органо-минеральные агрегаты, которые построены из закономерно расположенных кристаллов и обволакивающих их белковых веществ. Так, например, главным минералом твердых тканей человека является апатит, а каждое волокно его костной ткани состоит из цепочки мельчайших удлиненных (до 100 нм) призматических кристаллов этого минерала, окруженных белком - конхиалином и др. В тканях новорожденного часть фосфатного вещества костей волокон аморфна, часть окристаллизована плохо, доля белковых веществ относительно велика (более 30 процентов), кости ребенка мягкие. У пожилых людей фосфатное вещество костей волокон хорошо окристаллизовано, доля белка мала, кость становится хрупкой. Из кристаллов апатита, погруженных в белковое вещество, состоят эмаль и дентин зубов человека. Главной твердой фазой в веществе хрящей является апатит. Сам же апатит в тканях человека специфичен по кристаллохимическим особенностям. Он относительно обогащен углекислотой и водой за счет соответственно меньшего содержания в нем фосфорного ангидрида. Полагают, что карбонат - анионы в кристаллической структуре такого апатита занимают позиции фосфат - анионов, а состав минерала в результате этого отвечает формуле $\text{Ca}_2(\text{PO}_4)_2(\text{CO}_3\text{OH})(\text{OH})$, которая отличается от формулы в фосфоритах. Есть и другие кристаллические вещества в разных тканях и органах человека. Также есть они в организмах других живых существ и в растениях. Но и они не исчерпывают всего разнообразия веществ, которые можно отнести к минералам.

6.2. Рассеянные элементы

Рассеянные элементы. В.М. Гольдшмидт показал, что силикатный состав и кристаллическое строение земной коры имеют важное значение для распространения рассеянных элементов. Согласно его концепции в кристаллических структурах ионы ведут себя как жесткие сферы (твердые шары). Поэтому радиус каждого иона рассматривается как постоянная величина. Особенность ионов в кристаллических структурах заключается в том, что радиусы анионов значительно превышают радиусы катионов. Земная кора состоит из сплошного каркаса анионов кислорода, который играет роль своеобразного геохимического фильтра, способствующего дифференциации химических элементов по величине их ионов. В конкретную

кристаллическую структуру могут войти не любые элементы, обладающие необходимой валентностью, а лишь те, которые имеют соответствующий размер.

Каждый минерал характеризуется своей кристаллохимической индивидуальностью, то есть своим сочетанием химического состава и кристаллической структуры. Поэтому вещества одного и того же состава, но разной структуры (их называют полиморфными веществами) – являются разными минералами. Например, кальцит и аргонит – две разные модификации состава CaCO_3 . Два разных по составу, но одинаковых по кристаллической структуре вещества – это тоже разные минералы. Таковы магнезит MgCO_3 и сидерит FeCO_3 , корунд Al_2O_3 и эсколаит Cr_2O_3 . Часто такие изоструктурные вещества образуют кристаллы смешанного состава или твердые растворы.

6.2.1. Изоморфизм

Явление замены одних частиц формирующейся кристаллической решетки минерала другими получило название «изоморфизм». При росте кристаллов магнезита часть позиций магния оказывается занятой железом. Общий состав таких кристаллов магнезита смешанного состава выражается формулой $(\text{Mg,Fe})\text{CO}_3$. В конкретных случаях и при знании точного содержания железа формулы могут быть записаны так: $(\text{Mg}_{0.8}\text{Fe}_{0.2})\text{CO}_3$, $(\text{Mg}_{0.65}\text{Fe}_{0.35})\text{CO}_3$. Аналогично возможны такие природные составы сидерита – FeCO_3 , $(\text{Fe}_{0.9}\text{Mg}_{0.1})\text{CO}_3$, $(\text{Fe}_{0.58}\text{Mg}_{0.42})\text{CO}_3$. В кристаллах этих разных составов атом заменен на атом, все примесные атомы распределены в кристаллической решетке минерала статистически. Общее число атомов в формуле минерала не меняется.

Однако не менее распространены в природе явления изоморфизма, при которых замена атомов сопровождается дополнительными явлениями – возникновением вакансий (незанятых узлов в кристаллической решетке) или, наоборот, межузельных частиц (дополнительных атомов или электронов). Общее число атомов в формуле минерала, таким образом, не остается целочисленным, стехиометричность состава вещества нарушается. Например, природный моносulfид железа - минерал пирротин в идеале имеет формулу FeS , но в реальности почти всегда отмечается дефицит железа. Это происходит за счет того, что при росте кристаллов пирротина часть ионов Fe^{2+} заменяется ионами Fe^{3+} . В результате формулы разных проб пирротина могут иметь вид $\text{Fe}_{0.89}\text{S}$, $\text{Fe}_{0.91}\text{S}$, а в общем виде - Fe_{1-x}S . Обычно такие формулы записывают как Fe_8S_9 , $\text{Fe}_{10}\text{S}_{11}$, поскольку вид таких формул как бы не противоречит принципу стехиометричности и простых дальтоновских соотношений чисел атомов в формулах химических соединений.

Другой пример. Иногда в флюорите, (плавиком) шпате, присутствует изоморфная примесь иттрия. Каждый атом иттрия занимает позиции иона кальция, одновременно в межузельное пространство внедряется фторид-ион. Общую формулу такого флюорита можно записать так: $(Ca_{1-x}Y_x)F_{2+x}$. Все твердые растворы второго рода характеризуются нестехиометричностью их химического состава. В них всегда имеются дефекты – отклонения от идеальной кристаллической структуры минерала.

Итак, минералы – твердые растворы, характеризующиеся переменным химическим составом. В них всегда имеются дефекты – отклонения от идеальной кристаллической структуры минерала.

Образование распространенных минералов сопровождается своего рода сортировкой рассеянных элементов. Например, в полевом шпате $KAlSi_3O_8$ место калия (радиус составляет 0.133 нм) может занять только ион близкий по размеру. Таковым является катион бария с радиусом 0.134 нм. Однако барий менее распространен, чем калий. Только в редких случаях образуется цельзиан (бариевый полевой шпат). Аналогичным образом в распространенных минералах и горных породах избирательно задерживаются химические элементы, концентрация которых не так велика, чтобы они могли образовывать самостоятельные минералы. В результате изоморфизма рассеянные элементы закономерно концентрируются в определенных минералах. Полевые шпаты служат носителями бария, стронция, свинца, а оливины – никеля, кобальта, циркония, гафния. Такие элементы, как рубидий и рений также не образуют самостоятельных соединений в литосфере и полностью рассеяны в кристаллических структурах минералов-хозяев.

6.2.2. Акцессорные минералы

Изоморфные замещения – не единственная форма нахождения рассеянных элементов. Феномен рассеяния в земной коре проявляется в разных формах на разном уровне дисперсности. Наиболее грубодисперсной формой рассеяния являются хорошо окристаллизованные, очень мелкие акцессорные минералы. Они образуют механические включения в породообразующих минералах. Хотя содержание акцессориев весьма незначительное, концентрация рассеянных элементов в них настолько высокая, что эти элементы образуют самостоятельные соединения.

В кристаллических породах в качестве акцессориев присутствуют циркон $ZrSiO_4$, рутил TiO_2 , апатит $Ca_5(PO_4)_3F$, ильменит $FeTiO_3$, монацит $CePO_4$ и др. В некоторых минералах (преимущественно сульфидах) широко распространены так называемые структуры распада твердого раствора – мелкие выделения минерала – примеси в веществе минерала-хозяина. Примером является «эмульсионная вкрапленность» халькопирита $CuFeS_2$ и станина Cu_2FeSnS_4 в сфалерите ZnS , тонкие пластинчатые выделения

ильменита в магнетите FeFe_2O_4 . В результате в сульфиде цинка присутствует заметная примесь олова, в магнетите – примесь титана, в пирите присутствуют медь, кобальт, никель и цинк. Иногда рассеянные элементы не входят в кристаллическую структуру, а занимают дефекты реальных кристаллов. В этом случае элементы связаны с поверхностью минерала-носителя сорбционными силами и легко извлекаются. Такая форма нахождения рассеянных элементов составляет от 10 до 20 процентов.

