

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Павлодарский государственный университет
им. С. Торайгырова

А.П.Бондаренко, А.А.Калиева

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ЗДОРОВЬЕ

Учебное пособие для студентов естественных
специальностей

Павлодар

УДК 550.47 (075.8)
ББК 28.080.3 Я73
Б81

Рекомендовано Учёным советом ПГУ им. С. Торайгырова

Рецензент доктор биологических наук, профессор Базарбеков К.У.

Б81 Бондаренко А.П., Калиева А.А.
Биогеохимический потенциал и здоровье: учебное пособие. —
Павлодар, 2005. — 171 с.

В данном пособии кратко показано происхождение химических элементов, их свойства и распространение в космосе, звездах, планетах и различных структурах Земли.

Учебное пособие рекомендуется студентам естественных специальностей.

УДК 550.47 (075.8)
ББК 28.080.3 Я73

©Бондаренко А.П., Калиева А.А. 2006
©Павлодарский государственный университет им С. Торайгырова,
2006

Введение

Сентенция о космическом происхождении человека приобретает иное звучание, при знакомстве с условиями возникновения химических элементов. Синтез элементов, представленных в таблице Д.Менделеева происходит в условиях значительно отличающихся от привычных нам земных.

Если большинство биогенов - углерод, азот и так далее, способны синтезироваться в условиях Солнца, то элементы с большей атомной массой для синтеза требуют температуру и давление, которые оно не в состоянии обеспечить. Происхождение этих элементов относят к до солнечному периоду Вселенной, когда в протозвездах с температурой значительно превышающей солнечную мог осуществляться синтез всех известных естественных элементов.

Затем, в процессе эволюции звезд и в результате их распада, эти элементы стали основой для формирования Вселенной нынешнего строения, в том числе и Солнечной системы. Таким образом, мы с полным основанием можем завить о своем звездном происхождении.

Мелвин Кальвин, обсуждая химическую эволюцию, ведущую к возникновению живых систем на Земле и на других планетах, замечает, что после Коперника и Галилея человек перестал быть центром Вселенной, для которого светят Солнце и звезды. После Дарвина и Пастера он перестал быть видом, который был специально создан и которого Бог наделил душой и разумом. После Фрейда он перестал быть видом, поведение которого направляется сознательным, разумным мышлением. Введенные наукой представления низвели человека во Вселенной с центрального места на подчиненное, по крайней мере, с точки зрения вещества и энергии.

В соответствии с этим, живой организм любого уровня часто называют биохимической машиной. И с этой точки зрения, как и любой машине, находящейся в состоянии движения, необходимо постоянное обеспечение энергией и материалом. Различие между технической системой и живым организмом заключается в неизмеримо более высоком уровне сложности последних, что обеспечивает их способность к постоянной работе и постоянным синтезом необходимых для жизнедеятельности компонентов.

Важность минеральных элементов для организма объясняется тем, что эффективность их достигается даже небольшими

количествами, минералы вместе с водой обеспечивают постоянство осмотического давления, кислотно-щелочного баланса, процессов всасывания, секреции, кроветворения, костеобразования, свертывания крови; без них были бы невозможны функции мышечного сокращения, нервной проводимости, внутриклеточного дыхания. Микроэлементы действуют в организме путем вхождения в той или иной форме и в незначительных количествах в структуру биологически активных веществ, главным образом ферментов (энзимов).

Нами запланированы 3 части пособия. В данном пособии показано происхождение и устойчивость химических элементов, их содержание в различных вземных объектах, и разных компонентах биосферы, а также биогенное и антропогенное влияние на биогеохимический потенциал ландшафтов. В следующих частях будет показана взаимосвязь между химическими свойствами элементов, их концентрацией в окружающей среде и содержанием в продуктах питания. В третьей, заключительной части, приведены уровни содержания химических элементов таблицы Д.Менделеева в пищевых продуктах и организме человека, прослеживаются механизмы их влияния на здоровье человека.

Цель данного пособия - показать единство происхождения химических элементов, их свойств, распространения в природных объектах и живых организмах и роль в поддержании здоровья организма человека.

1 Химические элементы: происхождение и распространение

Рассматривая биогенность химического элемента и его роль в жизни и здоровье человека, в зависимости от его положения в периодической системе и содержания в окружающей среде, сделаем небольшой экскурс в историю происхождения химических элементов, продолжительности их жизни и условий, в которых они находятся в зоне появления и развития биологических систем, а также на некоторые химические и физические свойства и распространенность в природе. Важную роль в этом играют ядерные процессы, которые определяют устойчивость атома, вероятность его возникновения и время жизни.

1.1 Межзвёздный газ

Межзвёздный газ состоит из нейтральных и ионизованных атомов и молекул. Основную массу газа составляют атомы водорода и гелия (соответственно около 90 % и 10 % по числу атомов) с небольшой примесью кислорода, углерода, неона, азота (около 0,01 % каждого). Из молекул наиболее обильно представлена H_2 , сосредоточенная в облаках. Кроме того, имеются в малом количестве CH , OH , H_2O , NH_3 , CH_2O и другие органические и неорганические молекулы. Межзвёздный газ почти равномерно перемешан с межзвёздной пылью, состоящей из частиц размером 10^{-4} - $3 \cdot 10^{-6}$ см. Мелкие частицы состоят из Fe , SiO_2 , более крупные имеют частично графитовые ядра, возможно с примесью железа, и оболочки из замерзших газов CH_4 , NH_3 , H_2O и других. Газ и пыль почти полностью отсутствуют в эллиптических галактиках, в спиральных галактиках они составляют от 1 % до 10 % массы галактики, а в неправильных галактиках - в среднем 16 % от общей массы.

Межзвёздные газ и пыль в основном концентрируются к плоскости галактик, образуя диск (рисунок 1.), толщина которого составляет в среднем несколько сотен парсек, возрастая к периферии иногда до нескольких килопарсек. Концентрация газа в дисках около 1 или нескольких атомов в 1 см^3 (плотность около 10^{-24} г/см³); вне диска и на его краях плотность газа значительно меньше. В спиральных галактиках большая часть газа и пыли сосредоточена в спиральных рукавах (ветвях): плотность газа между рукавами галактики в 3-10 раз меньше, чем в рукавах. В рукавах около 80-90 %

газа сосредоточено в межзвёздных облаках, которые часто, образуя газопылевые комплексы, располагающиеся главным образом на внутренней стороне спиральных рукавов.



Рисунок 1 - Галактика в созвездии Андромеды

В нашей Галактике диаметры межзвёздных облаков обычно составляют 5-40 парсек, концентрация атомов в них от 2 до 100 в 1 см^3 , температура 20-100 К. Облака занимают около 10 % объёма диска Галактики. Газ и пыль вместе со звёздами движутся в диске галактик вокруг её центра по орбитам, близким к круговым, со средними скоростями, составляющими 100-200 км/сек. Отдельные облака межзвёздного газа имеют собственные скорости, величина которых в среднем равна 10 км/сек, иногда достигая 50-100 км/сек. Концентрация атомов между облаками 0,02-0,2 в 1 см^3 , температура 7-10 тысяч градусов К.

Водород, гелий и другие элементы, потенциалы ионизации которых больше, чем у водорода, в облаках ионизованы очень слабо, а между облаками ионизация водорода - несколько десятков процентов. Остальные элементы однократно ионизованы светом звёзд. Такие облака и среда между ними называются областями HI (нейтрального водорода) и занимают основную часть диска галактик. Вокруг горячих

звёзд класса O водород ионизован ультрафиолетовым излучением до 99 %. Такие области называются областями HII (ионизованного водорода) или зонами Стрёмгrena, температура областей HII достигает 6000-8000 К, размеры их в зависимости от температуры звезды и плотности газа колеблются от долей парсек до нескольких десятков, а в исключительных случаях - до сотен парсек.

Обычно вокруг горячих звёзд наблюдаются не просто ионизованные межзвёздные облака, а значительно более плотные диффузные туманности, в которых концентрация достигает десятков и сотен атомов в 1 см^3 . Возможно, это остатки того плотного комплекса, из которого образовались горячие звёзды. Такие области HII постепенно расширяются под действием горячего газа. Если на пути такой области встречается уплотнение, принадлежащее области HI, то граница области HII огибает это уплотнение, обнажая его со всех сторон. Так образуются тёмные (на фоне светящихся областей HII) холодные плотные области HI, имеющие вид вытянутых жгутов (так называемые слоновьи хоботы) или сферических сгустков (глобулы). В спектре областей HII наблюдаются яркие линии водорода и некоторых других элементов, а также слабый непрерывный спектр.

В радиодиапазоне эти области светятся в непрерывном спектре и в линиях водорода и гелия, возникающих при квантовых переходах между очень высокими энергетическими уровнями. В областях HI газ в оптических лучах не светится. Его изучают по линиям поглощения света звёзд, расположенных позади этих областей. Особенно много информации дают резонансные линии поглощения атомов и ионов, расположенные в ультрафиолетовой области и наблюдаемые с космических зондов. Сведения о нейтральном водороде в Галактике и других галактиках, о его распределении и движении получают, наблюдая радиолнии нейтрального водорода с длиной волны 21 см. В этой линии, однако, излучается лишь малая доля тепловой энергии газа областей HI. Основная доля энергии излучается областями HI в далёких инфракрасных спектральных линиях атомов кислорода, ионов углерода, кремния, железа и других.

1.2 Межзвёздная пыль

Пыль, как и газ, распределена неоднородно, образуя облака и более плотные образования - глобулы (рисунок 2.). В глобулах пыль является охлаждающим фактором, экранируя свет звёзд и излучая в инфракрасном диапазоне энергию, получаемую пылинками от

неупругих столкновений с атомами газа. На поверхности пыли происходит соединение атомов в молекулы: пыль является катализатором.



Рисунок 2 - Часть Млечного Пути. Видны тёмные и светлые участки («туманности» и «облака»)

Образуется пыль, по-видимому, вследствие конденсации молекул газа на зародышах - частицах графита, SiO_2 и других частичках в межзвёздном пространстве. Сами зародыши образуются в атмосферах холодных звёзд-гигантов, в расширяющихся оболочках сверхновых звёзд; расширение их приводит к охлаждению и к конденсации молекул. При образовании звёзд в плотном облаке часть пыли может сгуститься в планеты.

Средняя плотность пыли в диске Галактики 10^{-26} г/см³ (0,01 плотности газа). Эта пыль поглощает свет звёзд, причём синие лучи сильнее, чем красные. Поэтому из-за пыли свет далёких звёзд виден не только ослабленным, но и более красным. Наличие пыли не позволяет наблюдать звёзды, лежащие в плоскости Галактики на расстояниях, превышающих 3 килопарсек от Земли. Плотные облака газа и пыли, поглощающей свет, кажутся тёмными на светлом фоне Млечного Пути. Ещё резче выделяются тёмные газопылевые облака, если они проектируются на светлую туманность. Вблизи достаточно ярких звёзд (в основном класса В) пыль освещена настолько, что может быть сфотографирована с Земли; такие светлые облака называются отражательными туманностями. Слой газа и пыли в других галактиках, наблюдаемых с ребра, виден в виде тёмной

полосы. Межзвёздные пылинки имеют несферическую форму и ориентированы в среднем определённым образом относительно магнитного поля Галактики, что вызывает поляризацию света звёзд.

Массы больших газопылевых комплексов (рисунок 3.) достигают десятков и сотен тысяч масс Солнца. В их центральных частях температура очень низкая (иногда всего 5-6 градусов К) при концентрации атомов до сотен в 1 см^3 и более. Плотность пыли в них больше $1/100$ плотности газа. Это связано с тем, что при низких температурах и больших плотностях происходит образование молекул, в том числе многоатомных, и налипание их на пылинки. В таких местах могут образовываться звёзды. В связи с этим имеет важное значение то обстоятельство, что в центральных частях комплексов наблюдаются компактные объекты (размером порядка 10^{15} см и меньше), из которых, возможно, образуются звёзды и планеты. Они очень интенсивно излучают в радиолиниях молекул OH, H₂O и других, характер излучения которых иногда аналогичен излучению лазеров.



Рисунок 3 - Газово-пылевой комплекс

Частиц, составляющих космические лучи и обладающих огромными энергиями - от 10^6 до 10^{20} эв, в межзвездной среде гораздо меньше, чем других её компонентов, но их общая энергия в 1 см^3 составляет около 1 эв, то есть превышает энергию тепловых движений межзвёздного газа. Космические лучи больших энергий слабо

взаимодействуют с газом и пылью, изредка вызывая в них ядерные реакции.

В галактиках происходит постоянный обмен веществом между межзвездной средой и звёздами. Межзвездная среда служит материалом для образования звёзд, а звёзды, в свою очередь, выбрасывают часть вещества в межзвездную среду. Это происходит и на спокойных стадиях развития звёзд, и в конце их эволюции, когда звёзды сбрасывают оболочку, образуя планетарную туманность, или взрываются как сверхновая звезда. Происходит постоянный круговорот вещества, при котором количество газа в межзвездной среде постепенно истощается. Этим объясняют тот факт, что в эллиптических галактиках газа нет, в то время как в неправильных его много: здесь он истощился в меньшей степени. Поскольку в процессе эволюции звёзд и особенно при взрывах сверхновых звёзд ядерные реакции меняют химический состав газа, меняется со временем и состав среды, а следовательно, и состав образующихся из неё звёзд. Кроме того, постоянно происходит обмен газом между ядрами галактик и межзвездной средой.

1.3 Спектры метеоров и химический состав метеорных тел

На основании исследований спектров, полученных для ярких метеоров, от +1 до - 10 звёздной величины, установлено, что их излучение состоит главным образом из ярких эмиссионных линий атомных спектров со значительно более слабыми молекулярными полосами. Иногда наблюдается слабый непрерывный фон. Наиболее интенсивные линии в спектрах принадлежат атомам и ионам: Fe, Na, Mg, Mg⁺, Ca, Ca⁺, Cr, Si⁺, N, O. Эти же химические элементы входят и в состав метеоритов. Как и метеориты, метеорные тела разделяются на железные и каменные, причём преобладающими являются каменные.

Метеориты, железные или каменные тела, падающие на Землю из межпланетного пространства; представляют собой остатки метеорных тел (рисунок 4.) не разрушившихся полностью при движении в атмосфере. Изучено распределение платиноидов, золота и других металлов по разным фазам метеоритов. Показано, что в твёрдый раствор металлические фазы метеоритов входят в качестве примесей, лишь те элементы, которые окисляются при более высоком парциальном давлении кислорода, чем железо.

За сутки на Землю выпадает в среднем несколько десятков тонн метеорного вещества. Приток метеорного вещества (рисунок 5.)

оказывает существенное влияние на примесный газовый, ионный и аэрозольный состав верхней атмосферы, а также на ряд процессов в верхней атмосфере: образование серебристых облаков, спорадических слоев ионосферы.

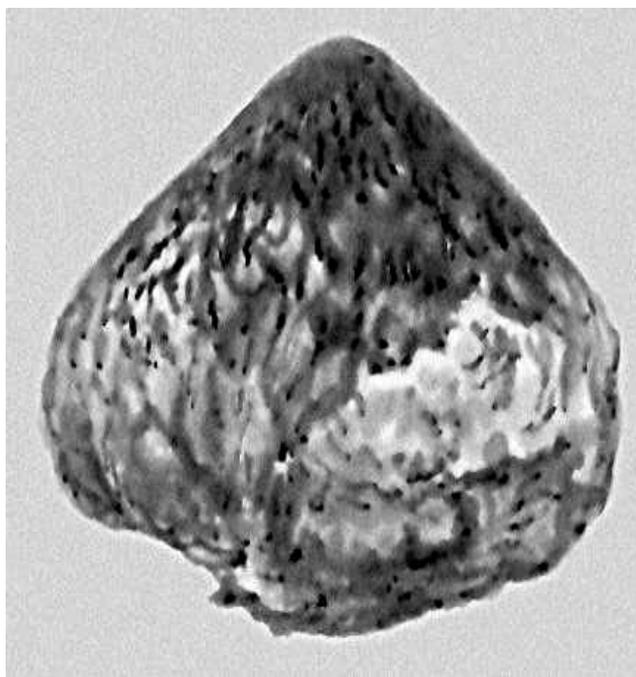


Рисунок 4 - Каменный метеорит Каракол, массой 2,8 кг, упавший 9 мая 1840 в Семипалатинской области

1.4 Химический состав звезд

Звезды различных галактик, включая систему Млечного Пути часто разделяют на две главные группы по их расположению, движению, возрасту и химическому составу. Эти группы названы звездными населенными. В центре большинства галактик располагается сфероидальная область, окруженная плоским диском, вращающимся вокруг своей оси. Типичный диск содержит спиральные ветви. Звезды населения I располагаются в галактических дисках, особенно в их спиральных ветвях. Эти звезды обладают обычным галактическим вращением, они относительно богаты металлами и молоды. К звездному населению типа II принадлежат центральные области галактик и шаровые звездные скопления. Они старше и беднее металлами.

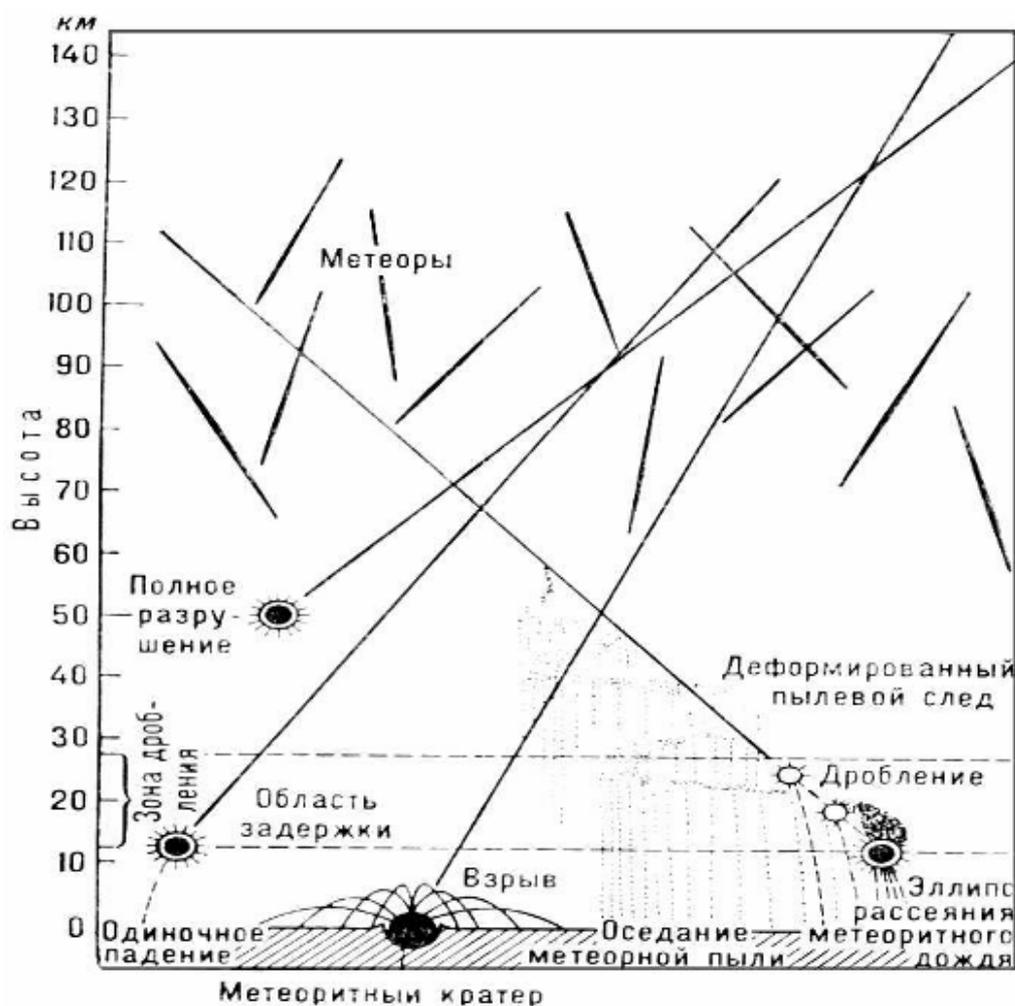


Рисунок 5 - Схема траекторий метеоритов в земной атмосфере

Предполагают, что звезды населения II образовались преимущественно из водорода. В период формирования более молодых звезд населения I межзвездная среда уже содержала более тяжелые элементы, образованные раньше в более старых звездах. Обогащение ими среды могло происходить двумя путями: во-первых, вследствие непрерывной потери вещества с поверхности гигантских красных звезд и, во-вторых, при взрывах новых и сверхновых.

Спектральная классификация звёзд - разделение звёзд на классы, установленные по различиям в их спектрах (в первую очередь по относительным интенсивностям спектральных линий). Спектральные классы имеют буквенные обозначения (рисунок 6.) и располагаются в последовательности:



Рисунок 6 - Спектральные классы звезд

Класс О (температура \gg 50000-30000 К). К этому классу принадлежат немногочисленные весьма горячие звёзды с сильно развитым ультрафиолетовым участком спектра. Характерны линии ионизованного гелия. В более поздних подразделениях видны линии нейтрального гелия, многократно ионизованных азота, углерода, кремния. Встречаются звёзды с широкими эмиссионными полосами, источником которых являются также нейтральные и ионизованные атомы гелия и ионизованные атомы азота, углерода и кислорода. Такие звёзды называются Вольфа - Райе звёздами и обозначают буквой W.

Класс В ($t \gg$ 30000-12000 К). Для спектров звёзд этого класса характерно наличие в них линий нейтрального гелия и ионизованных кислорода и азота. Линии водорода хорошо заметны, начиная с В0, и значительно усиливаются при переходе к классу В9. Наоборот, линии гелия к классу В9 ослабляются. Начиная со спектров В5, хорошо заметны линии ионизованного кальция (линия К) и магния (с длиной волны λ 4481 ангстрем).

Класс А ($t \gg$ 11500-7700К). В спектрах преобладают водородные линии бальмеровской серии, достигающие наибольшей интенсивности в классе А0, линии гелия исчезают. Нарастают интенсивности линии К и линии λ 4481 ангстрем, в классе А2 появляется линия нейтрального кальция λ 4227 ангстрем, а в классе А5 - линии нейтрального железа.

Класс F ($t \gg$ 7600-6100 К). Водородные линии всё ещё наиболее интенсивны, но заметны также многочисленные линии металлов - ионизованных и нейтральных. Очень интенсивны линии H и K ионизованного кальция. Несколько линий железа и ионизованного титана на спектрограммах с малой дисперсией сливаются, образуя полосу G (длины волн от 4305 ангстрем до 4315).

Класс G ($t \gg$ 6000-5000К). Водородные линии более не выделяются среди мощных спектральных линий металлов и в спектрах G5 - G9 слабее некоторых линий железа. Очень интенсивны

линии H и K. К классу G2 принадлежит Солнце.

Класс K ($t \gg 4900-3700$ K). Линии H и K, линия λ 4227 ангстрем и полоса G достигают наибольшего развития. В классе K5 появляются следы полос поглощения молекулы окиси титана. Непрерывный спектр в ближайшем ультрафиолетовом участке (за линией K) практически отсутствует.

Класс M ($t \gg 3600 - 2600$ K). К этому классу принадлежат красные звёзды с полосчатым спектром. Особенно выделяются полосы окиси титана. Из атомных линий выделяется только линия I 4227 ангстрем. Линии H и K почти не видны. Встречаются спектры M с одной или несколькими водородными линиями бальмеровской серии в виде линий излучения.

Класс R ($t \gg 5000-4000$ K). Спектры этого класса во многих чертах сходны со спектрами G5 - K5, но резко выделяются полосы поглощения молекул углерода и циана. У звёзд R5 фиолетовая часть спектра с длиной волны меньше 4240 ангстрем очень слаба.

Класс N ($t \gg 3000-2000$ K). Наблюдается дальнейшее усиление полос поглощения молекул углерода и циана, резко ограниченных с красной стороны. Непрерывный спектр с длиной волны меньше 4400 ангстрем очень слаб, чем и объясняется красный цвет этих звёзд. Звёзды классов R и N часто называют углеродными и сокращённо обозначаются как C-звёзды.

Класс S ($t \gg 3000-2000$ K). Звёзды этого класса по распределению энергии в непрерывном спектре сходны со звёздами спектральных классов M и N, но отличаются от них присутствием полос окиси циркония, а также менее заметных полос окиси иттрия и окиси лантана - элементов, очень редких на Земле. Водородные линии наблюдаются часто в форме излучения, как в классе M. В классах R, N и S также присутствуют полосы окиси титана.

Небольшое количество звёзд имеют спектры, не укладывающиеся в описанную последовательность или имеющие ту или иную особенность; это отмечается либо буквой p, либо, более определено, буквами: e - в случае наличия эмиссионных линий, особенно часто встречающихся в спектрах B и M (например, B2e); n - при сильно размытых линиях (например, A0n); s - при резких линиях (например, A3s); c - при особенно тонких и глубоких линиях поглощения (например, cA2); k - в случае присутствия в спектре хорошо заметных линий межзвёздного кальция (например, B0k).

1.5 Источники звёздной энергии и эволюция звёзд

Основным источником энергии звезд являются термоядерные реакции, при которых из лёгких ядер образуются более тяжёлые; чаще всего это - превращение водорода в гелий. В звездах с массой, меньшей двух солнечных, оно происходит главным образом путём соединения двух протонов в ядро дейтерия (рисунок 7.), лишний заряд уносится рождающимся позитроном, затем превращением дейтерия в изотоп He^3 путём захвата протона и, наконец, превращением двух ядер He^3 в He^4 и два протона.

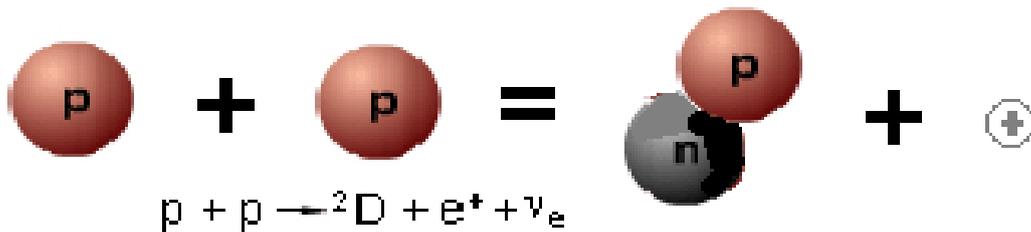


Рисунок 7 - Образование ядра дейтерия

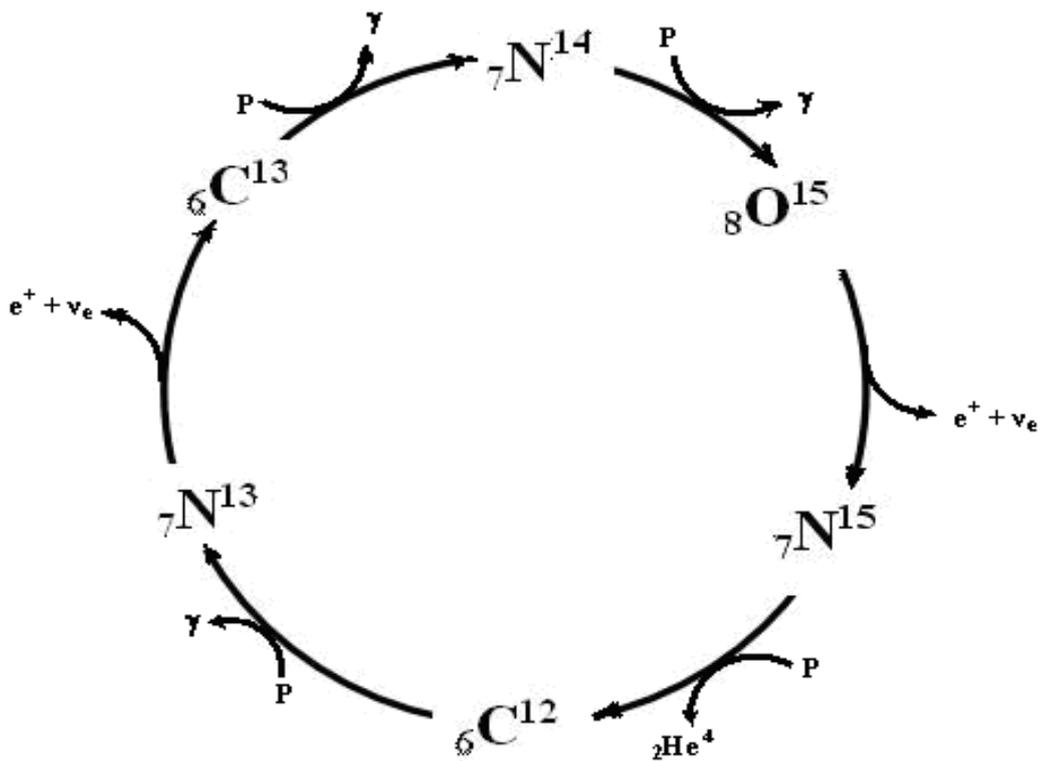
В более массивных звездах преобладает углеродно-азотная циклическая реакция: углерод захватывает последовательно 4 протона, выделяя попутно два позитрона, превращается сначала в азот, затем распадается на гелий и углерод (рисунок 8.). В процессе синтеза ядер гелия происходит выделение гамма – квантов (на рисунке - γ). Окончательным результатом обеих реакций является синтез ядра гелия из четырёх ядер водорода с выделением энергии: ядра азота и углерода в углеродно-азотной реакции играют лишь роль катализатора. Для сближения ядер на такое расстояние, когда может произойти захват, нужно преодолеть электростатическое отталкивание, поэтому реакции могут идти только при температурах, превышающих 10^7 градусов. Такие температуры встречаются в самых центральных частях звезд. В звездах малых масс, где температура в центре недостаточна для термоядерных реакций, источником энергии служит их гравитационное сжатие.

Часто наблюдаются изменения спектрального класса у звёзд. Так, в спектрах звёзд класса В нередко то появляются, то вновь исчезают эмиссионные линии (характеристика e). Изменения блеска физических переменных звёзд сопровождаются изменениями их спектрального класса. Очень сложные превращения испытывают

спектры новых звёзд после достижения ими максимума блеска. Спектры газовых планетарных туманностей, имеющие линии излучения без непрерывного спектра, обозначаются буквой Р. Встречаются сложные спектры, в которых смешиваются характеристики двух и даже трёх спектральных классов. Их обозначают, например, так: G0A2 или G0 + A2. Нередко эти спектры принадлежат тесным двойным звёздам.

1.6 Распространённость химических элементов

Как уже отмечалось, основную массу галактики составляют два наиболее простых химических элемента: - водород и гелий, после них наиболее распространены углерод, азот, кислород, неон, натрий, магний, алюминий, кремний и железо - элементы, порядковый номер которых в таблице Д. И. Менделеева не превышает 27.



P – протон, e^+ - позитрон, γ - гамма квант, ν_e – нейтрино

Рисунок 8 - Синтез ядра гелия из четырёх ядер водорода в углеродно-азотной реакции

Элементы с четными порядковыми номерами более распространены, чем с нечетными. Это связано с тем, что ядра, состоящие из четного числа протонов и четного числа нейтронов, обладают более высокой устойчивостью. Изучение состава доступной нашим наблюдениям части вселенной (галактики) позволяет сделать вывод, что главные закономерности изменения кларков химических элементов связаны со строением ядер и с процессами их образования. Наиболее распространенной термоядерной реакцией является превращение водорода в гелий. Преобразование ядер водорода в ядра гелия сопровождается выделением огромной энергии. По мнению О. Струве, весь свет, который исходит от звезд, возникает в результате этого процесса.

Литий, бериллий и бор образуются иначе - в магнитных полях огромной интенсивности под воздействием быстро движущихся электронов. Такие условия предполагаются в «звездных пятнах» или при образовании сверхновых звезд. Эти элементы очень неустойчивы под воздействием ядер водорода. Поэтому при термоядерных реакциях они «сгорают», превращаясь в гелий. В результате этого значения кларков лития, бериллия и бора малы не только для земной коры, но и для всей нашей галактики. Процесс термоядерного разрушения этих элементов может быть использован для определения относительной молодости звезд. Например, по содержанию лития, по степени его "выгорания" делают вывод о возрасте звезды.

Синтез ядер не останавливается на образовании гелия. Этот элемент также участвует в ядерных реакциях, с образованием ядер углерода, кислорода, неона, которые в результате захвата ядер гелия преобразуются в ядра магния, кремния, серы, аргона и кальция. Эти реакции происходят только в очень массивных звездах. Образование более тяжелых ядер, содержащих большое число нуклонов, может происходить при последовательном захвате нейтронов.

Особую группу составляют самые тяжелые и наиболее сложно устроенные ядра. Начиная с полония (84), элементы радиоактивны. Их ядра непрерывно распадаются, превращаясь в стабильные. Самопроизвольный радиоактивный распад можно рассматривать как неустойчивость ядер в данных условиях. Самые неустойчивые ядра давно разрушились и в земной коре отсутствуют.

Таким образом, образование ядер атомов происходит как за счет усложнения более просто устроенных ядер атомов легких химических элементов, так и в результате распада тяжелых ядер. Расчеты показали, что энергетически выгодно образование не легких и не

тяжелых ядер, а отвечающих средним порядковым номерам таблицы Д. И. Менделеева. С этим связывают высокий кларк железа.

Распространённость различных химических элементов определяется синтезом их ядер, происходящим по разным термоядерным реакциям в недрах звёзд, прочностью связей нуклидов в ядре и их сбалансированностью. Стадия эволюции звезды (её температура) определяет характер этого синтеза. Согласно наиболее распространённым космогоническим гипотезам, при образовании Солнца из сжимающейся и вращающейся туманности на заключительной стадии сжатия от центрального сгущения отделилась значительная масса горячей плазмы, которая образовала вокруг него протопланетное облако в виде диска. Облако быстро охлаждалось, и в нём возникла спонтанная конденсация вещества. В результате многостадийных реакций (конденсационный рост ядер, их коагуляция, процессы аккреции и агломерации) газовое облако превратилось в газопылевое. Одновременно происходила потеря облаком газов в космическое пространство. Холодное газопылевое облако в силу ротационной неустойчивости разбилось на ряд сгущений - протопланет, которые адиабатически сжимались.

Благодаря этому процессу из холодного вещества протопланетного облака образовались планеты земного типа и астероидный пояс с астероидами и метеоритами. Наконец, на периферии протопланетного облака происходила при очень низких абсолютных температурах конденсация отлетевших газов (H, He, NH₃, CH₄ и других), образовавших большие планеты - Юпитер, Сатурн, Нептун, Уран. В таблицах 1. - 16. показана распространённость элементов на Солнце и в метеоритах.