Обобщая эти данные можно назвать основные формы нахождения рассеянных элементов в кристаллическом веществе земной коры:

А. Микроминералогические формы

1. Элементы акцессорных минералов.
2. Элементы, содержащиеся в микроскопических выделениях в результате распада твердых растворов.
3. Элементы, находящиеся во включениях остаточных растворов.

Б. Неминералогические формы

1. Элементы, сорбированные поверхностью дефектов реальных кристаллов.
2. Элементы, входящие в структуру минерала-носителя.
3. Элементы, находящиеся в структуре минерала-носителя в неупорядоченном состоянии.

Сочетание всех форм сильно меняется в зависимости от многих факторов. Меняется и суммарное содержание рассеянного элемента в разных участках земной коры. Поэтому для объективной оценки содержания элемента используют методы математической статистики. Многочисленные факторы указывают на то, что распределение элементов с высокими кларками обычно подчиняется нормальному закону распределения, а рассеянных – логарифмически нормальному. С высокой вариабельностью низкокларковых элементов связана их способность образовывать очень высокие локальные концентрации. Максимальная степень концентрирования главных элементов составляет 20-кратные количества по отношению к их кларку, а для рассеянных может достигать 1000-кратной величины. Среднее содержание химического элемента представляет собой норму – геохимический фон для данного типа пород в определенном районе. На геохимическом фоне выделяются геохимические аномалии. Если они связаны с залежами руд, то мы имеем дело с ореолами рассеяния. Если концентрация металлов не достигает кондиций руды, то такие аномалии называются ложными.

7. СОСТАВ ЖИВОГО ВЕЩЕСТВА

Живое вещество представляет собой совокупность всей массы организмов, населяющих нашу планету в тот или иной момент. Живое

вещество составляют фитобиомасса (леса – 10^{11} - 10^{12} т, травы – 10^{10} – 10^{11} т), зообиомасса (10^9 т) и микробиомасса (10^8 – 10^9 т). В составе живых организмов преобладают кислород, углерод, азот. Изучение зольных элементов в организмах имеет важное значение. Содержание основного компонента (воды) варьируется в широких пределах. Планктон состоит почти на 99 процентов из слабосвязанной воды. Стволы деревьев содержат воды до 60 процентов. Известны три варианта выражения химического состава живого вещества. Относительное содержание химических элементов рассчитывают на живое (сырое) вещество организмов, на их сухую биомассу, а также на золу, то есть относительно суммы минеральных веществ. Каждый из способов используют в зависимости от поставленной задачи. Определение кларков живого вещества затруднено сильным колебанием концентрации химических элементов в индивидуальных организмах. Содержание меняется в зависимости от систематического положения, среды обитания, стадии организма. Даже в одном организме концентрация одного и того же химического элемента в разных тканях и органах неодинакова.

Следует отметить, что масса разных групп организмов различается еще более сильно, чем концентрация элементов в разных организмах. Учет этого обстоятельства весьма важен, так как значение кларка элемента в живом веществе суши зависит не столько от его концентрации во всех организмах, а сколько от концентрации в тех, которые составляют преобладающую часть массы живого вещества на Земле. Основную часть массы живого вещества планеты образуют высшие растения. Масса живого вещества океана в несколько сотен раз меньше. Масса наземных животных составляет около одного процента от фитомассы. По этой причине состав растительности суши обуславливает состав всего живого вещества Земли.

7.1. Состав биомассы суши

В живой (сырой) биомассе Мировой суши содержится: 60 процентов воды, 38 процентов органического вещества и 2 процента зольных элементов. При пересчете на абсолютно сухую биомассу мы имеем 95 процентов органического вещества и 5 процентов зольных элементов. В органическом веществе фитомассы континентов углеводы составляют более 60 процентов, лигнин – 30 процентов, липиды и белки примерно по 5 процентов.

Недостающую до 100 процентов часть образуют около 70 химических элементов, рассеянных в живом веществе на уровне 0.0004 процента.

Относительное содержание химических элементов в живом веществе Мировой суши

Химический элемент	Растения	Животные
Углерод	45.4	46.5
Кислород	41.0	18.6
Водород	5.5	7.0
Азот	0.3	10.0
Сера	0.35	0.5
Фосфор	0.23	1.7-4.4
Кальций	1.8	0.02-8.5
Калий	1.4	0.74

7.2. Состав биомассы океана

Масса живого вещества океана составляет менее одного процента массы растительности суши. Особенностью структуры живого вещества океана состоит в том, что масса консументов (организмов-потребителей органического вещества) превышает массу продуцентов (фотосинтезирующих организмов). Суммарная масса животных и бактерий Мирового океана приближается к $4.5 \cdot 10^9$ т. Масса растений составляет около $3.5 \cdot 10^9$ т. Преобладающую часть массы продуцентов океана составляет фитопланктон. Химический состав живого вещества суши и океана неодинаков. Живое вещество океана отличается более высоким содержанием воды (приблизительно 80 процентов), азота и серы, а также значительно большим содержанием зольных элементов, составляющих 40-50 процентов от сухой биомассы. В растениях океана по сравнению с сушей значительно выше концентрация почти всех главных зольных элементов, особенно натрия и магния, а также хлора и серы. Еще сильнее выражено превышение концентрации многих рассеянных химических элементов в фотосинтезирующих организмах океана: в 100 раз выше концентрация йода и брома, в 10 раз - кадмия, цинка, ртути, свинца, ванадия и др.

Обобщение данных о составе биомассы Земли позволило в 30-х годах XX века выделить группы макро- и микрокомпонентов питания. Было установлено физиологическое значение таких микрокомпонентов, как медь, цинк, марганец, бор, молибден, кобальт. Наряду с ними была выделена большая группа элементов, которые более или менее часто обнаруживались в составе организмов, но их роль была совершенно неясна. Так впервые было сформулировано понятие о качественно неодинаковом состоянии главных и рассеянных химических элементов в живом веществе.

7.3. Роль рассеянных химических элементов в функционировании биомассы

Все рассеянные элементы, содержащиеся в млекопитающих животных, обычно делят на две группы. К первой относят цинк, медь, йод, марганец, ванадий, молибден, кобальт и селен. Их незаменимость для организмов установлена. Ко второй группе относят большую часть рассеянных химических элементов. Они присутствуют в животных, но формы их соединений недостаточно изучены, а физиологическая роль неизвестна. Имеются также химические элементы, порядки содержания которых не установлены: скандий, ниобий, тантал, редкоземельные элементы. Функции микроэлементов в биохимических процессах разнообразны. Важную роль играют поливалентные металлы, входящие в состав ферментов (энзимов). Они служат переносчиками электронов и участвуют в регулировании таких процессов, как дыхание и фотосинтез.

Действие разных микроэлементов сложно взаимосвязано и взаимообусловлено. Ферменты, участвующие в превращении веществ в клетке в связи с процессом дыхания, активируются медью, цинком, марганцем, кобальтом. Процессы окисления стимулируются бором и титаном. В состав ферментов, обеспечивающих фотосинтез, входят марганец, железо и медь, но на интенсивность этого процесса влияет присутствие бора, кобальта и молибдена. Важная роль принадлежит микроэлементам в гормонах. Биосинтез тироксина (гормон щитовидной железы человека) невозможен без йода. Медь стимулирует деятельность гормона гипофиза.

8. МИГРАЦИЯ ВЕЩЕСТВ

Миграция химических элементов является основой существования биосферы. Выделяют четыре основных типа миграции: механическая, физико-химическая, биогенная и техногенная.

8.1. Механическая миграция

Механическая миграция обусловлена работой рек, ветра, ледников, вулканов, тектонических сил и др. Для нее характерно раздробление горных пород и минералов, что приводит к увеличению степени дисперсности, растворимости и развитию сорбции.

Механическая миграция зависит от твердости природного материала. Твердые минералы (алмаз, циркон) хорошо сохраняются в осадках, обладают абразивной прочностью, которая возрастает в ряду: золото, киноварь, колумбит, оливин, апатит, монацит, пирит, рутил, шпинель, корунд, алмаз.