Таблица 1- Распространённость химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Первая группа, главная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
1	H	10,64	$4,4 \cdot 10^{10}$	-	
3	Li	<-0,46	$<3,4 \cdot 10^{-1}$	1,54	$3,5 \cdot 10^1$
11	Na	4,94	$8,7 \cdot 10^4$	4,69	$4,93 \cdot 10^4$
19	K	3,34	$2,2 \cdot 10^3$	3,55	$3,52 \cdot 10^3$
37	Rb	1,12	$1,3 \cdot 10^1$	0,75	5,69
55	Cs	-	-	-0,91	$1,22 \cdot 10^{-1}$

Таблица 2 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Вторая группа, главная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
4	Be	0,98	9,55	-0,14	$7,19 \cdot 10^{-1}$
12	Mg	6,00	$1,0 \cdot 10^6$	6,00	$1,00 \cdot 10^6$
20	Ca	4,68	$4,8 \cdot 10^4$	4,75	$5,66 \cdot 10^4$
38	Sr	1,66	$4,6 \cdot 10^1$	1,27	$1,85 \cdot 10^1$
56	Ba	0,74	5,5	0,85	7,08

Таблица 3 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Третья группа, главная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
5	B	2,24	$1,7 \cdot 10^2$	1,18	$1,50 \cdot 10^1$
13	Al	4,84	$6,9 \cdot 10^4$	4,89	$7,81 \cdot 10^4$
31	Ga	1,36	$2,3 \cdot 10^1$	1,06	$1,16 \cdot 10^1$
49	In	0,09	1,2	2,85	$1,41 \cdot 10^{-3}$
81	Tl	-	-	-2,63	$2,38 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Четвертая группа, главная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
6	C	7,15	$1,4 \cdot 10^7$	4,30	$2,02 \cdot 10^4$
14	Si	6,34	$2,2 \cdot 10^6$	6,01	$1,04 \cdot 10^6$
		5,88	$7,6 \cdot 10^5$		
32	Ge	1,13	$1,3 \cdot 10^1$	1,35	$2,23 \cdot 10^1$
50	Sn	0,18	1,5	0,83	6,83
		0,69	4,9		
82	Pb	0,27	1,9	-0,81	$1,56 \cdot 10^{-1}$

Таблица 5 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Пятая группа, главная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
7	N	6,70	$5,0 \cdot 10^6$	2,54	$3,47 \cdot 10^2$
15	P	3,98	$9,6 \cdot 10^3$	3,72	$5,23 \cdot 10^3$
33	As	-	-	0,64	4,32
51	Sb	0,58	3,8		
		-0,94	$1,1 \cdot 10^{-1}$	-0,88	$1,33 \cdot 10^{-1}$
83	Bi	-	-	-1,63	$2,33 \cdot 10^{-2}$

Таблица 6 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Шестая группа, главная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
8	O	7,47	$3,0 \cdot 10^7$	6,55	$3,54 \cdot 10^6$
16	S	5,94	$8,7 \cdot 10^5$	5,00	$1,01 \cdot 10^5$
34	Se	-	-	1,31	$2,05 \cdot 10^1$
52	Te	-	-	0,28	1,90

Таблица 7 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Седьмая группа, главная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
9	F	-	-	3,01	$1,02 \cdot 10^3$
17	Cl	-	-	2,50	$3,20 \cdot 10^2$
35	Br	-	-	1,78	$6,08 \cdot 10^{-1}$
53	I	-	-	-1,71	$5,11 \cdot 10^{-1}$

Таблица 8 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Первая группа, побочная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
29	Cu	3,09	$1,2 \cdot 10^3$	2,49	$3,06 \cdot 10^2$
474	Ag	-0,61	$2,4 \cdot 10^{-1}$	0,82	$1,50 \cdot 10^{-1}$
79	Au	-	-	-0,79	$1,65 \cdot 10^{-1}$

Таблица 9 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Вторая группа, побочная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
30	Zn	2,16	$1,4 \cdot 10^2$	2,09	$1,24 \cdot 10^2$
48	Cd	0,18	1,5	1,14	$7,21 \cdot 10^{-2}$
80	Hg	-	-	-0,09	$8,08 \cdot 10^{-1}$

Таблица 10 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Третья группа, побочная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
21	Sc	1,49	$3,1 \cdot 10^1$	1,46	$2,88 \cdot 10^1$
39	Y	1,84	$6,9 \cdot 10^1$	0,56	3,64
57	La	0,67	4,7	-0,46	$3,50 \cdot 10^{-1}$
58	Ce	0,42	2,6	-0,24	$5,78 \cdot 10^{-1}$
59	Pr	0,09	1,2	-0,94	$1,15 \cdot 10^{-1}$
60	Nd	0,57	3,7	-0,17	$6,74 \cdot 10^{-1}$
62	Sm	0,26	1,8	-0,67	$2,16 \cdot 10^{-1}$
63	Eu	-0,40	$4,0 \cdot 10^{-1}$	-1,07	$8,53 \cdot 10^{-2}$
64	Gd	-0,23	$5,9 \cdot 10^{-1}$	-0,39	$4,12 \cdot 10^{-1}$
65	Tb	-	-	-1,29	$5,10 \cdot 10^{-2}$
66	Dy	0,36	$4,4 \cdot 10^{-1}$	-0,46	$3,49 \cdot 10^{-1}$
67	Ho	-	-	-1,16	$6,88 \cdot 10^{-2}$
68	Er	-	-	-0,71	$1,94 \cdot 10^{-1}$
69	Tm	-	-1,5	-1,42	$3,84 \cdot 10^{-2}$
70	Yb	0,17	-	-0,73	$1,87 \cdot 10^{-1}$
71	Lu	1,49	-	-1,49	$3,24 \cdot 10^{-2}$
90	Th	-	-	-1,55	$2,79 \cdot 10^{-2}$
92	U	-	-	-1,99	$1,02 \cdot 10^{-2}$

Таблица 11 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Четвертая группа, побочная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
22	Ti	3,45	$2,8 \cdot 10^3$	3,34	$2,20 \cdot 10^3$
		3,27	$1,9 \cdot 10^3$		
40	Zr	1,29	$2,0 \cdot 10^1$	1,09	$1,24 \cdot 10^1$
72	Hf	-	-	-0,74	$1,82 \cdot 10^{-1}$

Таблица 12 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Пятая группа, побочная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
23	V	2,81	$6,5 \cdot 10^2$	2,35	$2,23 \cdot 10^2$
41	Nb	0,94	8,7	-0,28	$5,23 \cdot 10^{-1}$
73	Ta	-	-	-0,75	$1,79 \cdot 10^{-1}$

Таблица 13 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Шестая группа, побочная подгруппа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
24	Cr	3,76	$5,8 \cdot 10^3$		
		3,65	$4,5 \cdot 10^3$	3,97	$9,35 \cdot 10^3$
42	Mo	0,94	8,7	0,40	2,53
74	W	-	-	-0,58	$2,64 \cdot 10^{-1}$

Таблица 14 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Седьмая группа, подгруппа марганца

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
25	Mn	3,49	$3,1 \cdot 10^3$	3,87	$7,37 \cdot 10^3$
75	Re	-	-	-0,76	$1,74 \cdot 10^{-1}$

Таблица 15 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Восьмая группа, подгруппа железа

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
26	Fe	5,44	$2,8 \cdot 10^5$	5,84	$6,96 \cdot 10^5$
27	Co	3,34	$2,2 \cdot 10^3$	3,28	$1,92 \cdot 10^3$
28	Ni	4,41	$2,6 \cdot 10^4$	4,60	$4,00 \cdot 10^4$

Таблица 16 - Распространенность химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах) (S_{Mg} - число атомов данного элемента на 10^6 атомов магния). Восьмая группа, подгруппа платиновые металлы

Элементы		Солнце		Метеориты	
		$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}	$\lg S_{Mg}$	S_{Mg}
44	Ru	0,46	2,9	0,20	1,60
45	Rh	0,01	1,0	-0,51	$3,15 \cdot 10^{-1}$
46	Pd	0,21	1,6	0,18	1,52
76	Os	-	-	-0,22	$5,96 \cdot 10^{-1}$
77	Ir	-	-	-0,38	$4,22 \cdot 10^{-1}$
78	Pt	-	-	0,22	1,66

Непосредственное определение общего состава планеты невозможно, однако астрономические (спектральные) данные о составе Солнца и данные о химическом составе каменных метеоритов (наиболее распространённых - хондритов) позволяют судить о распространенности химических элементов на Земле и на других планетах.

Химические элементы в таблицах 1-16 и ниже, где это представляется обоснованным, приведены по одной схеме, согласно их положению в группах периодической системы химических элементов Д. Менделеева. Вначале рассматриваются поочередно элементы главных подгрупп с первой по восьмую, а затем, в той же очередности элементы побочных подгрупп. Это кажется оправданным с химической и биологической точек зрения, так как зачастую элементы с одинаковыми химическими свойствами являются и конкурентами в выполнении сходных функций. Во всех периодах, наблюдается общая закономерность - уменьшение содержания элемента с увеличением его массы в данном периоде.

1.7 Эволюция Солнечной системы

Вопрос о происхождении Солнечной системы является одним из важнейших в современном естествознании. Его решение осложняется тем, что она представлена в единственном экземпляре. Предположения о существовании тёмных спутников планетных размеров у ближайших звёзд весьма вероятны, но пока не получили окончательного подтверждения. Краткий исторический период существования человека на Земле, по сравнению с галактическим временем не позволяет однозначно решить многие вопросы эволюции Солнца и Солнечной системы.

1.7.1 Солнце

Изучение спектров звезд позволяет определить химический состав их атмосфер. Звезды, как и Солнце (рисунок 9.), состоят из тех же химических элементов, что и все тела на Земле. В звездах преобладают водород (около 70% по весу) и гелий (около 25%); остальные элементы (среди них наиболее обильны кислород, азот, железо, углерод, неон) встречаются почти точно в том же соотношении, что и на Земле. Для наблюдений пока доступны лишь внешние слои звезд. Однако сопоставление данных непосредственных наблюдений с выводами, вытекающими из общих законов физики, позволило построить теорию внутреннего строения звезд и источников звёздной энергии (рисунок 10.).



Рисунок 9 - Солнце

Солнце по всем признакам является рядовой звездой. Имеются все основания предполагать, что многие звезды, как и Солнце, имеют планетные системы и наша планетная система не является исключительным явлением. На планетах, окружающих другие звезды, предполагается существование жизни, вряд ли Земля представляет в этом отношении исключение.

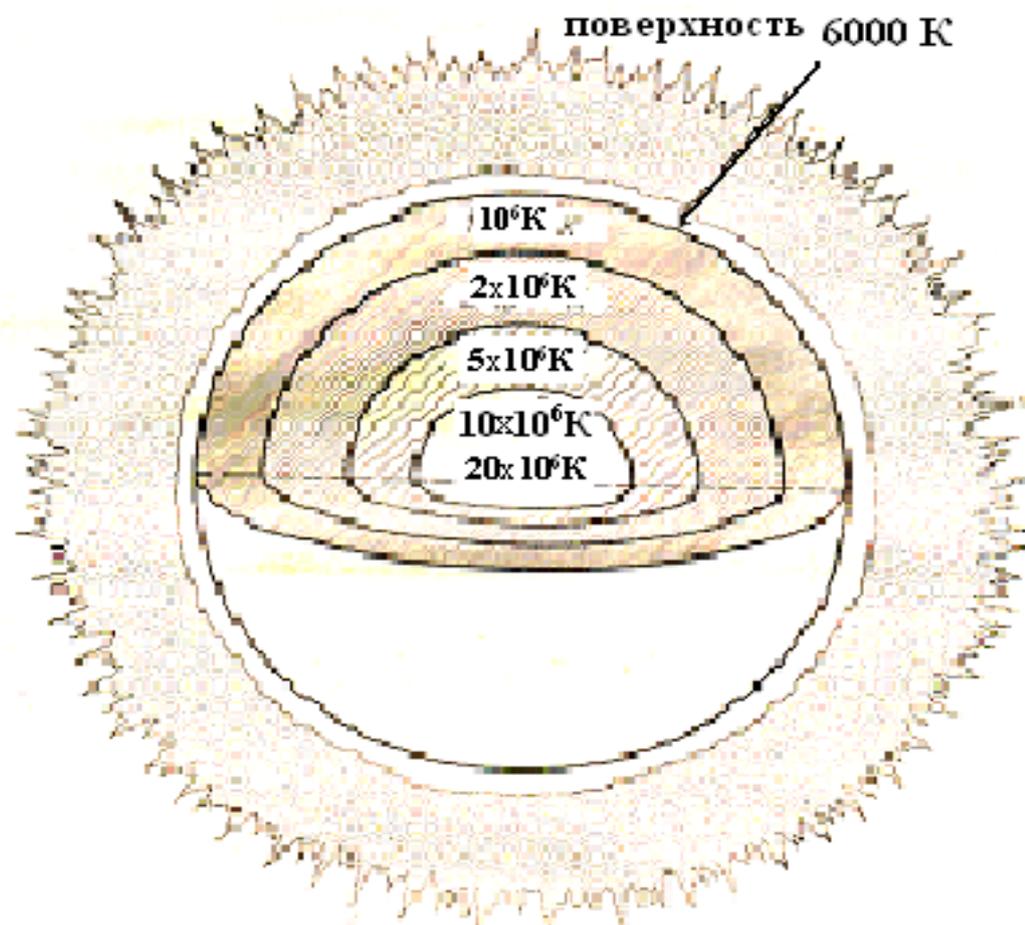


Рисунок 10 - Поперечный разрез Солнца, показывающий распределение температур (по С. Фокс)

Звезды изучаются в двух дополняющих друг друга направлениях. Звёздная астрономия, рассматривающая звезды как объекты, характеризующиеся теми или иными особенностями, исследует движение звезд, распределение их в Галактике и в скоплениях, различные статистические закономерности. Предметом изучения астрофизики являются физические процессы, происходящие в звездах, их излучение, строение, эволюция.

Наиболее распространённые элементы (изотопы) имеют четные по протонам и четные по нейтронам ядра (рисунок 11.). Элементы с чётно-нечётным числом протонов или нейтронов занимают среднее место. Элементы с нечётным числом протонов и нейтронов имеют очень малую распространённость - рисунок 12.

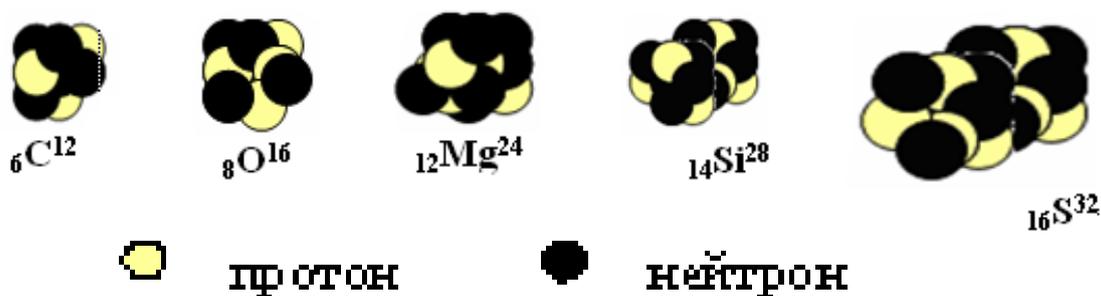


Рисунок 11 - Наиболее распространённые элементы

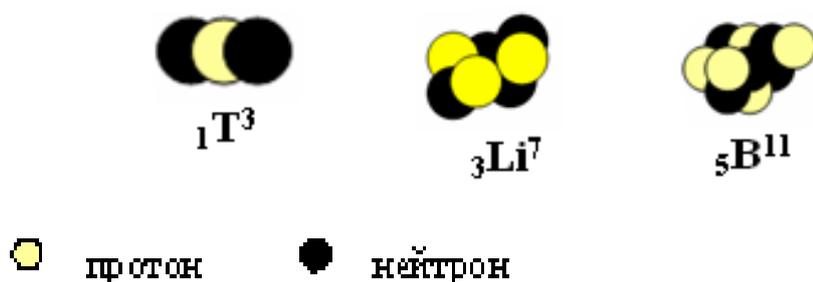


Рисунок 12 - Элементы с низкой распространённостью

Распространённость элементов с четными порядковыми номерами больше соседних с нечетными номерами. Лёгкие элементы Li, Be, B находятся в дефиците, так как «сгорают» в реакциях с протонами. Ядра элементов конца периодической системы неустойчивы из-за избытка нейтронов. Эти элементы претерпевают радиоактивный распад (U, Th, Ra) и спонтанное деление (U, Th, некоторые актиноиды).

Из данных о химическом составе оболочек Земли следует, что Земля имеет метеоритный состав. Метеориты разделяются на каменные (хондриты и более редкие ахондриты), железные (из Fe - Ni сплава) и смешанные. Хондриты потеряли все летучие вещества, кроме тех, которые прочно вошли в соединение с твёрдым веществом метеоритов - H_2O , FeS, C, NH_3 и другие. Их твёрдое вещество по распространённости элементов отвечает солнечному составу; Mg, Si, Fe, O занимают первые места (по числу атомов $\text{Si}/\text{Mg} = 1$), затем S, Al, Ca и др. Силикатная фаза хондритов состоит преимущественно из мета- и ортосиликатов - пироксенов (MgSiO_3) и оливинов [$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$], т. е. является тройной системой MgO, SiO_2 , FeO.

Каменные метеориты - многофазные системы; помимо главных

фаз - силикатной и металлической (сплав Fe - Ni), они имеют ещё сульфидную, хромитную, карбидную, фосфидную фазы. Отношение силикатной и металлической фаз в разных метеоритах варьирует. Многие учёные, исходя из аналогии с метеоритами, считают, что планеты земного типа имеют также силикатную фазу и металлическое ядро, причём отношения между этими фазами у разных планет различны. По этой гипотезе, Земля имеет около 31% металлической фазы, или около 40% Fe (включая окисленное).

На рисунке 13 показана распространённость химических элементов на Солнце и в каменных метеоритах (хондритах); по оси абсцисс — порядковые номера элементов, по оси ординат — число атомов данного элемента на 10^6 атомов Mg.

Так как Солнце располагается в диске нашей Галактики, имеет постоянную скорость вращения, относительно богато металлами и сравнительно молодо (около 5 млрд. лет), его причисляют к звездам населения 1. Поскольку масса Солнца относительно невелика, полагают, что оно может просуществовать в практически неизменном виде еще около 5 млрд. лет.

Относительное обилие металлов и других тяжелых элементов в Солнечной системе имеет непосредственное отношение к проблеме химической эволюции. Для образования значительных количеств углерода и кислорода, обнаруженных на Солнце, необходимы температуры свыше $6 \cdot 10^8$ К, в то же время, установлено, что максимальная температура в центре Солнца составляет величину порядка $20 \cdot 10^6$ К (рисунок 10), и вряд ли достигала значений, близких к указанной выше. Это означает, что большинство тяжелых элементов (а возможно и все), идентифицированных на Солнце и в Солнечной системе, в том числе и на Земле, не могли образоваться на Солнце. Очевидно, Солнце и вся Солнечная система унаследовала эти элементы, предполагается, что их источником было газопылевое облако, образовавшееся из старых звезд в более ранние периоды развития нашей Галактики.

1.7.2 Планетная космогония

При изучении эволюции вещества, образующего в настоящее время планеты, важную роль играют закономерности движения планет - их обращение вокруг Солнца в одном направлении по орбитам, приближающимся к круговым и лежащим почти в одной плоскости, - и деление планет на две группы, отличающиеся по массе

и составу. Группу близких к Солнцу планет земного типа и группу далёких от Солнца планет-гигантов.

В настоящее время является общепризнанным, что большинство планет аккумуляровалось из твёрдого, а Юпитер и Сатурн также и из газового вещества. По-видимому, существовавшее вблизи экваториальной плоскости Солнца газовой-пылевое облако простиралось до современных границ Солнечной системы. Исходя из господствующих представлений об образовании Солнца из сжимающейся и вращающейся туманности, большинство астрономов считает, что протопланетное облако той или иной массы отделилось под действием центробежной силы от этой туманности на заключительной стадии её сжатия.

Но, в отличие от Лапласа, рассматривавшего это отделение чисто механически, сейчас учитываются эффекты, связанные с наличием магнитного поля и корпускулярного излучения Солнца, Именно это позволило объяснить распределение момента количества движения между Солнцем и планетами в рамках гипотез о совместном образовании Солнца и протопланетного облака. Наряду с этими гипотезами высказывались гипотезы о захвате вещества уже сформировавшимся Солнцем.

Если протопланетное облако было первоначально горячим и состояло только из газов, то твёрдые пылинки образовались в ходе его охлаждения. Сначала конденсировались наименее летучие вещества, в том числе силикаты и железо, а затем - всё более и более летучие. Внутренняя зона протопланетного облака прогревалась Солнцем, и там могли образоваться только нелетучие, в основном каменистые пылинки, тогда как в холодной внешней зоне конденсировались также и летучие вещества. Хотя присутствие пыли делало облако непрозрачным, что способствовало очень низкой температуре внешней зоны, наиболее летучие вещества - водород и гелий - не могли конденсироваться даже там.

В космическом (солнечном) веществе летучих веществ много больше, чем нелетучих. Поэтому должно было возникнуть огромное различие не только в составе, но и в общем количестве пылевого вещества во внутренних и внешних зонах. В дальнейшем эти зональные различия привели к различиям в составе и массах планет земной группы и планет-гигантов.

Протекание процесса конденсации (или испарения) пылинок в зоне астероидов пытаются обнаружить путём анализа метеоритов, которые являются обломками астероидов и в некоторых случаях

могут служить образцами до планетного вещества, мало изменившихся при последующих процессах. Некоторые исследователи видят в результатах такого анализа указания на то, что конденсация пылинок и их аккумуляция в крупные тела протекали параллельно. Однако это не удаётся согласовать с результатами теоретических расчётов, указывающими на то, что длительность аккумуляции должна была в сотни или тысячи раз превосходить длительность остывания и конденсации.

Образование планет из протопланетного облака наиболее полно исследовано О. Ю. Шмидтом, согласно которому процесс условно разделен на 2 этапа. На первом этапе, который длился, вероятно, менее 10^6 лет из пылевой компоненты облака образовалось множество «промежуточных» тел размером в сотни километров. На втором этапе длительностью около 10^8 лет из роя «промежуточных» тел и их обломков происходило образование планет. (У наиболее далёких планет - Урана, Нептуна и Плутона, вещество которых было рассеяно по огромным кольцевым зонам, второй этап мог длиться около 10^9 лет.) Самые крупные планеты - Юпитер и Сатурн - на основной стадии аккумуляции вбирали в себя не только твёрдые тела, но и газы.

Протекание аккумуляции планет из роя «промежуточных» тел практически не зависит от механизма их образования. Вначале они двигались по круговым орбитам в плоскости породившего их пылевого слоя, росли, сливаясь друг с другом и вычерпывая окружающее рассеянное вещество - остатки «первичной» пыли и обломки, образовавшиеся, когда «промежуточные» тела сталкивались с большими относительными скоростями. Гравитационное взаимодействие «промежуточных» тел, усиливающееся по мере их роста, постепенно изменяло их орбиты, увеличивая средний эксцентриситет и средний наклон к центральной плоскости. Те из «промежуточных» тел, которые оказались впереди в процессе роста, стали зародышами будущих планет. При объединении многих тел в планеты произошло усреднение индивидуальных свойств движения отдельных объединяющихся тел, и потому орбиты планет получились почти круговыми и компланарными. Анализ процесса аккумуляции планет из роя твёрдых тел позволил объяснить происхождение прямого вращения планет и закона планетных расстояний.

Рост планет земной группы прекратился тогда, когда они вобрали в себя практически всё твёрдое вещество, имевшееся в районе их орбит (только у Марса часть вещества из его «зоны питания», вероятно, была поглощена массивным Юпитером).

Неупругие столкновения тел, происходившие в окрестностях растущих планет, приводили к тому, что часть тел переходила на спутниковые орбиты. В результате вокруг планет возникали рои твёрдых тел и частиц. Из них аккумулировались спутники планет. Луна, вероятно, аккумулировалась из околоземного роя на расстоянии около 10 земных радиусов, а затем отодвинулась на современное расстояние от Земли в результате приливного взаимодействия с Землёй.

У Юпитера и Сатурна из около планетных роев аккумулировались системы спутников, движущихся в направлении вращения планет по круговым орбитам, лежащим в экваториальной плоскости планеты. Эти системы спутников подобны Солнечной системе. Те спутники Юпитера, Сатурна и Нептуна, которые обладают обратным движением, были, вероятно, захвачены из числа «промежуточных» тел. Остатками этих тел и их обломков являются современные астероиды (каменистые тела внутренней зоны) и ядра комет (ледяные тела внешней зоны).

Столкновения астероидов друг с другом ведут к их дроблению. Как показывает изучение метеоритов, структура некоторых из них изменена под действием высокого давления (до сотен килобар), возникающего при столкновениях. Содержание в метеоритах короткоживущих изотопов, возникающих под действием космических лучей, показывает, что дробления, породившие эти метеориты, произошли 10^7 - 10^8 лет назад. Ледяные ядра комет образуют облако вокруг планетной системы, простирающееся до 100-150 тыс. астрономических единиц от Солнца. Там при низкой температуре льды сохраняются неограниченно долго. Под действием звёздных, а потом и планетных возмущений отдельные ядра переходят на меньшие орбиты и превращаются в короткопериодические кометы. Часто приближаясь к Солнцу, они испаряются и разрушаются за несколько десятков или сотен оборотов.

Измерения радиоактивных изотопов и продуктов их распада показывают, что возраст древнейших метеоритов составляют 4,7 млрд. лет. Поскольку астероиды, являющиеся родительными телами метеоритов, быстро аккумулировались в самом начале образования Солнечной системы, этот возраст принимается за возраст всей Солнечной системы. Измерение возраста лунных образцов показывает, что Луна образовалась в ту же эпоху, что и Земля. Излияния тёмных лав, заполнивших впадины лунных «морей», произошли на миллиард лет позже (3,1-3,6 млрд. лет назад).

При аккумуляции планет происходил их разогрев, но у планет земной группы средняя температура поверхности определялась в основном нагревом от Солнца и влиянием парникового эффекта. Из более глубоких слоев тепло выходит медленно. Достаточно было остатка в 3-4%, чтобы нагреть недра Земли и Венеры до 1000-1500 °С, а недра планет-гигантов до десятков тысяч градусов. Начальный разогрев Земли и Луны был связан с выделением гравитационной энергии при их сжатии, и, вероятно, с приливными деформациями этих двух первоначально близких тел. Дальнейшая эволюция их и других планет земной группы определялась в основном накоплением тепла, выделившегося при медленном распаде радиоактивных элементов - урана, тория и других, которые имеются в ничтожно малых количествах во всех горных породах. Разогрев и частичное расплавление недр планет привело к выплавлению коры и выделению газов и паров. У планет малой массы (Меркурий, Марс, Луна) образующиеся газы полностью или в значительной мере рассеялись в пространство, а у более массивных планет в основном сохранились, образовав атмосферу и гидросферу (Земля) либо только атмосферу (Венера).

С помощью космических аппаратов установлены углекислый состав атмосферы Венеры (97% CO_2), высокая температура её поверхности (450 °С) и давление (около 100 ат). Содержание U, Th и K в породах Венеры близко к содержанию этих элементов на Земле.

1.7.3 Лунный грунт

Всюду, где совершали посадки космические аппараты, луна покрыта разнотельным обломочно-пылевым слоем толщиной от нескольких метров до нескольких десятков метров, возникшего в результате дробления, перемешивания и спекания лунных пород при падениях метеоритов и микрометеоритов. Из-за действия солнечного ветра он насыщен нейтральными газами.

Среди обломков реголита (лунного вещества) найдены частицы метеоритного вещества. Радиоизотопным методом было установлено, что некоторые обломки на поверхности луны находились на одном и том же месте десятки и сотни млн. лет. Среди образцов, доставленных на Землю, встречаются породы двух типов: вулканические (лавы) и породы, возникшие за счёт дробления и расплавления лунных образований при падениях метеоритов (стекла и брекчи). Основная масса вулканических пород сходна с земными базальтами, в них встречаются плагиоклазы, пироксены, ильменит, оливин, а также

шпинель, циркон, апатит, металлическое железо, медь и другие. Возможно такими породами сложены все лунные моря.

Кроме того, в лунном грунте встречаются обломки иных пород, сходных с земными норитами, анортозитами, дацитами, и так называемая KREEP - порода, обогащенная калием, редкоземельными элементами и фосфором.

Очевидно, эти породы представляют собой обломки вещества из которых сложены лунные материки. «Луна-20» и «Аполлон-16», совершившие посадки на лунных материках, привезли оттуда породы типа анортозитов. Все типы пород (таблица 17.) образовались в результате длительной эволюции расплавов в недрах Луны. По ряду признаков лунные породы отличаются от земных: в них очень мало воды, мало калия, натрия и других летучих элементов, в некоторых образцах очень много титана и железа, но в целом Луна обеднена сидерофильными элементами. Возраст этих пород, определяемый по соотношениям радиоактивных элементов, равен 3,0-4,5 млрд. лет, что соответствует древнейшим периодам развития Земли.

Таблица 17 - Основные разновидности лунных пород*

Вещество	1	2	3	4	5
SiO ₂	40,5	42,4	44,1	50	61
Al ₂ O ₃	9,7	20,2	35,5	20	12
FeO	19,0	6,4	0,2	7,7	10
TiO ₂	11,4	0,4	-	1,3	1,2
CaO	9,6	18,6	19,7	11	6,3
MgO	8,0	12,2	0,1	8	6
Na ₂ O	0,53	0,40	0,34	0,63	0,69
K ₂ O	0,16	0,52	-	0,53	2,0

*1 – морской базальт («Аполлон-11», среднее по четырем образцам); 2 – габбро-анортозит («Луна-20»); 3 – анортозит («Аполлон-15», №15415); 4 – норит, или «неморской базальт» («Аполлон-14», №14310); 5 – дацит («Аполлон-12», №12013)

На основании исследования лунного вещества, доставленного советскими автоматическими станциями «Луна-16», «Луна-20» и «Луна-24», а также полученного американскими учёными, было установлено, что состав базальтов коры Луны сопоставим с базальтами земной коры. Наряду с базальтами, заливающими впадины лунных морей и имеющими возраст 3800-3200 млн. лет, в области

лунных континентов присутствуют анортозиты (4500 млн. лет), синхронные образованию самой Луны, Земли и метеоритов.

1.8 Геохимия Земли

Земная кора на 82,6% состоит из кислорода, кремния и алюминия, однако эти элементы составляют лишь немного более 3% от общего числа химических элементов, найденных в горных породах (всего 90). Содержание многих элементов в горных породах не превышает тысячных долей процента, некоторые содержатся в еще меньших количествах – до $p \cdot 10^{-16}\%$ (радон). Элементы, среднее содержание которых в земной коре не превышает 0,01 %, в геохимии принято называть редкими (туда попадают и кобальт, и свинец, бром, олово, мышьяк, серебро, золото – которые к редким не относят, а цирконий и ванадий – относят к редким).

Для понимания законов распределения химических веществ в элементах ландшафтов необходимо знание их физических и химических свойств. Главная геохимическая особенность земной коры - необычайно высокий кларк кислорода. Ничего подобного не обнаружено ни на Солнце, ни на других звездах. Объяснение этого явления связано не со строением ядра кислорода, а со способностью этого элемента образовывать очень прочные связи с кремнием, алюминием и некоторыми другими элементами. В свою очередь кремний и алюминий накапливаются в земной коре благодаря их способности образовывать легкоплавкие соединения со щелочами. В итоге была выплавлена и закреплена на поверхности нашей планеты уникальная твердая кремнекислородная оболочка.

Низкие кларки благородных газов объясняются их неспособностью связываться в химические соединения и закрепляться на планете. Поэтому происходит их диссипация - рассеивание в космос из атмосферы Земли. Но содержание одного из благородных газов - аргона систематически пополняется за счет самопроизвольно протекающей реакции превращения радиоактивного изотопа калия (${}_{40}\text{K}$). При этом около 12% этой изотопа превращается в аргон, а около 88% - в кальций.

Изоморфное замещение играет огромную роль в распределении элементов по различным минералам. Использование R_i в геохимии объяснило причину ассоциации таких разнородных элементов, как U, Th и редкоземельных элементов (в минералах ториянит, иттриалит и других), а также постоянную ассоциацию редкоземельных элементов.

При деформации одного иона другим в соединении, имеющем катион малого радиуса и анион большого радиуса, возникает поляризация, которая нарушает физико-химические свойства вещества - твёрдость, летучесть и многие другие. Отношение R_i катиона/ R_i аниона определяет число атомов, окружающих центральный атом в соединении, - его координацию - координационное число. Оно в свою очередь указывает на характер и строение кристаллической решётки.

Координационное число может изменяться в зависимости от условий образования минерала. Кристаллические решётки минералов имеют различную структуру - от очень простых и симметричных построек из плотно упакованных шаров до весьма сложных с низкой степенью симметрии. При кристаллизации атомы и ионы стремятся расположиться в кристаллической решётке таким образом, чтобы была минимальная энергия кристаллической решётки (рис. 14 - 16.) На основе всех этих данных была создана геохимическая классификация элементов, опирающаяся на физико-химические свойства химических элементов (табл. 18.).

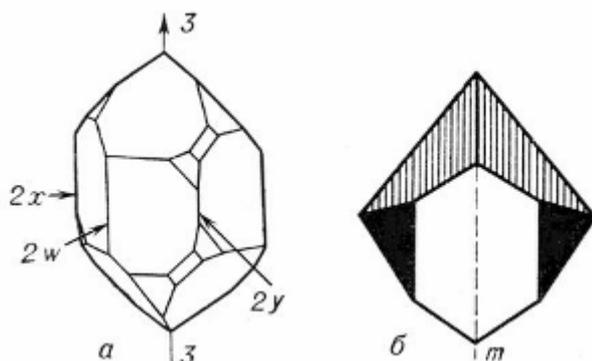


Рисунок 14 - а — кристалл кварца: 3 — ось симметрии 3-го порядка, 2x, 2y, 2w — оси второго порядка; б — кристалл водного метасиликата натрия: m — плоскость симметрии

Элементы в таблице разбиты на три группы:

- сидерофильные элементы (от греч. sideros - железой philéo - люблю), переходные химические элементы, относящихся в основном к VIII группе (3 d - 5 d) периодической системы элементов.

- халькофильные элементы (от греч. chalkós - медь и philéo - люблю), химические элементы сульфидных руд и обладают специфическим сродством к S, Se, Te. Они составляют только 0,046%

массы земной коры, но благодаря способности накапливаться в определённых условиях образуют рудные месторождения, главным образом гидротермальные жильные.

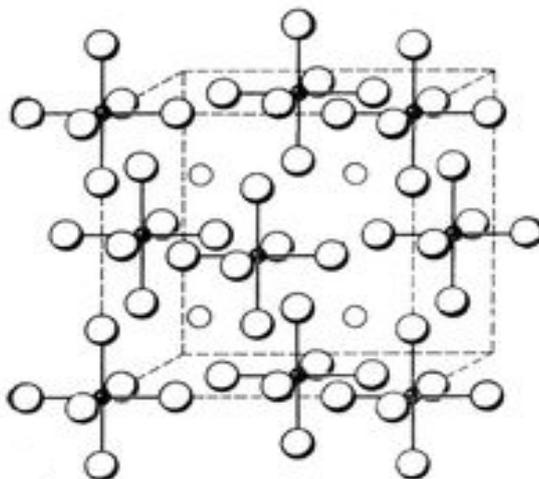


Рисунок 15 - Элементарные ячейки кристалла K_2PtCl_6

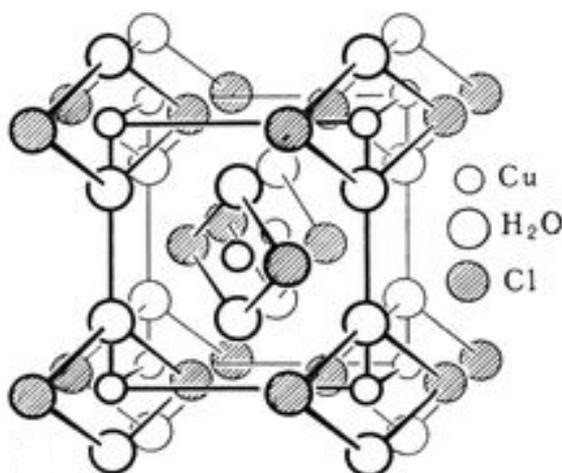


Рисунок 16 - Элементарные ячейки кристалла $CuCl_2 \times 2H_2O$

- литофильные элементы (от лито... и греч. philéo - люблю), химические элементы горных пород. В их число входят 55 элементов периодической системы: O, Si, Al, Ti, B, C, все щелочные и щёлочноземельные металлы, галогены и многие редкие элементы они

слагают около 93% массы всей земной коры и около 97% солевого состава вод океанов - продуктов выветривания горных пород, растворимых в воде.

Таблица 18 - Геохимическая классификация химических элементов

Сидерофильные (железо)	Халькофильные (сульфиды)	Литофильные (силикаты и другие)
Fe, Ni, Co, Ru, Rh, Rd, Os, Ir, Pt, (Mo), Au, Re, (P), (As), (C), (Ge), (Ga), (Sn), (Sb), (Cu)	S, Se, Te, Cu, Zn, Cd, Pb, Sn, Mo, Ge, As, Ga, Sb, Bi, Ag, Hg, In, Tl, (Fe), (Ni), (Co)	H, O, N, Si, Ti, Zr, Hf, F, Cl, Br, I, B, Al, Sc, Y, Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, V, Cr, Mn, W, Th, Nb, Ta, U, Ac, Pa, (S), (P), (Sn), (C), (Ga), (Fe), (Ni), (Co), редкоземельные элементы

С открытием изотопов стала развиваться геохимия изотопов - изучение процессов разделения изотопов химических элементов в природных процессах, особенно лёгких атомов H, C, O, N, S и других. Этим методом часто удаётся установить способ и условия разделения химических элементов и образования конкретных минералов и рудных залежей.

1.8.1 Геохимические процессы

Геохимические процессы разделения элементов на Земле поддерживаются преимущественно теплом, генерируемым радиоактивными элементами (радиогенное тепло) и гравитационной энергией. На поверхности Земли значительную роль играет энергия солнечных лучей, которая, в частности, трансформируется живым веществом в химическую энергию нефтей и углей.

Первичное разделение холодного недифференцированного вещества Земли на оболочки произошло под влиянием тепла адиабатического сжатия планеты и радиогенного тепла. В мантии Земли на различных глубинах, особенно в астеносфере, возникали многочисленные расплавленные очаги. Разделение на оболочки шло путём зонного плавления, которое не требует полного расплавления мантии. Силикатное вещество планеты разделялось на тугоплавкую фазу - ультраосновные породы (перидотиты) верхней мантии, и легкоплавкую фазу - основные породы (базальты) земной коры.

Легкоплавкое вещество проплавило кровлю магматической камеры, а тугоплавкое кристаллизовалось на дне камеры; поэтому легкоплавкое вещество перемещалось вверх к поверхности Земли. При этом метасиликаты разлагались на ортосиликаты и кремнекислоту, обогащенную химическими элементами, понижающими температуру плавления: щелочными элементами, Si, Ca, Al, U, Th, Sr и другими редкими литофильными элементами. Вещества, повышающие температуру плавления (Mg, Fe, Ni, Co, Cr), сохранились по преимуществу в тугоплавкой фазе - остались в мантии Земли. Вместе с зонным плавлением шёл процесс дегазации верхней мантии.

Процессы выплавления и дегазации вещества мантии имеют периодический характер. После того как произошёл вынос тепла и вещества из глубин на поверхность Земли, необходимо время на новое разогревание очага. С таким геохимическим циклом связан весь ритм тектоно - магматической и вулканической деятельности и метаморфических преобразований. Этот процесс шёл также на Луне и, по-видимому, на всех планетах земного типа. Химическая эволюция Земли поддерживается и регулируется непрерывным процессом выплавления и дегазации вещества мантии за счёт энергии радиоактивного распада. Вещество мантии Земли (перидотиты, дуниты и другие ультраосновные породы) имеет химический состав, приближающийся к метеоритному (табл.1 - 16).