Показателем механической миграции (P_m) является годовой расход взвешенных частиц в створе реки. Максимальная величина характерна для аридных гор ($P_m = 1000 \text{ т/км}^2$), а минимальная – для гумидных лесных равнин. В современную геологическую эпоху механическая миграция преобладает над химической. В истории отдельных химических элементов механическая миграция играет различную роль. Она велика для кремния, циркония, гафния и мала для никеля, кобальта, магния, натрия, хлора.

8.2. Физико-химическая миграция

Интенсивность и направление этого процесса зависят от внутренних (свойства иона, форма, в которой присутствует химический элемент, его химические свойства) и внешних (кислотно-основные и окислительно-восстановительные условия, водный режим, температурный режим, давление, жизнедеятельность живых организмов) факторов.

8.2.1. Внутренние факторы миграции

Ионная миграция характерна главным образом для водных растворов, магматических расплавов, газовых смесей и живого вещества. Электростатические свойства ионов во многом обусловлены размерами ионных радиусов. С увеличением радиуса иона возрастает дальность миграции. Показателем электростатических свойств ионов служит ионный потенциал Картледжа (ПК) и энергетические коэффициенты (ЭК)

$$ПК = Z_i / 10R_i, \text{ где}$$

Z_i – заряд иона,

R_i – радиус иона.

По этому показателю химические элементы делятся на три группы:

1. $ПК < 3$. Химический элемент легко переходит из твердой фазы в природные воды в виде ионов и не образует комплексных соединений (калий, магний, натрий, кальций, литий, рубидий, цезий, барий).
2. $ПК$ от 3 до 12. Химические элементы образуют труднорастворимые гидролизованые соединения (железо, алюминий, цирконий, ванадий, хром).
3. $ПК > 12$. Химические элементы этой группы образуют кислородсодержащие анионы (бор, углерод, азот, фосфор, сера). В зависимости от условий кремний и молибден могут вести себя и как элементы второй группы и как элементы третьей группы.

Энергетические коэффициенты ионов рассчитывают по формулам, которые предложил А.Е.Ферсман:

$$\begin{aligned} \text{ЭК}_{\text{катионов}} &= (Z_i^2 - 20R_i) \times [0.75 \times (10R_i + 0.2)] \\ \text{ЭК}_{\text{анионов}} &= (Z_i^2 - 20R_i) \end{aligned}$$

Энергетические коэффициенты отражают последовательность кристаллизации минералов из растворов и расплавов. Они зависят от энергии их кристаллических решеток. Ионы с большими значениями ЭК выпадают из растворов раньше. В процессах миграции они менее подвижны и поэтому накапливаются в элювии. Ионы с малыми значениями ЭК (натрий, калий, рубидий, цезий, литий) обладают хорошей растворимостью и высокой миграционной способностью.

Степень электролитической диссоциации характеризует количество ионов, образовавшихся при растворении вещества. Показателем степени диссоциации является константа диссоциации, которая зависит от природы как растворенного вещества, так и растворителя. Поэтому данный показатель можно отнести как к внутренним, так и к внешним факторам миграции. Степень электролитической диссоциации определяет последовательность выпадения вещества в осадок. Однако невозможно объяснить все разнообразие миграционных процессов свойствами ионов, так как многие элементы мигрируют в виде недиссоциированных молекул, особенно это относится к гидроксидам. Неионная форма преобладает и в органических соединениях (коллоидные мицеллы), многие из которых хорошо растворимы в воде (фульвокислоты). В виде комплексов с органическими веществами мигрируют и многие металлы.

Форма, в которой находится элемент, также относится к внутренним факторам миграции. В.И.Вернадский выделял 4 формы нахождения элемента в природе: горные породы и минералы, живое вещество, магмы (силикатные расплавы) и рассеяние. Интенсивность миграции элементов, находящихся в различных формах и соединениях различна. Металлы могут накапливаться в земной коре в виде карбонатов, оксидов, сульфатов, сульфидов и т.д. В целом существует такая закономерность: кислородные соединения металлов на земной поверхности более устойчивы, чем, например, сульфиды.

8.2.2. Внешние факторы миграции

1. Температурный режим. С повышением температуры увеличивается миграционная способность элементов, находящихся в растворах и расплавах.
2. Давление. При изучении гидротермальных, магматических и метаморфических процессов обязательно учитывают давление. В

пределах биосферы и почв давление существенного влияния не оказывает.

3. Кислотно-основные условия среды. Концентрация ионов водорода оказывает значительное влияние на водную миграцию элементов в зоне гипергенеза. От этого внешнего фактора зависит осаждение из растворов многих соединений, коагуляция коллоидов, поступление элементов в растения. Значения рН начала осаждения гидроксидов элементов приводятся в различных справочниках. Однако эту картину осложняет образование комплексных ионов. Например, рН осаждения $UO_2(OH)_2$ 3.8 -6.0 (в зависимости от концентрации урана в растворе). Т.е. при значениях рН выше 6 миграция UO_2^{2+} не должна происходить. В то же время известно, что уран в таких водах мигрирует. Это связано с образованием растворимых карбонатных комплексов. Для большинства металлов образование комплексных ионов повышает рН осаждения гидроксидов и повышает растворимость вообще. Известно также, что щелочные металлы образуют только растворимые гидроксиды и для их осаждения рН вод имеет лишь косвенное значение, как фактор, влияющий на сорбцию, растворимость солей и т.д.
4. Окислительно-восстановительные условия. Этот фактор значительно влияет на миграцию элементов. В бескислородной обстановке (для почв – глеевая среда) миграционная способность катионогенных элементов увеличивается, а анионогенных - уменьшается, ускоряется разложение алюмосиликатов. В восстановительной среде сероводород вступает в реакции со многими металлами, вызывая их осаждение из раствора. Восстановительная обстановка даже периодического характера в теплое время года сопровождается интенсивной миграцией соединений железа, марганца, кобальта, никеля, меди. Чем меньше доступ кислорода и ниже значения рН, тем выше подвижность соединений металлов. В периоды аэрации начинается переход в более высокие состояния окисления и интенсивное выпадение в осадок. При этом происходит накопление соединений железа (III), кобальта (III), марганца (IV) и др.

Особую роль в водной миграции играют коллоиды. Миграция в коллоидной форме характерна для гумуса, соединений кремния, алюминия, железа, марганца, олова, титана, циркония, ванадия, хрома, никеля и некоторых других элементов. Одна из особенностей процесса сорбции на коллоидах – селективность. Состав сорбируемых веществ во многом определяется зарядом сорбента. Преимущественно сорбируются ионы, имеющие общую атомную группировку. Лучше сорбируются поливалентные, чем моновалентные ионы, а среди моновалентных – те, чей радиус больше.

8.3. Биогенная миграция

Эта форма миграции обусловлена совокупной жизнедеятельностью живых организмов. Растительность и животные организмы удерживают в своих тканях миллиарды тонн минеральных веществ. Чем больше биогенное значение химических элементов, тем лучше они защищены от прямого выноса грунтовыми и речными водами. Поэтому элементы с высокой степенью биогенности (фосфор, кальций, калий, сера, углерод, азот) обладают меньшей миграционной способностью, чем элементы, не играющие существенной роли в химическом составе живого вещества (хлор, натрий, магний). Химические элементы малой биогенности легко отбрасываются или мало захватываются живыми организмами, поэтому они характеризуются высокой миграционной способностью и выносятся далеко за пределы ареала своего образования, участвуют в процессах соленакопления (карбонаты, бикарбонаты, сульфаты, хлориды натрия и магния).

Живое вещество активно влияет на геохимическую среду, дифференциацию, отток и задержание химических элементов через пищевые цепи, метаболиты, постмортальные остатки. Кларки воздушных мигрантов в живом веществе, впервые установленные В.И.Вернадским, составляют (в %): кислород – 70, углерод -18, водород – 10.5, азот – 0.3. На долю водных мигрантов приходится всего 1.2 %. Причем содержание макроэлементов (кальций, калий, кремний, магний, фосфор, сера, натрий, хлор, железо) изменяется от 0.5 до 0.01, а микроэлементов находится в пределах 10^{-3} – 10^{-12} %. Кларки концентраций живого вещества уменьшаются с ростом атомной массы элементов. В живом веществе не обнаружены (в настоящее время): рутений, гафний, рений, осмий, иридий, полоний, актиний, технеций, астат, франций.