Высокие температуры и давления в мантии приводят к полиморфным изменениям минералов, например к образованию стишовита - кварца с плотностью 4350 кг/м^3 (при нормальном давлении и температуре). Благодаря этому вещество мантии разделяется на зоны с разной плотностью. Вещество верхней мантии проникает к поверхности на материках в дунитовых поясах, богатых хромитами, платиноидами, высокотемпературными сульфидами, в океанах - в рифтовых долинах срединноокеанических хребтов.

Над мантией располагается земная кора, которая отделяется от вещества мантии границей Мохоровичича. Выделяют два типа земной коры: материковую (континентальную) и океаническую. Мощность континентальной коры достигает в среднем 35-40 км, а океанической - 6-8 км. Примитивные (толеитовые) базальты океанической коры - более сложная система, чем вещество каменных метеоритов; они состоят по крайней мере из 4 главных компонентов: MgO, SiO₂, FeO, Al₂O₃. В них отношение Si/Mg = 6,5, следовательно они не солнечного состава. Базальты земной коры, лунные породы (с

поверхности лунных «морей») и эвкриты (базальтические каменные метеориты) имеют идентичный состав и одинаковую офитовую структуру. Исключительную роль в силикатных и других системах играют вода и прочие летучие вещества, понижающие точку плавления системы. Наиболее существенное влияние на магматические процессы оказывает вода в состоянии, близком к надкритическому.

В мантии под вулканами методами сейсмологии обнаружены камеры, заполненные жидкой магмой. Излияние базальтов сопровождается выделением водяного пара - около 7% по массе (20% по объёму) от излившегося базальта - и кислых дымов и газов NH (CO₂, HF, HCl, S, SO₂). В высокотемпературной стадии остывания базальта (600-800°C) выделяются главным образом CO₂, HF, HCl. При средних температурах (около 200°C) также и соединения серы. При низких температурах и в поствулканической (фумарольной) стадии выделяются CH₄, H₃BO₃, CO₂ и другие газы, а также минерализованные растворы. Образование CO₂, CO, CH₄ - результат реакции в магме углерода с H₂O при разных температурах и давлениях. Этот процесс сопровождается частичным разделением изотопов углерода - утяжелением углерода (повышением содержания C¹³) в CO₂, алмазах и карбонатах (CaCO₃ кимберлитовых трубок) по сравнению с углеродом других горных пород.

Базальтовая лава при охлаждении подвергается фракционной кристаллизации с образованием различных магматических пород, имеющих общие признаки. В магматической стадии дифференциации возможны ликвация (например, отделение от силикатов высокотемпературных Cu - Ni - Fe сульфидов) и газовый перенос. В ранней стадии фракционной кристаллизации магмы могут образоваться магнетит и титаномagnetит, как следствие окисления в магме Fe²⁺ в Fe³⁺; магнетит не растворяется в силикатном расплаве и увлекает с собой Ti в силу близости ионных радиусов Fe³⁺ (0,65) и Ti⁴⁺ (0,60).

В стадии главной кристаллизации образуются плагиоклазы от Лабрадора до олигоклаза и многие другие алюмосиликаты. По мере остывания происходит накопление в расплаве более легкоплавких и летучих соединений, на известной стадии вступающих в реакцию с ранее выделившимися более высокотемпературными соединениями. В этом отборочном механизме в остаточном расплаве концентрируются ионы, которые не вошли в порообразующие минералы из-за своих больших или очень малых ионных радиусов. С этими остаточными

расплавами связывают происхождение богатых редкими элементами пегматитов и других горных пород.

Кислые горные породы - граниты, гранодиориты и другие - имеют большое распространение в земной коре. Одни из них содержат много Са (около 2,5%) и тяжёлых металлов, мало щелочей и летучих, другие бедны Са (около 0,5%) и тяжёлыми металлами, но богаты щелочами и летучими. Происхождение гранитов большинство учёных связывает с эвтектическим плавлением, с процессом гранитизации (метаморфизм и метасоматоз) осадочных горных пород на различных уровнях земной коры. Повышенное содержание ^{18}O в кварце гранитов отвечает относительно низким температурам образования минерала.

В земной коре материков образуются рудные залежи - месторождения многих химических элементов, прежде всего Fe, Cu, Ni, Co, Pb, Zn, Mo, Ag, Hg, в виде окислов, сульфидов и других химических соединений. Их происхождение связано с гидротермальными растворами, несущими также и газы. Несмотря на известное разнообразие их состава в связи с глубиной, температурой и другими условиями образования, они имеют общие черты, например обычны ассоциации SiO_2 - Au или Pb - Zn - Cu в виде сульфидов или ассоциации SnO_2 - WO_3 - H_3BO_3 - F в гидротермальных и грейзеновых месторождениях.

Гидротермальные образования и грейзены рассматриваются как конечные продукты тектоно-магматического процесса или гранитизации. Источниками рудного вещества гидротерм могут быть как процессы в земной коре, так и процессы под корой. Вопрос о способе переноса тяжёлых металлов вызывает споры. не исключается газовый перенос металлов, например в виде фторидов, причём фтор часто даёт во вмещающих породах большие ореолы рассеяния. неясны равновесия фторидов, хлоридов, металлов с H_2O при разных температурах и давлениях.

О химических и физических условиях рудообразования даёт представление состав газовой-жидких включений в рудных минералах, которые содержат растворы NaCl, MgCl_2 , MgSO_4 , KCl, H_2S , SiO_2 , карбонатов и следы металлов; нередко высокое давление CO_2 до 2000 атм. Эти растворы близки к нейтральным; температура их образования лежит в пределах 50-550 °C. Обыкновенные сульфиды тяжёлых металлов Pb, Zn, Cu, Fe мало растворимы в воде, и изменение давления и температуры почти не меняет их растворимости. Например, чтобы осадить 1 т цинка из раствора ZnS, нужно было бы

испарить около 10 км^3 воды. Маловероятен перенос сульфидов и в виде коллоидных растворов - золей. Существуют, однако, комплексные соединения сульфидов тяжёлых металлов, более растворимые, чем простые сульфиды, например дающие ионы HZnS_2^{2-} или HgS^{2-} .

Большую роль в процессе переноса тяжёлых металлов горячими растворами играет концентрация в них CO_2 и, возможно, других газов: O_2 , H_2S , PH_3 . например, U образует комплексы $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$, легко растворимые в H_2O при определённой концентрации CO_2 . Уменьшение CO_2 в растворе разрушает этот комплекс и вызывает отложение соединений U. Отложение тяжёлых металлов регулируется также парциальным давлением H_2S , которое определяет последовательность отложения металлов в сульфидном теле, парциальным давлением CO_2 , окислительным потенциалом и других факторов. Кристаллизация сульфидов, например Pb, Zn и многих других, распределение в них редких элементов, таких как In, Ga, Ge, Tl происходит по законам изоморфизма. Процесс отложения сульфидов отражается на изотопном отношении $\text{S}^{32}/\text{S}^{34}$ в минералах, что имеет диагностическое значение.

Магматические породы на поверхности Земли разрушаются под влиянием климатических факторов и ряда других агентов: организмов, воды, углекислоты, органических веществ; этот процесс зависит от концентрации ионов водорода и кислорода, ионного потенциала и другие условий. Вещество горных пород при выветривании испытывает сложные превращения. например, полевые шпаты превращаются в каолинит, карбонаты и кварц; Na, Mg, K в виде хлоридов, сульфатов, карбонатов переходят в раствор и уносятся потоками в океан. Вследствие гидратации и карбонатизации общий объём пород увеличивается (рисунок 17.).

В разрушении горных пород участвуют многие химические процессы, как, например, гидролиз алюмосиликатов, который приводит к образованию латерита, свободных водных окисей Al_2O_3 и бокситов, которые обогащены Ti, Nb, Sn, Be. Окисление до более высоких валентностей часто выполняется микроорганизмами, например Fe^{2+} в Fe^{3+} , Mn^{2+} в Mn^{4+} и так далее. Железные осадочные руды обогащаются фосфатами, арсенатами, ванадатами, а марганцевые - Ba, Ra, Co и другими элементами. Известняки, а также доломиты, фосфаты и некоторые другие соли образуются при участии живых организмов и накапливают Sr, Mn, Pb, F, редкоземельные элементы.

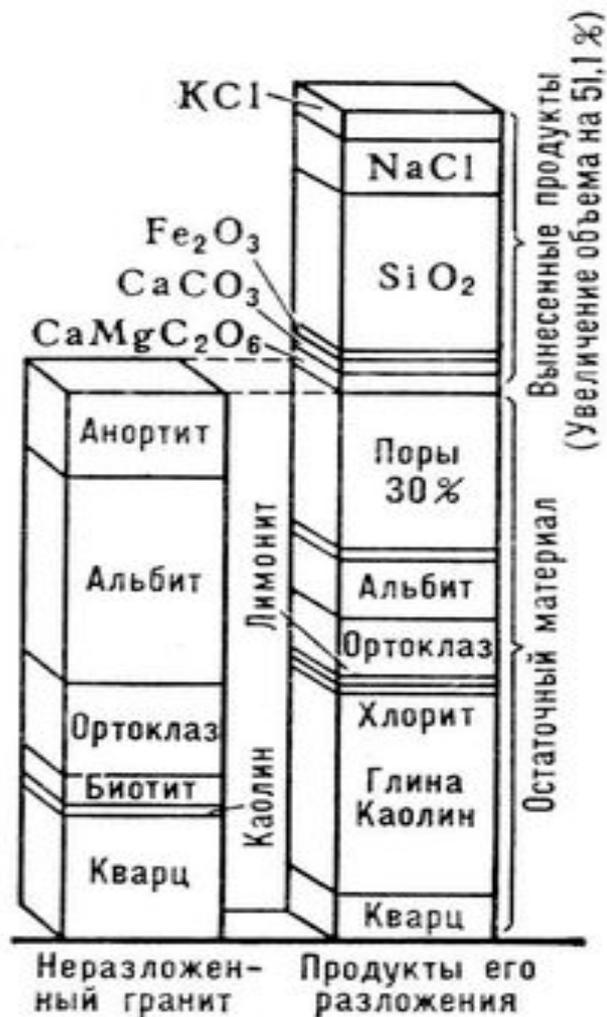


Рисунок 17 - Увеличение объёма породы в зоне выветривания

Соленосные отложения возникают в результате испарения воды в изолированных бассейнах. Последовательность отложения солей, в том числе NaCl, MgSO₄ идёт по законам галогенеза. В этом процессе происходит отделение твёрдых солей от насыщенного раствора - рапы, которая содержит наиболее растворимые соли Na, K, Sr, Li, B, Br. Подобные растворы встречаются и в подземных высокоминерализованных водах.

Органическое вещество суши при захоронении приводит к образованию углей, а органическое вещество донных отложений современных и древних морей (главным образом планктона) - к

образованию нефтей и горючих газов. Изотопный анализ отдельных фракций нефтей на $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ указывает температуру их образования - не выше 200-250°C. Появление углей и нефтей в земной коре изменило миграцию и распределение ряда осадочных элементов. Так, например, U, V, Ge обычно концентрируются в осадочных железных рудах. С появлением углей их соединения стали накапливаться и в углях и в битумах, образуя нередко месторождения этих элементов. Наиболее стойкие минералы - монацит, торит, золото, магнетит, кварц, циркон, рутил, касситерит и другие, при разрушении горных пород накапливаются в прибрежной части морей и океанов и образуют в зонах морского шельфа россыпные месторождения.

Мощность осадочных пород на материках в некоторых местах достигает 20 км, а в среднем превосходит 1 км. Главную массу пород составляют глины и сланцы (около 55%), карбонатные породы (около 25%), пески и песчаники (около 20%).

Все магматические и осадочные горные породы подвергаются в той или иной степени метаморфизму. Разнообразные процессы в твёрдом веществе горных пород идут либо без переноса вещества извне (собственно метаморфизм), либо с выносом и привносом вещества (метасоматоз). Различают щелочной метасоматоз (натриевый или калиевый), магнезиальный, кальциевый, железистый, а также серный (березитизация гранитов), фосфатный, боратный и другие. Глины превращаются в сланцы, известняки в мраморы, на глубине под действием высокой температуры породы могут испытать переплавление. Все превращения, связанные с метаморфизмом, направлены к химическому равновесию, перекристаллизации с уменьшением объёма. Образуются минералы с большей плотностью и породы более или менее однообразного минерального состава, содержащие кварц, полевой шпат, слюды (системы с минимумом свободной энергии). В силу сложности и разнообразия процессов метаморфизма за основу классификации метаморфических пород берутся их минеральные ассоциации (минеральные фации), как показатели условий образования этих пород.

Неравномерность распределения различных химических элементов по регионам обуславливает выделение различных геохимических провинций. Изучение территориального распространения химических элементов в связи с геологией района составляет задачу региональной геохимии, конечной целью которой является составление геохимических карт территории на базе общих геологических данных. Такие карты могут быть положены в основу

мероприятий по профилактике болезней, связанных с недостатком или избытком тех или иных элементов.

1.8.1.1 Преобразование магмы

С момента возникновения магмы и до образования из нее горных пород магматическое вещество изменяется. Так как в химическом составе магмы преобладают кислород, кремний и другие распространенные в земной коре элементы, то при ее отвердевании образуются вполне определенные химические соединения: оксид кремния - кварц, силикаты - калиевые и кальциево-натриевые полевые шпаты, слюды, амфиболы и пироксены, оливины. Различные сочетания этих минералов создают почти все разнообразие магматических горных пород выше в мантии (в пределах астеносферы) на глубине от 100 до 400 км. Через глубокие разломы она внедряется в более высокие участки, где возникают магматические резервуары.

Горные породы, образовавшиеся из магмы, составляют около 90% объема земной коры. Поэтому процессы магматизма играют важную роль в геохимии земной коры. Магма - сложный раствор-расплав силикатного состава. В нем преобладают те же восемь химических элементов, которые слагают земную кору. Вместе с тем состав магмы - отличается от состава горных пород значительным количеством легколетучих соединений - паров воды и различных газов. Эти вещества растворены в магме благодаря очень большому давлению. Они уменьшают вязкость силикатного расплава, придают ему значительную подвижность, повышают растворимость некоторых соединений и увеличивают воздействие магмы на окружающие породы.

Движение магмы к поверхности обусловлено, во-первых, огромным давлением толщ горных пород; во-вторых, с уменьшением давления увеличивается объем магмы за счет выделения растворенных газов. Магматическое вещество, содержащее 9-10% воды, при подъеме с глубины в 40 км. к поверхности увеличивает свой объем примерно в 1000 раз. Резкое увеличение объема начинается с глубины около 5 км от поверхности.

Непосредственное изучение магмы пока еще технически невозможно. Раскаленная масса, изливающаяся из вулканов и доступна изучению - силикатная часть магмы, лишенная паров и газов, называется лавой. Существует предположение, что в

магматическом веществе кремний и кислород присутствуют или в виде молекул SiO_2 , которые преобразуются в ионы при кристаллизации твердого вещества, или в силикатных расплавах сохраняются кремнекислородные тетраэдры, которые связаны в полимерные соединения. Эти соединения обуславливают высокую вязкость расплавов. Чем больше в расплаве кремнезема, тем он более вязок. Ионы с большим радиусом и вода способствуют разрыву связей в полимерных кремнекислородных соединениях и понижают вязкость расплава.

Большое значение имеет последовательность кристаллизации минералов. Вещество магмы не твердеет одновременно. В первую очередь кристаллизуются минералы, устойчивые при высоких температурах. Но они сразу после своего образования начинают реагировать с окружающим расплавом. Дальнейший ход реакций может осуществляться двумя путями.

Первый путь заключается в последовательной кристаллизации изоморфного ряда самых распространенных силикатов - плагиоклазов. Самым высокотемпературным минералом в этом ряду является кальциевый плагиоклаз $\text{Ca} [\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$. Он кристаллизуется при температуре около 1550°C . Остальные представители этого ряда кристаллизуются при более низких температурах, вплоть до 1118°C , когда образуется конечный член ряда - натриевый плагиоклаз альбит $\text{Na} [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$. Возникшие кристаллы кальциевого плагиоклаза по мере остывания магмы реагируют с окружающим расплавом. Если в расплаве имеется необходимое количество кремния и натрия, то кристаллохимическая структура плагиоклаза будет постепенно преобразовываться путем замещения Ca^{2+} и Al^{3+} на Na^+ и Si^{4+} . Этот процесс будет развиваться до тех пор, пока не возникнет плагиоклаз, соответствующий составу исходного расплава.

Иначе идет кристаллизация тяжелых железо-магниевого силикатов. Это происходит путем последовательного возникновения минералов. Вначале образуются высокотемпературные минералы группы оливина, кристаллическая структура которых состоит из разобщенных кремнекислородных тетраэдров, соединенных ионами магния и железа. При более низкой температуре кристаллизуются пироксены, обладающие структурой из одинарных цепочек кремнекислородных тетраэдров, затем - амфиболы со структурой из двойных цепочек, далее - слюды со слоистой структурой. Если в составе магмы наряду с железом и магнием достаточно много кремния, то соединения типа оливина будут неустойчивы, в этих условиях

возникнут другие силикаты, содержащие больше кремнекислородных тетраэдров. Самым последним кристаллизуется чистый оксид кремния - кварц. Он образуется при температуре значительно более низкой, чем силикаты, при 573 °С.

Последовательность магматической кристаллизации установлена Н. Боуэном в виде представленном на рисунке 18. В зависимости от состава магмы и условий кристаллизации образуются различные магматические горные породы. В процессе преобразований происходит разделение химических элементов. Например первые выделившиеся кристаллические структуры активно поглощают из магмы железо и магний, поэтому остаточный расплав все больше обогащается кремнием. В процессе первоначального разделения участвуют не только химические, но и физические процессы - различие в гравитационных, диффузных и других характеристиках образующихся веществ.

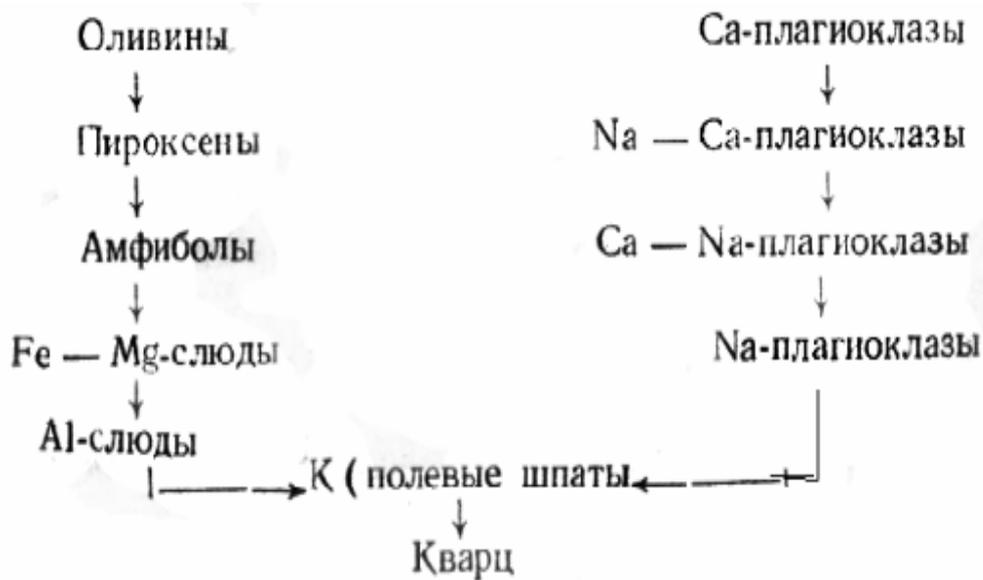


Рисунок 18 - Последовательность магматической кристаллизации (два реакционных ряда, по Н. Боуэн)

1.8.1.2 Гипергенные процессы

Процессы химического и физического преобразования минерального вещества в верхних частях земной коры и на её поверхности под воздействием атмосферы, гидросферы и живых

организмов при низких температурах называются гипергенными, они заключаются в химическом разложении, растворении, гидролизе, гидратации, окислении, карбонатизации и других явлениях.

Хотя изменение горных пород на поверхности обычно называют выветриванием, ветер не имеет к этому существенного отношения. Термин «выветривание» на русском языке стал употребляться в результате неудачного перевода с немецкого. Поэтому А. Е. Ферсман предложил другое название - «гипергенез». Оно основано на древнегреческих корнях «гипер» (сверх) и «генез» (рождение). В настоящее время под выветриванием, или гипергенезом, понимают совокупность процессов преобразования твердого вещества земной коры на поверхности суши под влиянием географических условий. Сущность этих процессов заключается в перегруппировке атомов и образовании новых устойчивых соединений.

В результате гипергенных процессов происходят: образование коры выветривания и зоны окисления месторождений, почвообразование, формирование состава подземных вод, рек, озёр, морей и океана, хемогенное и биогенное осадкообразование, диагенез и ранний эпигенез осадков.

Если для эндогенных процессов главными факторами служат температура и давление, то в гипергенных процессах ведущие факторы - щёлочность или кислотность среды и окислительно-восстановительный потенциал. Широко развиты коллоидно-химические процессы, в частности сорбция, а кроме того - раскристаллизация гелей, переосаждение и явления ионного обмена, большую роль играют биогеохимические процессы.

Важнейшим внешним фактором гипергенных процессов является климат, а закономерностью размещения гипергенных процессов на поверхности Земли - зональность, (зональность почв, коры выветривания, континентальных отложений, грунтовых вод). В результате таких процессов образуются месторождения ценных полезных ископаемых и образование геохимических провинций.

1.8.1.3 Кора выветривания

Один из основных законов природы - стремление к равновесию между строением вещества и окружающей его средой. Прочные системы из атомов, возникшие в определенных условиях, в случае изменения этих условий становятся неустойчивыми. Элементы таких

систем перегруппируются, образуя другие соединения, которые будут находиться в равновесии с новыми условиями.

Например, гранит сложен минералами, возникшими при высоких температурах и давлении. На поверхности суши - иные условия: давление равно одной атмосфере, а температура сравнительно невысокая и непостоянная, поэтому в граните, поднятом из недр на поверхность, начинаются процессы перегруппировки атомов. На месте гранитных массивов с течением времени возникают совершенно непохожие на них мощные скопления белых глин - каолинов, из которых изготавливают фарфор.

Процессы преобразования минералов и горных пород на поверхности не менее сложны, чем те, которые протекают в глубоких недрах земной коры. Правда, они не сопровождаются выделением значительных энергий, протекают за период времени во много раз превышающий продолжительность жизни человека и в связи с этим не сразу привлекают внимание к этому процессу.

Все магматические минералы, попадая в зону выветривания, оказываются в неравновесном состоянии с различной степенью устойчивости. При изучении продуктов выветривания, было установлено, что гипергенное преобразование разных минералов происходит неодинаково. Есть очень устойчивые минералы, которые сохраняются сотни миллионов лет, хотя все другие, содержащиеся с ними в одной горной породе, подверглись глубокому изменению. В то же время имеются очень неустойчивые минералы.

Устойчивость главных минералов, слагающих земную кору, определенным образом связана с их кристаллохимической структурой. Наименее устойчивы силикаты, структуру которых образуют изолированные кремнекислородные тетраэдры, соединенные катионами железа и магния. Более устойчивы силикаты с одинарными цепочками кремнекислородных тетраэдров (пироксены), затем - с двойными цепочками (роговые обманки), далее силикаты с листовыми структурами (слюды). Железо-магниево-слюды (биотиты) - менее устойчивы, чем алюминиевые (мусковиты). Полевые шпаты, обладающие каркасной структурой, имеют неодинаковую устойчивость, зависящую от состава катиона с крупным радиусом. Устойчивость плагиоклазов постепенно возрастает от чисто кальциевого представителя к натриевому. Наиболее устойчив кварц, структура которого полностью состоит из кремнекислородных тетраэдров.

Зависимость устойчивости силикатов от их структуры кажется

очевидной. Причину этого часто объясняют, исходя из энергетических представлений. Любая кристаллохимическая структура характеризуется определенным количеством энергии, которое складывается из значений, внесенных каждым ионом. Эти значения А. Е. Ферсман назвал энергетическими константами (ЭК). Можно сказать, что ЭК - это доля энергии, которую вносит ион, входя в структуру.

С. Голдич обратил внимание на то, что устойчивость порообразующих минералов возрастает в последовательности их кристаллизации. Это объясняется следующим: чем более резко выражено различие между условиями образования и выветривания, тем в большем неравновесии находится минерал. Высоко температурные, кристаллизующиеся первыми силикаты и разрушаются в первую очередь.

Одним из наиболее характерных проявлений преобразования вещества на поверхности суши является его прогрессирующее измельчение. Минералы, слагающие кристаллические горные породы, заметно отличаются изменением объема при нагревании и охлаждении. При нагревании до одной и той же температуры объем полевых шпатов увеличивается в два раза больше, чем у кварца. В результате суточного колебания температур в минералах и породах довольно быстро образуются трещины. Расклинивающее действие пленок воды в тонких трещинах и давление льда в более крупных способствует механическому раздроблению. Горные породы теряют свою монолитность, пронизываются густой сетью трещин, превращаются в россыпи щебня.

Чем сильнее раздроблено, диспергировано вещество, тем больше его удельная поверхность - поверхность, приходящаяся на единицу объема. Для кубика из гранита с ребром 1 см поверхность равна 6 см^2 . Если его разделить на 8 частей, то поверхность составит уже 12 см^2 . Разделив куб на кубики с ребром 1 мм, получим суммарную поверхность, равную 60 см^2 , хотя объем исходного вещества остался без изменений 1 см^3 . Дальнейшее измельчение вызовет еще большее возрастание величины удельной поверхности (рис.19). С возрастанием поверхности усиливается преобразование глубинного кристаллического вещества. При этом изменяются не только физические свойства вещества, но также появляются новые физико-химические свойства, важнейшим из которых является приближение свойств мелкодисперсных веществ к свойствам кристаллов.

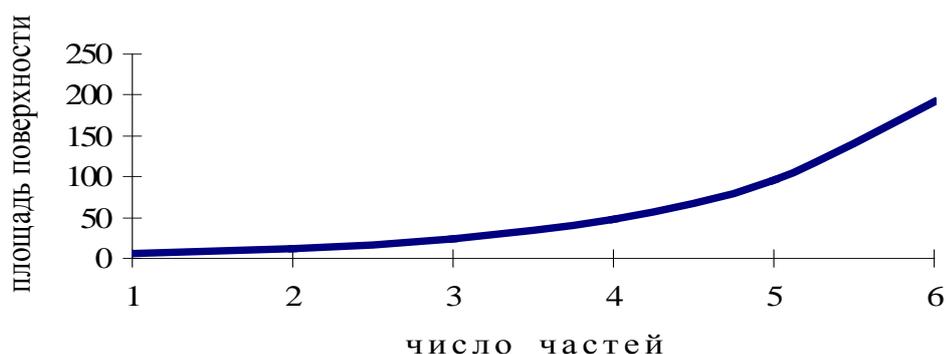


Рисунок 19 - Зависимость площади поверхности от числа частей

Еще недавно предполагалось, что при выветривании кристаллические минералы разрушаются на составные ионы, которые переходят в раствор и вскоре выпадают в виде аморфных сгустков, состоящих из смеси оксидов кремния, алюминия и железа. Иногда даже противопоставляли кристаллическому состоянию, характерному для глубинных частей земной коры, аморфное состояние вещества на поверхности Земли. Однако в результате тщательных рентгеноструктурных анализов было доказано, что глины не аморфное вещество, а очень мелкие частицы, имеющие кристаллическое строение. Глины - это силикаты, образующиеся в зоне гипергенеза. Кристаллохимическая структура глинистых минералов находится в равновесии с условиями, господствующими в этой зоне. Поэтому на поверхности суши глины более устойчивы, чем гранит.

Необычность реакции выветривания силикатов сразу обращает на себя внимание тем, что новый минерал не просто выпадает в осадок, он замещает исходный, глубинный силикат, полностью

повторяя его форму. Если посмотреть на гранит, который миллионы лет подвергался выветриванию, то видно, что строение породы сохранилось до мельчайших деталей. Видны очертания кристаллов полевого шпата, слюды и некоторых других бывших минералов, которые преобразованы в мельчайшие чешуйки глины. Следовательно, реакции гипергенного преобразования идут при строгом сохранении объема и формы исходных минералов

Основными элементами кристаллохимической структуры глинистых минералов являются листы кремнекислородных тетраэдров, которые прочно связаны с ионами алюминия и гидроксид ионами в виде двух- или трехслойных пакетов. Наличие листов кремнекислородных тетраэдров характерно и для глинистых минералов, и для слюд, но строение пакетов и тип межпакетной связи у них резко различаются.

В структуре каолинита чередуются плоские двухслойные пакеты. Верхний слой состоит из кремнекислородных тетраэдров, нижний - из сочетания ионов алюминия и гидроксид - ионов. Каждый ион алюминия находится в связи с четырьмя гидроксид - ионами и двумя ионами кислорода. Формула каолинита $Al_4(OH)_8[Si_4O_{10}]$.

В другом распространенном глинистом минерале - монтмориллоните плоские пакеты трехслойны. Верхний и нижний слои представлены листами кремнекислородных тетраэдров, между которыми располагаются ионы алюминия (и магния) и гидроксид ионы. Формула минерала $(Al_2, Mg_3)(OH)_2[Si_4O_{10}] \cdot nH_2O$. Особенностью структуры монтмориллонита является очень слабая связь между пакетами. В межпакетное пространство могут входить молекулы воды и раздвигать пакеты. С этим связано сильное набухание монтмориллонитовых глин.

Кристаллохимическое строение гипергенных и глубинных силикатов принципиально различается. В структурах глубинных силикатов по всем трем измерениям объема развиты электростатические (ионные, ионно-ковалентные) связи. В глинистых минералах электростатические силы имеются только в пределах плоского пакета, а связь между пакетами осуществляется межмолекулярными силами.

1.8.2 Классификация минералов

Все минералы можно разделить на породообразующие и редкие (акцессорные). В природных условиях они встречаются в больших

количествах, слагая многие горные породы (к ним относятся не более 100 минералов). Редкие минералы, хотя и содержатся почти в каждой породе, но, как правило, представлены в них незначительным количеством – не более 1%. Ниже представлена классификация предложенная С.Д.Четвериковым:

- Класс I - силикаты
- Класс II - карбонаты
- Класс III – окислы
- Класс IV - гидроокислы
- Класс V - сульфиды
- Класс VI - сульфаты
- Класс VII - галоиды
- Класс VIII - фосфаты
- Класс IX - вольфраматы
- Класс X - самородные элементы

1.8.2.1 Класс I - силикаты

Силикаты – наиболее многочисленный класс, включающий до 800 минералов. По весу они составляют около 75% земной коры. В химическом отношении это сложные соединения, в состав которых входят *Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, O, H* и др.

Силикаты – наиболее сложный тип химических соединений и характеризуется в основном ионными кристаллическими решетками. Основным элементом кристаллической решетки силикатов *кремнекислородный тетраэдр - SiO_4^{4-}* (рис.20). Ион кремния Si^{4+} располагается в центре тетраэдра и окружен четырьмя ионами кислорода O^{2-} , расположенными в вершинах тетраэдра.

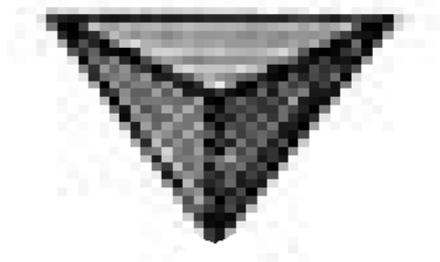


Рисунок 20 - Основной элемент силикатов - кремнекислородный тетраэдр

Каждый кремнекислородный тетраэдр за счет четырех свободных валентных связей может присоединить к себе ионы других элементов, скрепляя все соединение в прочную кристаллическую решетку. В кристаллической решетке алюмосиликатов особую роль играет Al^{3+} , как бы частично заменяющий ион кремния внутри тетраэдра. Кремнекислородные тетраэдры различным образом сочетаются, и в кристаллической решетке силикатов получаются различные типы структур:

- островные (изолированные или кольцевые);
- цепные, ленточные (или поясные);
- листоватые (или слоистые);
- каркасные.

Эти структуры – основа кристаллохимической классификации силикатов.

При *островной структуре* кремнекислородные тетраэдры располагаются изолированно. Их соединение друг с другом происходит через положительно заряженные ионы других металлов (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} и др.) и свободные отрицательные валентности самих тетраэдров (ортосиликаты). Пример силиката с такой структурой оливин - $(Mg, Fe)_2SiO_4$. Другой тип соединения тетраэдров – их объединение через общий кислород. При этом, если эти объединения состоят из 2-х тетраэдров, то возникает островная структура, состоящая из изолированных кольцевых групп $(Si_2O_7)^{6-}$ (диортосиликаты). Примером могут служить - эпидот $Al(SiO_4)_3, (Al, Fe)_2, CaOH$ и мелилит $(Ca, Mg, Fe)_3, (Al, Fe)_2Si_2O_{10}$. Если же соединения состоят из 3,4 или 6 тетраэдров, замкнутых в кольца, то возникают уже структуры в виде *кольцевых структур* $(Si_3O_9)^{6-}$, $(Si_4O_{12})^{8-}$ и $(Si_6O_{18})^{12-}$, соединенных друг с другом положительно заряженными ионами других металлов. Пример минерала с кольцевой структурой – берилл $Be_3Al_2(Si_6O_{18})$ отдельные кольца которого соединены через бериллий и алюминий (рисунок 21). Все рассмотренные выше объединения (структуры) состоят из конечного числа тетраэдров (один, два, три и т.д.).

Другая группа цепных структур представляет собой бесконечное сочетание тетраэдров. Простейший тип такого объединения – цепочка кремнекислородных тетраэдров с простыми звеньями $(Si_2O_6)^{6-}$. Тетраэдры связаны одной вершиной с другой в виде бесконечного ряда. Соединение цепочек друг с другом осуществляется также через положительные ионы других металлов.

Такую цепную структуру имеют пироксены, (рисунок 22.) например авгит $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Fe})[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$.

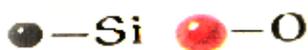


Рисунок 21 - $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$ -шесть кремнекислородных тетраэдров, соединенных в кольцо в структуре берилла

Дальнейшее усложнение структур происходит путем соединения одной цепочки с другой. Такие сдвоенные цепочки, также соединены через общие кислороды тетраэдров, образуют бесконечные ленточные или поясные структуры со звеном $(\text{Si}_4\text{O}_8)^{6-}$. Такую структуру имеют амфиболы, например, группа роговой обманки (представляет собой изоморфную смесь актинолитовых молекул $(\text{Ca}, \text{Mg})_2, \text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ и $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$).

Соединение тетраэдров, расположенных в одной плоскости через три общих кислорода, приводит к образованию бесконечного слоя, или листа. Такая листоватая структура в своей основе имеет звено $(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{4-}$ и характерна для разнообразных пластинчатых минералов, в т.ч. для талька $\text{Mg}_3[(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2]$, каолинита $\text{Al}_4[(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8]$, слюд и т.д. (рисунок 23).

Наиболее сложный тип структур в силикатах – бесконечные трехмерные решетки или *каркасные структуры*. Этот непрерывный каркас состоит из связанных между собой тетраэдров через кислороды всех своих четырех вершин. Здесь нет свободных валентностей и

присоединение других ионов невозможно. Некоторая часть ионов кремния может быть замещена ионами алюминия, и тогда равновесие в структуре достигается с другими металлическими катионами. Основное звено каркасных структур $[(Si, Al)_4O_8]^{4-}$, примером служат полевые шпаты, например альбит $Na[AlSi_3O_8]^{4-}$.