8.4. Техногенная миграция

Техногенные миграционные процессы можно разделить на две группы. Первая группа унаследована от биосферы. К ней относятся: биологический круговорот, круговорот воды, рассеяние элементов, распыление вещества. При изучении этих процессов в техногенезе используются понятия и методы, разработанные для анализа природных процессов.

Техногенные процессы второй группы находятся в резком противоречии с природными условиями. Так характерное для ноосферы металлическое состояние железа, никеля, хрома, ванадия и многих других элементов не свойственно природе, не соответствует физико-химическим условиям земной коры. Человеку приходится тратить много энергии, чтобы получить и содержать данные элементы в свободном состоянии. Для характеристики

процессов второй группы вводятся новые понятия и подходы к исследованиям. Специфическими показателями техногенеза являются:

1. Технофильность (Т)
2. Деструктивная активность элемента
3. Техногенное геохимическое давление
4. Модуль техногенного геохимического давления

Технофильность. Отношение ежегодной добычи элемента (Д) к его кларку в земной коре (К) называют технофильностью. Самым технофильным элементом является углерод ($T = 1.1 \times 10^{11}$). Наименее технофильны иттрий, галлий, цезий, торий. Например, у иттрия технофильность составляет $1 \cdot 10^3$. Технофильность марганца заметно ниже технофильности меди, хотя уровни их добычи вполне сопоставимы. Таким образом, технофильность химических элементов колеблется в очень широких пределах, размах колебаний измеряется в миллионах, в то время как контрасты кларков – в миллиардах. Это второе коренное отличие ноосферы от биосферы: техногенез ведет к уменьшению геохимической контрастности ноосферы.

Используют и другие показатели техногенеза. Например, деструктивную активность (ДА), которая равна отношению технофильности к биофильности (Б). Биофильность в данном случае – это кларк химического элемента в живом веществе. Деструктивная активность характеризует степень опасности элемента для живых организмов. Наибольшее значение этого показателя у ртути (10^5), кадмия (10^3), свинца, сурьмы, мышьяка, урана (10^2).

Количество элемента, выводимое ежегодно из техногенного потока в природный, называют техногенным геохимическим давлением, а отношение этого показателя к единице площади – модулем техногенного геохимического давления (т/км²). Наиболее велики модули техногенного давления у натрия, хлора, кальция, железа (в пределах 0.5 – 1.0). Наименьшие модули техногенного давления у лития, серебра, вольфрама, золота, ртути и таллия ($10^{-5} - 10^{-7}$).

Используя систему показателей, характеризующую техногенные системы, можно установить наличие в том или ином регионе техногенных геохимических аномалий. Размеры аномалий могут быть различны. Глобальные аномалии охватывают весь земной шар. К ним относят повышенное содержание углекислого газа в атмосфере, явившееся результатом сжигания топлива, накопление стронция-90 после ядерных взрывов. Региональные аномалии распространяются на материки, страны, зоны, области, провинции. К региональным аномалиям приводят такие антропогенные явления, как применение минеральных удобрений, ядохимикатов. Локальные аномалии связаны с конкретным заводом, рудником, городом. Это, например, повышенное содержание металлов в почвах и водах вокруг металлургических предприятий. Их радиус ограничивается несколькими десятками километров.

Техногенные аномалии делятся на литохимические (в почвах, породах, строениях), гидрохимические (в воде), атмогеохимические (в атмосфере), биогеохимические (в живых организмах). Совокупность техногенных аномалий от локального источника называется техногенным ореолом и потоком рассеяния. Обычно техногенный ореол включает все виды аномалий. Техногенная аномалия может быть результатом уменьшения интенсивности техногенной миграции. Такой участок носит название техногенного геохимического барьера. Техногенные барьеры могут быть полезными, вредными и нейтральными. Например, вторичное засоление – результат вредного техногенного барьера. А такие мероприятия по повышению плодородия почв, как известкование, приводят к возникновению полезного техногенного барьера и накоплению элементов питания.

9. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Миграционная способность химических элементов различается в значительной степени. Тем не менее, в разное время были предприняты попытки сгруппировать элементы по их подвижности.

9.1. Геохимическая классификация В.М. Гольдшмидта

Первым геохимическую классификацию химических элементов предложил В.М.Гольдшмидт (1924). Эта классификация проста, удобна и касается важнейших свойств элементов. В рамках этой классификации все элементы разделены на 4 основные группы:

1. *Литофильные элементы*. Они образуют горные породы и отличаются сродством к кислороду. Минералы представлены в основном оксидами, гидроксидами, солями кислородных кислот. К числу литофильных относятся 54 элемента: щелочные и щелочноземельные металлы, бор, алюминий, скандий, иттрий, лантан, лантаниды, актиний, актиниды, углерод, кремний, титан, гафний, цирконий, фосфор, ванадий, ниобий, тантал, кислород, хром, молибден, вольфрам, галогены и марганец.
2. *Халькофильные элементы*. Входят в состав сульфидных руд. Образуют соединения с серой. На внешней оболочке 8 или 18 электронов. В природе встречаются в виде сульфидов, селенидов, теллуридов, а также в самородном состоянии. Характерна растворимость сульфидов халькофильных элементов в расплавленном моносulfиде железа и образование соединений типа CuBiS_2 , Ag_3AsS_3 , PbSb_2S_4 . В земной коре обнаружено 19 халькофильных элементов: медь, серебро, золото, цинк,

кадмий, ртуть, галлий, индий, таллий, германий, олово, свинец, мышьяк, сурьма, висмут, сера, селен, теллур, железо.

3. Сидерофильные элементы («сидерос» в переводе с греческого означает железо. К этой группе относятся элементы, образующие металлическую фазу метеоритов и, вероятно, ядро Земли. По геохимическим свойствам они близки к железу. Некоторые сидерофильные элементы обнаруживают сродство к мышьяку и сере ($PtAs_2$, $NiAs_2$, $CoAs_2$, FeS , NiS , $CoAsS$), растворяются в железных расплавах и дают соединения и сплавы с железом. В эту группу входят: железо, никель, кобальт, рутений, родий, палладий, осмий, иридий, платина, рений.
4. Атмофильные элементы. Это элементы земной атмосферы: водород, углерод, кислород, азот, гелий, неон, аргон, ксенон, радон. Внешняя оболочка атомов большинства из них состоит из восьми электронов.

В.М.Гольдшмидт выделил также особую группу элементов - биофилов, к которой относятся прежде всего углерод, водород, кислород, фосфор, азот, сера, йод и в меньшей мере – бор, кальций, магний, калий, натрий, марганец, железо, кобальт, медь.

Классификация Гольдшмидта имеет качественный характер и не может быть использована для объяснения многих частных особенностей распространенности и распределения отдельных элементов в земной коре. Однако она оказалась полезной при разработке гипотез первичного расслоения Земли и может служить основой для общей геохимической классификации элементов.

9.2. Геохимическая миграционная классификация

Биогеохимия элементов во многом определяется их способностью образовывать газообразные и растворимые соединения, литофильностью, халькофильностью, сидерофильностью, катионогенностью, анионогенностью. С учетом этих свойств А.И.Перельманом была предложена геохимическая миграционная классификация. В основе этой классификации лежит деление на воздушные и водные мигранты. Первые мигрируют как в газообразном состоянии, так и с водным раствором. Вторые в газообразном состоянии не мигрируют или мигрируют слабо. В классификации также учтена зависимость миграционной способности химических элементов в разных окислительно-восстановительных средах.

9.2.1. Воздушные мигранты

К этой группе относятся элементы, для которых характерна газообразная форма в земной коре в целом, т.е. в земных глубинах и в биосфере. В рамках этой группы выделяют две подгруппы элементов: активные (образуют химические соединения) и пассивные (не образуют химические соединения). К первой подгруппе относятся кислород, водород, углерод, азот и сера. Вторую подгруппу составляют аргон, гелий, неон, криптон, ксенон и радон. Элементы первой подгруппы благодаря высокой химической активности и высоким кларкам играют особо важную роль в земной коре. Они определяют окислительно-восстановительные и кислотно-основные условия растворов и расплавов. Это главные элементы живого вещества. Для них характерна как ионная, так и неионная формы миграции в растворах и расплавах.

Кислород. Это самый распространенный элемент земной коры (47 %), гидросферы (85,7 %) и живого вещества (70 %). В земной коре преобладают кислородсодержащие минералы. В биосфере происходит резкая дифференциация кислорода в результате биологического круговорота. Растения при фотосинтезе разлагают воду и выделяют кислород в атмосферу и гидросферу. Кислород проявляет высокую химическую активность («геохимический аккумулятор»). Количество реакций окисления огромно. Они в основном имеют биохимическую природу. В почвах, илах, водоносных горизонтах, везде, где имеются органические вещества и вода, развивается деятельность микроорганизмов, окисляющих органические соединения. Общая схема круговорота кислорода в биосфере складывается из противоположных ветвей – образования свободного кислорода при фотосинтезе и его поглощения в окислительных реакциях. Кроме кислорода в атмосфере при электрических разрядах и других процессах образуются еще более сильные окислители (озон и пероксид водорода), но их количество очень мало. Тем не менее, без озонового экрана жизнь была бы невозможна.

Водород. Это главный элемент космоса. В планетах земной группы его немного (кларк гранитоидов 0.15 %, гидросферы 10.7 %, живого вещества 10.5 %). В земной коре большая часть атомов водорода входит в состав воды, угля, нефти, горючих газов, живых организмов и некоторых минералов. Геохимия водорода в биосфере тесно связана с образованием воды и эволюцией жизни. Заметное количество водорода образуется в результате деятельности бактерий, разлагающих органические вещества. Часть образующегося водорода улетучивается в космос. В земной коре есть и глубинный водород, поступающий по зонам разломов. Предполагается также его присутствие в ядре.

Сера. Роль серы в земной коре огромна, благодаря способности давать как газообразные (сернистый газ, сероводород), так и легкорастворимые (сульфаты) продукты. По числу минералов сера занимает пятое место после кислорода, водорода, кремния и кальция, а по величине кларка – пятнадцатое

(0.05 %). Сера влияет на миграцию главным образом элементов - халькофилов. По способности образовывать минералы сера не уступает водороду, фосфору, хлору, цинку. Анализ кларков концентрации показывает, что серы в земной коре во много раз больше, чем в мантии. Сера концентрируется в биосфере, осадочных породах, соленых озерах, углях, нефти. Этот биоэлемент входит в состав белков и других органических соединений. Известны организмы-концентраторы серы (водоросли, бактерии и др.). В биосфере широко распространено окисление сульфидов до легко и труднорастворимых сульфатов. Эти сульфаты в свою очередь восстанавливаются до вторичного сероводорода или сульфидов. Реакции протекают при участии микроорганизмов. В биосфере насчитывается свыше 150 минералов серы, в основном сульфатов. Важнейшим концентратором серы является мировой океан. По талассофильности сера занимает четвертое место после хлора, водорода, брома. В течение всей геологической истории источником серы для биосферы были в основном продукты извержения вулканов, содержащие водород и сернистый газ. Образование кислородной атмосферы в докембрийском периоде (4 млрд. – 570 млн. лет назад) привело к коренным изменениям в геохимии серы. Возникла сульфатная форма миграции. Появились сульфатные воды, гипсы и другие сульфаты. Одновременно развивалась десульфуризация в илах и подземных водах. В результате накапливались так называемые гипергенные сульфиды.

Углерод. Накапливается в биосфере в основном в известняках, каменном угле, нефти. Преобладающая часть атомов углерода земной коры сосредоточена в известняках и доломитах (кларк углерода 2.3%). Геохимическая роль углерода состоит в том, что он аккумулирует солнечную энергию, которая освобождается в ходе его круговорота и совершает большую работу. Число минералов 112, но много органических соединений. Основным источником углекислого газа является вулканизм. Углерод занимает четвертое место (после водорода, гелия, кислорода) по распространенности элементов в космосе. Атмосфера Марса и Венеры богата углекислым газом, а планет-гигантов – метаном.

Азот. Встречается в земной коре и биосфере в различных состояниях окисления. (3-, 0, 2+, 3+, 4+, 5+), что определяет исключительное разнообразие его миграции. Среди различных типов миграции ведущее значение имеет биогенная миграция. По роли биогенной миграции азот занимает первое место среди элементов. Кларк азота составляет 0.002%. Содержание азота в атмосфере составляет 78%. При электрических разрядах в атмосфере азот окисляется и с осадками поступает в почвы и воды в виде нитратов. Атмосферный азот поглощается также некоторыми микроорганизмами, накапливается в живом веществе, каменном угле, нефти. Природные минералы (аммонийные соли и нитраты) хорошо растворимы и легко мигрируют. Главная роль в истории азота принадлежит живому веществу, в котором он присутствует в виде органических соединений.

Вторую подгруппу составляют инертные газы (аргон, неон, гелий, крипто, ксенон, радон), химическая инертность и низкие кларки которых определяют низкие кларки в земной коре. В космосе их распространенность значительно выше. Изучение геохимии изотопов инертных газов позволяет решать и многие вопросы истории земной коры и мантии, начиная с глубокого докембрия.

9.2.2. Водные подвижные мигранты

Прежде, чем перейти к рассмотрению химических элементов этой группы, необходимо вспомнить геохимические правила.

Правило Д.И.Менделеева: *Легкие элементы распространены в земной коре больше, чем тяжелые.*

Правило В.Гаркинса: *Четные химические элементы распространены в несколько раз больше, чем соседние по периоду нечетные элементы.*

Правило Г.Оддо: *Атомные массы наиболее распространенных химических элементов выражаются числами, кратными четырем, или отличаются от этого показателя на минимальную величину.*

Во данную группу входят щелочные и щелочно-земельные металлы, а также галогенид-ионы. Для этих элементов выполняется правило Д.И.Менделеева. Исключением является литий, низкий кларк которого связывают с аномально высоким значением дефекта масс у атомных ядер элементов начала периодической системы.

Все щелочные элементы литофильны, входят в минералы в форме однозарядных катионов. Встречаются в первичных (изверженных) минералах и являются составной частью осадочных пород. Щелочные элементы находятся в верхних слоях Земли. Их мало в мантии и совсем нет в ядре. В литосфере щелочные элементы присутствуют в форме алюмосиликатов (полевых шпатов). Например, натрий входит в состав минерала альбита $\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{16}]$. При разрушении полевых шпатов щелочные элементы переходят в природные воды в виде хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов. В морской воде содержится до 3% солей щелочных металлов. При этом на долю хлорида натрия приходится 74%. Содержание хлорида калия не превышает 4%. Катионы натрия в меньшей степени, чем катионы калия сорбируются почвами и породами, поскольку его гидратированный катион больше ($R_{\text{Na}^+aq} = 7.0\text{A}$, $R_{\text{K}^+aq} = 5.3\text{A}$). По этой причине натрий в меньшей степени проникает в поры цеолитов, структуры почвенных гуминовых кислот. В результате натрий выносится в океан, а калий задерживается почвой, минералами и растениями. Большую роль играет водная миграция. Достаточно большие размеры негидратированного катиона калия определяют его изоморфизм с катионами рубидия, стронция, бария, свинца, таллия (I). В

биосфере в отличие от натрия калий мигрирует слабо. По интенсивности водной миграции он является аналогом магния.

Наиболее известными минералами щелочных металлов являются: сильвинит ($\text{NaCl} \times \text{KCl}$), мирабилит ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$), натрон (Na_2CO_3), карналлит ($\text{KCl} \times \text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$). Литий, рубидий и цезий являются редкими элементами. Встречаются в алюмосиликатах.