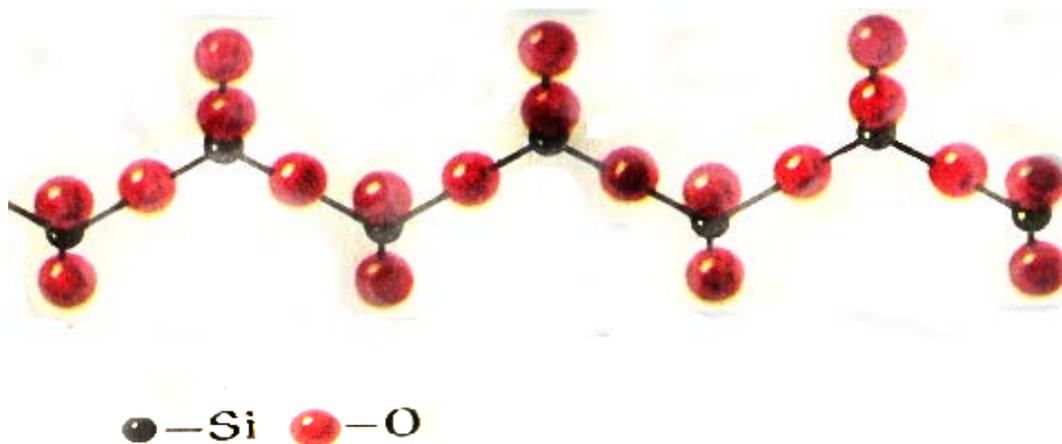


Рисунок 22 - $[SiO_3]^{2-}$ - непрерывные обычные цепочки пироксенов

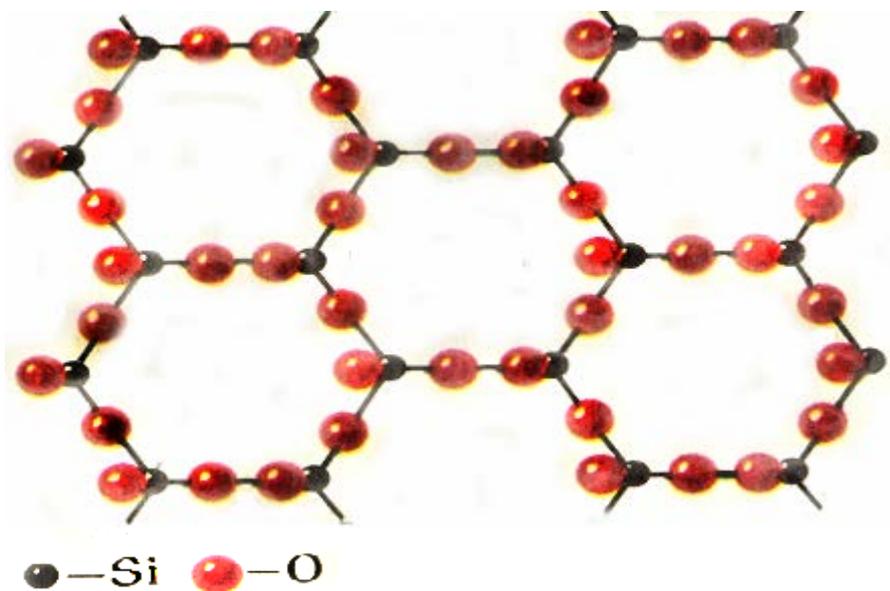


Рисунок 23 - $[Si_2O_5]^{2-}$ - плоский лист, образованный кремнекислородными тетраэдрами в структуре слюд

Минералы класса силикатов по внутреннему строению разделяются на следующие группы:

Каркасные силикаты:

полевые шпаты;

фельдшпатыды.

Цепные силикаты:

пироксены.

Ленточные силикаты:

амфиболы.

Листоватые силикаты:

слюда;

тальк;

хлориты;

глинистые.

Островные силикаты:

оливин.

1.8.2.2 Класс II - карбонаты

Карбонаты - группа широко распространённых минералов солей угольной кислоты H_2CO_3 . В соединении с литофильными (Na, Ca, Mg, Sr, Ba, Th), а также халькофильными (Zn, Cu, Pb, Bi) элементами образуют более 80 природных соединений (минералов). В состав карбоната входят один или два главных катиона с добавочными анионами или без них. Основой их структуры является плоский треугольник $[CO_3]^{2-}$, у которого углерод находится в тройной координации по отношению к атомам кислорода. Группы $[CO_3]^{2-}$ изолированы и соединяются через катионы или дополнительные анионы $(OH)^-$, F^- , Cl^- .

Структура карбонатов слоистая вследствие листового расположения группы $[CO_3]^{2-}$ (тип кальцита, рисунок 24) или цепочечная [тип бастнезита $Ca(CO_3)F$], когда группа $[CO_3]^{2-}$ располагается по оси. Плоские группы $[CO_3]^{2-}$ ориентированы либо в виде параллельных слоев и цепочек, либо по иной симметрии. Большинство карбонатов кристаллизуется в ромбической, моноклинной и гексагональной (тригональной) системах. Они характеризуются твёрдостью от 3 до 5 по минералогической шкале,

повышенной растворимостью в воде (особенно водные карбонаты щелочных металлов), лёгкой растворимостью в соляной кислоте, высоким двойным лучепреломлением, диссоциацией при нагревании. Цвет карбонатных минералов зависит от присутствия ионов-хромофоров. Карбонаты меди — зелёные и синие, урана — жёлтые, железа и редких земель — коричневые, кобальта и марганца — розовые, остальные бесцветны или слабо окрашены.

Минералы карбонатов образуются в разнообразных условиях: в осадочно-морских (в морских отложениях карбонаты кальция слагают огромные толщи известняков частью биогенного происхождения и доломитов), в гидротермальных рудных месторождениях (кальцит, сидерит, анкерит), в коре выветривания (магнезит), в метасоматических образованиях (магнезит, сидерит), в зоне окисления полиметаллических месторождений (малахит, азурит, смитсонит, церуссит). Магматогенным путём возникают карбонатиты, с которыми связаны месторождения апатита и редких земель. Многие из них (например, смитсонит, малахит, церуссит, стронцианит, сидерит и др.) используются как руда на Zn, Pb, Bi, Ba, Sr, Cu, Fe, Mn, редкие земли и др. металлы, как сырьё для цементной и химической промышленности (например, доломит, магнезит) и как строительный материал (известняк, мрамор).

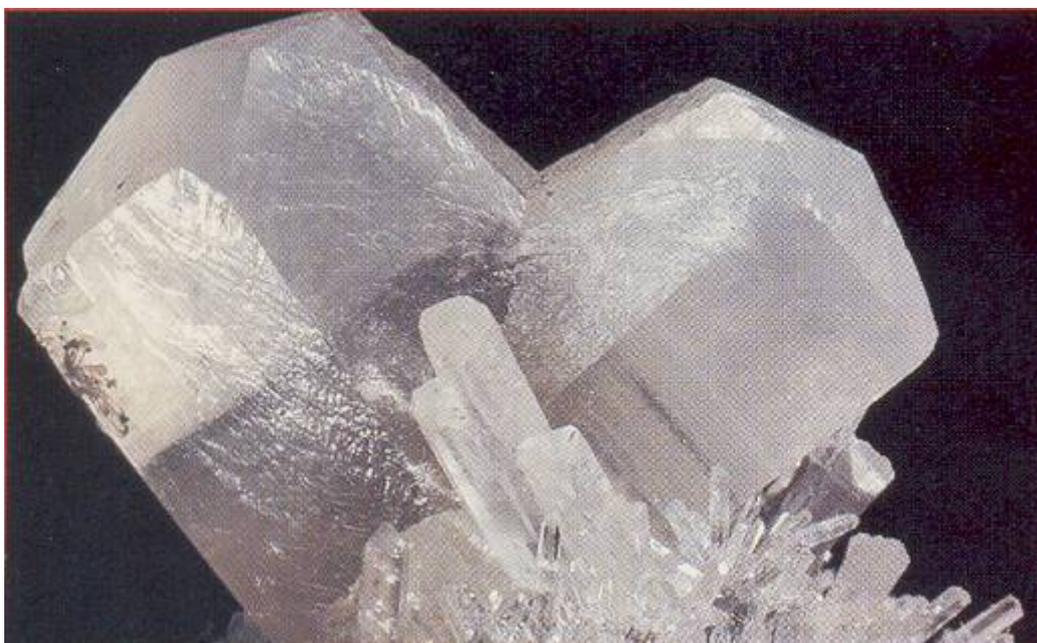


Рисунок 24 - Кальцит. Формула CaCO_3

1.8.2.3 Класс III - Окислы

Окислы - группа минералов, представляющих собой природные химические соединения элементов с кислородом или гидроксильной группой (гидроокислы или гидроксиды), а также с O и OH вместе (оксигидраты). В качестве катионов в их составе участвует до 40 элементов; главные из них относятся к группе литофильных (Si, Ti, Nb, Ta, Mn, Al, Mg, Sn, Zr и др.), однако известны многие минералы халькофильных и сидерофильных элементов. В этом классе выделяют простые окислы (например, минералы кремнезёма, куприт CuO_2 , корунд AlO_3 , гематит Fe_2O_3 , касситерит SnO_2); сложные окислы, смешанные окислы, кристаллические структуры которых состоят из одного или двух атомов металла с различной степенью окисления и кислорода (например, магнетит, ильменит $\text{Fe}^{2+}\text{Ti}^{4+}\text{O}_3$ и др.); своеобразную группу представляют соединения с Nb, Ta, Ti [напр., колумбит $(\text{Fe}, \text{Mn})^{2+}(\text{Ta}, \text{Nb})_2^{5+}\text{O}_6$, браннерит, перовскит CaTiO_3]; гидроокислы [например, брусит $\text{Mg}(\text{OH})_2$, гиббсит $\text{Al}(\text{OH})_3$]; оксигидраты — более сложные соединения с гидроксильной группой и кислородом (например, бёмит $\text{AlO}(\text{OH})$; иногда в их кристаллической структуре водород образует протон H^+ с координационным числом 2, располагающийся обычно между двумя кислородами (например, в гётите FeOOH , диаспоре AlOOH).

В некоторых минералах этого класса в виде твёрдого раствора присутствует молекулярная вода (например, гидрогётит $\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Кристаллические структуры многих окислов являются координационными (типа корунда, NaCl , флюорита и др.), цепочечными (типа рутила и др.), каркасными (типа кварца, анатаза и др.).

Условия их образования связаны главным образом с процессами гипергенеза и литогенеза на поверхности суши и в прибрежных мелководных зонах. Характерная геохимическая обстановка - богатая водой и кислородом среда с высоким окислительным потенциалом. В результате метаморфизма горных пород гидроокислы переходят в простые или сложные окислы (например, бурые железняки в гематит и магнетит, диаспор - бёмит в корунд). При застывании магмы и кристаллизации минералов из остаточных расплавов и растворов в пегматитах, гидротермальных жилах и др. также образуется ряд

простых или сложных природных окислов (например, хромиты, магнетиты, ильмениты, касситерит, уранинит, колумбит).

1.8.2.4 Класс IV - гидроокислы

Гидроокислы - обширная группа минералов, представляющих собой устойчивые на поверхности Земли соединения металлов (Al, Mn, Fe, Mg, U, W, V и др.) с гидроксилем $(\text{OH})^{1-}$ или OH^{1-} и кислородом (так называемые оксигидраты). Кислородно-водородные группировки в их составе кроме гидроксила $(\text{OH})^{1-}$, часто представлены и H_2O , входящей в них в виде твёрдого раствора или воды кристаллогидратного типа. В большинстве гидроокислов катионы кристаллохимически связаны с анионами O^{2-} и $(\text{OH})^{1-}$ по симметрии октаэдра. Последние, связываясь между собой, образуют слоистые, цепочечные, реже каркасные мотивы кристаллических структур. По химическому составу минералы этого класса подразделяются на простые [гётит, FeOOH , гидраргиллит $\text{Al}(\text{OH})_3$ и др.] и сложные (например, беккерелит $\text{Ca} [(\text{UO}_2)_6\text{O}_4(\text{OH})_6]8\text{H}_2\text{O}$ и др.). При нагревании они теряют воду ступенчато, превращаясь в стойкие, часто высокоогнеупорные простые окислы (Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 , MnO_2 и др.).

В минеральных кислотах обычно растворимы, за исключением гидроокислов Mn, Al, Fe. Имеют стеклянный, жирный или полуметаллический блеск. Большинство из них прозрачно или просвечивают в тонких осколках. Цвет зависит от хромофорных свойств атомов, входящих в состав, например Mn^{3+} , Mn^{4+} — чёрные; Fe^{3+} — красно-бурые; U^{6+} — жёлтые. Твёрдость по минералогической шкале различна: от 2,5 (брусит, гидроокислы урана и др.) до 7,2 (диаспор, псиломелан). Плотность зависит от атомной массы катиона, наличия молекул воды, структурной упаковки атомов в кристаллической решётке и колеблется от 2400 до 7300 кг/м^3 .

Наиболее распространены минералы: диаспор, гётит, манганит, псиломелан, бёмит, лепидокрокит, гидротунгстит, гетерогенит, гиббсит, брусит и беккерелит. Гидроксиды образуются при процессах гипергенеза за счёт гидрохимического разрушения и переотложения вещества первичных минералов горных пород и руд на поверхности Земли, часто с участием живых организмов и входят в качестве важнейшей составной части в почвы, минеральные образования коры выветривания, зоны окисления месторождений, в состав осадков морей, континентальных озёр, текучих вод и т.п. Многие из них

образуют крупные промышленные месторождения полезных ископаемых (например, бокситов, бурых железняков, окисных и гидроокисных марганцевых руд, урановых и ванадиевых руд).

1.8.2.5 Класс V - сульфиды

Сульфиды - природные минеральные образования, состоящие из сернистых соединений металлов (сульфидов); к ним относятся также селенистые, теллуристые, мышьяковистые и сурьмянистые соединения металлов. Это — важный источник для получения Ni, Co, Cu, Zn, Pb, Mo, Bi, Sb и Hg. В состав руд, кроме сульфидов, входят др. минералы, в том числе и не содержащие металлы (кварц, кальцит, иногда барит, слюдистые минералы и др.). В зависимости от соотношения сульфидов и других минералов выделяют сплошные, или массивные, с преобладанием сульфидов, и прожилковые, или вкрапленные, с преобладанием несulfидных минералов.

Сульфидные руды могут быть простыми, или монометаллическими, и комплексными, или полиметаллическими. Особенно распространены полиметаллические руды, в состав которых входят сульфиды меди, цинка и свинца, а также комплексные медные руды, никелевые руды, кобальтовые руды, сурьмяные руды и ртутные руды. Во многих из них в качестве примесей присутствуют Pt, Au, Ag, Cd, In, Se, Te. Большинство месторождений сульфидных руд относится к эндогенным месторождениям с преобладанием среди них гидротермальных месторождений. Рудные тела чаще всего представлены жилами, а также пластами, линзами, штоками и трубообразными залежами. Такие тела протягиваются в длину и на глубину на сотни *м* — несколько *км*. Запасы руд в них достигают сотен млн. и даже млрд. *т*, а запасы металлов — десятков, сотен тысяч и даже нескольких млн. *т*, при содержании металлов в руде от десятых долей до нескольких десятков процента.

1.8.2.6 Класс VI - сульфаты

Сульфаты - это класс минералов, представляющих собой природные соли серной кислоты. Он содержит около 150 минеральных видов; однако число устойчивых и широко распространённых сульфатов в земной коре сравнительно невелико (ангидрит, барит, гипс, целестин, алуниит, мирабилит, квасцы и др.).

Химически они представляют собой или простые безводные соли, либо большей частью простые или двойные соли с кристаллизационной водой или с добавочными анионами (обобщённые формулы для которых имеют вид: $A_m [SO_4]_p Z_q \cdot xH_2O$ и $A_m B_n [SO_4]_p Z_q \cdot xH_2O$, где А и В - катионы, а Z - добавочные анионы ($[OH]^-$, Cl^- , $[CO_3]^{2-}$ и др.).

Важнейшие видообразующие катионы в сульфатах: Fe (особенно Fe^{3+}), Na^+ , K^+ , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Pb^{2+} , Ba^{2+} . Основная кристаллохимическая структурная единица - тетраэдр $[SO_4]$, в котором сера находится в центре. Анионы $[SO_4]^{2-}$ всегда отделены др. катионами и анионами, поэтому среди сульфатов резко доминируют островные структуры. Возникновение цепных или слоистых структур обусловлено либо наличием водородных или гидроксильных связей, либо сочетанием их с прочными комплексами (UO_6 и др.). Большинство С. н. обладает низкой симметрией (ромбические, моноклинные, реже триклинные). Кристаллы, как правило, имеют изометрический габитус. Цвет обусловлен ионами-хромофорами, минеральными включениями и наличием дефектов. Плотность от 1490 до 6920 кг/м^3 . Для них характерны низкая твёрдость (2-3,5 по минералогической шкале), повышенная растворимость в воде (особенно сульфаты одновалентных катионов).

Почти все природные сульфаты образуются в зоне гипергенеза и при седиментогенезе в крупных водных бассейнах. В гидротермальных месторождениях они представлены баритом, реже встречаются другие безводные сульфаты — ангидрит, целестин и англезит. Многие из них - гипс, брошантит, ярозит, купоросы образуются в зоне окисления сульфидных месторождений, при сольфатарной деятельности вулканов (например, алунит); некоторые редкие минералы сульфатов (например, халькокианит) возникают в результате фумарольной деятельности.

1.8.2.7 Класс VII - галоиды

Минералы этого класса представляют собой соли хлористоводородной и других галоидоводородных кислот. В составе солей преобладают химические элементы I и II групп таблицы Д.И.Менделеева, но встречаются минералы и с другими металлами. Широкое распространение имеют лишь отдельные хлориды и фториды. Большая часть галоидных минералов встречается редко.

Кристаллохимическая структура этих минералов основана на

ионной связи. Ионы в этих структурах очень слабо поляризованы. Среди минералов важное значение имеет галит (от греч. *Hals* - соль) - NaCl . Сингония кубическая. В кристаллохимической структуре минерала шесть катионов натрия окружают анион хлора. Кристаллы галита встречаются довольно часто, они имеют кубический облик. Однако чаще минерал образует рыхлые зернистые скопления или плотные массивные пласты (каменная соль). Абсолютно чистый минерал бесцветен, но благодаря различным примесям может иметь серый, красноватый или даже бурый цвет. Твердость - 2, спайность совершенная. Легко растворяется в воде.

Галит используется как пищевой продукт, сырье для химической промышленности (изготовление соляной кислоты, хлорной извести и других соединений).

Сильвин - KCl . Сингония кубическая. Кристаллохимическая структура аналогична структуре галита. Обычно встречается в виде зернистых масс, но иногда обнаруживаются кубические кристаллы. Цвет часто красный, что обусловлено примесью тонкодиспергированного гематита. Твердость - 1,5-2, спайность совершенная по кубу. Легко растворяется в воде. От галита отличается горьким вкусом.

Сильвин - важный вид минерального сырья, так как он является исходным продуктом для получения калийных удобрений и различных химических препаратов. Основная масса калия используется в сельском хозяйстве, меньшая - в химической, легкой и медицинской промышленности, в стекольном производстве.

Карналлит - $\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Сингония ромбическая. Образует землистые массы. Твердость - 2-3, спайность отсутствует. Цвет часто красный благодаря примесям гидроксида железа, из-за чего этот минерал иногда ошибочно принимают за сильвин.

Флюорит (плавиковый шпат) - CaF_2 . Сингония кубическая. В кристаллохимической структуре катион окружен восемью анионами фтора, а каждый анион фтора — четырьмя катионами кальция. Часто встречаются хорошо образованные кристаллы кубического или октаэдрического облика и зернистые массы. Кристаллы флюорита прозрачны и обычно окрашены в желтые, зеленые, голубые, фиолетовые тона. Интенсивная фиолетовая окраска возникает под воздействием радиоактивных излучений. Твердость - 4. Минерал хрупок и обладает совершенной спайностью. При облучении флюорит испускает световые лучи, светится фиолетовым, синим и зеленоватым цветом. Это явление, обнаруженное впервые на данном минерале,

получило название флюоресценции. Минерал начинает светиться также при нагревании (термолюминесценция). Характерная особенность флюорита - наличие изоморфных примесей редкоземельных элементов и иттрия благодаря близким размерам ионных радиусов этих химических элементов, с одной стороны, и кальция — с другой. В случае замещения значительной части кальция образуются редкоземельные минералы (иттрофлюорит, флюоцерит и др.).

Флюорит используется преимущественно в металлургии для получения легкоплавких шлаков, а также в химической промышленности для изготовления фтористых соединений, в частности плавиковой кислоты. Крупные бесцветные кристаллы флюорита (так называемый оптический флюорит) применяются для изготовления линз в оптических приборах.

1.8.2.8 Класс VIII - фосфаты

Фосфаты в природе представлены двумя основными группами природных образований - фосфоритами и апатитами, гораздо реже – алюмо- и железофосфатами, а также гуано. Главные их компоненты – фосфатные минералы группы апатита; наиболее распространённые из них - фторапатит (в эндогенных апатитовых месторождениях), фторкарбонатапатит и его модификации – франколит и курскит (в экзогенных фосфоритовых месторождениях); существенную роль иногда играет гидроксилапатит.

К фосфатным рудам - минеральным образования, содержащим фосфор в таких концентрациях и соединениях, при которых технически возможно и экономически целесообразно их перерабатывать с получением фосфорсодержащих продуктов (минеральных удобрений, кормовых фосфатов, фосфорных солей) для различных отраслей промышленности. Основной полезный компонент в них – фосфор (в виде фосфорного ангидрида – P_2O_5); содержание P_2O_5 в рудах изменяется в широких пределах от 2–6 до 25–34%; оно зависит также от технологических свойств, горно-геологических условий добычи и др. факторов.

В их состав кроме фосфатных, входят другие минералы, представляющие собой иногда попутные полезные компоненты (например, нефелин, сфен, титаномагнетит, магнетит, эгирин, в виде изоморфных примесей также стронций, редкоземельные и редкие элементы) или вредные примеси (доломит, кальцит, кварц, халцедон,

глауконит, глинистые минералы, пирит, гидроокислы железа).

Месторождения природных фосфатов по происхождению разделяют на эндогенные и экзогенные. Среди эндогенных месторождений выделяются: магматические (позднемагматические), представленные пласто- и линзообразными залежами комплексных апатитовых руд, связанных с нефелиновыми сиенитами. Среди экзогенных месторождений выделяются: осадочные – химические и биохимические осадки древних шельфов, представленные фосфоритами, образующими пластовые залежи среди карбонатно-кремнистых, терригенно-глауконитовых и др., месторождения выветривания остаточного и инфильтрационного генезиса, образующиеся при выветривании апатито- и фосфоритоносных пород, обычно карбонатного состава, и имеющие плащеобразную и неправильную морфологию.

1.8.2.9 Класс IX - вольфраматы

Вольфраматы - группа минералов, являющихся солями вольфрамовой кислоты. В природных условиях встречаются только соли Fe, Mn, Zn, Ca, Pb, Al моновольфрамовой кислоты H_2WO_4 ; из них широко распространены вольфрамит (Fe, Mn) WO_4 и шеелит $CaWO_4$, остальные соединения - штольцит $PbWO_4$, санмартинит (Zn, Fe) WO_4 встречаются редко. В природе образуются в эндогенных гидротермальных условиях. В зоне окисления вольфрамовых месторождений образуются водные основные соли вольфрамовой кислоты - минералы ферритунгстит $Ca_2Fe_2^{2+}Fe_2^{3+}[WO_4]_7 \cdot 9H_2O$ и антуанит (антоинит) $Al(WO_4)(OH) \cdot H_2O$.

Вольфраматы кристаллизуются в моноклинной и квадратной системах. Основу структур моноклинных минералов составляют зигзагообразные чередующиеся цепочки из октаэдров (WO_6) и $(Mn, Fe) O_6$; W^{6+} находится в шестерной координации (структура вольфрамита, санмартинита). В основе их структуры квадратной системы— изолированные тетраэдры $(WO_4)^{2-}$, соединённые ионами Ca^{2+} или Pb^{2+} ; W^{6+} имеет четверную координацию (структура шеелита, штольцита). Эта структура допускает замещение W^{6+} некоторым количеством Mo^{6+} , в связи с чем известны шеелиты, обогащённые молибденом (зейригит), в редких случаях появляется минерал чиллагит $Pb(Mo, W) O_4$. Вольфрамит и шеелит являются основными промышленными минералами, из которых извлекается вольфрам.

1.8.2.10 Класс X - самородные элементы

Самородные элементы - химические элементы, встречающиеся в природе в виде более или менее устойчивых минералов. Среди них различают: неметаллы (полиморфные модификации углерода — алмаз и графит, самородные S, Se, Te), полуметаллы (самородные As, Sb) и металлы (самородные Au, Ag, Cu, Pt, Pd, Ir, Fe, Ta, Pb, Zn, Sn, Hg, Bi). Обычно вместе с самородными металлами рассматриваются тесно связанные с ними (минералогически и генетически) их твёрдые растворы, а иногда и интерметаллические соединения. Например, минералы группы платины наряду с редкой собственно платиной включают ферроплатину, поликсен и др. В самородном состоянии в природных условиях существует также ряд газов: азот, кислород, водород, аргон, гелий, криптон, ксенон, радон.

Большинство самородных элементов встречается редко и лишь в особых условиях образует крупные скопления (месторождения). Для некоторых минералов этого класса типичны полиморфные модификации. Как и все минералы, они характеризуются наличием примесей и разнообразием форм проявления, отражающими условия образования в природе. Происхождение минералов этого класса определяется магматическими, гидротермальными, метаморфическими и гипергенными процессами; многие из них встречаются в россыпях.

1.8.3 Геохимические провинции

Некоторые области и районы, характеризуются специфическим преобладанием одних химических элементов (в изверженных горных породах - это называется «специализацией» по тому или иному химическому элементу) и недостатком других, что проявляется в отклонении от соотношений средних содержаний химических элементов в земной коре. Чем больше отклонение, тем контрастнее выражена данная геохимическая провинция и тем сильнее это сказывается на локализации в данной области месторождений определённых типов полезных ископаемых, на особенностях характерных почв, минерализации подземных и поверхностных вод, растительности и животного мира, вызывая иногда специфические заболевания растений и животных

Из естественных радиоактивных изотопов наибольшее биологическое значение имеет долгоживущий радий-226. Существуют геохимические провинции с повышенным содержанием радия. В

организм радий поступает с пищей, а также с питьевой водой. Суточное поступление в организм человека радия-226 с пищей и водой составляет 0,000000000023 кюри, а потери с мочой и калом – 0,000000000008 и 0,000000000022 кюри соответственно. Около 80% поступившего в организм радия накапливается в костях. Большие концентрации радия в организме вызывают болезненные изменения в виде остеопороза, самопроизвольных переломов, опухолей.

1.8.4 Кларки элементов

Кларки элементов - это числа, выражающие среднее содержание химических элементов в земной коре, гидросфере, Земле в целом, космических телах и других геохимических или космохимических системах. Различают весовые (в %, в г/т или в г/г) и атомные (в % от числа атомов) кларки. Обобщение данных по химическому составу различных горных пород, слагающих земную кору, с учётом их распространения до глубин 16 км впервые было сделано американским учёным Ф. У. Кларком (1889). Полученные им величины процентного содержания химических элементов в составе земной коры, впоследствии несколько уточненные А. Е. Ферсманом, по его предложению были названы числами Кларка или кларками.

Средние содержания элементов в земной коре, в современном понимании её как верхнего слоя планеты выше границы Мохоровичича, вычислены А. П. Виноградовым (1962), С. Р. Тейлором (1964), К. Г. Ведеполем (1967) (таблицы 19-36). Среди атомов преобладают элементы малых порядковых номеров: 15 наиболее распространённых элементов обладают порядковыми номерами до 26 (Fe). Элементы с чётными порядковыми номерами слагают 87% массы земной коры, а с нечётными - только 13% (рисунок 25.). Средний химический состав Земли в целом рассчитывался на основании данных о содержании элементов в метеоритах. Так как кларки элементов служат эталоном сравнения пониженных или повышенных концентраций химических элементов в месторождениях полезных ископаемых, горных породах или целых регионах, знание их важно при поисках и промышленной оценке месторождений полезных ископаемых; они позволяют также судить о нарушении обычных отношений между сходными элементами (хлор - бром, ниобий - тантал) и тем самым указывают на различные физико-химические факторы, нарушившие эти равновесные отношения.



Рисунок 25 - Распространенность химических элементов, в зависимости от четности порядкового номера

В процессах миграции элементов кларки элементов являются количественным показателем их концентрации. Определенную, все возрастающую роль в этих процессах играют техногенные процессы. Глобальную роль в масштабах биосферы играют не столько перераспределения, вызванные перемещением того или иного элемента, в большей степени они связаны с увеличением числа локальных и региональных загрязнителей.

Таблица 19 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Первая группа, главная подгруппа

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
1	H		700
3	Li	32	30
11	Na	25000	24500
19	K	25000	28200
37	Rb	150	120
55	Cs	3,7	2,7

87	Fr		
----	----	--	--

Таблица 20 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Вторая группа, главная подгруппа

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
4	Be	3,8	2
12	Mg	18700	13900
20	Ca	33000	28700
38	Sr	340	290
56	Ba	650	590
88	Ra		

Таблица 21- Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Третья группа, главная подгруппа

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
5	B	12	9
13	Al	80500	78300
31	Ga	19	17
49	In	0,25	0,07
81	Tl	1	1,3

Таблица 22 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Четвертая группа, главная подгруппа

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
6	C	200	320
14	Si	295000	305400
32	Ge	1,4	1,3
50	Sn	2,5	3
82	Pb	16	15

Таблица 23 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Пятая группа, главная подгруппа

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
7	N	19	20
15	P	930	810

33	As	1,7	1,7
51	Sb	0,5	
83	Bi	0,009	0,2

Таблица 24 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т.
Шестая группа, главная подгруппа

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
8	O	470000	472500
16	S	370	310
34	Se	0,05	0,09
52	Te	0,001	(0,002)
84	Po		

Таблица 25 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т.
Седьмая группа, главная подгруппа

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
9	F	660	720
17	Cl	170	320
35	Br	2,1	2,9
53	I	0,4	
85	At		

Таблица 26 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т.
Восьмая группа, главная подгруппа

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
2	He		(0,003)
10	Ne		
18	Ar		(0,04)
36	Kr		
54	Xe		
86	Rn		

Таблица 27 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т.
Первая группа, подгруппа меди

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)

29	Cu	47	30
47	Ag	0,07	0,06
79	Au	0,0043	0,004

Таблица 28 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Вторая группа, подгруппа цинка

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
30	Zn	83	60
48	Cd	0,13	
80	Hg	0,083	0,08

Таблица 29 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Третья группа, побочная подгруппа

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
21	Sc	10	14
39	Y	29	34
57	La	49	44
58	Ce	70	75
59	Pr	9	7,6
60	Nd	37	30
61	Pm		
62	Sm	8	8,6
63	Eu	1,3	1,4
66	Dy	5	6,1
67	Ho	1,7	1,8
68	Er	3,3	3,4
69	Tm	0,27	
70	Yb	3,3	3,4
71	Lu	0,8	1,1
89	Ac		
90	Th	13	11
91	Pa		
92	U	2,5	3,5

Таблица 30 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Четвертая группа, подгруппа титана

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)

22	Ti	4500	4700
40	Zr	170	160
72	Hf	1	3

Таблица 31 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Пятая группа, подгруппа ванадия

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
23	V	90	95
41	Nb	20	20
73	Ta	2,5	3,4

Таблица 32 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Шестая группа, подгруппа хрома

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
24	Cr	83	70
42	Mo	1,1	1
74	W	1,3	1,3

Таблица 33 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Седьмая группа, подгруппа марганца

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
25	Mn	1000	690
43	Tc		
75	Re	0,0007	(0,001)

Таблица 34 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т. Восьмая группа, подгруппа железа

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполю (1967)
26	Fe	46500	35400
27	Co	18	12
28	Ni	58	44

Таблица 35 - Среднее содержание элементов в земной коре, г/т.
Восьмая группа, платиновые металлы

Атомный номер	Элемент	По А. П. Виноградову (1962)	По К. Г. Ведеполу (1967)
44	Ru		(0,001)
45	Rh		(0,001)
46	Pd	0,013	0,01
76	Os		(0,001)
77	Ir		(0,001)
78	Pt		(0,005)

1.9.5 Геохимия ландшафта

Геохимия ландшафта - научное направление, возникшее на границе географии и геохимии в 40-х годах 20 в. Объект исследований этой науки - миграция химических элементов в ландшафте. Результаты первых работ в этом направлении были опубликованы в трудах В. И. Вернадского о биосфере (в 1926) и А. Е. Ферсмана по геохимии пустынь и полярных областей (в 1931). Основатель геохимии ландшафта как самостоятельного научного направления - Б. Б. Польшов, в 1946 г. сформулировал основные задачи и понятия, а также разработал методику исследований.

Геохимия ландшафта классифицирует миграцию элементов в соответствии с формами движения материи. Ведущее значение в большинстве ландшафтов имеет биогенная миграция, выражающаяся в биологическом круговороте атомов, образовании и разложении органических веществ. В результате этого солнечная энергия превращается в химическую энергию биологических систем. Физико-химическая миграция в основном развивается в водах ландшафта. Она определяет многие его геохимические особенности.

По характерным ионам природных вод различают кислые (H^+), кальциевые (Ca^{2+}) и прочие ландшафты. Участки земной поверхности, отмеченные определёнными особенностями миграции, именуются геохимическими ландшафтами, все их части - водоразделы, склоны, долины и так далее - связаны между собой миграцией атомов. Особенности миграции положены в основу геохимической классификации ландшафтов и составления ландшафтно-геохимических карт для территории бывшего СССР и отдельных регионов.

1.9 Распространённость химических элементов в природе

Как уже было отмечено ранее, распространённость химических элементов в космосе определяется нуклеогенезом внутри звёзд. Химический состав Солнца, планет земного типа Солнечной системы и метеоритов, по-видимому, практически тождествен. Образование ядер химических элементов связано с ядерными процессами, протекающими в звездах при высоких температурах. Поэтому на разных этапах своей эволюции различные звёзды и звёздные системы имеют неодинаковый химический состав.

Из 107 известных в настоящее время элементов - 89 обнаружены в природе, остальные: технеций (атомный номер 43), прометий (атомный номер 61), астат (атомный номер 85), франций (атомный номер 87) и трансурановые элементы, получены искусственно (ничтожные количества Te, Pm, Np, Fm образуются при спонтанном делении урана и присутствуют в урановых рудах). В доступной части Земли наиболее распространены 10 элементов с атомными номерами в интервале от 8 до 26, которые по массе составляют 99,92% земной коры, их процентное содержание по массе приведено в таблице 37.

Таблица 37-10 элементов, составляющие 99,92% массы земной коры

Элемент	Атомный номер	Содержание, % по массе
O	8	47,00
Si	14	29,50
Al	13	8,05
Fe	26	4,65
Ca	20	3,30
Na	11	2,50
K	19	2,50
Mg	12	1,87
Ti	22	0,45
Mn	25	0,10

1.10 Биогеохимия элементов

Биогеохимия - это часть геохимии, изучающая геохимические процессы, происходящие в биосфере при участии организмов. Миграция химических элементов на Земле не может быть понята без учёта их влияния, отражение биогеохимических процессов находят место на геологических картах. Часть живого вещества детритоядные организмы разлагают, остальное остается не до конца разложенным и

минерализованным, образуя отложения пород биогенного происхождения - каменный уголь, торф, сапропели, природный газ. Эти биогенные породы и составляют совместно с живыми организмами биомассу Земли - живое вещество биосферы.

По данным последних лет биомасса одновременно живущих на Земле организмов составляет величину порядка $2,423 \times 10^{15}$ т, из них сухопутные - $2,42 \times 10^{12}$ т, на водных - $0,003 \times 10^{12}$ т. В связи с этим В.И. Вернадский из общей геохимии выделил особую дисциплину - биогеохимию, главная задача которой - изучение участия живых организмов в концентрации различных химических элементов и определение границ и состава пород верхних слоев литосферы в разных биогеохимических провинциях.

Биогеохимия рассматривает живое вещество, выраженное в массе, химическом составе и энергии, которую оно привносит в геохимические процессы. Живое вещество неравномерно распределяется по поверхности Земли. Известны области его интенсивного развития, например планктона в океанах и морях, лесов на суше, гумуса, торфяника в почвах; плотность населения неравномерна и в значительной степени зависит от почвенно-климатических зон.

Растительные организмы составляют главную массу живого вещества, около 1% падающей солнечной энергии поглощается растениями, что эквивалентно 3×10^{14} кг углерода, - это примерно соответствует массе живого вещества на земном шаре. Только масса живого вещества не даёт правильного представления об интенсивности участия его в биогеохимических процессах. Огромное значение имеет скорость размножения организмов и общая продукция органического вещества, образуемая за определённое время. Особенно это относится к низшим организмам - бактериям, грибкам, водорослям и другим, обладающим высокой скоростью размножения. В состав живого вещества входят все известные химические элементы и их изотопы но основную массу любого организма составляет ограниченное число химических элементов (таблица 38.), которые в условиях биосферы образуют легкоподвижные и легкорастворимые соединения, например газы CO_2 или NH_3 , H_2O , ионы H^+ , OH^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также тяжёлые металлы, образующие высоко окисленные комплексные ионы.

Нужно отметить, что величины, приведенные в таблице 38. являются всеобщими. Некоторые элементы, представленные в организме человека в ограниченном количестве, в организме других

видов могут накапливаться в значительных концентрациях. Примеры этого приведены в таблице 39 данного раздела и в разделе 1.10.2. – биогеохимические эндемии.

Таблица 38 – Среднее содержание некоторых химических элементов в организме взрослого человека

Элемент	Атомный номер	Содержание, % по массе
O	8	65,00
C	6	18,00
H	1	10,00
N	7	3,00
Ca	20	1,50
P	15	1,0
S	16	0,25
K	19	0,20
Na	11	0,15
Cl	17	0,15
Mg	12	0,05

Химические элементы, не образующие в биосфере растворимых и легкоподвижных соединений, как например, Ti, Zr, Th, несмотря на их заметное количество в породах земной коры, в организмах содержатся лишь в очень малых количествах. Организмы не повторяют полностью химического состава среды, а активно выбирают те или иные химические вещества. Нередко тот или иной вид организмов накапливает определённый химический элемент, следовательно химический состав организмов является характерным признаком для определённого вида, в определенных условиях. Таким образом, организмы выполняют геохимическую функцию, участвуя в биогенной миграции того или иного химического элемента.