Щелочноземельные элементы являются типичными литофилами. Это объясняется их сродством к кислороду («жесткие кислоты» по классификации Пирсона). Они присутствуют в изверженных и осадочных породах. Гумидные ландшафты характеризуются дефицитом кальция, аридные содержат много карбоната кальция. Радий в основном содержится в урановых рудах. Малые размеры позволяют катиону магния входить в решетку глинистых минералов. Этим он резко отличается от других щелочноземельных и щелочных металлов. Подобных минералов нет ни у кальция, ни у натрия. Водная миграция магния аналогична миграции наиболее подвижных элементов (натрия, калия, хлора, брома, йода). В аридных ландшафтах магния больше, чем в гумидных. Наиболее распространены следующие минералы щелочноземельных s-элементов: доломит ($\text{MgCO}_3 \times \text{CaCO}_3$), кальцит (CaCO_3), гипс ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$), флюорит (CaF_2), апатит ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{Cl}, \text{F}, \text{OH})$), целестин (SrCO_3), барит (BaCO_3), оливин ($[\text{Mg}, \text{Fe}]_2\text{SiO}_4$).

Галогены относятся к типичным анионогенным элементам. Для них характерна интенсивная водная миграция (за исключением фтора). С одной стороны, фтор – самый электроотрицательный элемент, химически активный, взаимодействует даже с инертными газами: XeF_2 , XeOF_4 . С другой стороны, фториды менее растворимы, чем хлориды и бромиды. Известно 86 минералов фтора. Фтор может изоморфно входить в решетку апатитов и некоторых других минералов. В биосфере самый распространенный минерал хлора – галит (NaCl). Хлор является наиболее талассофильным элементом. В земной коре преобладает в виде хлорид-иона. По химическим свойствам и особенностям миграции бром напоминает хлор, но характеризуется более низким кларком. Бром не образует самостоятельных минералов. Развитие живого мира морей докембрийского периода и раннего палеозоя (570 млн. лет назад) замедлялось тормозящим влиянием брома. Выход животных в девоне (410 млн. лет назад) на континенты привел к ослаблению «бромного пресса» на нервную систему живых существ, так как на суше содержание брома намного ниже, чем в море. Это благоприятствовало эволюции нервной системы (земноводные – пресмыкающиеся – млекопитающие). Йод менее электроотрицателен, чем другие галогены. В биосфере он встречается в виде I_2 , в океане – IO_3^- , реже – I^- . По миграции в биосфере йод ближе к азоту. Для йода характерна биогенная миграция. В результате сорбции и осаждения богатых йодом органических соединений этот элемент из воды поступает в илы. При уплотнении илов освобождается раствор, содержащий йод и бром, который образует артезианские бассейны.

9.2.3. Малоподвижные водные мигранты

В эту группу входят все халькофилы, сидерофилы и часть литофилов. У них в меньшей степени выражена катионогенность и анионогенность, чем у элементов группы подвижных водных мигрантов. Растворимость соединений меньше, чем соединений элементов второй группы. Характерна коллоидная миграция. В рамках этой группы выделяют шесть классов (подгрупп) элементов.

Литофильные анионогенные элементы (Si, P, B). Эти элементы, как правило, проявляют постоянную валентность и анионогенность. Кремний является слабым водным мигрантом. В минералах присутствует в виде тетраэдров SiO_4^- . Способен замещать алюминий. Минералы труднорастворимы. Фосфор в соединениях, находящихся в земной коре, проявляет в основном валентность V. Это соли ортофосфорной кислоты, которые труднорастворимы, что ограничивает их водную миграцию. Как уже отмечалось, фосфор является важным биоэлементом. Биофильными свойствами обладает и бор. Для него характерно биологическое накопление. Гумидные ландшафты бедны бором, аридные наоборот обогащены.

Литофильные элементы с постоянной степенью окисления (Be, Al, Zr, Hf, Sc, Th, лантаниды). Образуют комплексные катионы и анионы. Миграция их соединений зависит от окислительно-восстановительных условий. Интенсивность водной миграции достаточно низкая. В биологическом круговороте участвуют слабо, плохо поглощаются организмами. Лантаниды, скандий, иттрий и лантан составляют группу так называемых редкоземельных элементов (РЗЭ). Они в природе не так уж редки (кларки на уровне 10^{-3} - 10^{-5} %). Легкие РЗЭ более распространены, чем тяжелые (правило Д.И.Менделеева). Самые тяжелые РЗЭ (тулий, иттербий и лютеций) имеют кларк порядка 10^{-5} % (больше, чем у ртути). Для РЗЭ выполняется также правило В.Гаркинса, то есть кларки нечетных элементов (Pr, Pm, Eu, Tb, Ho) в несколько раз меньше, чем четных соседей по ряду лантанидов (Ce, Nd, Sm, Gd, Dy, Er). Правда в конце ряда эта закономерность искажается, что может быть связано с погрешностями оценки их распространенности. Известны минералы циркония - циркон (ZrSiO_4) и бадделит (ZrO_2), в которых присутствует до 2 % гафния. Торий входит в состав минерала монацит. Бериллий образует минерал берилл: $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$. Скандий в земной коре распылен и практически самостоятельных минералов не образует.

Литофильные и сидерофильные элементы с переменной степенью окисления (Ti, V, Nb, Ta, U, W, Re, Mo, Tc). Титан относится к распространенным в природе элементам (кларк 0.6 %). В водных растворах гидролизует до титанила TiO^{2+} , в сильноокислой среде присутствует в виде комплексного аниона $[\text{TiF}_6]^{2-}$. Образует минералы рутил TiO_2 , ильменит FeTiO_3 , перовскит CaTiO_3 . Элементы подгруппы ванадия в земной коре

распространены менее, чем соседние по периоду (правило В.Гаркинса). Кларк ванадия 0.02%, что соответствует достаточной распространенности. Ниобий и тантал относятся к редким элементам (кларк составляет около 10^{-5} %). Ванадий не образует собственных месторождений по причине близости его размеров и атомов самых распространенных элементов (железа, титана и марганца). Имеет значение также сходство размеров ванадат- и фосфат-ионов. В результате ванадий включается в кристаллическую структуру минералов более распространенных элементов. Известны немногие собственные минералы ванадия. Это патронит $VS_2 \times V_2S_5$, ванадит $3Pb_3(VO_4)_2 \times PbCl_2$ и карнотит $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \times 3H_2O$. Они редки и не являются объектом промышленной переработки. Ниобий и тантал сопутствуют РЗЭ и присутствуют в урансодержащих минералах. Технеций также содержится в урановых рудах как продукт спонтанного деления ядер урана. Стабильных изотопов не образует. Рений является редким, рассеянным элементом (кларк 10^{-7} %), входит в состав минерала джезказганита $CuReS_4$, который представляет собой примесь к сульфидным рудам. Четные элементы молибден и вольфрам достаточно распространены в земной коре (кларк на уровне 1×10^{-3} %). Их минералы: молибденит MoS_2 , вульфенит $PbMoO_4$, повелит $CaMoO_4$, вольфрамит $xFeWO_4 \times yMnWO_4$, шеелит $CaWO_4$.

Металлы группы железа (Fe, Mn, Cr, Ni, Co). Эти элементы являются сидерофилами, однако железо, никель и кобальт проявляют и халькофильные свойства, а хром и марганец – литофильные. Марганец представляет исключение из правила В.Гаркинса, то есть имеет нечетный номер, но относится к наиболее распространенным элементам (кларк составляет 8.5×10^{-2} %). Марганец – типичный литофил, имеет небольшие размеры, жесткую электронную оболочку, является «жесткой» кислотой по Пирсону. Поэтому тяготеет к «жесткому» атому кислорода и в земной коре присутствует в основном в виде кислородных соединений. Это пиролюзит $MnO_2 \times nH_2O$, браунит Mn_2O_3 , родонит $MnSiO_3$. На дне Тихого, Атлантического и Индийского океанов обнаружены огромные запасы соединений металлов, в том числе марганца и железа. Это так называемые железо-марганцевые конкреции – продукты коагуляции коллоидов, содержащие оксиды этих и других металлов.

Геохимия железа очень сложна. Железо входит в состав очень большого числа первичных и вторичных минералов, горных и осадочных пород. По распространенности в земной коре железо занимает четвертое место, а среди металлов второе после алюминия. Кларк железа составляет 4.2 %. Минералы железа: магнетит Fe_3O_4 , красный железняк Fe_2O_3 , пирит FeS_2 , сидерит $FeCO_3$, бурый железняк $Fe(OH)_3$, оливин $(Mg, Fe)_2SiO_4$. Это один из главных минералов, слагающий основную силикатную оболочку и мантию Земли. Ядро Земли представляет собой своеобразную сидеросферу и состоит в основном из железа. Железо и никель являются четными элементами, поэтому образуют в природе много изотопов. Нечетный элемент кобальт

является элементом одиночкой. В соответствии с правилом В.Гаркинса кларк никеля составляет $2 \cdot 10^{-2}$ %, а кобальта – $2 \cdot 10^{-3}$ %. Никель встречается в природе в виде минералов никелина NiAs и купферникеля NiS. Кобальт присутствует в минералах никеля в соотношении 1:10. Известны и собственные минералы кобальта: кобальтовый блеск (кобальтит) CoS и смальтит CoAs.

Платина и платиноиды (Pt, Ru, Rh, Pd, Os, Ir). Они мало распространены. Четные элементы (Ru, Pd, Os, Pt) – в большей степени, нечетные (Rh и Ir) – в меньшей. Кларки четных и нечетных платиноидов находятся на уровне $n \times 10^{-6}$ %. Сведения об относительной распространенности противоречивы. Вследствие низкой химической активности металлы платиновой группы встречаются в природе и в самородном состоянии. Это чаще всего вкрапления в сульфидные руды меди и никеля..

Халькофильные металлы (Hg, Cd, Ag, Cu, Pb, In, Bi, Zn, Au). Встречаются в природе в виде сульфидов или примесей к ним, а также в самородном состоянии. Например, индий может накапливаться в сульфидах цинка, кадмия и свинца до 1 %. Наиболее распространенные минералы: киноварь HgS, сфалерит ZnS, халькопирит CuFeS₂, свинцовый блеск PbS. Распространенность этих элементов в земной коре подчиняется правилу В.Гаркинса. Кларки изменяют с от 10^{-8} % у золота до 10^{-3} % для меди, цинка и свинца. Содержание в земной коре индия, висмута и свинца не превышает 10^{-6} %, а ртути 10^{-7} %.

10. БИОЛОГИЧЕСКИЙ КРУГОВОРОТ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Живое вещество постоянно самообновляется. Ежегодное отмирание и возобновление растительности сопровождается циклической миграцией громадных масс химических элементов. Наиболее важной стороной геохимической деятельности растений является синтезирование органического вещества и вследствие этого перераспределение газов на поверхности Земли. Одновременно в миграцию вовлекаются многочисленные химические элементы из почвы, остающиеся после сжигания в составе золы. Циклическая миграция «зольных» элементов в системе почва – растения была открыта еще Ю.Либихом и называется биологический круговорот. Можно определить количество главных элементов, ежегодно захватываемых наземной растительностью. Геохимический отбор элементов растительностью суши обусловлен многими факторами. Один из наиболее важных – это способность химических элементов к образованию устойчивых координационных соединений с органическими лигандами. Щелочные металлы не склонны к комплексообразованию, поэтому находятся в ионном

виде. Тяжелые металлы легко образуют комплексы и могут накапливаться в клетках. Присутствие ионов хорошо растворимых соединений в клеточном соке еще не означает, что эти ионы концентрируются растением.

Итак, избирательная аккумуляция определенных рассеянных элементов происходит в растительных клетках во многом благодаря комплексообразованию. Эти микроэлементы накапливаются не клеткой вообще, а ее определенными компонентами. Установлено, что концентрация хрома в нуклепротеидах семян примерно в 100 раз выше, чем в общей массе растительной клетки, а меди в платоцианине - в 800 раз.

В океане другие закономерности. Биомасса океана значительно меньше биомассы суши. Благодаря быстрой воспроизводимости планктонных организмов скорость биологического круговорота в океане больше, чем на суше. Основная часть солнечной энергии проникает в морскую глубину до 100м. В этих пределах сосредоточена основная масса планктона. Поверхностный слой океана – это область наибольшей интенсивности биогеохимических процессов. Оборот вещества фитопланктона происходит в течение суток, что обусловлено низкой концентрацией многих элементов в поверхностном слое.

10.1. Интенсивность биологического поглощения

Как мы уже выяснили, захват рассеянных элементов растительностью представляет собой особую форму движения – биогенную миграцию. Поскольку физиологическое значение разных элементов неодинаково, можно полагать, что интенсивность их вовлечения в этот процесс тоже будет разная. Данные об относительном содержании химических элементов в живом веществе сами по себе не дают возможности судить о интенсивности их биопоглощения. Например, в сухой фитомассе содержится около 3×10^{-4} % титана. а молибдена - 0.5×10^{-4} %. Для того, чтобы оценить интенсивность биопоглощения химических элементов необходимо величину его содержания в растениях сравнить с содержанием в источнике, из которого он поступает. Источником поступления и титана и молибдена является земная кора. Поэтому надо сравнить их кларки в фитомассе и земной коре. Таким образом, интенсивность биопоглощения было предложено представлять частным от деления его содержания в золе на содержание в горных породах (Б.Б.Полынов, А.И.Перельман). Этот параметр А.И.Перельман назвал коэффициентом биопоглощения (K_6), значения которого для ряда химических элементов приведены в таблице 3.

Значения коэффициентов биопоглощения (K_6) для некоторых микроэлементов

Элемент	K_6
Бор	50.00
Бром	36.36
Серебро	12.50
Иод	12.00
Цинк	11.76
Молибден	9.69
Ртуть	7.58
Селен	7.14
Марганец	6.86
Стронций	3.04
Медь	2.27
Мышьяк	1.58
Цирконий	0.88
Барий	0.66
Рубидий	0.56
Титан	0.20

В первом приближении все элементы можно разделить на две группы. К первой относят те элементы, содержание которых в золе больше, чем в земной коре. Это - бор, бром, йод, цинк, серебро ($K_6 > 10$), а также медь, молибден, марганец, кобальт, никель ($1 < K_6 < 10$). Их физиологическая роль установлена или предполагается. Наряду с ними растения активно поглощают ртуть, селен, мышьяк, стронций (табл. 3), являющиеся ядовитыми для живых организмов даже в небольших дозах. Вторая группа включает элементы, содержащиеся в золе в меньших количествах, чем в земной коре. Некоторые из них находятся в земной коре в труднорастворимой для растений форме (галлий, цирконий, титан, иттрий, лантан). Интенсивность биопоглощения рассеянных элементов не зависит от их содержания в земной коре. Циркония в гранитном слое континентов в несколько раз больше, чем цинка, но интенсивность поглощения растениями циркония в 13 раз меньше, поскольку он находится в земной коре в труднодоступных формах для растений.

Химические элементы с коэффициентом биологического поглощения немногим больше или меньше единицы могут переходить из одной группы в другую. Наиболее изменчивы числовые значения K_6 для стронция. Интенсивность биопоглощения изменяется не только в зональных типах растений, но и по вертикальным поясам горных пород. Накопление химических элементов вначале стимулирует жизнедеятельность растения и его продуктивность, а затем угнетает. В других растениях при достижении определенного уровня концентрации химического элемента начинают

действовать механизмы, препятствующие дальнейшему его поглощению. Такое явление называют физиологическим барьером поглощения. Выделяют барьерный и безбарьерный типы поглощения. Неограниченное поглощение характерно для корней, коры, древесины стволов деревьев. Ограниченное поглощение наблюдается для зеленых опадающих частей.

10.2. Факторы, влияющие на концентрацию микроэлементов в растениях

На концентрацию микроэлементов в растениях влияют многие независимые факторы:

1. Содержание микроэлементов в почвообразующих породах.
2. Минералогический состав почв.
3. Тип почв.
4. Рельеф и уровень грунтовых вод.
5. Морфологические особенности растений.
6. Особенности вегетации растений.