Например, кальций издавна использовался организмами для образования скелета в виде CaCO_3 . Эта очень древняя геохимическая функция была характерна для многих низших организмов. Позже, наряду со скелетом из CaCO_3 , появились организмы со скелетом из фосфата кальция (в первую очередь среди брахиопод), который утвердился и у всех высших организмов. У многих древних низших организмов (включительно до морских губок) встречается также скелет из кремнекислоты. Это указывает на направление эволюции организмов.

Вернадский отмечал концентрационную функцию живого

вещества, таблица 39. Участие живого вещества в биогеохимических процессах проявляется прямо либо косвенно. Так, после гибели организмов живое вещество непосредственно участвует в образовании диатомита, известняков, углей, нефтей и других залежей. Зелёные растения в результате фотосинтетической деятельности создают всю массу кислорода современной атмосферы Земли. Морские водоросли концентрируют значительные количества иода; после их гибели в морских илах происходят захоронение и процесс превращения органического детрита в вещество нефтей. В результате выпрессовывания из захороненных илов жидкой нефти в пористые породы (пески и другие коллекторы) выдавливаются иловые воды, содержащие большое количество йода.

Ещё более разнообразно косвенное влияние организмов и продуктов их жизнедеятельности на геохимические процессы. Микроорганизмы участвуют, например, в окислении соединений железа, марганца и других элементов, что ведёт к выпадению их из природных растворов и отложению в осадках, а также восстанавливают сульфаты, образуя биогенные месторождения серы и участвуют в других подобных процессах. Под влиянием живого вещества изменяются со временем геохимические процессы. Так, когда на Земле ещё не было биосферы, уран, германий и ванадий концентрировались в осадочных железных рудах, а с её появлением уран, ванадий и германий накапливаются и в некоторых ископаемых углях и битумах.

Живое вещество, наряду с H_2O и CO_2 , играет в процессах выветривания и образования осадочных пород (биогенных осадков в морях и океанах) исключительную роль. Представляет интерес участие организмов в процессах разделения близких по свойствам пар химических элементов, например Si/Ge, Fe/Mn, K/Na, Ca/Sr и других пар. В свою очередь среда обитания отражается на составе организмов. В таблице 40 показано среднее содержание некоторых элементов в осадочных породах, земной коре и растениях. Если для большинства химических элементов их содержание в растениях существенно ниже, то некоторые элементы, например углерод, кислород активно накапливаются в организме.

Таблица 39 - Проявление концентрационной функции живого вещества (по Вернадскому)

Элемент	Концентрация	Организмы
Водород (H)	Водород-кислородные организмы. До 99 % воды при ее обычном содержании в теле 80-90 %	Огромное количество водных организмов. В медузах химически чистой воды – 99,9 %. Водородистые бактерии.
Углерод (C)	Углеродистые организмы. Углерод до 48 % при обычном содержании 8-18 % в окружающей среде.	Лишайники, семена, многие организмы в латентном состоянии.
Натрий (Na)	Натриевые организмы. Концентрируют до 5 % при обычном содержании в среде Na 0,02 – 0,5 %.	Флора солончаков, солянки, солеросы, полыни, большинство морских водорослей.
Магний (Mg)	Магниевые организмы. Концентрируют до 10 % Mg при фоновом содержании $n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^{-2}$.	Фораминиферы, литотамниевые водоросли.
Кремний (Si)	Кремниевые организмы. Концентрируют до 10 % Si при фоновом содержании $n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^{-3}$.	Диатомовые водоросли, песчаные фораминиферы, радиолярии, кремниевые губки, хвоци.
Сера (S)	Серные организмы. Концентрируют до 10 % S при фоновом содержании $n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^{-2}$.	Серные бактерии, выделяющие самородную серу.
Железо (Fe)	Железные организмы. Концентрируют до 20 % Fe при фоновом содержании $n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^{-3}$.	Железобактерии, некоторые фораминиферы, десмидиевые водоросли, некоторые лишайники, многие водные растения.
Кальций (Ca)	Кальциевые организмы. Концентрируют до 40 % Ca при фоновом содержании $n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^{-2}$.	Лишайники, многие цветковые растения, лишённые раковины моллюски, большинство водорослей.

Таблица 40 - Среднее содержание некоторых химических элементов в земной коре, почвах и организмах (% по массе, данные на 1968)

Химические элементы	Земная кора (осадочные породы)	Почвенный покров	Организмы (растения)
B	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$
C	1,0	2,0	18,0
N	$6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$
O	52,8	49,0	70
F	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Na	0,66	0,63	$2 \cdot 10^{-2}$
Mg	1,34	0,63	$7 \cdot 10^{-2}$
Al	10,45	7,1	$2 \cdot 10^{-2}$
Si	23,8	33,0	$1,5 \cdot 10^{-1}$
P	$7 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$
S	$3 \cdot 10^{-1}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
Cl	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	10^{-2}
K	2,28	1,36	$3 \cdot 10^{-1}$
Ca	2,53	1,37	$3 \cdot 10^{-1}$
Ti	0,45	$4,6 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Mn	$6,7 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Fe	3,3	3,8	$2 \cdot 10^{-2}$
Cu	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Sr	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}
Zr	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}
I	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Ba	$8 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}
U	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-7}$

В пределах так называемых биогеохимических провинций возникают формы организмов, накапливающие иногда значительные количества химического элемента, то есть имеет место интенсивная биогенная миграция. Известно также, что организмы участвуют в нарушении изотопного состава ряда лёгких химических элементов (углерода, кислорода, серы). Как правило, в биогенных процессах организмами поглощаются преимущественно более лёгкие изотопы.

1.10.1 Биогеохимические провинции

Биогеохимические провинции - области на поверхности Земли, различающиеся по содержанию (в почвах, водах и других объектах ландшафтов) химических элементов (или соединений), с которыми связаны определённые биологические реакции со стороны местной флоры и фауны. Элементный состав почв влияет на видовое разнообразие и распределение растений, а также на их изменчивость под влиянием тех или иных химических соединений или химических элементов, находящихся в почвах. Границы распространения определённой флоры или фауны в пределах одной почвенной зоны нередко совпадают с областью развития известных горных пород или геологических формаций.

Хорошо известна специфическая растительность, распространённая на серпентинитах, известняках, в бессточных засоленных областях, на песках и тому подобное. Резкая недостаточность или избыточность содержания какого-либо химического элемента в среде вызывает в пределах данной провинции биогеохимические эндемии - заболевания растений, животных и человека. Например, при недостаточности йода в пище - простой зоб у животных и людей, при избыточности селена в почвах - появление ядовитой селеновой флоры и многие другие эндемии.

По генезису выделяются 2 типа биогеохимических провинций: 1) приуроченные к определенным почвенным зонам в виде отдельных пятен или областей и определяемые недостаточностью того или иного химического элемента в среде. Например, для зон подзолистых и дерново-подзолистых почв Северного полушария, простирающихся почти через всю Евразию, характерны биогеохимические провинции связанные с недостаточностью йода, кальция, кобальта, меди и др. Подобные провинции с характерными для них эндемиями (зоб, акабальтоз, ломкость костей у животных) не встречаются в соседней зоне чернозёмов.

Причина лежит в большой подвижности ионов I, Ca, Co, Cu и других, легко вымываемых из подзолистых почв. Подобный процесс имеет место и в аналогичных почвах Южного полушария. Этот тип биогеохимической провинции носит негативный характер, так как возникает в результате недостаточности того или иного химического элемента в среде.

2) биогеохимические провинции и эндемии, встречающиеся в любой зоне. В этом смысле они имеют интразональный характер и возникают на фоне первичных или вторичных ореолов рассеяния

рудного вещества месторождений, солёных отложений, вулканогенных эманаций и тому подобных процессов. Например, борные биогеохимические провинции и эндемии (среди флоры и фауны) обнаружены в бессточных областях; флюороз человека и животных - в области недавно действующих вулканов, месторождений флюорита и фторапатита; молибденозис животных - в пределах месторождений молибдена.

Химические элементы, образующие хорошо растворимые соединения в почвенных условиях, вызывают наиболее сильную биологическую реакцию у местной флоры. Имеет значение и форма нахождения химических элементов в среде. Например, молибден вызывает у животных заболевание только в районах с щелочными почвами (молибденовая кислота даёт растворимые соединения с щелочами); в районах кислых почв избыток молибдена не вызывает заболеваний. Химические элементы Ti, Zr, Hf, Th, Sn, Pt и многие другие, не образующие в почвенных условиях легкоподвижных растворимых соединений, не вызывают образования биогеохимических провинций и эндемий.

В пределах биогеохимических провинций различают 2 вида концентрации организмами химических элементов: групповой, когда все виды растений в данной провинции в той или иной степени накапливают определённый химический элемент, и селективный, когда имеются определённые организмы-концентраторы того или иного химического элемента вне зависимости от уровня содержания этого элемента в среде. Известны различные виды растений, которые в биогеохимических провинциях концентрируют определённые элементы и подвергаются при этом изменчивости. К ним относятся специфическая галмейная флора (концентрирующая Zn), известковая, селеновая, галофитная, серпентинитовая флора и многие другие.

В зависимости от конституционных свойств данного вида организма и особенно при длительном изолированном существовании его в той или иной биогеохимических провинций возникает изменчивость организмов - появление физиологических рас (без видимых внешних изменений), морф, вариаций, подвидов и видов. Это сопровождается повышением содержания в организмах соответствующих химических элементов - Cu, Zn, Se, Sr и других. Появляются также химические мутанты с изменением в ядрах клеток числа хромосом и тому подобного; изменчивость может приобрести наследственный характер, особенно у микробов.

Многие редкие и рассеянные химические элементы

(микроэлементы) играют значительную физиологическую роль, входя в важные органические соединения организмов - в дыхательные пигменты, ферменты, витамины, гормоны и другие акцессорные физиологически важные вещества.

Известно более 30 химических элементов (Li, B, Be, C, N, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, V, Mn, Cu, Zn, As, Se, Br, Mo, I, Ba, Pb, U и некоторые другие), с которыми связано образование биогеохимических провинций, эндемий и появление организмов-концентраторов.

На основе изучения химической экологии биогеохимических провинций в практику борьбы с соответствующей эндемией в на этих территориях широко вошло использование химических элементов (B, Cu, Mn, Co, I и других) в качестве удобрения или подкормки животных. На основе изучения содержания химических элементов в почвах и растениях был создан биогеохимический метод поисков полезных ископаемых. В геологическом прошлом такие районы также играли значительную роль в отборе и изменении флоры и фауны. Реконструкция палеобиогеохимических провинций может многое объяснить в эволюции органического мира.

1.10.2 Биогеохимические эндемии

Биогеохимические эндемии - заболевания растений, животных или человека, вызываемые недостатком или избытком в среде определённых химических элементов. Эндемические болезни у животных, биогеохимические эндемии у животных - болезни, возникающие вследствие недостатка или избытка в почве, воде и кормах жизненно необходимых химических элементов проявляются в определенных биогеохимических провинциях. Недостаточность или избыточность одного или нескольких микроэлементов в организме животного, а также обеднение ими организма при избытке других микроэлементов вызывают нарушение обмена веществ, в том числе минерального, влекут за собой расстройство функций органов или их системы, приводят к изменению структуры тканей.

Например, недостаток фосфора, кобальта и меди или недостаток кальция при избытке солей фосфора служат причиной развивающегося в организме нарушения фосфорно-кальциевого обмена и разрушения костной ткани (эндемическая остеодистрофия). При йодной недостаточности нарушается функция щитовидной железы (эндемический зоб), что приводит к задержке роста и развития

молодняка, у взрослых животных происходят аборт или недоразвитие плода в период беременности. Недостаток меди или избыток в организме молибдена и свинца при достаточном содержании меди являются причиной расплавления мозговой ткани у ягнят (энзоотическая атаксия ягнят). В этом случае у больных нарушаются двигательные функции, возникают судороги, параличи; отмечают также потерю зрения и слуха, в период окота - массовую гибель новорождённых.

При некоторых эндемических болезнях возможны хронические отравления (например, при повышенном содержании фтора в кормах растительного происхождения), при этом клинические признаки зависят как от абсолютного количества поступающих в организм микроэлементов, так и от количественного соотношения между этими элементами. Лечение и профилактика при эндемических болезнях в первую очередь сводятся к составлению рациона, сбалансированного по содержанию в кормах минеральных веществ. По данным химического анализа почвы, воды и произрастающих в определенном биохимическом регионе растений принимаются также соответствующие хозяйственные меры по улучшению лугов и пастбищ (внесение минеральных удобрений). Некоторые биогеохимические эндемии приведены в таблице 41.

1.10.3 Биогеохимические циклы элементов

Все химические элементы в биосфере постоянно перемещаются как в пределах отдельных сфер (литосфера, гидросфера, атмосфера, педосфера), так и между ними. Темпы миграции химических элементов неодинаковы, и наиболее активно они передвигаются в атмосфере и природных водах, в связи с чем А.И. Перельман разделил их на воздушные и водные мигранты, хотя и в пределах каждой группы выделяются подгруппы более или менее подвижных элементов в зависимости от свойств их соединений, кислотно-основной и окислительно-восстановительной обстановки в той среде, где они мигрируют.

Повторяющиеся перемещения и превращения химических элементов в биосфере при активном участии живого вещества называют биогеохимическими циклами элементов.

протекания процессов в прямом и обратном направлениях.

На рисунке показано, что в целом биогеохимический цикл йода замкнут, но в его пределах есть циклы меньших масштабов, ограниченные небольшим числом блоков. Скорости передвижения соединений йода между отдельными блоками различаются на несколько порядков. Биогеохимические циклы других элементов построены аналогично, они различаются по числу блоков, по доминирующим процессам, скоростям и массам мигрирующих элементов.

1.10.4 Участие микроэлементов в почвообразовании

На первых этапах изучения микроэлементов преобладало мнение, что они существенны только для живых организмов. Последующие исследования показали, что даже при малом содержании многие микроэлементы могут существенно влиять на процессы почвообразования и активно в них участвовать. Характерные для почв слоистые алюмосиликаты при изоморфных замещениях модифицируются, изменяются их строение и свойства. Так, в минералах-хлоритах алюминий октаэдрических слоев может быть замещен на Cr^{3+} , Mn^{3+} , магний в бруситовом слое - на Mn^{2+} , Ni^{2+} , в монтмориллонитах алюминий замещается на Ni^{2+} , Zr^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , в вермикулитах - на Cr^{3+} , V^{3+} . Такого рода замещения могут изменить электрические заряды, приходящиеся на элементарную ячейку минерала, что, в свою очередь, повлияет на степень их обводненности, способность поглощать катионы, органические вещества.

Поскольку микроэлементы воздействуют на развитие растений, то все почвенные биохимические процессы накопления, трансформации, переноса органических соединений в экосистеме во многом зависят от уровня содержания и набора микроэлементов; одновременно последние стимулируют деятельность микроорганизмов. В результате интенсифицируются процессы образования гуминовых веществ в почвах из растительных остатков. На содержание и распределение микроэлементов активно влияют многие процессы формирования почвенного профиля. Они выносятся из элювиальных (оподзоленных, осолоделых) горизонтов, накапливаются в иллювиальных горизонтах (горизонтах вымывания), глеевых (восстановленных) горизонтах.

Соединения микроэлементов в породах и особенно в почвах отличаются разнообразием. Катионы металлов поступают в почвы при

растворении пород и минералов, при минерализации растительных и животных остатков, но в почвенном растворе их доля невелика, поскольку почвенные коллоиды легко их поглощают, а гуминовые вещества связывают в комплексные соединения. Частично они переходят в гидроксиды, карбонаты, фосфаты твердых фаз. Для других неметаллических элементов (В, F) могут быть характерны производные соответствующих кислот. Так, бор чаще всего представлен солями ортоборной кислоты H_3BO_3 - боратами.

Особое место занимают соединения йода; его роль значительна, так как, с одной стороны, он влияет на состояние щитовидной железы, а с другой - радиоактивный йод - один из важнейших компонентов антропогенных выбросов радионуклидов, в том числе при авариях. Почвы Русской равнины, по данным Н.Г. Зырина и Ю.Н. Зборищука, по содержанию иода делятся на три группы: 1) автоморфные кислые таежные почвы с низким содержанием йода, 2) автоморфные почвы лесостепной и степной зоны с высокой концентрацией йода и 3) торфяно-болотные луговые, пойменные почвы, где йода больше всего. Это не случайно, поскольку концентрация йода в почве y (в мг/кг) прямолинейно связана с содержанием органического вещества x (в %) по уравнению $y = 0,25 + 0,43x$.

Все это свидетельствует о том, что основным компонентом почвы, связывающим йод, является органическое вещество. Когда йод только поступает в почву, он связывается водорастворимыми низкомолекулярными веществами, но постепенно растет его доля, входящая в соединения с гуминовыми веществами, то есть йод становится все более прочно связанным. Однако конкретные соединения йода с органическими веществами почв изучены плохо.

Основной источник микроэлементов в почвах - почвообразующие породы. Почвы, развитые на продуктах выветривания кислых пород (гранитах, липаритах) бедны Ni, Co, Cu, а почвы, образовавшиеся на продуктах выветривания основных пород (базальтах, габбро), обогащены этими микроэлементами.

В результате почвообразовательного процесса содержание микроэлементов и их распределение по генетическим горизонтам может существенно изменяться. Степень изменения определяется особенностями почв и почвообразовательных процессов и свойствами самих микроэлементов. Микроэлементы в почвах содержатся:

в кристаллической решетке первичных и вторичных минералов в виде изоморфной подмеси;

в форме нерастворимых соединений (солей, окислов);

в ионообменном состоянии;
 в составе органического вещества;
 в почвенном растворе.

1.11 Геохимические процессы в гидросфере, атмосфере и биосфере

Водная оболочка Земли - гидросфера - возникла в результате излияния базальтов и выноса в этом процессе воды, CO₂ и других газов. Мировой океан со средиземными и приконтинентальными морями занимает около 71% поверхности Земли и имеет общий объём 1,37*10¹⁸ м³. Строение дна океанов - результат глобальных магматогенных процессов. Донные осадки составляют около 1,2*10²¹ кг. Легкорастворимые вещества обогащают водный раствор, трудно растворимые накапливаются в осадках дна. Соотношения растворённых солей сохраняются постоянными. Главные ионы океанической воды приведены в таблице 42.

Таблица 42 - Главные ионы океанической воды (на 1 кг океанической воды при солёности S=35,00‰ и хлорности Cl=19,375 ‰)

Компоненты	Концентрация	
	г/кг	г-экв/кг
Катионы		
Na ⁺	10,7638	0,46806
Mg ²⁺	1,2970	0,10666
Ca ²⁺	0,4080	0,02035
K ⁺	0,3875	0,00991
Sr ²⁺	0,0136	0,00031
Сумма	-	0,60529
Анионы		
Cl ⁻	19,3534	0,54582
SO ₄ ²⁻	2,7007	0,05623
HCO ₃ ⁻	0,1427	0,00234
CO ₃ ²⁻	(0,0702)	(0,00234)
Br ⁻	0,0659	0,00083
F ⁻	0,0013	0,00007
H ₃ BO ₂	0,0265	
Сумма	-	0,60529

В толще воды устанавливаются сложные равновесия между органическим веществом, солями, газами и другими веществами океанического раствора и химическим составом донных отложений. Все воды материков составляют 3% массы воды океана. В воде рек и пресных озёр главными ионами являются (в порядке убывания содержания) Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- .

С поверхности океанов ежегодно испаряется около 500 тыс. км³ воды, которая частично сбрасывается на материки, просачивается через слои осадочных пород и образует подземные воды. Захороненные воды бывших морских илов образуют межпластовые воды. Под влиянием обмена между межпластовыми водами и породами и в зависимости от температуры пластов формируется состав подземных вод. Известны подземные воды нефтеносных областей, богатые I и Br, иногда B; хлоркальциевые воды (например, в девонских слоях Восточно-Европейской платформы); бессульфатные, богатые Ra; сероводородные, обычно возникающие в результате восстановления SO_4^{2-} бактериями; богатые Li и другие. Разнообразны и воды минеральных источников. В областях древнего вулканизма минеральные источники - холодные, без CO_2 . В областях недавнего вулканизма появляются горячие источники с разнообразным солевым составом.

Древняя газовая оболочка Земли была маломощной и состояла из CO_2 , H_2O , возможно CH_4 и некоторых других газов. Современная атмосфера возникла вторично, с появлением на Земле свободного кислорода в результате фотосинтетической деятельности растений. После этого продукты вулканической эвгаляций S, H_2S , NH_3 , H_2 , CH_4 были окислены, выбыли из атмосферы и была создана современная азотно-кислородная оболочка Земли.

Из пород Земли в атмосферу при действии вулканов выделяются лёгкие газы He^4 , He^3 , H, D («гелиевое дыхание»), которые не удерживаются гравитационным полем Земли и рассеиваются в космическое пространство. Источником CO_2 (а также следов HF, HCl) являются тоже вулканы. На содержание в атмосфере CO_2 оказывает влияние океан, поглощающий CO_2 в холодных широтах и освобождающий CO_2 на экваторе. Поэтому на экваторе парциальное давление CO_2 в атмосфере несколько выше. Изотоп аргона ^{40}Ar накапливается в атмосфере в результате ядерного превращения ^{40}K в ^{40}Ar (K-захват). Другие инертные газы - Ne, Kr, Xe - первичного происхождения. Атмосфера играет огромную роль в транспорте многих легколетучих соединений, галогенидов, органических

веществ. Газы атмосферы участвуют в геохимическом выветривании горных пород, например O_2 , CO_2 . Азот фиксируется синезелёными водорослями и некоторыми другими растениями. После их гибели в результате метаморфизма их остатков образуется калийная селитра.

Подземные атмосферы, заполняющие пористые породы, имеют разнообразный состав и образуются различными путями. Атмосферные газы могут быть захвачены осадочными породами. В этом случае для них характерно содержание ^{40}Ar по отношению к N_2 около 1%. Азотные струи без ^{40}Ar - результат метаморфизма органического вещества (биогенные газы). Известны подземные атмосферы из CO_2 , а также струи CO в районах вулканической деятельности, нефтяные газы CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 и другие углеводороды в нефтеносных областях, сероводород, радиогенные газы - в том числе He , Rn .

Биосфера - область на границе твёрдой, жидкой и газовой оболочек Земли, занятая живым веществом - совокупностью организмов возникла около $3,5 \cdot 10^9$ лет тому назад. Благодаря маломощной первичной атмосфере космическое излучение проникало на Землю. Под влиянием этого облучения из вулканических дымов и газов H_2O , CO , CO_2 , HF , HCl , CH_4 , S , H_2S , S_2 , NH_3 , H_3BO_3 и других происходил абиогенный синтез многих сложных соединений углерода с симметричными молекулами, оптически неактивными. На этом фоне возник биогенный синтез асимметричных оптически активных молекул живого вещества. После возникновения в результате фотосинтеза азотно-кислородной атмосферы над ней образовался озоновый экран. Вследствие этого космические лучи практически перестали проникать к поверхности Земли и абиогенный синтез органических соединений прекратился. Организмы не только изменили состав атмосферы, но прямо или косвенно участвуют в многочисленных геохимических процессах.

История отдельных элементов в земной коре и их геохимия, поведение в разных природных процессах составляют специальную часть общей геохимии и часто представляют значительный не только экономический, но и биологический, и социальный интерес. Закономерные парагенезисы (ассоциации элементов) встречаются в разных природных процессах, но затем может происходить и разделение элементов. Например, все галогениды в виде HF , HCl , HBr , HI поступают на поверхность Земли с вулканическими эманациями. В дальнейшем соединения йода под влиянием окислительно-восстановительных реакций (и солнечной радиации) легче других

галогенидов окисляются, и переходят в I_2 , который транспортируется через атмосферу и на поверхности Земли совершает свой круговорот. HF вулканических газов немедленно фиксируется материковыми породами, особенно молекулой P_2O_5 , образуя прочную молекулу, лежащую в основе фторапатита.

Соли HCl и HBr переходят в водные растворы и мигрируют вместе. Разделительным процессом для них является главным образом процесс садки солей при испарении растворов в изолированных бассейнах. NaCl поступает в осадок, а соли Br остаются в рапе озёр. Отношение Cl/Br в океане близко к 300, то же примерно в озёрах, реках. но в отложениях галита отношение Cl/Br около 10000 и больше, а в рапе (или в Мёртвом море) около 50. Следовательно, по этому отношению Cl/Br можно устанавливать происхождение минеральных растворов.

Другой пример: S, Se, Te выбрасываются вулканами. В гидротермальных рудных отложениях и сульфидах тяжёлых металлов они находятся вместе, но на поверхности Земли разделяются: S легко окисляется в SO_4^{2-} и сбрасывается в море; при испарении морской воды образуются осадки сернокислого кальция - гипсы, ангидриты. Se трудно окисляется и в виде нерастворимых водных солей селенистой кислоты образует скопления. Теллур рассеивается при окислении.

Миграция Ca, Sr, Ba, Ra имеет много общих этапов. Однако Ba, встречаясь с SO_4^{2-} , даёт нерастворимые соединения $BaSO_4$. Одновременно тут же накапливается и $RaSO_4$. Бикарбонаты Ca и Sr сбрасываются в виде водных растворов в океаны. При этом, в силу большой растворимости солей Sr^{2+} , он не уходит в карбонатные осадки, а накапливается в растворах. Ещё более сложные разделительные процессы идут при образовании сульфидных гидротермальных отложений и во многих других случаях. Миграция отдельных элементов из одной термодинамической системы в другую является частью общего круговорота или цикла миграции вещества на Земле.

1.11.1 Виды вод гидросферы

Гидросфера Земли выражена прерывистой водной оболочкой Земли, располагающейся между атмосферой и твёрдой земной корой (литосферой) и представляющая собой совокупность океанов, морей и поверхностных вод суши. В более широком смысле в ее состав включают также подземные воды, лёд и снег Арктики и Антарктики, а

также атмосферную воду и воду, содержащуюся в живых организмах. Основная масса воды на Земле сосредоточена в морях и океанах, второе место по объёму водных масс занимают подземные воды, третье — лёд и снег арктических и антарктических областей. Поверхностные воды суши, атмосферные и биологически связанные воды составляют доли процента от общего объёма воды (таблица 43.). По химическому составу гидросфера приближается к среднему составу морской воды.

Таблица 43 - Виды вод гидросферы

Виды вод	Название	Объём, млн. км ³	% от общего объёма гидросферы
Морские воды	Морская	1370	94
Подземные (за исключением почвенной) воды	Грунтовая	61,4	4
Лёд и снег (Арктика, Антарктика, Гренландия, горные ледниковые области)	Лёд	24,0	2
Поверхностные воды суши: озёра, водохранилища, реки, болота, почвенные воды	Пресная	0,5	0,4
Атмосферные воды	Атмосферная	0,015	0,01
Воды, содержащиеся в живых организмах	Биологическая	0,00005	0,0003

Поверхностные воды, занимая сравнительно малую долю в общей массе воды планеты, тем не менее играют важнейшую роль в жизни, являясь основным источником водоснабжения, орошения и обводнения. Воды гидросферы находятся в постоянном взаимодействии с атмосферой, земной корой и биосферой. Взаимодействие этих вод и взаимные переходы из одних видов вод в другие составляют сложный круговорот воды на земном шаре.

1.11.1.1 Вода – химические свойства

Вода - окись водорода, H_2O - простейшее устойчивое в обычных условиях химическое соединение водорода с кислородом (11,19% водорода и 88,81% кислорода по массе), молекулярная масса 18,016; бесцветная жидкость без запаха и вкуса (в толстых слоях имеет голубоватый цвет),

В обычных условиях вода устойчивое соединение. Распад молекул H_2O (термическая диссоциация) становится заметным лишь выше $1500^\circ C$. Разложение может происходить также под действием ультрафиолетового (фотодиссоциация) или радиоактивного излучения (радиолиз). В последнем случае, кроме H_2 и O_2 , образуется также перекись водорода и ряд свободных радикалов. Характерным химическим свойством воды является её способность вступать в реакции присоединения, а также гидролитические разложения взаимодействующих веществ. Восстановители действуют на воду преимущественно при высокой температуре. Только наиболее активные из них, щелочные и щелочноземельные металлы, реагируют уже при комнатной температуре с выделением водорода и образованием гидроксидов: $2Na + 2H_2O = 2NaOH + H_2$; $Ca + 2H_2O = Ca(OH)_2 + H_2$.

Магний и цинк взаимодействуют с при кипячении, алюминий — после удаления с его поверхности окисной плёнки. Менее активные металлы вступают в реакцию с водой при красном калении: $3Fe + 4H_2O = Fe_3O_4 + 4H_2$. Медленное взаимодействие многих металлов и их сплавов с водой происходит при обычной температуре. Благородные металлы - золото, серебро, платина, палладий, рутений, родий, а также ртуть с водой не взаимодействуют.

Атомарный кислород превращает воду в перекись водорода: $H_2O + O = H_2O_2$. Фтор уже при обычной температуре разлагает ее: $F_2 + H_2O = 2HF + O$. Одновременно образуются также H_2O_2 , озон, окись фтора F_2O и молекулярный кислород O_2 . Хлор при комнатной температуре даёт с водой хлористоводородную и хлорноватистую кислоты: $Cl_2 + H_2O = HCl + HClO$, бром и йод в этих условиях реагируют аналогичным образом. При высоких температурах ($100^\circ C$ для хлора, $550^\circ C$ для брома) взаимодействие идёт с выделением кислорода: $2Cl_2 + 2H_2O = 4HCl + O_2$. Фосфор восстанавливает воду и образует метафосфорную кислоту (только в присутствии катализатора под давлением при высокой температуре): $2P + 6H_2O = 2HPO_3 + 5H_2$. С азотом и водородом она не взаимодействует, а с углеродом при высокой температуре даёт водяной газ: $C + H_2O = CO + H_2$. Эта

реакция может служить для промышленного получения водорода, как и конверсия метана: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$ (1200-1400°C). Вода взаимодействует со многими основными и кислотными окислами, образуя соответственно основания и кислоты.

Воду, химически связанную с веществом, в которое она входит (неразличимую в виде «готовых» молекул H_2O), называют конституционной; молекулы H_2O образуются лишь в момент разложения вещества, например при сильном нагревании: $\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. Вода, входящая в состав ряда кристаллических веществ (например, алюминиевых квасцов $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$) и различимая в этих кристаллах рентгенографически, называется кристаллизационной или кристаллогидратной. Воду, поглощённую твёрдыми веществами, имеющими большое число пор и развитую поверхность (например, активным углём), называют адсорбционной. Свободную воду, заполняющую тонкие каналы (например, в почве), называют гигроскопической (капиллярной) водой.

Различают также структурно-свободную воду, располагающуюся в пустотах некоторых структур, например в минералах. Качественно можно обнаружить воду в виде конденсата, образующегося при нагревании исследуемого образца; проводя нагревание при непрерывном взвешивании, получают количественные результаты (термогравиметрический анализ). В органических растворителях воду можно обнаружить по окрашиванию бесцветной серноокислой меди CuSO_4 , образующей с водой синий кристаллогидрат $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Обладая свойствами электролита, вода растворяет многие кислоты, основания, минеральные соли. Такие растворы проводят электрический ток благодаря диссоциации растворённых веществ с образованием гидратированных ионов. Многие вещества при растворении в воде вступают с ней в реакцию обменного разложения, называемую гидролизом. Из органических веществ в воде растворяются те, которые содержат полярные группы ($-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{COOH}$ и др.) и имеют не слишком большую молекулярную массу. Сама вода хорошо растворима (или смешивается во всех отношениях) лишь в ограниченном числе органических растворителей. Однако в виде ничтожной примеси к органическим веществам она присутствует практически всегда и способна резко изменять физические константы последних.

Вода в природных условиях всегда содержит растворённые соли, газы и органические вещества. Их количественный состав

меняется в зависимости от происхождения воды и окружающих условий. При концентрации солей до 1 г/кг воду считают пресной, до 25 г/кг - солоноватой, свыше - солёной. Наименее минерализованными водами являются атмосферные осадки (в среднем около 10—20 мг/кг), затем пресные озёра и реки (50-1000 мг/кг). Солёность океана колеблется около 35 г/кг; моря имеют меньшую минерализацию (Чёрное 17-22 г/кг; Балтийское 8-16 г/кг; Каспийское 11-13 г/кг). Минерализация подземных вод вблизи поверхности в условиях избыточного увлажнения составляет до 1 г/кг, в засушливых условиях до 100 г/кг, в глубинных артезианских водах минерализация колеблется в широких пределах. Максимальные концентрации солей наблюдаются в соляных озёрах (до 300 г/кг) и глубокозалегающих подземных водах (до 600 г/кг).

В пресных водах обычно преобладают ионы HCO_3^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} . По мере увеличения общей минерализации растёт концентрация ионов SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ и K^+ . В высокоминерализованных водах преобладают ионы Cl^- и Na^+ , реже Mg^{2+} и очень редко Ca^{2+} . Прочие элементы содержатся в очень малых количествах, хотя почти все естественные элементы периодической системы найдены в природных водах.

Из растворённых газов в природных водах присутствуют азот, кислород, двуокись углерода, благородные газы, редко сероводород и углеводороды. Концентрация органических веществ невелика - в среднем в реках около 20 мг/л, в подземных водоисточниках ещё меньше, в океане около 4 мг/л. Исключение составляют воды болотные и нефтяных месторождений и воды, загрязнённые промышленными и бытовыми стоками, где количество их бывает выше. Качественный состав органических веществ очень разнообразен и включает различные продукты жизнедеятельности организмов, населяющих водоемы, и соединения, образующиеся при распаде их остатков.

Вода наиболее универсальный растворитель. Газы достаточно хорошо в ней растворяются, если способны вступать с ней в химическое взаимодействие (аммиак, сероводород, сернистый газ, двуокись углерода), другие газы мало растворимы. При понижении давления и повышении температуры растворимость газов в воде уменьшается. Многие газы при низких температурах и повышенном давлении не только растворяются в воде, но и образуют кристаллогидраты (аргон, криптон, ксенон, хлор, сероводород, углеводороды и др.). В частности, пропан при 10°C и 0,3 мн/м² (3

кгс/см²) даёт кристаллогидрат $C_3H_8 \cdot 17H_2O$. При уменьшении давления такие гидраты распадаются. Кристаллогидраты многих газообразных веществ, образующиеся при низких температурах, содержат воду в «пустотах» своих кристаллов (так называемые клатраты).

Первоисточниками солей природных вод являются вещества, образующиеся при химическом выветривании изверженных пород (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ и др.), и вещества, выделявшиеся на протяжении всей истории Земли из её недр (CO_2 , SO_2 , HCl , NH_3 и др.).

1.11.1.2 Вода – физические свойства

Многие физические свойства воды обнаруживают существенные аномалии. Как известно, свойства однотипных химических соединений у элементов, находящихся в одной и той же группе периодической системы Менделеева, изменяются закономерно. В ряду водородных соединений элементов VI группы (H_2Te , H_2Se , H_2S , H_2O) температуры плавления и кипения закономерно уменьшаются лишь у первых трёх; для воды эти температуры аномально высоки.

Плотность воды в интервале $100-4^\circ C$ нормально возрастает, как и у огромного большинства других жидкостей. Однако, достигнув максимального значения $1,0 \text{ г/см}^3$ при $+3,98^\circ C$, при дальнейшем охлаждении уменьшается, а при замерзании скачкообразно падает, тогда как почти у всех остальных веществ кристаллизация сопровождается увеличением плотности. Вода способна к значительному переохлаждению, т. е. может оставаться в жидком состоянии ниже температуры плавления (даже при $-30^\circ C$). Удельная теплоёмкость, удельная теплота плавления и кипения у воды аномально высоки по сравнению с другими веществами, причём удельная теплоёмкость минимальна при $40^\circ C$. Вязкость воды с ростом давления уменьшается, а не повышается, как следовало бы ожидать по аналогии с другими жидкостями, а сжимаемость крайне невелика, причём с ростом температуры уменьшается. Важнейшие физические свойства воды приведены в таблице 44.

1.11.2 Антропогенные изменения состава вод гидросферы

Воде принадлежит важнейшая роль в геологической истории Земли и возникновении жизни, в формировании физической и

химической среды, климата и погоды на нашей планете.

Таблица 44 - Физические свойства воды

Свойство	Значение
Плотность, $г/см^3$	
лёд	0,9168 (0°C)
жидкость	0,99987 (0°C) 1,0000 (3,98°C) 0,99823 (20°C)
пар насыщенный	0,5977 $кг/м^3$ (100°C)
Температура плавления	0°C
Температура кипения	100°C
Критическая температура	374,15°C
Критическое давление	218,53 $кгс/см^2$
Критическая плотность	0,325 $г/см^3$
Теплота плавления	79,7 $кал/г$
Теплота испарения	539 $кал/г$ (100°C)
Удельная теплопроводность, $кал/(см·сек·град)$	
лёд	$5,6 \cdot 10^{-3}$ (0°C)
жидкость	$1,43 \cdot 10^{-3}$ (0°C) $1,54 \cdot 10^{-3}$ (45°C)
пар насыщенный	$5,51 \cdot 10^{-5}$ (100°C)
Удельная электропроводность, $ом^{-1}·см^{-1}$	
лёд	$0,4 \cdot 10^{-8}$ (0°C)
жидкость	$1,47 \cdot 10^{-8}$ (0°C) $4,41 \cdot 10^{-8}$ (18°C) $18,9 \cdot 10^{-8}$ (50°C)
Удельная теплоёмкость $кал/(г·град)$	
жидкость	1,00 (15°C)
пар насыщенный	0,487 (100°C)
Диэлектрическая проницаемость	
лёд	74,6 (°C)
жидкость	81,0 (20°C)
пар насыщенный	1,007 (145°C)
Вязкость, $спз$	
жидкость	1,7921 (0°C) 0,284 (100°C)
Поверхностное натяжение жидкой воды на границе с воздухом, $дин/см$	74,64 (0°C) 62,61 (80°C)

Скорость звука в воде	1,496 м/сек (25°С)
-----------------------	--------------------

Без воды невозможно существование живых организмов, она обязательный компонент практически всех технологических процессов - как сельскохозяйственного, так и промышленного производства. Первые водные интоксикации были отмечены во 2-й половине 19 в. в Западной Европе (свинцовые «эпидемии») вследствие применения свинцовых труб в водопроводной технике. Свинец обнаруживается и в подземных источниках, в концентрациях, которые не безразличны для организма из-за длительного действия.

Среди химических веществ, обнаруживаемых в питьевой воде, могут встречаться также вещества, которые в небольших концентрациях изменяют ее органолептические свойства (запах, вкус, прозрачность и пр.).

Наиболее часто органолептические свойства воды изменяют химические вещества, содержащиеся в природных водах (соли общей минерализации, железо, марганец, медь, цинк и др.), остаточные количества соединений, используемые как реагенты при обработке воды, а также промышленные загрязнения водоёмов.

Для собственных нужд и для технического использования человеку необходима пресная вода, ее содержание в общем объеме гидросферы оценивается величиной порядка 3%, доступное количество пресной воды значительно меньше. Неудивительно, что химический состав вод, после их использования, или вследствие сбросов отработанных вод значительно изменяется.

В качестве примера приведем изменение состава воды р. Иртыш (рис. 27.) со среднегодовым многолетним расходом 800-900 м³/сек. Река Иртыш является единственной водной артерией, пересекающей её территорию с юга и юго-востока на север и северо-запад на протяжении более 500 км. Она принадлежит к типу рек со смешанным питанием: в верхней части преимущественно горно-снеговое и ледниковое, в средней – атмосферное и грунтовое. В связи с этим режим реки определяется в основном от таяния снегов на равнине и в предгорьях Алтая от таяния ледников в горах и дождей.

Годовой объем стока р.Иртыш при 95% обеспеченности в пределах области составляет 25,63 тыс. км³/год. Загрязненность реки Иртыш в пределах Павлодарской области контролируется лабораторией Павлодарского областного территориального управления ООС на участке начиная от Южного водозабора, расположенного в 3,5 км выше города Павлодара и заканчивая в районе с. Мичурина, в 18 км ниже по течению реки.

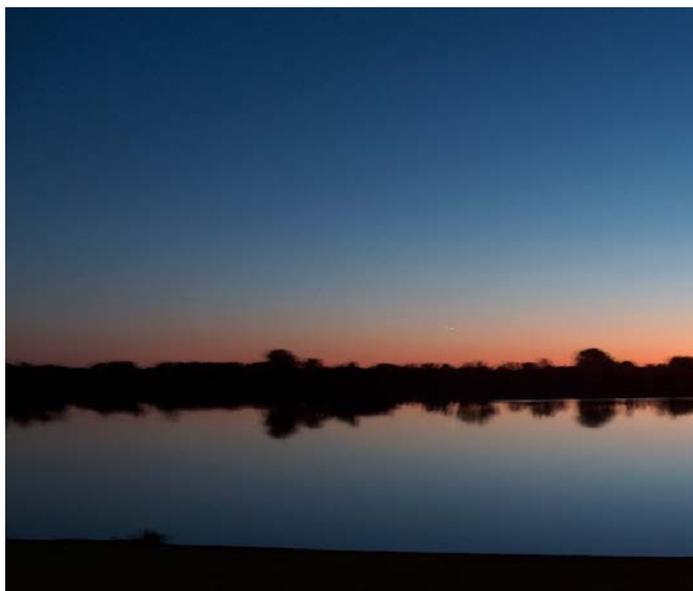


Рисунок 27 – Река Иртыш вблизи г. Павлодар

Расчет значения ИЗВ для р. Иртыш проводился по 7 контрольным точкам (таблица 45.). Значение ИЗВ для р. Иртыш в пределах Павлодара и Павлодарского района в 2002 г. равно 1,44, что позволяет характеризовать р. Иртыш как водоем 3 класса качества воды, умеренно загрязненная. Контроль состояния р. Иртыш в пределах области, по данным специалистов ДГП "Казгидромет", показал превышение содержания в воде практически всех контролируемых ингредиентов (таблица 46.).

Таблица 46 - Загрязнение р. Иртыш в 2002 г., мг/л

Ингредиенты	ПДК, мг/л	Показатели	
		Мах.	Мин.
Медь	0,001	0,0034	0,001
Цинк	0,01	0,014	0,0088
Нефтепродукты	0,05	0,17	0,13
Марганец	0,01	0,19	0,0056
Железо	0,1	0,19	0,15

Зарегулированность водосброса каскадами ГЭС в верховьях р. Иртыш неблагоприятно сказывается на состоянии поймы, так как река покрывает 87 % потребности области в воде. Нерегулярные и отличающиеся по длительности и срокам от естественных, разливы обедняют пойму, уменьшается численность рыбы в Иртыше. Отсутствие питьевой воды для населения и скота в сельских районах, а также концентрация сельхозтоваропроизводителей в прибрежных селах усиливает нагрузку на пойму р. Иртыш.

1.11.2 Элементы атмосферы

Воздух, естественная смесь газов, главным образом азота и кислорода, составляющая земную атмосферу. Под действием воздуха и воды совершаются важнейшие геологические процессы на поверхности Земли, формируется погода и климат. Воздух является источником кислорода, необходимого для нормального существования подавляющего числа живых организмов. В сухом состоянии в нем имеются следующие газы (% по объёму): азот N_2 - 78,09; кислород - O_2 20,95; аргон - Ar 0,93; углекислый газ CO_2 - 0,03. В нем содержится очень небольшое количество остальных инертных газов, а также водорода H_2 , озона O_3 , окислов азота, окиси углерода CO, аммиака NH_3 , метана CH_4 , сернистого газа SO_2 и других (таблица 47.).

Средняя молекулярная масса сухого воздуха равна 28,9644. Содержание в воздухе азота, кислорода и инертных газов практически постоянно, причём постоянная концентрация O_2 (и отчасти N_2) поддерживается растительным миром Земли. Содержание углекислого газа, окислов азота, сернистых соединений существенно колеблется (в частности, возрастает вблизи больших городов и промышленных предприятий). Содержание воды также непостоянно и может составлять от 0,00002 до 3% по объёму. В воздухе всегда находится большое число мелких твёрдых частичек - пылинок (от нескольких млн. в $1 м^3$ чистого комнатного до 100-300 млн. в $1 м^3$ воздуха больших городов).

Такие частички зачастую служат центрами конденсации атмосферной влаги и являются причиной образования туманов. Воздух проникает в почву, составляя от 10 до 23-28% её объёма. Почвенный воздух, благодаря биологическим процессам в почве, существенно отличается от воздуха атмосферы по составу; он содержит (по объёму): 78-80% O_2 , 0,1-20,0% N_2 и 0,1-15,0% CO_2 .

Таблица 47 - Химический состав сухого атмосферного воздуха у земной поверхности

Газ	Объемная концентрация (%)	Молекулярная масса
Азот	78,084	28,0134
Кислород	20,9476	31,9988
Аргон	0,934	39,948
Углекислый газ	0,0314	44,00995
Неон	0,001818	20,179
Гелий	0,000524	4,0026
Метан	0,0002	16,04303
Криптон	0,000114	83,80
Водород	0,00005	2,01594
Закись азота	0,00005	44,0128
Ксенон	0,0000087	131,30
Двуокись серы	От 0 до 0,0001	64,0628
Озон	От 0 до 0,000007	
	летом	
	От 0 до 0,000002	
	зимой	
Двуокись азота	От 0 до 0,000002	47,9982
Аммиак	Следы	46,0055
Окись углерода	Следы	17,03061
Йод	Следы	28,01055

1.11.2.1 Физические свойства воздуха

Давление воздуха при 0°С на уровне моря 101325 н/м² (1,01325 б, 1 ат, 760 мм рт. ст.); в этих условиях масса одного его литра равна 1,29 г. Для большинства практических целей воздух можно рассматривать как идеальный газ; в частности, парциальное давление каждого газа, входящего в его состав, не зависит от присутствия других компонентов. Критическая температура -140,7°С, критическое давление 3,7 Мн/м².

Приведенные ниже свойства воздуха даны при давлении 101325 н/м² (нормальное давление). Удельная теплоёмкость при постоянном давлении C_p - $10,045 \cdot 10^3$ дж/(кг·К), в интервале 0-100°С, а при постоянном объёме C_v - $8,3710 \cdot 10^3$ дж/(кг·К), в интервале 0-1500°С. Коэффициент теплопроводности - 0,024276 вт/(м·К), при 0°С и 0,030136 вт/(м·К), при температуре 100°С; коэффициент теплового

расширения - 0,003670 (0-100°C). Вязкость - 0,000171 (0°C) и 0,000181 (20°C) мн·сек/м² (спз). Степень сжимаемости $z = pV/p_0V_0$ 1,00060 (0°C), 1,09218 (25°C), 1,18376 (50°C); показатель преломления - 1,00029; диэлектрическая проницаемость - 1,000059 (0°C). Растворимость в воде (в см³ на 1 л воды) 29,18 (0°C) и 18,68 (20°C). Благодаря тому, что растворимость кислорода в воде несколько выше, чем азота, соотношение этих газов при растворении в воде изменяется и составляет соответственно 35% и 65%. Скорость звука в воздухе при 0°C около 330 м/сек.

Воздух в жидком состоянии - голубоватая жидкость с плотностью 0,96 г/см³ (при -192°C и нормальном давлении). Свободно испаряющийся при нормальном давлении жидкий воздух имеет температуру около -190°C. Состав его непостоянен, так как азот (и аргон) улетучивается быстрее кислорода.

1.11.2.2 Физиолого-гигиеническое значение воздуха

Колебания содержания азота и кислорода в атмосфере незначительны и не оказывают существенного влияния на организм человека. Для нормальной жизнедеятельности человека важен процентный состав, в частности парциальное давление кислорода. Над уровнем моря оно составляет 21331,5 н/м² (160 мм рт. ст.), при его уменьшении до 18665,1 н/м² (140 мм рт. ст.) появляются первые признаки кислородной недостаточности, которые легко компенсируются у здоровых людей учащением и углублением дыхания, ускорением кровотока, увеличением количества эритроцитов и т.д. При уменьшении парциального давления до 14 665,4 н/м² (110 мм рт. ст.) компенсация становится недостаточной и появляются признаки гипоксии, а уменьшение его до 6 666,1-7 999,3 н/м² (50-60 мм рт. ст.) опасно для жизни. Повышение парциального давления кислорода вплоть до дыхания чистым кислородом (парциальное давление 101325 н/м² - 760 мм рт. ст.) переносится здоровыми людьми без отрицательных последствий.

При обычном парциальном давлении азот инертен. Увеличение его парциального давления до 0,8-1,2 Мн/м² (8-12 ат) приводит к проявлению наркотического действия. Значительное увеличение процентного содержания азота в воздухе (до 93% и более) вследствие уменьшения парциального давления кислорода может привести к аноксемии и даже смерти.

Содержание углекислого газа в атмосфере составляет обычно

0,03- 0,04% по объёму. Некоторое повышение его концентрации в воздухе промышленных центров несущественно для организма. Важна физиологическая роль углекислого газа как возбудителя дыхательного центра в организме животного. При высоких концентрациях углекислого газа и снижении парциального давления кислорода может наступить асфиксия. При содержании в воздухе 14-15% CO_2 может наступить смерть от паралича дыхательного центра. Увеличение концентрации CO_2 в помещениях происходит в основном за счёт дыхания и жизнедеятельности людей (взрослый человек в покое при 18-20°C выделяет около 20 л CO_2 в час). Содержание CO_2 в жилых помещениях не должно превышать 0,1%. Находящиеся в незначительном количестве в атмосфере инертные газы - аргон, гелий, неон, криптон, ксенон при нормальном давлении индифферентны для организма. Обнаруживаемые в атмосфере в ничтожных концентрациях радиоактивные газы радон и его изотопы - актинон и торон, имеющие малый период полураспада, не оказывают существенного воздействия на человека.

1.11.2.3 Антропогенное изменение состава воздуха

Рост масштабов хозяйственной деятельности увеличивает загрязнение воздуха. Развитие промышленности, энергетики, транспорта приводит к повышению содержания в воздухе углекислого газа (на 0,2% от имеющегося в воздухе количества ежегодно) и ряда других газов. Metallургические и химические предприятия и ТЭЦ поставляют в атмосферу сернистый газ, окислы азота, сероводород, галогены и их соединения. Другим важным источником действия на состав воздуха является автотранспорт. По некоторым подсчётам, 1 тыс. автомобилей в день выбрасывает с выхлопными газами в окружающую среду 3,2 т окиси углерода, от 200 до 400 кг других продуктов неполного сгорания топлива, 50-150 кг соединений азота.

Очень велико поступление в воздух твёрдых частиц. Промышленные предприятия, ТЭЦ, автотранспорт, лесные пожары, пыльные бури, возникающие в результате эрозии почв при нарушающем землепользовании, повышают концентрацию твёрдых частиц (пыли и дыма) в воздухе настолько, что это существенно (на 20-40%) понижает солнечную радиацию, дошедшую до поверхности земли в районе больших городов. О масштабах таких процессов можно судить хотя бы по тому, что пыльные бури 1930-34 в США унесли до 25 см почвенного слоя и перенесли около 200 млн. т пыли

на расстояния до 1000 км.

Воздействие на атмосферу приводит к ухудшению условий жизни человека, животных и растений. Вредное действие на живые организмы при этом вызывается не только первичными компонентами промышленных выбросов, но и образующимися из них новыми токсическими веществами, так называемыми фотооксидантами. Загрязнение воздуха иногда может достигать таких масштабов, что приводит к увеличению заболеваемости и смертности населения. Особую опасность представляют радиоактивные загрязнения; вследствие постоянных движений воздушных масс они могут иметь глобальный характер. Некоторые загрязнения вызывают профессиональные заболевания. В качестве обязательных мероприятий при планировке и застройке городов и посёлков и размещении промышленных объектов предусматривается создание санитарно-защитных зон (разрывов), вынос вредных в санитарном отношении промышленных предприятий за пределы жилых районов.

В Павлодарской области, имеющей достаточно развитую промышленность основная масса загрязняющих веществ поступает от предприятий теплоэнергетики и металлургической промышленности, и составляет примерно 18,0% республиканского объема. На территории Павлодарской области находится 3 крупных города - Павлодар, Экибастуз и Аксу где функционирует ряд крупнейших предприятий Республики Казахстан:

- г. Павлодар: АО «Алюминий Казахстана» (ПАЗ и ТЭЦ-1), ТОО «ПТЭЦ-2», ТОО «ПТЭЦ-3», ЗЛО «Павлодарский нефтехимический завод», ОАО «Павлодарский химзавод», ОАО «Казахстантрактор».

- г. Экибастуз: ОАО «Экибастузская станция ГРЭС-2», ТОО «АЕ Экибастуз», ТОО «Богатырь Аксес Комир», разрез «Восточный» ОАО «ЕЭК», ТОО «Экибастузская ТЭЦ».

- г. Аксу: «Аксуский завод ферросплавов» ТНК «Казхром» и Аксуская ТЭС ОАО «Единая энергетическая корпорация».

Основная масса выбросов поступает от городов Павлодарской области (2002 г.): Экибастуз (43%), Аксу (30 %) и Павлодар (25%), на долю всех остальных районов области приходится лишь немногим более 1% выбросов.

Как видно из рисунка 28, в г. Павлодар превышения максимальной разовой ПДК отмечались по следующим примесям:

Оксид углерода. Максимальная концентрация достигла 4,4 ПДК,. Повторяемость превышений по городу составила 2%.

Диоксид азота. Максимальная концентрация составила 1,9 ПДК, Повторяемость превышений по городу составила 1%.

Фенол. Максимальная концентрация достигала 1,1 ПДК, Повторяемость превышений по городу составила 0,1%.

Хлористый водород. Максимальная концентрация достигала 4,4 ПДК. Повторяемость превышений по городу составила 4%.

В г. Экибастуз превышения максимальной разовой ПДК наблюдались по пыли, оксиду углерода, диоксиду азота, по остальным примесям превышения ПДК не отмечалось.

Пыль. Максимальная концентрация достигала 1,8 ПДК. Повторяемость превышений по городу составила 1%.

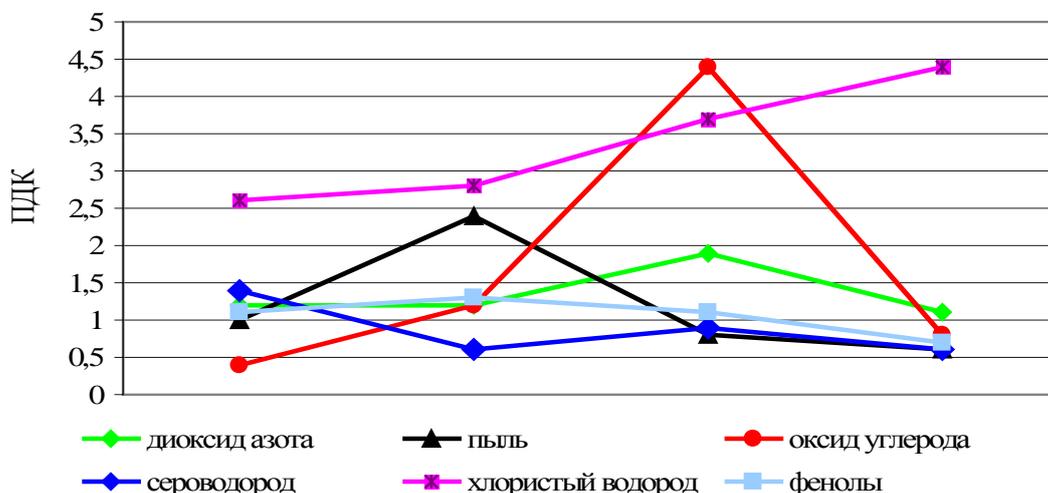


Рисунок 28 - Павлодар. Поступление в воздух некоторых ингредиентов в единицах ПДК. Приведены данные за 2001 – 2002 гг. (по данным ДГП "Казгидромет")

Оксид углерода. Максимальная концентрация достигала 1,4 ПДК. Повторяемость превышений по городу составила 2%.

Диоксид азота. Максимальная концентрация составила 1,4 ПДК. Повторяемость превышений по городу составила 1%.

На рисунке 29 показана динамика уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Павлодаре и Екибастузе. Как видно из графика, средние уровни загрязнения стабильно высокие, превышают или находятся на уровне 2 ПДК, что говорит о наличии

серьезных проблем в состоянии атмосферного воздуха.

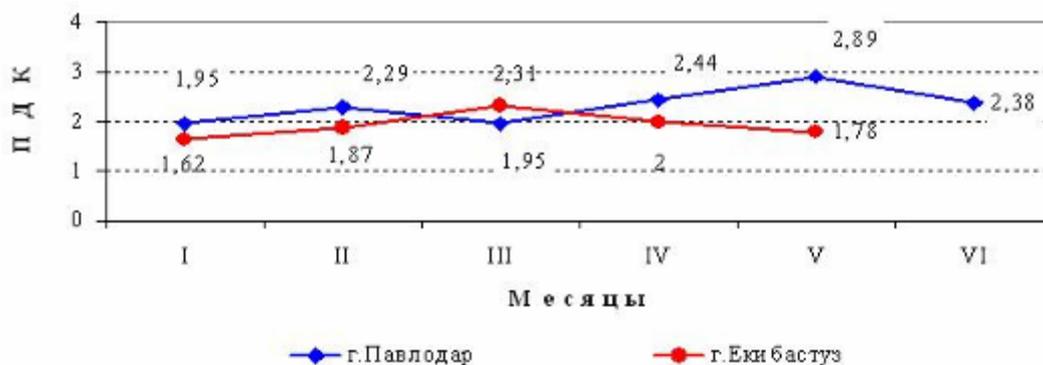


Рисунок 29 - Изменения уровня загрязнения атмосферного воздуха за 1 полугодие 2002 г. (по данным ДГП "Казгидромет")

1.12 Антропогенные биогеохимические провинции

Значительную биогеохимическую роль выполняет в результате своей геологической деятельности человек. Ежегодно из недр Земли извлекается до нескольких десятков т горной породы на душу населения. Человек влияет на химический и изотопный состав атмосферы, биосферы и земной коры, и это влияние с каждым столетием, а нынешнем тысячелетии с каждым годом многократно возрастает. Несмотря на то, что антропогенное действие на элементы биосферы носит, как правило, локальный характер, реже принимает региональные масштабы, характер глобального воздействия принимает плотность таких местных изменений ландшафтов, зачастую превышающих емкость вмещающих экосистем.

Одним из таких локальных негативных воздействий на окружающую среду является загрязнение окружающей среды Павлодарским химическим заводом ртутью. Эта проблема получила большой общественный резонанс, как в Казахстане, так и за его пределами, поэтому были предприняты меры к снижению последствий поступления ртути в элементы биосферы. Краткая история вопроса такова: с 1975 по 1993 г.г. на ПХЗ действовало производство хлора и каустической соды ртутным способом. В цехе электролиза были установлены электролизеры типа СДМ-150/7.3, в каждый из них загружалось 2400-2750 кг ртути. По проекту, в одном

электролизере должно было находиться - 2400 кг ртути, по регламенту – 2750 кг. Фактическая закладка, контролировалась 1 раз в квартал методом радиоизотопного разбавления.

Номинальная токовая нагрузка составляла 150 кА, рабочая температура растворов 75-100⁰С. Проектная мощность производства – 112,7 тыс. тонн 100% каустической соды и 100,0 тыс. тонн хлора. Источники сырья: поваренная соль - привозная Баскунчакского солепромысла, вода - из р. Иртыш. Отличительной особенностью принятой технологии производства каустической соды являлось то, что в качестве катода в электролизерах применялась металлическая ртуть, которая циркулировала с помощью насоса в замкнутой системе электролизер - разлагатель. Электролизу подвергался водный раствор поваренной соли в горизонтальных электролизерах с ртутным катодом и вертикальных разлагателях амальгамы. При этом из электролизера в разлагатель выводилась амальгама натрия где, взаимодействуя с водой, образовывался 46% раствор каустической соды с образованием водорода и щелочи.

В процессе эксплуатации электролизеров происходили потери металлической ртути:

с продуктами электролиза (водородом, хлором, каустической содой, отработанным рассолом-анолитом);

во входном и выходном карманах электролизера (с амальгамным маслом, графитовым шламом, абгазами, промывной водой);

во время ремонта - промывка и отбивка ртути с деталей электролизеров, испарение ее с открытых поверхностей, удаление зартученных деталей (прокладки, аноды, насадки, карманы, рамы, насосы, днища, крышки, разлагатели и т.д.);

за счет течей из электролизеров.

Ртуть, выводящаяся из электролизеров, частично снова возвращалась в ванны (сбор ртути из ловушек и пролитой ртути с пола, переработка амальгамного масла, шлама). Однако имели место и безвозвратные потери ртути с бедными шламами, выбросами ртути через вентиляционные фонари и сточными водами. Структура потерь ртути представлена по результатам обследований, неоднократно проводившихся специалистами Киевского филиала ГОСНИИХЛОРПРОЕКТа, и с учетом величины усредненных потерь ртути в таблице 48.

Прямое поступление ртути в почву происходило непосредственно на территории производства, на промплощадке, при

экстремальных ситуациях значительные объемы ртути проникали в бетонное основание и в нижние горизонты, где объемы ртути оцениваются в 850-910 т. Общая площадь прямого загрязнения составила более 520 тысяч квадратных метров. Средняя концентрация ртути в верхнем горизонте почвы составляла 14 мг/кг, что в 7 раз превышает допустимые концентрации. Общая масса ртути этого слоя составляла около 3 тонн. Поступление ртути отмечалось на глубине свыше 4 м, но уже на расстоянии 1,5 м от поверхности почвы ее концентрация уменьшалась до значений ПДК в почве. Общая масса ртути на территории промплощадки в четырехметровой толщине грунта оценивается массой в 10 тонн.

Таблица 48 - Распределение потерь ртути по статьям, (в кг/т)

Статья потерь	Удельный расход ртути		% факт
	План	Факт	
Каустическая сода	0,0005	0,0003-0,0007	0,02-0,04
Водород	0,000003	0,0035-0,052	0,2-3,9
Хлор	0,00006	0,00006	0,004
Абгазы	0,000004	0,00003	0,002
Вентвыбросы	0,00083	0,018-0,03	1,1-1,9
Сточные воды	0,000005	0,0001-0,0052	0,006-0,3
Рассольные шламы	0,129	0,188	11,8
Шламы, направляемые на ртутный комбинат	(не опр.)	0,037-0,042	2,3-2,6
Шламы, накапливаемые в производстве	(не опр.)	0,012	0,75
Неучтенные (механические) потери	(не опр.)	1,249-1,330	78,6-83,7
Суммарные потери средние	(не опр.)	1,589	100

Загрязненными ртутью были также элементы строительных конструкций цехов, связанных с производственными процессами,

описанными выше. Содержание ртути в бетоне, кирпиче, штукатурке и других элементах колебалось от 0,2 до 50 мг/кг. Повышенным источником опасности оказалось бетонное основание полов на площадке более 7 тысяч квадратных метров, где в объеме 3,8 тысяч кубических метров депонировано 104 тонны ртути. В грунтах на площади 8,5 квадратных метра в объеме около 13 тысяч кубических метров было накоплено около 860 т ртути. Основная масса ртути в грунте и элементах конструкций находится в металлическом состоянии.

Высокий фон (от 1 до 50 ПДК ртутного загрязнения почв в слое 0-50 см на площади около 1 км² вокруг бывшего производства хлора и каустика связан, по мнению Илющенко М.А. с высокой подвижностью форм ртути, составляющих загрязнение.

Работы, проведенные по консервации этого «антропогенного месторождения», были основаны на строительстве противofильтрационной стены в грунте (рисунок 30.), для предотвращения попадания поллютантов в окружающие



Рисунок 30 - Устройство противofильтрационной стены в грунте. Пояснение в тексте

грунтовые воды. В результате реализации этого проекта вокруг источников интенсивного ртутного загрязнения были созданы полуметровые стены из глины, в нижней части соединенные со слоем водоупорной глины, а на поверхности закрытые слоем глины, для

предотвращения перераспределения загрязнителя с потоками воды и дефляционными процессами. На рисунке 31. показан процесс строительства «стены в грунте» - противофильтрационной завесы, показанной на рисунке 30.

Другим источником прямого поступления ртути в почву служил шлам, который поступал в одну из секций пруда – испарителя. При высыхании воды в прудах испарителях, неорганические соединения ртути были подвержены дефляционным процессам и служили источником вторичного загрязнения территории, прилегающей к озеру Балкылдак, так и вод самого озера. Очаг ртутного загрязнения почвы в этом районе образован за счет ветрового переноса дисперсных твердых ртутьсодержащих отходов и имеет поверхностный характер.



Рисунок 31 - Строительство противофильтрационной завесы (стена в грунте) вокруг прудов испарителей

Это озеро – основной наземный водоем с высоким содержанием ртути. За все время, связанное с данным производством в озеро Балкылдак площадью 18 км² и объемом 74 млн. кубометров сброшено 10-15 т ртути. В начале эксплуатационных работ было слито большое количество неочищенных от ртути стоков – это привело к повышению концентрации в воде до 10 мг/л, что в тысячи раз выше ПДК, в донных отложениях концентрация достигала 1,2 г/кг. Затем сброс ртути значительно уменьшился - до 0,35 т/год, благодаря адсорбции загрязнителя илом, содержание ртути в воде понизилось до 0,001-

0,005 мг/л.

Основными источниками загрязнения поверхностных вод, в том числе и р. Иртыш являются:

- атмосферные осадки, содержащие ртуть;
- загрязненная почва (при ветровом переносе);
- загрязненная почва (смыв ливневыми стоками).

В зависимости от расстояния до источника ртутных выбросов на каждый квадратный километр поверхности, в том числе и водоемов, осаждается от 0,3 до 51 кг ртути. Еще больше ртути поступает в водоемы с ливневыми стоками. Однако существенного повышения концентрации ртути, где преобладают только атмосферные поступления, не обнаружено, что связано с процессами естественного самоочищения вод.

Поверхностные воды в спецпрудах, скапливающиеся из-за атмосферных осадков, были загрязнены ртутью до уровня 50 мг/л (100 000 ПДК), в карьерах и котлованах на юг от спецпрудов - от 3 до 30 мкг/л (6-60 ПДК), в канаве вдоль автодороги к западной дамбе накопителя Балкылдак - от 2 до 18 мкг/л (4-36 ПДК), накопителе Балкылдак от 3,5 мкг/л (7 ПДК) около спецпрудов до 100-300 нг/л (0,2-0,6 ПДК) вдоль остального побережья. Содержание ртути в воде недостроенного аварийного канала, протянувшегося от накопителя Балкылдак к реке Иртыш, - не более 10 нг/л (0,02 ПДК), в старицах Иртыша около сс. Павлодарское и Шауке - не более 9 нг/л (0,018 ПДК), в реке Иртыш - ниже предела обнаружения используемой методики анализа 2 нг/л (0,004 ПДК).

Ртуть в подземных водах имеет различное происхождение. Значительная ее часть связана с потерями во время перекачки сточных вод в пруд-испаритель, просачиванием загрязненных поверхностных вод и вымыванием ртути из загрязненных почв на дневной поверхности. Фронт загрязнения подземных вод расширяется до 50 м/год, при этом скорость движения ртути в разных горизонтах различна и изменяется в среднем от 12 до 47 м/год.

Обследование существующих наблюдательных и эксплуатационных скважин показало, что распространение подземных вод с содержанием ртути выше ПДК (500 нг/л) ограничено территорией промплощадки, местами прохождения канализационных сетей и районом прудов испарителей. В дальнейшем был обнаружен подземный поток воды с высоким содержанием ртути, распространяющийся от основного очага ртутного загрязнения в северо-северо-западном направлении. Его максимальная ширина

составляла 350 м, а протяженность – более 2 км, при этом движение загрязненных вод происходит над слоем водоупорных глин павлодарской свиты на глубине от 6 до 14 м в зависимости от рельефа местности и поверхности водоупора. Концентрации ртути в шлейфе изменялись от 65 мкг/л.

Накопители, золоотвал и оросительная система становятся интенсивными источниками питания подземных вод. В настоящее время техногенные факторы являются доминирующими и во многом определяют режим подземных вод на территории, подвергшейся интенсивному антропогенному воздействию. Мощный поток подземных вод, формирующийся в районе золоотвала ТЭЦ 2 и 3 в результате фильтрационных потерь, проходит через территорию бывшего ПО "Химпром", загрязняется ртутью и переносит ее преимущественно в северо-северо-западном направлении. По результатам моделирования (первый вариант прогноза) установлено, что шлейф загрязнения подземных вод ртутью будет распространяться в северо-северо-западном направлении. Если направление подземных вод не изменится, это не будет представлять серьезной угрозы для жителей с. Павлодарское и реки Иртыш. Вместе с тем будет возможно поступление небольшого количества ртути в недостроенный аварийный сбросной канал, проходящий от накопителя Былкылдак в западном направлении. На рисунке 32. приведена схема подземного распространения ртути с водой.

Второй вариант прогноза, сделанный в результате исследований Илющенко М.А., позволил сделать вывод, что сооружение “стены в грунте” вокруг источника ртути под корпусом 31 не решит полностью проблему улучшения качества подземных вод, так как остается еще один, хотя и менее интенсивный источник загрязнения в районе 6-й насосной станции. Третий вариант прогноза показал, что направление распространения шлейфа ртутного загрязнения подземных вод может измениться при изменении гидрогеологических условий. Прекращение подачи воды на станцию очистки сведет к нулю питание подземных вод на ее территории, что повлияет на конфигурацию поверхности подземных вод и направление их движения. В результате шлейф загрязнения может сместиться к западу и возникнет угроза с. Павлодарскому и реке Иртыш.

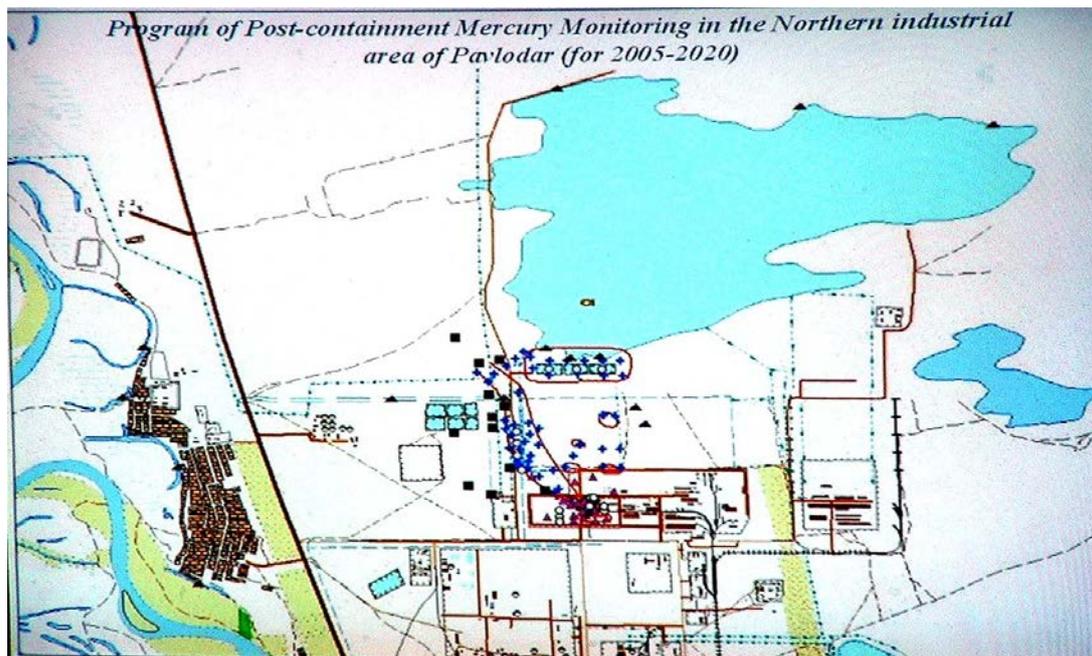


Рисунок 32 - Движение подземных вод, загрязненных ртутью.
(по Илющенко М.А.)

В меньшей степени изучена судьба выбросов ртути в воздух. По ориентировочным данным, за время эксплуатации хлорщелочного производства потери ртути с водородом, абгазами и вентиляционными выбросами составили от 14 до 63 тонн. При этом выбросы ртути в атмосферу с отходящими газами значительно, в 10 и более раз, превышали установленные нормативы, однако в воздухе промплощадки и санитарно-защитной зоны превышений ПДК не наблюдалось. В доступной нам литературе констатировался факт поступления ртути в атмосферу и последующий ее переход в почву. Однако практически не изучались элементы почвы, связывающие ртуть, возможное изменение ее химических форм, а также обменные процессы между ртутью, депонированной в верхнем горизонте почвы и атмосферой.

1.12.1. Антропогенные биогеохимические провинции и поступление элемента в организм

На примере ртутной биогеохимической провинции антропогенного происхождения рассмотрим пути, объемы и формы поступления в организм человека тяжелых металлов. Модель

переноса и накопления учитывает степень опасности различных способов и форм поступления и аккумуляции элемента, специфическую реакцию организма.

На рисунке 33. показаны пути перехода ртути от источника

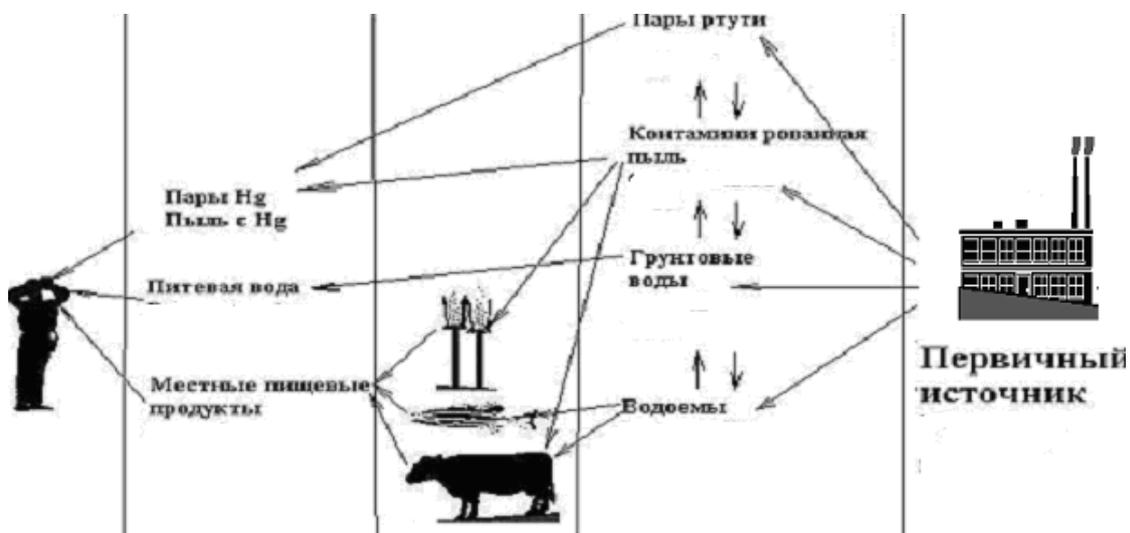


Рисунок 33 - Пути поступления ртути от источника выбросов в организм человека

техногенного загрязнения к человеку. Первичный источник обеспечивает поступление ртути непосредственно или опосредованно во все элементы окружающей среды. При выбросах ртути на ПХЗ, непосредственному загрязнению подвергались атмосфера, почва, поверхностные и подземные воды. Основными формами ртути были металлическая ртуть и ее неорганические соли.