На геохимических аномалиях усиливается контраст содержания рассеянных химических элементов. Это используют при разработке биогеохимических методов поиска руд. Биогеохимические аномалии возникают вследствие следующих обстоятельств:

1. Выход на поверхность горных пород с повышенной концентрацией металлов.
2. Наличие подземных вод, обогащенных металлами.
3. Систематическое выпадение из воздуха металлосодержащих вулканических выбросов.

В пределах биогеохимической аномалии все растения характеризуются повышенным содержанием рассеянных химических элементов. Имеются определенные виды, отличающиеся очень высокими концентрациями. Образование таких растений-концентраторов свидетельствует о том, что приспособление к аномальным условиям может развиваться не только в виде ограничения концентраций избыточных микроэлементов, но также их усиленного использования. Наряду с металлофильной флорой, концентрирующей сразу несколько металлов, имеются растения с узкой геохимической специализацией.

При рассмотрении геохимии земной коры необходимо иметь ввиду, что одной из ее важных особенностей является неравномерность распределения содержания химических элементов. Наиболее сильно эта неравномерность выражена для рассеянных элементов. Участки земной коры с высокой концентрацией химических элементов играли важную роль в видообразовании. В горных странах такие участки более распространены, чем в равнинах. Н.И.Вавилов одним из первых обратил внимание на усиленное

видообразование в горных регионах. Природные участки с повышенной концентрацией устойчивы во времени, организмы адаптированы к этим условиям. Иная ситуация возникает при быстром повышении концентрации металлов в результате антропогенных факторов. Происходят внутривидовые изменения. Дальнейшее повышение концентрации металлов приводит к уменьшению видового разнообразия. Геохимическая неоднородность земной коры континентов оказывает сильное влияние на состав растительности. Повышенное содержание какого-либо химического элемента сопровождается увеличением его концентрации прежде всего в фотосинтезирующих организмах. Здесь проявляется качественное различие между главными и рассеянными элементами.

Главные элементы входят в состав растений в таком большом количестве, что увеличение концентрации макроэлемента в несколько раз повлечет перестройку организма, а иногда и полное нарушение его функций. Концентрации рассеянных элементов (микроэлементов) столь незначительны, что ее увеличение даже в десятки раз может не иметь губительных последствий.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 400 с.
2. Башкин В.Н. Биогеохимия. М.: Научный мир, 2004. – 584 с.
3. Безуглова О.С., Орлов Д.С. Биогеохимия. Ростов-на-Дону: Феникс, 2000.- 320 с.
4. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. – 262 с.
5. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрейя - 2000, 1999. – 763 с.
6. Вернадский В.И. Биосфера. М.: Мысль, 19657. – 376 с.
7. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия. М.: Логос, 2000. – 627 с.
8. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высш. шк., 1989. – 527 с.
9. Вернадский В.И. Живое вещество. М.: Наука, 1978. – 358 с.
10. Орлов Д.С. Экология биосферы при химическом загрязнении / Д.С.Орлов, Л.К.Садовникова, И.Н.Лозановская. – М.: Высш. шк., 2002. – 334 с.
11. Исидоров В.А. Экологическая химия. СПб: Химиздат., 2001. – 304 с.
12. Холленд Х. Химическая эволюция океанов и атмосферы. М.: Мир, 1989. – 552.
13. Линник П.Н. , Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоиздат., 1986. – 270 с.
14. Войтович Г.В. Химическая эволюция Земли. М.: Наука, 1986. – 230 с.
15. Ковалевский А.Л. Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука, 1991. – 294 с.
16. Монин А.С., Лисицын А.П. Биогеохимия океана. М.: Наука, 1983. – 368 с.

КРАТКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Акцессорные минералы – минералы, входящие в состав горных пород в очень малых количествах (<1 %), но являющиеся их закономерной частью; по характеру акцессорных минералов может быть установлено родство и происхождение горных пород.

Антропогенное воздействие – любой вид хозяйственной деятельности человека в его отношении к природе.

Аридные территории – области с засушливым климатом, где испарение в течение года превышает сумму атмосферных осадков.

Астеносфера – слой пониженной твердости и вязкости в верхней мантии Земли,стилающий литосферу.

Базальт – темная эффузионная основная горная порода, состоящая главным образом из основного плагиоклаза, пироксенов и оливина.

Биогеоценоз – однородный участок земной поверхности с определенным составом живых (биоценоз) и косных (приземной слой атмосферы, солнечная энергия, почва и др.) компонентов и динамическим взаимодействием между ними (обменом веществ и энергии). Иногда термин применяется как синоним экосистемы.

Биогенные процессы (биогенез) – образование органических соединений живыми организмами.

Биокосное тело – термин В.И.Вернадского, означающий такие природные тела, которые образовались при одновременном участии живых организмов и горных пород. Почвы – типичный пример биокосных тел.

Биосфера – область существования живых организмов, охватывающая нижнюю часть атмосферы (ниже озонового слоя), всю гидросферу, поверхность суши и верхнюю часть литосферы (2-3 км); термин «биосфера» включает в себя не только среду обитания живых организмов, но и сами эти организмы.

Выщелачивание почвы – процесс выноса из почвенного профиля различных растворимых веществ с нисходящими или боковыми токами почвенной влаги.

Габбро – глубинная горная порода, состоит из основного плагиоклаза, пироксенов и небольшого количества рудных минералов.

Генезис – происхождение, возникновение; в широком смысле – момент зарождения и последующий процесс развития, приведший к определенному состоянию.

Гипергенез – совокупность процессов химического преобразования минеральных веществ в верхних частях земной коры и на ее поверхности под действием атмосферы, гидросферы и живых организмов.

Геохимические аномалии – участки земной коры, отличающиеся повышенными концентрациями каких-либо химических элементов по сравнению с фоновыми значениями.

Геохимические провинции – участки земной коры с повышенным или пониженным содержанием каких-либо химических элементов в горных породах (по сравнению с кларком).

Гнейс – массивный, обычно полосчатый («гнейсовидный») кристаллический сланец гранитоидного состава.

Гумидные территории – участки земной поверхности, характеризующиеся влажным (т.е. гумидным) климатом.

Гуминовые вещества – совокупность специфических, образующихся в почве при разложении органических осадков соединений, имеющих кислую природу; в их составе различают гуминовые и гиматомелановые кислоты, фульвокислоты и гумин.

Гуминовые кислоты – темноокрашенная и высокомолекулярная фракция специфических органических веществ почвы, образовавшаяся в процессе гумификации из растительных и животных остатков; содержит бензоидные кольца, алифатические цепи и большой набор функциональных групп.

Гумификация – процесс превращения любых органических материалов в почвах в специфические гуминовые вещества.

Кероген – рассеянное органическое вещество осадочных горных пород; в процессе метаморфизма превращается в графит.

Кларк – среднее содержание элемента в земной коре; термин ввел геохимик А.Е.Ферсман в честь американского ученого Ф.Кларка.

Консументы – организмы, к числу которых принадлежат все животные, потребляющие готовые органические вещества, создаваемые фотосинтезирующими или хемосинтезирующими видами – продуцентами; в отличие от деструкторов не доводят органические вещества до полного разложения на простые минеральные составляющие.

Кратон – консолидированный участок континентальной земной коры, не испытывающий значительных складчатых деформаций.

Литосфера – внешняя сфера «твёрдой» Земли, включающая земную кору и часть верхней мантии.

Литофильные элементы – по классификации В.М.Гольдшмидта группа химических элементов (53 элемента), слагающих основную массу минералов земной коры (литосферы).

Ноосфера – особый этап в развитии Земли, особая её оболочка, в которой проявляется деятельность человеческого общества.

Технофильность – отношение ежегодной добычи элемента к его кларку в земной коре.

Техногенез – геохимическая деятельность человечества.

Фитофаги – животные, питающиеся только растениями.

Фульвокислоты – специфические вещества, образующиеся в процессе гумификации из растительных и животных остатков, и отличающиеся от других гуминовых веществ высокой растворимостью в водных средах при любой их кислотности или щелочности, сравнительно невысокой молекулярной массой и слабой окраской; фульвокислоты не являются самостоятельной группой соединений, а рассматриваются как фракции гуминовых кислот.

Элювий – продукты выветривания горных пород, остающиеся на месте своего образования.