В атмосфере постоянно содержится ртуть, примерно в равных количествах в виде паров и в аэрозольном состоянии. Время нахождения ртутных паров в атмосфере колеблется от 0,4 до 3 лет. В слабозагрязненном воздухе концентрация ртути составляет 0,8-1,2 нг/м³, в районах крупных ртутных месторождений - до 240 нг/м³, в районах газовых месторождений - до 70000 нг/м³, в то время как среднее содержание ее в атмосфере 0,5-2,0 нг/м³, а среднесуточная величина ПДК для металлической ртути и ее неорганических соединений, составляет 0,0003 мг/м³. Содержание ртути в воздухе вокруг предприятий, производящих или потребляющих ртуть, на расстоянии до 2 км может превышать ПДК в 4-5 и более раз. В радиусе 5 км от организованного источника выпадает не более 6-10 % валового выброса ртути, около 60 % переносится на расстояние до

100 км. Сочетание высокого давления пара и низкой растворимости в воде способствует переносу Hg в атмосфере на дальние расстояния. Фоновое содержание ртути в атмосфере обусловлено в основном присутствием Hg(0). Она удаляется из атмосферы при сухом выпадении на земную поверхность и мокрым осаждением после окисления Hg(0) и ее перевода в водорастворимую Hg(+2). По оценочным данным за все время эксплуатации хлор-щелочного производства выброс ртути в атмосферу составил от 14 до 63 тонн, выбросы ртути в атмосферу с отходящими газами доходило до 3-4 кг/сутки, что превышало установленные нормативы в десять и более раз.

Ртуть, содержащаяся в воздухе, может попадать в органы дыхания человека и животных в газообразном состоянии, в составе аэрозолей, и с мелкой пылью, адсорбируясь на ее поверхности. Более крупная пыль не проникает в органы дыхания, но может попасть в организм через ротовую полость и продолжить путь через органы пищеварения. Важным фактором является форма ртути. Ее действие на организм усиливается в последовательности: металлическая ртуть – ртуть неорганическая – органическое соединение ртути. ПДК для этих форм соотносятся как: 1 : 7 : 140, в такой же пропорции возрастает и опасность для человека различных форм ртути.

Поступление ртути с воздухом в общей популяции считается незначительным и, за исключением ингаляции паров ртути профессионалами, в основном связано с неорганическими соединениями ртути. Пары ртути при ингаляционном поступлении легко абсорбируются в кровь и распределяются по всем органам. Элементарная ртуть легко проникает в мозг, где окисляется и задерживается, благодаря низкой способности неорганических соединений ртути проникать через гематоэнцефалический барьер. Неорганические соединения ртути попадают в легкие в форме частиц, которые удаляются с помощью мукоцилиарного клиренса. Согласно модели дыхательного тракта МКРЗ, большая часть малорастворимых частиц, поступивших в дыхательные пути за счет ингаляции, посредством механизмов мукоцилиарного клиренса перемещаются в носоглотку, а затем проглатываются. Следовательно, ингаляционное поступление неорганических соединений ртути можно приблизительно приравнять к оральному (пищевому) поступлению.

Таким образом, ингаляционное поступление паров ртути в исследуемой популяции является маловероятным, но, тем не менее, требующим уточнения посредством замеров концентраций ртути в

воздухе. Большая часть ртути, находящаяся в поверхностных слоях почвы на промплощадке, представлена в форме неорганических соединений. Следует оценить возможность ингаляционного поступления неорганической ртути с пылью, приносимой с поверхности загрязненных территорий. Для этого нужно произвести сбор пыли из воздуха в изучаемых населенных пунктах на высоте доступной для ингаляции и исследовать ее на содержание соединений ртути.

При расчете поступлений от паров ртути исходят из допущения, предлагаемого экспертами ВОЗ о том, что 80% ингалируемых паров ртути задерживается в организме. Таким образом, расчет ежедневных поступлений от ингаляции элементарной ртути можно производить по следующей формуле:

$$IDIV = (Cod*Vod+Cid*Vid)*rf,$$

где: IDIV - ежедневное поступление от ингаляции паров ртути;

Cod – концентрация паров ртути в воздухе на открытом пространстве;

Vod – объем суточной вентиляции на открытом пространстве;

Cid – концентрация паров ртути в воздухе в закрытом помещении;

Vid – объем суточной вентиляции в закрытом помещении;

rf – коэффициент задержки, то есть, та часть ингалируемой элементарной ртути, которая задерживается в организме. Принять за 0.8 в соответствии с рекомендациями экспертов ВОЗ.

Ртуть в почвенном покрове распределяется неравномерно, ее концентрации зависят от содержания материнских породах и колеблется в пределах 0,005-1,275 мг/кг для данного региона. ПДК ртути в почве равна 2,1 мг/кг почвы. Распределение ртути по профилю зависит от свойств почв - гранулометрического, количественного и качественного состава органического вещества, рН среды, содержания карбонатов. Большое влияние на закрепление ртути в почве оказывают органические вещества. В одном и том же элементарном ландшафте ртуть в большей степени аккумулируется в обогащенных органикой участках. Вниз по разрезу доля ртути, переходящей в солянокислую вытяжку, увеличивается с уменьшением количества гумуса. Таким образом, процессы перераспределения ртути в малом цикле почва - растение усиливают депонирующую роль почвы и ее значение в

состоянии ртути в окружающей среде.

При изучении влияния гуминовой кислоты (ГК) на загрязнение почвы ртутью выявлено, что в аллювиальной почве при содержании ГК $>0,2$ г/кг в растениях не обнаружена усвоенная ртуть (предел определения $<2,5$ мкг/кг), хотя количество вносимой в почву ртути составило 8 мкг/кг. Количество усваиваемой ртути уменьшается с увеличением содержания ГК в почве. В исследованных почвах установлена значительная положительная корреляционная связь между содержанием ГК и Hg-органической (коэффициент корреляции для красной почвы - 0,974, для аллювиальной - 0,979), что объясняется образованием металлоорганических соединений. Увеличение содержания ГК в почве снижает количество Hg, усваиваемой растениями, именно из-за связывания последней в органический комплекс; это также значительно снижает масштаб выноса Hg из почвы. Эта закономерность особенно четко проявляется в аллювиальной почве с более низким содержанием глинистой фракции. Использование ГК в качестве вещества, контролирующего перенос Hg в сильно загрязненных почвах, предотвращает ее попадание в пищевую цепь. Деятельность микроорганизмов может преобразовать металлоорганический комплекс Hg(II) в Hg(0) с последующей миграцией ртути в атмосферу путем испарения, однако возможен и обратный процесс, окисление ртути и перевод в органическое состояние. Определение формы содержания тяжелых металлов в почве дает возможность прогнозировать их поведение и разработать методики для очистки загрязненных почв.

Длительное сельскохозяйственное использование почв без применения удобрений повышает поступление в растения загрязняющих веществ. Почвы обладают способностью поглощать металло-ионы, но в определенный момент наступает равновесное состояние, когда процессы растворения и осаждения протекают с одинаковой скоростью. Способность почв поддерживать устойчивую концентрацию на постоянном уровне характеризует буферную способность почв в отношении определенного металла или их суммы.

Переход ртути из почвы в растения, зависит от многих параметров, среди которых важную роль играют pH, содержание гумуса и карбонатов в почве и другие факторы. Растения чаще всего содержат ртуть в меньших количествах, чем почвы, но в процессе минерализации растительных остатков возможно накопление ртути в верхних горизонтах. Величина отношения корни/надземная часть

обычно меньше 1. В дерновом горизонте почв наблюдается отчетливое увеличение содержания ртути в надземных и корневых органах растений до 0,018-3,0 мг/кг, с увеличением ее концентрации в почве. Минимальное содержание Hg (0,01-0,02 мг/кг) накапливается в растениях, произрастающих на почвах с низкими концентрациями ртути (до 0,10 мг/кг). Исследования миграции ртути в системе атмосфера - растение - почва показали, что ртуть, поступающая из атмосферы в виде паров, сорбируется хвоей и прочно удерживается ею.

При ПДК для поверхностных вод 0,0005 мг/л концентрации растворенной ртути в природных водах варьируют от наногаммов до микрограммов в литре (для незагрязненных водных экосистем менее 1 мкг/л). При этом в хорошо аэрируемых водах, для которых окислительно-восстановительный потенциал среды $E(h) > 0,5$, преобладает двухвалентная ртуть (в виде Hg(+2) или CH_3Hg^+), а при восстановительных условиях - Hg(0). При интенсивном взаимодействии ртути с твердыми взвешенными частицами размером менее 0,45 мкм доля связанной ртути в 10 тыс. раз больше, чем растворенной. В донных отложениях ртуть практически полностью связана с фракцией частиц диаметром менее 20 мкм. Среднее фоновое содержание растворенной ртути в реках и озерах составляет 0,09 мкг/л и взвешенной ртути - 0,23 мкг/л. Концентрация ртути в воде пруда-испарителя ПХЗ доходила до 10 мг/л.

Поступление ртути с водой в общей популяции незначительно. оно связано в основном с неорганической ртутью (Hg^{++}). Однако анаэробные бактерии в воде могут преобразовывать неорганическую ртуть в метилртуть, которая отличается высокой токсичностью. С этой точки зрения особую опасность для человека и животных могут представлять мелкие пересыхающие озера и временные водоемы. Глубина многих из них незначительна и редко достигает 1 –1.5 м. В большинстве случаев они имеют глубину 40-50 см. Многие озера летом высыхают, превращаясь в соры и солончаки. Чаще всего это небольшие озера, питание которых осуществляется исключительно за счет талых вод. Ртуть, попадающая в такие озера с атмосферными выпадениями или с пылью, претерпевает химические и биохимические преобразования и образующиеся соединения могут оказаться более опасными для животных и человека, чем исходное вещество. После высыхания таких озер, мелкая пыль с адсорбированными соединениями ртути вновь попадает в воздух и, через органы дыхания, в легкие.

Исходя из предварительного анализа форм и путей перехода ртути от первичного источника загрязнений к человеку можно составить модель поступления ртути в организм человека, основа которого представлена на рисунке 33. Поступление ртути может быть связано с контаминированной пищей, водой и воздухом. Однако в общей популяции в обычных условиях основным путем поступления является пищевой за счет употребления рыбы и в меньшей степени в связи с употреблением других продуктов. В рыбе ртуть содержится в форме метилртути, а в других продуктах чаще всего присутствует как элементарная ртуть. При оральном поступлении 94-95% метилртути подвергается всасыванию в кровь.

Расчет поступления ртути в организм может производиться двумя способами. Первый основан на измерении содержания ртути и ее органических и неорганических соединений в воздухе, в воде питьевой и применяемой для приготовления пищи, в продуктах питания. Далее количество ртути в каждой из ее форм и по каждому пути поступления умножается на соответствующий коэффициент абсорбции. Второй способ основан на измерении концентраций ртути в биологических средах организма и расчетах поступления по результатам этих замеров.

Во всех случаях, независимо от пути поступления, негативное действие ртути на организм значительно возрастает при переходе ртути из металлического состояния в неорганическое состояние и еще в более высокой степени, при переходе в органическую ртуть. Из этого следует необходимость учета формы поступающей ртути, для чего введем коэффициенты содержания металлической, неорганической и органической ртути в воздухе, воде и пищевых продуктах:

μ - коэффициент для ртути в металлической форме;

η - коэффициент для неорганической ртути;

ω - коэффициент для органической ртути.

С учетом этого общее поступление ртути в организм можно представить в виде:

$$АН = \mu\omega АН_a + \mu\eta\omega АН_{aa} + \mu\eta\omega АН_{ad} + \mu\eta\omega АН_w + \mu\eta\omega АН_f + \mu\eta\omega АН_s,$$

где: АН – общее поступление ртути в организм,

$\mu\eta\omega АН_a$ - поступление газообразной ртути из воздуха,

$\mu\eta\omega АН_{aa}$ – поступление аэрозольной ртути с воздухом,

$\mu\eta\text{oAN}_{\text{ad}}$ – поступление ртути, адсорбированной на мельчайших частицах пыли, с воздухом,

$\mu\eta\text{oAN}_{\text{w}}$ - поступление ртути с водой,

$\mu\eta\text{oAN}_{\text{f}}$ - поступление ртути с пищей,

$\mu\eta\text{oAN}_{\text{s}}$ – поступление ртути через кожу.

Во всех случаях коэффициенты $\mu\eta\text{o}$ - отражают содержание той или иной формы ртути в объектах исследования.

В первом и втором членах данной формулы значимую роль играет металлическая ртуть, в третьем – могут быть представлены все формы, при поступлении с водой значимыми могут быть металлическая и неорганическая формы ртути, в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала среды. При поступлении ртути с пищей основные формы ртути – неорганическая и органическая. Последний член формулы в данном случае не имеет значимой величины и может быть опущен. Данная модель учитывает поступление ртути в организм из всех возможных источников и позволяет оценить содержание ртути в элементах окружающей среды и ее переход из одной формы в другую.

Заключение

Представления о роли химических элементов в жизнедеятельности организмов претерпевали значительные изменения даже в последние десятилетия. Вещества, считавшиеся, безусловно вредными, оказывались жизненно необходимыми. Благодаря биохимическим исследованиям была установлена роль многих металлов, относящихся к тяжелым, и показана их роль в деятельности ферментов.

Биогеохимия - сравнительно новое научное направление, возникшее на стыке между геологией, химией и биологией. Общим объектом исследования являются химические элементы и их движение в различных объектах биосферы. Распространенность элементов, их количественные величины, участие в метаболических процессах живых организмов зависят от происхождения, строения, химических свойств и физических характеристик, определяющих роль и значение в системах различных уровней.

В данном пособии, являющимся первой частью, представлена общая картина возникновения химических элементов и их распространения в природе. Прослеживается общность вещественного мира, зависимость кларков веществ от их химических и физических свойств элементов и их соединений, а также от условий формирования литосферы. Значительную роль в создании элементного состава атмосферы, гидросферы, педосферы играют живые организмы. Благодаря их влиянию свойства среды обитания постоянно изменяются. Все возрастающую роль в изменениях свойств биосферы играет человечество, которое становится существенным геологическим фактором, изменяющим, в первую очередь, среду обитания самого человека.

Литература

Основная

- 1 Виноградов А.П. Проблемы геохимии и космохимии. — М. : Наука, — 1988. — 336 с.
- 2 Безуглова О.С., Орлов Д.С. Биогеохимия. — Москва. : Высшая школа, 1997. — 323 с.
- 3 Добровольский В.В. Геология. — М.: Владос, 2001. — 320 с.
- 4 Добровольский В.В. Основы биогеохимии. — М. : Академия, 2003. — 400 с.
- 5 Добровольский В.В. Основы биогеохимии. — Москва. : Высшая школа, 1998. — 411 с.
- 6 Жолнин А.В. Химия биогенных элементов. — Челябинск: ЧГМА, 2001. — 65 с.
- 7 Ковда В.А. Биогеохимические циклы в биосфере. — М. : 1976. — 298 с.

Дополнительная

- 1 Глазовская М.А. Методологические основы устойчивости почв к техногенному воздействию. — М. : МГУ, 1997. — 247 с.
- 2 Добровольский В.В. Глобальные циклы миграции тяжелых металлов. — М. : 1991. — 96 с.
- 3 Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. — М. : 1985. — 256 с.
- 4 Перельман А.И. Геохимия биосферы. — М. : 1973. — 344 с.
- 5 Перельман А.И. Геохимия ландшафта. — М. : 1966. — 391 с.
- 6 Левицкий В.И. Петрология и геохимия метасоматоза при формировании континентальной коры. — Новосибирск: Гео, 2005.
- 7 Кальвин М. Химическая эволюция. — М. : Мир, 1971. — 240 с.
- 8 Перельман А.И. Очерки геохимии ландшафта. — М. : Географгиз, 1955. — 392 с.
- 9 Комаскелла В. Самоцветы. — М. : Омега, 2002. — 192. с.

**Приложение А. Фотографии и краткие характеристики
некоторых минералов.**

Большинство фотографий взяты из книги «Самоцветы»,
приведенной в списке литературы, часть сделаны авторами в музее
ПГУ

Класс I - силикаты

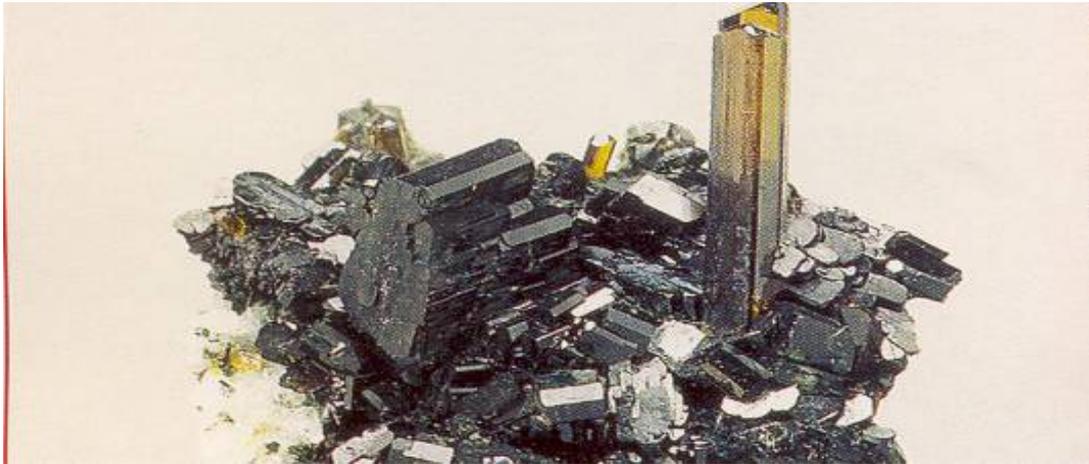


Рисунок А. 1 - Авгит. Формула: $(Ca, Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Ti, Al)_2\{Si, Al\}_6O_{20}$. Формы кристаллизации: призмы; часто контактовые двойники. Цвет: черный, зеленоватый, бурый. Твердость: 5,5-6. Излом: неровный, раковистый. Блеск: от стеклянного до смоляного



Рисунок А. 2- Альбит. Формула: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$. Формы кристаллизации: призматические или таблитчатые кристаллы, почти всегда в виде двойников. Цвет: бесцветный, белый. Твердость: 6-6,5. Излом: раковистый. Блеск: стеклянный. Разновидности: периклин, кливеландит. Происхождение. Обычный и распространенный минерал, основной компонент многих магматических пород.



Рисунок А. 3 - Оливин (перидот). Формула: $(Mg, Fe)_2SiO_4$.
Формы кристаллизации: неправильные призмы. Цвет: зеленый, желтый, коричневый, серый. Твердость: 6,5-7. Излом: раковистый. Блеск: стеклянный, жирный



Рисунок А. 4 - Роговая обманка. Формула: $(Ca, Na, K)_{2-3}(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al)_2(OH, F)_2Si_6O_{22}$. Формы кристаллизации: зерна, колоннообразные формы; игольчатые кристаллы в агрегатах в форме снопа. Цвет: темно-зеленый. Твердость: 5-6. Излом: неровный. Блеск: стеклянный.



Рисунок А. 5 - Серпентин (змеевик). Формула: $Mg_6(OH)_8Si_4O_{10}$.
Формы кристаллизации: встречается в микрозернистых или кристаллических агрегатах. Цвет: зеленый, серый, белый, желтый. Твердость: 2,5-4. Излом: раковистый. Блеск: от жирного до шелковистого. Разновидности: антигорит, хризотил, бовенит, вильямсит, бертьерит.



Рисунок А. 6 - Ортоклаз. Формула: $KAlSi_3O_8$. Формы кристаллизации: призмы. Цвет: бесцветный, белый, желтый, красный, другие цвета. Твердость: 6. Излом: ступенчатый. Блеск: от стеклянного до перламутрового. Разновидности: адуляр (бесцветный), валенсианит (белый), анортоклаз.

Класс II - карбонаты



Рисунок А. 7 - Магнезит. Формула: $MgCO_3$. Формы кристаллизации: ромбоэдры, призмы; чаще грубозернистые, фарфоровидные, плотные и землистые массы. Цвет: бесцветный, желто-бурый, сероватый. Твердость: 4-4,5. Излом: раковистый. Блеск: стеклянный. Происхождение. Довольно обычный минерал, формирующийся в геологических средах разного типа



Рисунок А. 8 - Сидерит (железный шпат). Формула: $FeCO_3$. Формы кристаллизации: ромбоэдры, призмы, скаленоэдры. Более распространены шпатовые массы и скопления. Цвет: от желтого до черного. Твердость: 4—4,5. Излом: раковистый, неровный. Блеск: стеклянный, перламутровый. Происхождение. Обычный минерал, встречающийся в разнообразных местах.



Рисунок А. 9 - Смитсонит (цинковый шпат). Формула: $ZnCO_3$.
Формы кристаллизации: редко - ромбоэдрические или скаленоэдрические кристаллы; обычно появляется в форме конкреций. Цвет: бесцветный, может принимать различную окраску. Твердость: 5. Излом: раковистый. Блеск: от стеклянного до перламутрового. Происхождение. Вторичный минерал в зонах окисления металлосодержащих залежей, богатых цинком.



Рисунок А. 10 - Церуссит. Формула: $PbCO_3$. Формы кристаллизации: удлиненные, лом-теобразные или таблитчатые призмы. Цвет: бесцветные, белые с сероватыми отблесками. Твердость: 3-3,5. Излом: раковистый. Блеск: алмазный. Происхождение. Типичный минерал для районов окисления залежей свинца.

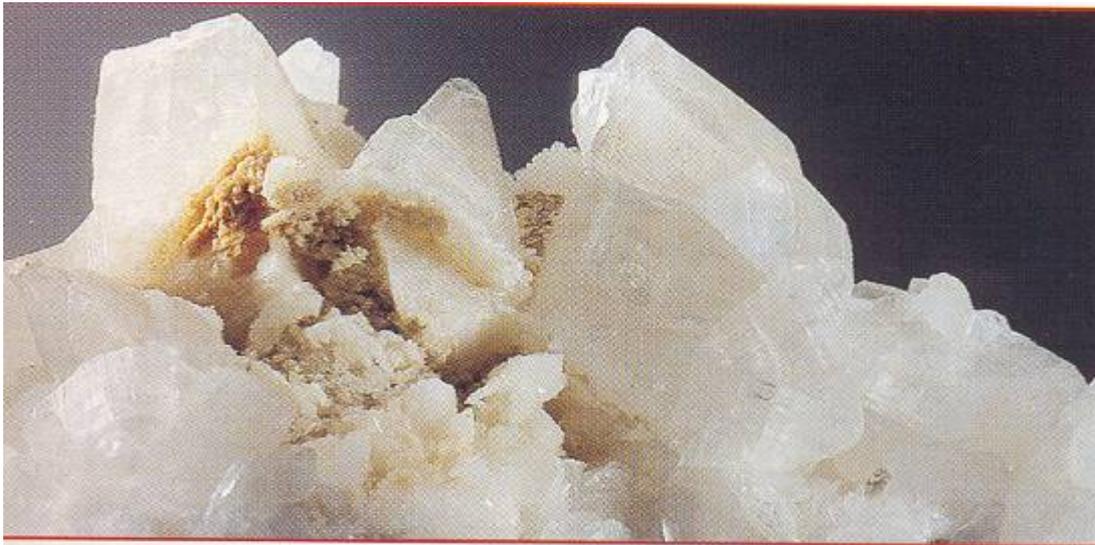


Рисунок А. 11 - Доломит. Формула: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Формы кристаллизации: ромбоэдри, часто седлообразно изогнутые. Цвет: бесцветный, белый, розовый, желтоватый. Твердость: 3,5-4. Излом: раковистый. Блеск: от стеклянного до перламутрового. Происхождение. Минерал является неременной составляющей карбонатных пород, то есть доломитов и доломитовых известняков.



Рисунок А. 12 - Малахит. Формула: $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$.
Формы кристаллизации: редко -игольчатые кристаллы; как правило -
плотные натечные и землистые массы. Цвет: изумрудно-зеленый.
Твердость: 4. Излом: раковистый. Блеск: стеклянный, шелковистый, мато-
вый. Происхождение. Вторичный минерал в залежах меди.

Класс III – окислы



Рисунок А. 13 - Куприт. Формула: Cu_2O . Формы кристаллизации: кубы, октаэды. Цвет: темно-красный. Твердость: 3,5-4. Излом: раковистый или неровный. Блеск: полуметаллический. Другое название: красная медная руда. Происхождение. Встречается в основном в районах окисления залежей меди.



Рисунок А. 14 - Корунд. Формула: Al_2O_3 . Формы кристаллизации: бипирамидальный или призматически-бипирамидальный габитус. Цвет: бесцветный, если минерал не имеет примесей. Твердость: 9. Излом: раковистый. Блеск: алмазный. Происхождение. Метаморфические породы, или породы, сформировавшиеся при отвердении глубокой магмы



Рисунок А. 15 - Гематит (железный блеск) Тригональная сингония. Формула: Fe_2O_3 . Формы кристаллизации: кристаллы ломтеобразные или плоские, а также пластинчатые, расположенные подобно лепесткам розы (железная роза). Цвет: от красного до черного. Твердость: 6,5. Излом: раковистый. Блеск: металлический. Другое название: красный железняк. Происхождение. Обычный минерал для эффузивных пород в пегматитах или гидротермальных жилах; часто встречается также седиментарный генезис.



Рисунок А. 16 - Магнетит. Кубическая сингония Формула: Fe_3O_4 . Формы кристаллизации: октаэдры, ромбические додекаэдры; массивные агрегаты. Цвет: черный. Твердость: 6—6,5. Излом: неровный, полураковистый. Блеск: металлический. другое название: магнитный железняк. Происхождение: Распространен во всех породах.



Рисунок А. 17 - Ильменит. Тригональная сингония Формула: FeTiO_3 . Формы кристаллизации: таблитчатый габитус; встречается в виде плотных, пластинчатых или зернистых агрегатов. Твердость: 5,5—6. Излом: неровный, полураковистый. Цвет: буро-черный. Блеск: металлический, Другое название: титанистый железняк. Происхождение. Акцессорный минерал в магматических, метаморфических и пегматитовых породах.

Класс IV - гидроокислы



Рисунок А. 18 - Манганит. Моноклинная сингония. Формула: $MnO(OH)$. Формы кристаллизации: удлиненные призмы, часто рифленые по вертикали. Цвет: черный матовый. Твердость: 4. Излом: неровный. Блеск: металлический. Происхождение: Низкотемпературные гидротермальные жилы, осадочные (седиментарные) залежи.



Рисунок А. 19 - Диаспор. Ромбическая сингония. Формула: $AlO(OH)$. Формы кристаллизации: редко — таблитчатые кристаллы, тонкие или иглообразные; чаще сплошные массы или агрегаты. Цвет: белый, серый. Твердость: 6,5—7. Излом: раковистый. Блеск: стеклянный, жемчужный. Происхождение: Широко распространен в бокситовых породах; аксессуарный минерал в доломитах, известняках, гнейсах и слюдяных сланцах.

Класс V - сульфиды



Рисунок А. 20 - Лимонит. Неопределенная сингония. Формула: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ — общая формула группы гидроокислов железа. Формы кристаллизации: никогда не бывает в форме кристаллов, только в землистых массах, небольших скоплениях или корочках. Цвет: желто-бурый, черный. Твердость: 5—5,5. Излом: раковистый или землистый. Блеск: землистый или фарфоровый. Происхождение: Районы преобразования железных месторождений; также может иметь органическое происхождение.



Рисунок А. 21 - Сфалерит. Кубическая сингония. Формула: ZnS . Формы кристаллизации: тетраэдры, ромбические додекаэдры. Цвет: разнообразный, от бесцветного до черного. Твердость: 3,5—4. Излом: раковистый. Блеск: от смолистого до полуметаллического. Другое название: цинковая обманка. Происхождение: Обычный минерал для гидротермальных отложений; встречается в известняковых или доломитовых породах, затронутых гидротермальными жидкостями.



Рисунок А. 22 - Галенит (Свинцовый блеск). Кубическая сингония. Формула: PbS . Формы кристаллизации: в основном, кубы. Цвет: свинцово-серый. Твердость: 2,5—3. Излом: раковистый. Блеск: металлический. Происхождение: Образуется путем затвердевания магматических остатков, оставшихся после формирования гранитов и пегматитов.



Рисунок А. 23 - Гауэрит. Кубическая сингония. Формула: MnS_2 . Формы кристаллизации: октаэдры, реже — кубические октаэдры и шаровидные агрегаты. Цвет: красно-бурый или матовый буро-черный. Твердость: 4. Блеск: металлический. Происхождение: Это — характерный минерал для соляных куполов, в которых он находится всегда вместе с серой, гипсом, кальцитом и арагонитом.



Рисунок А. 24 - Антимонит (Сурмяной блеск). Ромбическая сингония. Формула: Sb_2S_3 . Формы кристаллизации: призматические и игольчатые кристаллы. Цвет: стальной серый. Твердость: 2. Излом: оскольчатый. Блеск: металлический. Другое название стибнит. Происхождение: Обычно - гидротермальное; встречается совместно с минералами, содержащими серебро, свинец и ртуть. Также может откладываться из растворов горячих источников.



Рисунок А. 25 - Пирротин. Гексагональная сингония. Формула: FeS . Формы кристаллизации: иногда — бипирамиды и таблитчатые кристаллы, обычно — сплошные зернистые агрегаты. Цвет: от розоватого желтого до бронзово-желтого. Твердость: 3,5—4,5. Излом: неровный. Блеск: металлический. Другое название: магнитный колчедан. Происхождение: Магматическая сегрегация: сформировалась первой во время отвердения основных и ультрабазитовых пород.

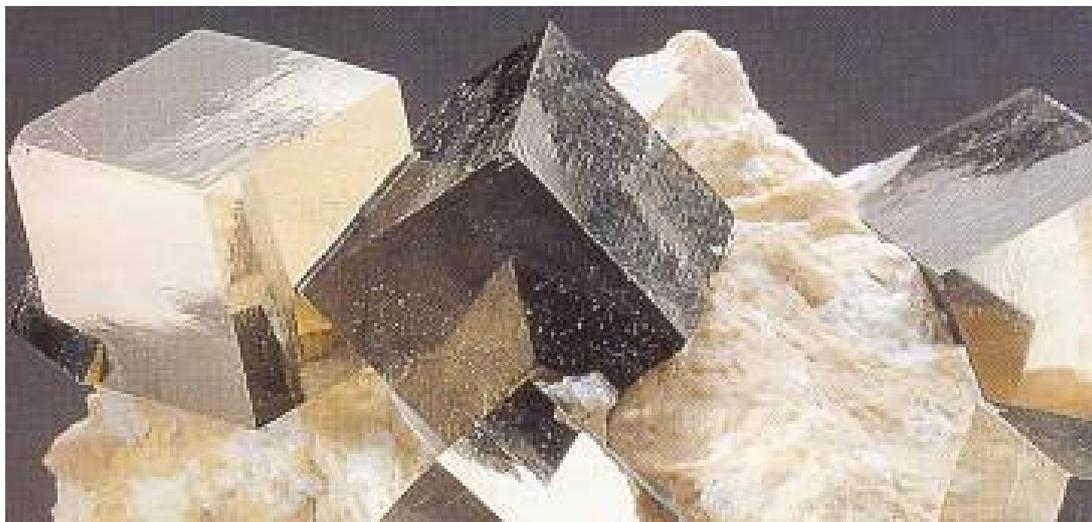


Рисунок А. 26 - Пирит. Кубическая сингония. Формула: FeS_2 . Формы кристаллизации: восьмигранники (октаэдры), кубы, пентагон-додекаэдры. Цвет: латунно-желтый. Твердость: 6,5. Излом: раковистый. Блеск: металлический. другое название: серный, или железный колчедан. Происхождение: Обычно минерал находится в гидротермальных жилах, в метаморфических породах с содержанием серпентина, а также в мраморе.



Рисунок А. 27 - Халькопирит. Тетрагональная сингония. Формула: CuFeS_2 . Формы кристаллизации: псевдотетраэдр (редко), сплошные или микрозернистые массы. Цвет: желто-зеленоватый. Твердость: 3,5—4. Излом: раковистый. Блеск: металлический. Другое название: медный колчедан. Происхождение: Минерал жильного происхождения, формирующийся путем сгущения магматических остатков в гранитах и пегматитах.

Класс VI - сульфаты



Рисунок А. 28 - Гипс (Легкий шпат). Моноклинная сингония. Формула: $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Формы кристаллизации: призмы, таблитчатый габитус. Цвет: бесцветный, белый, разнообразных оттенков. Твердость: 2. Излом: занозистый. Блеск: от стеклянного до перламутрового. Происхождение: Осадочный минерал, образовавшийся вследствие естественного испарения морских вод в закрытых водоемах.



Рисунок А. 29 - Барит (тяжелый шпат). Ромбическая сингония. Формула: $BaSO_4$. Формы кристаллизации: призмы, часто соединенные в друзы. Цвет: бесцветный, желтоватый, розоватый, зеленоватый. Твердость: 3—3,5. Излом: раковистый. Блеск: от стеклянного до перламутрового. Происхождение: Гидротермальные жилы, известняковые породы и доломиты.

Класс VII - галоиды



Рисунок А. 30 - Каменная соль (галит). Кубическая сингония. Формула: NaCl . Формы кристаллизации: кубы. Цвет: бесцветный, может принимать различные оттенки в зависимости от примесей или включений. Твердость: 2. Излом: раковистый. Блеск: стеклянный. Происхождение: Осадочные отложения, сформировавшиеся вследствие испарения соленых вод закрытых водоемов



Рисунок А. 31 - Флюорит (Плавиновый шпат), Кубическая сингония. Формула: CaF_2 . Формы кристаллизации: кубы, октаэдры. Цвет переменчивый: если минерал не имеет примесей, он бесцветный и прозрачный, но может быть также желтым, розовым, зеленым, голубым, почти черным. Твердость: 4. Излом: неровный. Блеск: стеклянный, в катодных лучах флюоресцирует. Происхождение: Гидротермальное, реже — пегматитовое.

Класс VIII - фосфаты



Рисунок А. 32 - Апатит. Гексагональная сингония. Формула: $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$. Формы кристаллизации: призмы, может встречаться также в виде характерных мелкозернистых сахаровидных плотных масс. Цвет: бесцветный, белый, всех цветов. Твердость: 5. Излом: раковистый. Блеск: стеклянный. Происхождение: В большинстве случаев выступает как аксессуарный (второстепенный) минерал в породах вулканического происхождения и метаморфических породах. Крупные кристаллы имеют пегматитовый генезис.



Рисунок А. 33 - Пироморфит. Гексагональная сингония. Формула: $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$. Формы кристаллизации: призмы, часто объединенные в почти параллельные группы. Цвет: бесцветный, белый, коричневый, зеленый, оранжевый. Твердость: 3,5—4. Излом: раковистый. Блеск: от алмазного до смоляного. Происхождение: Типичный минерал, образующийся в районах окисления залежей свинец содержащих минералов.

Класс IX - вольфраматы



Рисунок А. 34 - Шеелит. Тетрагональная сингония. Формула: CaWO_4 . Формы кристаллизации: бипирамидальный или таблитчатый габитус. Цвет: бесцветный, желтый, серый, буроватый. Твердость: 4,5—5. Излом: неровный. Блеск: стеклянный, алмазный. Происхождение: Контактные метаморфические отложения, пегматитовые породы, металлосодержащие гидротермальные жилы.

Класс X - самородные элементы



Рисунок А. 35 - Золото. Кубическая сингония. Формула: Au. Формы кристаллизации: мелкие и редкие кристаллы (кубы, октаэды, ромбические додекаэды); обычно пластинки или самородки неправильной формы. Цвет: от желто-золотого до желто-оловянного. Твердость: 2,5—3. Излом: крючковатый. Блеск: металлический. Происхождение: Присутствует в гидротермальных жилах коренных месторождений или во вторичных россыпных месторождениях в виде порошка, соломки и самородков.



Рисунок А. 36 - Сера. Ромбическая сингония. Формула: S .
Формы кристаллизации: бипирамиды или гранулированные агрегаты. При температурах выше 119° принимает моноклинную форму. Цвет: желтый, бурый. Твердость: 2. Излом: раковистый. Блеск: от жирного до жирно-алмазного. Происхождение: Характерный минерал для месторождений эвапоритов.

Глоссарий

Агломерация - термический процесс окускования мелких материалов (руды, рудных концентратов, содержащих металлы отходов и др.), являющихся составными частями металлургической шихты, путем их спекания с целью придания формы и свойств (химического состава, структуры), необходимых для плавки. Спекание происходит непосредственным слипанием отдельных нагретых частиц шихты при поверхностном их размягчении либо в результате образования легкоплавких соединений, связывающих частицы при остывании агломерируемого продукта.

Адиабатный процесс - процесс, происходящий в физической системе без теплообмена с окружающей средой.

Аккреция - увеличение массы любого вещества путём добавления частиц извне.

Актинолит - лучистый камень, минерал из группы амфиболов. Химический состав $\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$. Иногда имеет примесь MnO (манганактинолит). Кристаллизуется в моноклинной системе. Образует вытянутые, игольчатые и нитевидные кристаллы, собранные в радиально-лучистые, спутанно-волокнистые (нефрит) агрегаты. Цвет зелёный, блеск стеклянный, твердость по минералогической шкале 5,5—6; плотность 3170—3300 кг/м³.

Акцессорные минералы (от позднелат. *accessorius* - добавочный) - минералы, входящие в состав горных пород в очень малых количествах и не учитывающиеся в их номенклатуре. Первоначально считались случайными добавочными минералами (отсюда название). Позднее было выяснено, что они являются строго закономерной частью пород и по их характеру может быть установлено родство и происхождение горных пород.

Альбит - минерал из группы полевых шпатов — плагиоклазов. Химический состав $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$. Система триклинная. Кристаллы таблитчатые, чаще скопления зёрен неправильной формы. Окраска белая с различными оттенками. Блеск стеклянный. Твердость по минералогической шкале 6-6,5; плотность 2610 кг/м³. Породообразующий минерал кислых и щелочных изверженных пород и пегматитов.

Алюмосиликаты - алюмокремневые солеобразные соединения, к которым в природе относится группа широко распространённых минералов. В их кристаллической структуре алюминий обладает,

подобно кремнию, четверной тетраэдрической координацией (окружен четырьмя атомами кислорода) и даже кристалло-химически замещает кремний, т. е. химическая роль глинозёма близка (но не идентична) роли кремнезёма. Алюминий может входить в состав силикатов и обладать, подобно магнию и прочим типичным основаниям, шестерной (октаэдрической) координацией. В этом случае соответствующие соединения являются силикатами алюминия, например минералы топаз, пирофиллит и др. При замене в структурных анионных комплексах силикатов кремнекислородного радикала $(\text{SiO}_4)^{4-}$ на $(\text{AlO}_4)^{5-}$ возникают дополнительные отрицательные заряды, которые в алюмосиликатах компенсируются вхождением дополнительных катионов - обычно K, Na или двухвалентных Ca, Ba с большими радиусами ионов.

Амфиболы - группа распространённых породообразующих минералов - кремнекислородных соединений магния, железа, кальция, реже алюминия и щелочей, содержащих воду, фтор, иногда хлор. Входят в состав очень многих изверженных и метаморфических горных пород (роговообманковые габбро, диорит, амфиболит и др.), иногда слагая их нацело (горнблендит, амфиболовые сланцы). Объединение группы произведено по их кристаллографическим свойствам, они кристаллизуются в моноклинной и ромбической системах, образуя призматические кристаллы.

Аноксемия (от греч. an - отрицательная частица, позднелат. oxugenium - кислород и греч. haima - кровь) - отсутствие кислорода в крови. Истинная аноксемия наблюдается крайне редко и приводит к смерти. Раньше также называли и гипоксемию, т. е. пониженное содержание кислорода в крови.

Астеносфера (от греч. asthenes - слабый и сфера) - слой пониженной твёрдости, прочности и вязкости в верхней мантии Земли. Расположен на глубинах около 100 км под континентами и около 50 км под дном океана; нижняя граница его находится на глубинах 250—350 км.

Асфиксия (греч. asphyxia, буквально - отсутствие пульса, от a - отрицательная частица и sphuxis - пульс) - патологическое состояние, возникающее вследствие нарушений внешнего дыхания и характеризующееся резким недостатком кислорода и избытком двуокиси углерода в крови и тканях. Может возникнуть в результате механического препятствия доступу воздуха в дыхательные пути от сдавления их извне (например, удушение и др.), развития опухоли, скопления жидкости (при попадании рвотных масс), сужения

дыхательных путей из-за отёка гортани (дифтеритический круп) или спазма мышц гортани (например, при столбняке).

Базальт (лат. *basaltes*, *basanites*, от греч. *basanos* — пробный камень; по другой версии - от эфиоп. *basal* - железосодержащий камень) - магматическая горная порода. В его составе преобладает плагиоклаз (лабрадор); присутствуют пироксены, оливин, магнетит, титанит, апатит и др. Химический состав близок к габбро, которое является глубинным его аналогом.

Березит (по названию Березовского месторождения на Урале) - горная порода, состоящая из кварца (25-50%), альбита (5-25%), серицита (10-15%), карбоната (0-10%), обогащенная пиритом и пронизанная кварцевыми, иногда рудоносными жилами. Образуется в результате низкотемпературных метасоматических изменений пород гранитного состава под влиянием гидротермальных растворов кислотной стадии выщелачивания.

Березитизация – изменение кислых магматических горных пород под воздействием гидротермических растворов, при котором полевой шпат замещается слюдой и образуются пириты.

Бокситы [франц. *bauxite*, по названию местности Ле-Бо (*Les Baux*) на юге Франции, где впервые были обнаружены залежи] - горная порода, состоящая в основном из гидратов глинозёма, окислов железа с примесью других минеральных компонентов. Основной химический компонент - глинозём (Al_2O_3). Постоянная составная часть - окись железа (Fe_2O_3). Наиболее вредная примесь - кремнезём (SiO_2). Из других примесей встречаются: двуокись титана (TiO_2), окись кальция (CaO), окись магния (MgO), окись марганца (MnO), пятиокись фосфора (P_2O_5) и др.

Брусит - минерал из группы гидроокислов, химический состав $Mg(OH)_2$. Магний может частично замещаться Fe^{2+} или Mn^{2+} (ферро- и манганобруситы). Кристаллизуется в тригональной системе; представляет собой бесцветные или белые (редко голубоватые) слюдоподобные кристаллы слоистой структуры или их массы; иногда тонковолокнистые или плотные натёчного вида агрегаты. Твердость по минералогической шкале 2,5; плотность 2370—2400 $кг/м^3$. Образуется при гидротермальном изменении магнезиальных ультраосновных пород и метаморфизме доломитов.

Габбро (итал. *gabbro*) - магматическая горная порода основного состава, содержащая примерно в равных количествах основной плагиоклаз (лабрадор, битовнит), цветные минералы (пироксены, реже оливин и амфибол) и в небольших количествах рудные

минералы.

Габитус, хабитус (лат. *habitus* — внешность, наружность) - наружный вид, облик животного или растительного организма, кристалла, минерала.

Галогенез (от греч. *hals* — соль и *genesis* — происхождение) - процессы формирования испарением рассолов в поверхностных бассейнах аридной зоны, осаждения из них и образования отложений легкорастворимых солей.

Глеевый горизонт – почвенный горизонт, который образуется в результате сложного биохимического восстановительного процесса, протекающего в анаэробных условиях при обязательном наличии органического вещества и участии анаэробных организмов. При этом происходит разрушение первичных и вторичных минералов. Наиболее характерная особенность глееобразования – восстановление окисного железа в закисное.

Глины - осадочные горные породы, состоящие в основном из глинистых минералов и обладающие свойством пластичности. Под пластичностью понимается способность образовывать с водой тесто, принимающее под давлением любую форму, сохраняя её и по высыхании. После обжига глина приобретает прочность камня. Ее главными химическими компонентами являются SiO_2 (30—70%), Al_2O_3 (10—40%) и H_2O (5—10%). В подчинённых количествах присутствуют TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , K_2O , Na_2O . В составе глин главную роль играют каолинит, монтмориллонит, гидрослюда. Кроме того, обычно присутствуют примеси, представленные обломками различных минералов или горных пород, растительными или животными остатками, новообразованными минералами (карбонатами, гипсом, окислами железа и др.). При большом содержании примесей получаются переходы от собственно глины к другим осадочным породам - глинистым пескам, мергелям и др. По преобладанию того или иного глинистого минерала выделяют следующие минеральные типы глин: каолинитовые, монтмориллонитовые, гидрослюдистые и др. В глинах преобладают частицы меньше 0,01 мм. При увеличении количества более крупных песчаных частиц они постепенно переходят в пески.

Глобулы - небольшие тёмные образования, заключенные в светлые туманности и иногда видимые на фоне Млечного Пути. Представляют собой плотные массы газа и пыли с размерами от 0,01 до 0,5 парсек. Масса пыли в компактных глобулах обычно не превышает 0,001-0,01 массы Солнца, а общая масса может достигать

массы Солнца. Масса менее компактных больших глобул от 2 до 10 масс Солнца и даже более. Газ сжат в них давлением окружающего горячего газа туманности. Но образование звёзд из глобул вследствие их небольшой массы может происходить, по-видимому, лишь в исключительных случаях.

Гнейс (нем. Gneis) - метаморфическая горная порода, сланцеватая, богатая полевым шпатом и в меньшем количестве содержащая кварц, биотит, мусковит, амфибол, пироксен, гранат, силлиманит и т.п.

Грейзен (нем. Greisen) - горная порода метасоматического происхождения, состоящая в основном из кварца и светлых слюд - лепидолита и мусковита.

Гранит (итал. granito, от лат. granum — зерно) - магматическая горная порода, богатая кремнезёмом. Одна из самых распространённых пород в земной коре. Состоит из калиевого полевого шпата (ортоклаза, микроклина), кислого плагиоклаза (альбита, олигоклаза), кварца, а также слюды (биотита или мусковита), амфибола и редко пироксена. Структура обычно полнокристаллическая, нередко порфировидная и гнейсовидно-полосчатая.

Гранодиорит - магматическая интрузивная горная порода, промежуточная по минеральному составу между гранитом и кварцевым диоритом. Состоит из кварца, полевых шпатов (преимущественно плагиоклазов), а также из биотита, роговой обманки, пироксена и пр.

Грейзенизация (геологическое) - среднетемпературный процесс изменения гранитных пород под действием газов и растворов, отделяющихся от охлаждающихся гранитных тел. В процессе грейзенизации за счёт полевых шпатов гранитов образуются светлые слюды (лепидолит или мусковит).

Диагенез (от греч. dia - приставка, означающая здесь завершённость действия, и ...генез) - совокупность природных процессов преобразования рыхлых осадков на дне водных бассейнов в осадочные горные породы в условиях верхней зоны земной коры.

Диорит (франц. diorite, от греч. diorízo - разграничиваю, различаю) - магматическая горная порода, состоящая из плагиоклаза (андезина или олигоклаза), роговой обманки, реже авгита и биотита, иногда присутствует кварц. В химическом отношении диорит характеризуется средним содержанием кремнекислоты (55—65%). Различают разновидности: кварцевые, бескварцевые,

роговообманковые, авгитовые и биотитовые. Цвет серый, до зеленовато-серого. Диорит мало распространён и, как правило, связан с гранитами и гранодиоритами, реже с др. породами, появляясь как местная фация.

Доломит (по имени французского геолога Д. Доломье,) - минерал из группы карбонатов. По химическому составу - двойная углекислая соль кальция и магния: $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$. Кристаллизуется в тригональной системе, образуя хорошо огранённые кристаллы ромбоэдрического облика.

Друза (от нем. *Druse* - щётка) - форма природного кристаллического минерального агрегата. Представляет собой совокупность свободных кристаллов, выросших одним концом (гранью или ребром) на стенки трещин или замкнутых пустот в горных породах. При этом свободная часть кристаллов хорошо огранена, а направление их главного роста близко к перпендикулярному относительно поверхности нарастания. Часто встречаются друза кварца, аметиста, кальцита, сурьмяного блеска.

Дунит [по названию горы Дун (*Dun*) в Новой Зеландии] - магматическая горная порода, ультраосновная, чёрного, тёмно- или светло-зелёного цвета; состоит на 85-100% из оливина, в качестве примесей содержит хромит, иногда совместно с магнетитом. Богат магнием и содержит мало кремнезёма.

Зона Стрёмгрена - области ионизованного водорода в которых температура достигает 6000-8000 К. Их размеры зависят от температуры звезды и плотности газа колеблются от долей *пс* до нескольких десятков, а в исключительных случаях - до сотен *пс*. Обычно вокруг горячих звёзд наблюдаются не просто ионизованные межзвёздные облака, а значительно более плотные диффузные туманности, в которых концентрация достигает десятков и сотен атомов в 1 см^3

Зонное плавление - гипотетический процесс выплавления и дегазации вещества мантии Земли, аналогичный механизму зонной плавки, который приводит к образованию оболочек Земли (литосферы, гидросферы и атмосферы).

Зонная плавка - кристаллофизический метод рафинирования материалов, который состоит в перемещении узкой расплавленной зоны вдоль длинного твёрдого стержня из рафинируемого материала.

Изоморфизм (от изо... и греч. *morphé* - вид, форма), свойство веществ, аналогичных по химическому составу, кристаллизоваться в одинаковых формах.

Изоэлектронный - имеющий то же число электронов. Например ионы натрия и магния, калия и кальция.

Иллювий (от лат. *illuvies* - разлив, намывная грязь), минеральные и органические вещества, выщелоченные дождевыми водами из верхней части почвы и отложенные в её нижней части (иллювиальном горизонте). Состоит, в зависимости от типа почвы, из гумуса, гидроокислов железа, карбонатов, гипса.

Интрузивные горные породы, глубинные породы - магматические горные породы, образовавшиеся в результате застывания магмы на глубине, в толще земной коры. Они противопоставляются эффузивным горным породам, представляющим собой магму, излившуюся и затвердевшую на поверхности Земли в форме так называемой лавы вулканов.

Касситерит (от греч. *kassíteros* - олово) - оловянный камень, минерал химического состава SnO_2 . Теоретически он содержит 78,62% Sn, но обычно включает примеси Nb, Ta, Zr, Sc, W, Fe, в зависимости от которых содержание Sn колеблется в пределах 68—78%. Кристаллизуется в тетрагональной системе, образуя кристаллы призматического или дипирамидального облика; характерны коленчатые двойники.

Компланарный [от лат. *com* (*sum*) - совместно и *planum* - плоскость] - параллельные одной плоскости.

Критическая температура - для индивидуальных веществ определяется как температура, при которой исчезают различия в физических свойствах между жидкостью и паром, находящимися в равновесии. При этом, плотности насыщенного пара и жидкости становятся одинаковыми, граница между ними исчезает и теплота парообразования обращается в нуль. Критическая температура - одна из неизменяющихся характеристик (констант) вещества.

Лабрадор (название по месторождению на полуострове Лабрадор) - минерал из группы известково-натровых полевых шпатов, плагиоклазов. Изоморфная смесь натрового полевого шпата - альбита с известковым полевым шпатом - анортитом, который содержится в лабрадоре в количестве 50-70%. Кристаллизуется в триклинной системе. Бесцветен, белого или серого цвета, образует сложные двойники. Твёрдость по минералогической шкале 6; плотность 2680-2720 кг/м^3 . Входит в состав многих основных магматических пород: габбро, базальтов, диабазов и др. Горные породы, состоящие почти полностью из лабрадора называются лабрадоритами.

Латерит (от лат. *later* - кирпич) - красноцветные железистые или

железисто-глинозёмистые элювиальные образования, типичные для влажных тропических и субтропических областей.

Ликвация (от лат. *liquatio* - разжижение, плавление) - в геологии - процесс разделения первоначально однородного магматического расплава при понижении температуры на две разные по составу несмешивающиеся жидкости.

Липарит (от итал. *Lipari* - Липарские острова, где он был впервые обнаружен) - эффузивная горная порода, по химическому составу соответствует граниту.

Лиственит - метасоматическая горная порода, состоящая из карбонатов (наиболее часто - анкерита), кварца и мусковита или фуксита (хромовой слюды) с примесью разнообразных минералов (талька, хлорита, актинолита, альбита, турмалина, рутила, сфена и др.). Листвениты имеют ярко-зелёную (от фуксита) или серую (при бесцветном мусковите) окраску. Образуются в результате процесса лиственитизации серпентинитов и др. ультраосновных и основных пород. Обычно залегают в форме линз и жилкообразных тел среди рассланцованных и слабо карбонатизированных пород.

Литофильные элементы (от лито... и греч. *philéo* - люблю, имею склонность) - химические элементы горных пород. В их число входят 55 элементов периодической системы: O, Si, Al, Ti, B, C, все щелочные и щёлочноземельные металлы, галогены и многие редкие элементы. Они слагают около 93% массы всей земной коры и около 97% солевого состава вод океанов - продуктов выветривания горных пород, растворимых в воде. По классификации А. П. Виноградова к числу литофильных элементов относятся и все атмосфильные элементы

Метасоматизм, метасоматоз (от мета... и греч. *soma*, родительный падеж *somatos* - тело) - замещение одних минералов другими с существенным изменением химического состава породы и обычно с сохранением её объёма и твёрдого состояния при воздействии растворов высокой химической агрессивности.

Минерал (франц. *minéral*, от позднелат. *minera* - руда) - природное тело, приблизительно однородное по химическому составу и физическим свойствам, образующееся в результате физико-химических процессов на поверхности или в глубинах Земли (и других космических тел), главным образом как составная часть горных пород, руд, метеоритов. В подавляющем большинстве - это твёрдые тела, подчиняющиеся всем законам физики твёрдого тела; реже встречаются жидкие минералы (например, ртуть самородная).

Отнесение воды к минералам - вопрос дискуссионный, но лёд общепринято считать минералом. Различают минералы кристаллические, аморфные - метакolloиды (например, опалы, лешательерит, лимонит и др.) и метамиктные минералы, имеющие внешнюю форму кристаллов, но находящиеся в аморфном, стеклоподобном состоянии.

Монацит (нем. Monazit, от греч. monázō - бываю один, живу один) - минерал, фосфат редкоземельных элементов преимущественно цериевой группы; химическая формула $(Ce, La...) [PO_4]$. Часто содержит различные примеси, из которых главные: ThO_2 (до 10 % и более), UO_2 (до 6,6 %), ZrO_2 , CaO , а также SiO_2 , SO_3 . Кристаллизуется в моноклинной системе, образуя пластинчатые, иногда толстотаблитчатые кристаллы, неправильные зёрна, зернистые массы.

Монтмориллонит [от названия французского города Монморийон] - глинистый минерал из подкласса слоистых силикатов с переменным химическим составом $(Ca, Na) (Mg, Al, Fe)_2 [(Si, Al)_4 O_{10}] (OH)_2 \times nH_2O$. Структура отличается симметричным сложением пачек слоев.

Мохоровичича поверхность - граница раздела между земной корой и мантией Земли. Установлена по сейсмическим данным: скорость продольных сейсмических волн при переходе (сверху вниз) через нее возрастает скачком с 6,7-7,6 до 7,9-8,2 км/сек, а поперечных - с 3,6-4,2 до 4,4-4,7 км/сек. Различные геофизические, геологические и др. данные указывают на то, что плотность вещества тоже возрастает скачком, предположительно, с 2,9-3 до 3,1-3,5 т/м³. Наиболее вероятно, что она разделяет слои разного химического состава.

Нефелометрия (от греч. nephéle - облако и ...метрия) - совокупность методов измерения интенсивности рассеянного в данной среде видимого или ультрафиолетового света с целью определения концентрации, размера и формы диспергированных частиц в дисперсных системах.

Октаэдр (греч. oktáedron, от októ - восемь и héra - грань) - один из пяти правильных многогранников. Октаэдр имеет 8 граней (треугольных), 12 рёбер, 6 вершин (в каждой вершине сходятся 4 ребра).

Оливин (от лат. oliva - оливка, маслина) - перидот, хризолит, минерал, главный представитель этой группы, относящийся к ортосиликатам. В группу входят: форстерит $Mg_2[SiO_4]$, собственно

оливин $(\text{Mg, Fe})_2[\text{SiO}_4]$, фаялит $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$, тефроит $\text{Mn}_2[\text{SiO}_4]$, кнебелит $(\text{Fe, Mn})_2[\text{SiO}_4]$, монтичеллит $\text{CaMg}[\text{SiO}_4]$. Параллельно с составом изменяются и свойства входящих в эту группу минералов, кристаллизуются в ромбической системе в форме таблитчатых или призматических кристаллов. Их структура образована изолированными тетраэдрическими группировками и катионами Mg^{2+} , Fe^{2+} в шестерном окружении кислородных ионов. Распределение Mg и Fe в структуре, устанавливаемое по мессбауэровским спектрам, используется в качестве геотермометра. Спайность несовершенная. Твердость по минералогической шкале 6,5-7; плотность 3200-4400 кг/м^3 (варьирует в зависимости от содержания тяжёлых атомов Fe, Mn). Оливин - желтовато-зелёного, оливкового цвета, иногда бесцветен.

Олигоклаз (от олиго... и греч. *klasis* - ломка, раскалывание, преломление) - породообразующий минерал из группы полевых шпатов (плаггиоклазов), представляющий собой изоморфную смесь из 10-30% анортита $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ и 70-90% альбита $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$.

Оподзоливание – почвообразовательный процесс, в существенная особенность которого – разрушение в верхней части профиля почвы первичных и вторичных минералов и вынос продуктов разрушения в нижележащие горизонты и в грунтовые воды.

Офитовая структура (от греч. *orphitēs* - похожий на змею) - структура жильных и основных интрузивных горных пород, в которых плаггиоклазы образуют крупные вытянутые кристаллы, а тёмные минералы (преимущественно пироксен) заполняют промежутки между ними.

Парсек - единица измерения расстояний в астрономии, равная 206265 астрономическим единицам, что составляет $30,857 \times 10^{12}$ км. Сокращённое обозначение: русское *пс*, международное *рс*.

Перидотит (от франц. *péridot* - перидот, или оливин), ультраосновная интрузивная горная порода, состоящая главным образом из оливина (70-30%) и пироксенов (30-70%), иногда с роговой обманкой. Содержание SiO_2 колеблется в пределах 40-46% и MgO 34-46%. В виде второстепенных минералов встречаются: магнетит, ильменит, пирротин, хромит, шпинель, гранат и др.; иногда она содержит платину и некоторые никелевые минералы. Перидотит - порода тёмной окраски, чаще всего зелёного или зеленовато-серого цвета. Оливин и пироксены иногда бывают сильно серпентинизированы; в этом случае перидотит переходит в змеевик.

Пироксены (от греч. *пύρ* — огонь и *χένος* — чужой; назван в 1796 французским учёным Р. Ж. Аюи, предположившим чуждое вулканической лаве происхождение этого минерала) - группа важнейших Mg и Fe-содержащих породообразующих минералов подкласса цепочечных силикатов. Общая структурная формула $R_2^{2+} [Si_2O_6]$, где $R = Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Na^+$ и Li^+ обычно в паре с Al^{3+} или Fe^{3+} , а также примесь $Mn^{4+}, Cr^{3+}, Ti^{4+}, V^{4+}$ и др. Кристаллохимический тип структуры — бесконечные цепочки из кремнекислородных тетраэдров $(SiO_4)^{4-}$, соединённых через два общих атома кислорода, вытянутые по оси с кристаллов. Элементарное звено цепочки — анионная группа $[Si_2O_6]^{4-}$.

Плагиоклазы (от греч. *plágios* - косою и *klásis* - ломка, раскалывание), распространённые породообразующие минералы, входящие в группу каркасных (по кристаллохимической структуре) алюмосиликатов - полевых шпатов. По химическому составу представляют собой непрерывный изоморфный ряд натриево-кальциевых алюмосиликатов - альбита $Na [AlSi_3O_8]$ и анортита $Ca [Al_2Si_2O_8]$ с неограниченной смешиваемостью. В виде примесей иногда содержат K_2O (до нескольких процентов), BaO , SrO , FeO , Fe_2O_3 и др.

Полиморфизм (от греч. *polýmorphos* - многообразный) в физике, минералогии, химии, способность некоторых веществ существовать в состояниях с различной атомной кристаллической структурой. Каждое из таких состояний (термодинамических фаз), называется полиморфной модификацией, устойчиво при определённых внешних условиях (температуре и давлении). Модификации обозначаются обычно греческими буквами α, β, γ и т.д. Различие в структуре обуславливает и различие в свойствах полиморфных модификаций данного вещества.

Пропилитизация - процесс метасоматического преобразования первичных минералов вулканических основных или средних горных пород с образованием в них хлорита, альбита, адуляра, актинолита, серецита, пирита, цеолитов. Процесс связан с воздействием на вмещающие породы послемагматических (иногда рудоносных) растворов (проникающих по трещинам) в областях активного вулканизма. По температуре образования различают три минеральные фации пропилитизации: высокотемпературная (актинолит-эпидот-альбитовая), среднетемпературная (эпидот-хлорит-альбитовая) и низкотемпературная (хлорит-альбит-кальцитовая и адуляр-цеолитовая или безальбитовая). Процессы нередко связаны с зонами

гидротермального изменения пород, сопровождающих образование сульфидных руд Cu, Au, Ag, Zn, Pb, Mo, As, Sb, Hg.

Реголит - лунный грунт. Во всех районах посадки космических аппаратов, луна покрыта разномерным обломочно-пылевым слоем толщиной от нескольких метров до нескольких десятков метров. Он возник в результате дробления, перемешивания и спекания лунных пород при падениях метеоритов и микрометеоритов. Из-за действия солнечного ветра реголит насыщен нейтральными газами. Среди обломков реголита найдены частицы метеоритного вещества. Радиоизотопным методом установлено, что некоторые обломки на поверхности реголита находились на одном и том же месте десятки и сотни млн. лет.

Роговая обманка - наиболее распространённый породообразующий минерал из группы моноклинных амфиболов. Примерный химический состав $\text{Ca}_2\text{Na} [\text{Mg}, \text{Fe}]_4 [\text{Al}, \text{Fe}] [(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{11}]_2[\text{OH}, \text{F}]_2$, со значительными колебаниями соотношений основных компонентов и с разнообразными элементами-примесями (Na - K, Ba, Rb; Ca - TR, Y, Sr, U, W, Mo; Al - Ga; Mg - Li; Fe - Zn, Sc). Кристаллизуется в моноклинной системе. Образует удлинённо-призматические и неправильные зёрна, волокнистые агрегаты зелёного, чёрного, бурого цвета. Твёрдость по минералогической шкале 5,5-6. Плотность 3100-3300 кг/м³.

Рутил (от лат. *rutilus* - изжелта-красный, ярко-красный, отливающий золотом), минерал, одна из трёх полиморфных модификаций двуокиси титана TiO_2 . В виде примесей содержит Fe, Cr, иногда V, Nb, Ta.

Сверхновые звёзды - звёзды, испытавшие катастрофический взрыв, после которого происходило огромное увеличение их блеска. В максимуме блеска их светимость в миллиард раз превышает светимость таких звёзд, как Солнце, превосходя иногда светимость всей галактики, в которой они находятся. Максимум блеска сверхновой звёзды наступает примерно через две-три недели после взрыва. После этого её блеск начинает постепенно падать, уменьшаясь в течение последующих 100 суток в 25-50 раз. В среднем в галактике, подобной нашей, вспыхивает одна - две сверхновые звёзды в столетие.

Серицит (от лат. *sericus* - шёлковый) - минерал, разновидность белых слюд, обычно мусковита $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$, реже парагонита $\text{NaAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$. Часто содержит меньше калия (натрия), больше воды, SiO_2 , MgO, по составу приближаясь к гидрослюдам.

Обычно встречается в виде скрыто- и тонкочешуйчатых бесцветных или зеленоватых масс с шелковистым блеском. Как вторичный минерал широко распространён в гидротермально измененных изверженных и метаморфических горных породах, в серицитовых сланцах, в зальбандах рудных тел вместе с кварцем, карбонатами, хлоритом, сульфидами, баритом, тальком, реже флюоритом и турмалином..

Серицитизация - процесс замещения плагиоклазов и других минералов серицитом при воздействии на горные породы низкотемпературных гидротермальных растворов. Характерный процесс околорудного метасоматические изменения горных пород, сопровождающий развитие медно-колчеданных, полиметаллических, золотосеребряных, сурьмяно-ртутных и других руд. Нередко развивается в связи с березитизацией, лиственитизацией, пропицитизацией и окварцеванием горных пород.

Сидерофильные элементы (от греч. sideros - железой philéo - люблю), группа переходных химических элементов, относящихся в основном к VIII группе (3 d - 5 d) периодической системы элементов (Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) и некоторые соседние элементы (Mo, Re); иногда к этой группе относят также Au, P, As, C, Ge, Ga, Sn, Sb, Cu.

Сланцы - горные породы, характеризующиеся почти параллельным расположением входящих в их состав вытянутых или пластинчатых минералов и обладающие способностью раскалываться на тонкие пластинки. По степени регионального метаморфизма выделяются две большие группы: слабо метаморфизованные горные породы - глинистые сланцы и глубоко метаморфизованные - кристаллические сланцы.

Солоди – тип почвы, образующийся из солонцов в результате замещения обменного Na на H. один из характерных признаков солодей и осолоделых почв – наличие в них аморфной кремнекислоты, растворимой в 5% KOH.

Толейт [от названия селения Толей (Tholey), земля Саар, ФРГ] - толейтовый базальт, вулканическая горная порода, лишённая порфириновых включений. Состоит из основного плагиоклаза (Лабрадора), пироксенов (пижонит, авгит, гиперстен), базальтической роговой обманки, кварца, иногда оливина, в промежутках между которыми встречаются участки неизменного вулканического стекла.

Турбидиметрия (от лат. turbidus — мутный и ...метрия) - метод

анализа мутных сред, основанный на измерении интенсивности поглощённого ими света. Турбидиметрические измерения производят в проходящем свете с помощью визуальных и фотоэлектрических колориметров и турбидиметров, аналогичных колориметрам, но применяющихся без светофильтров.

Фумаролы (итал. fumarola - дымящая трещинка вулкана) - небольшие отверстия и трещинки, по которым поднимаются струи горячих газов (H_2O , HCl , HF , SO_2 , CO_2 , CO , H_2S , H_2 и др.), выделяющихся из магмы. Они расположены в кратере, на склонах и у подножия вулкана. С фумаролами связано отложение возгонов галогенидов, сульфатов, самородной серы и др.

Халькофильные элементы (от греч. chalkós - медь и philéo - люблю, имею склонность) - химические элементы сульфидных руд по классификации В. М. Гольдшмидта. Составляют побочные группы периодической системы элементов. В их число входит 19 элементов.

Эвтектика (от греч. éutektos - легко плавящийся) - жидкая система (раствор или расплав), находящаяся при данном давлении в равновесии с твёрдыми фазами, число которых равно числу компонентов системы.

Эксцентриситет орбиты - один из элементов орбиты небесного тела, характеризующий её форму. В зависимости от величины эксцентриситета e орбита имеет форму эллипса ($e < 1$), параболы ($e = 1$) или гиперболы ($e > 1$).

Элювий (от лат. eluo - вымываю) - рыхлые отложения, возникающие при выветривании исходных (материнских) горных пород на месте их залегания.

Эпигенез - различные природные изменения осадочных горных пород после их образования.

Содержание

	Введение.....	3
1	Химические элементы: происхождение и распространение.....	5
1.1	Межзвёздный газ.....	5
1.2	Межзвёздная пыль	7
1.3	Спектры метеоров и химический состав метеорных тел	10
1.4	Химический состав звезд	11
1.5	Источники звёздной энергии и эволюция звёзд	15
1.6	Распространённость химических элементов.....	16
1.7	Эволюция Солнечной системы.....	24
1.7.1	Солнце	24
1.7.2	Планетная космогония	27
1.7.3	Лунный грунт	32
1.8	Геохимия Земли	34
1.8.1	Геохимические процессы	37
1.8.2	Классификация минералов.....	51
1.8.3	Геохимические провинции.....	65
1.8.4	Кларки элементов.....	66
1.9.5	Геохимия ландшафта	72
1.9	Распространённость химических элементов в природе..	73
1.10	Биогеохимия элементов	73
1.10.1	Биогеохимические провинции.....	79
1.10.2	Биогеохимические эндемии	81
1.10.3	Биогеохимические циклы элементов	82
1.10.4	Участие микроэлементов в почвообразовании.....	86
1.11	Геохимические процессы в гидросфере, атмосфере и биосфере	88
1.11.1	Виды вод гидросферы	91
1.11.2	Антропогенные изменения состава вод гидросферы	96
1.11.2	Элементы атмосферы	102
1.12	Антропогенные биогеохимические провинции.....	108
1.12.1.	Антропогенные биогеохимические провинции и поступление элемента в организм.....	115
	Заключение	123
	Литература	124
	Приложение А. Фотографии и краткие характеристики некоторых минералов.	125
	Глоссарий.....	157

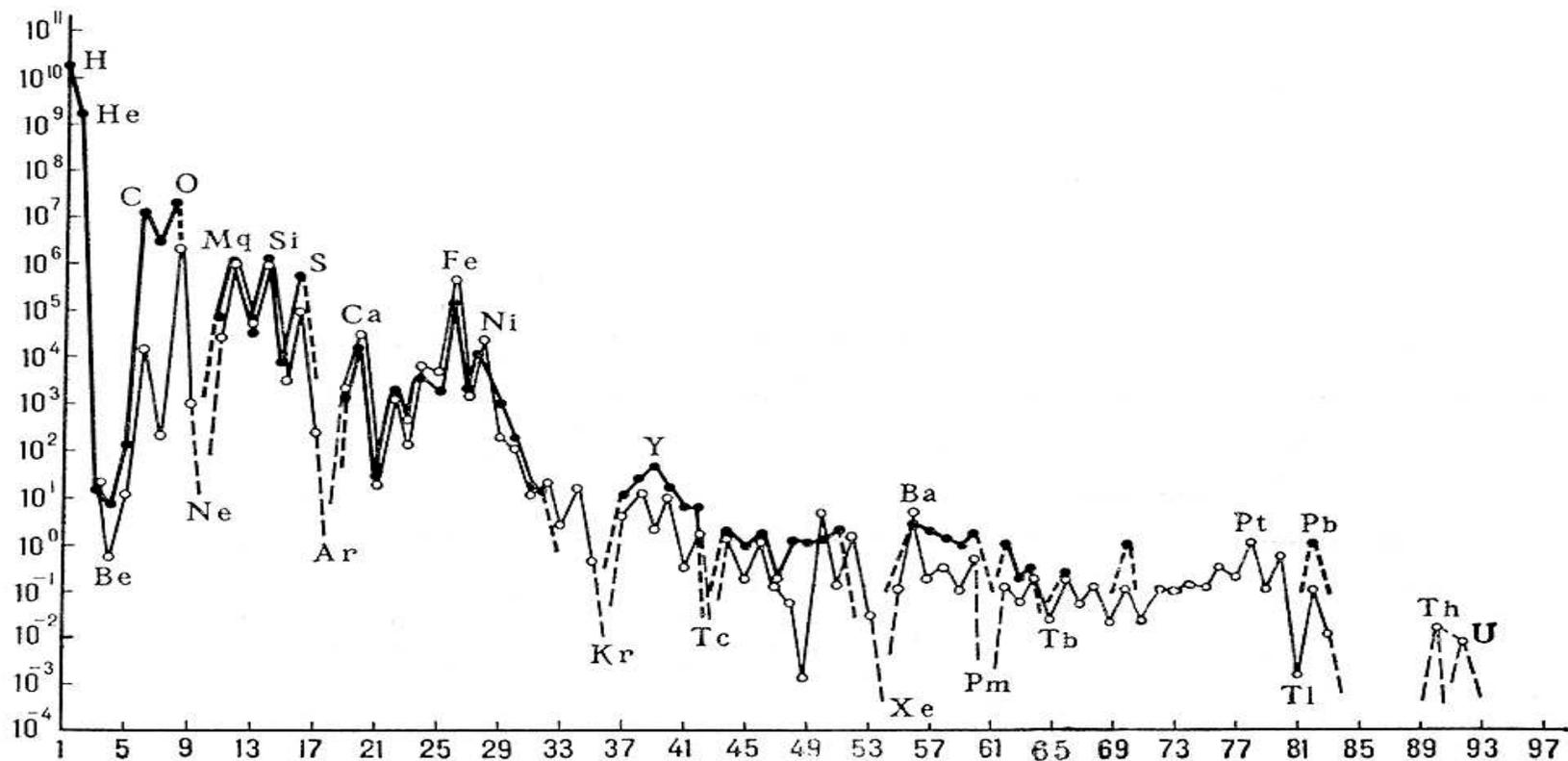


Рисунок 13 - Распространённость химических элементов на Солнце ● и в каменных метеоритах (хондритах) ○; по оси абсцисс — порядковые номера элементов, по оси ординат — число атомов данного элемента на 10^6 атомов Mg

Таблица 41 - Биогеохимические эндемии (Виноградов А.П., 1949)

Элемент	Недостаток элемента и эндемии	Избыток элемента и эндемии	Специфическая флора или фауна
Li	-	-	Литиевая флора
Be	-	Бериллиевый рахит у животных	
B	Заболевание растений, при сод. В почва ниже 10^{-5} %	Заболевание растений в пустынях с борным засолением	
F	Заболевание зубов (кариес), ниже $5 \cdot 10^{-5}$ %	Флюороз костей, крапчатость эмали зубов, в питьевой воде выше 10^{-5} %	-
Na	-	Галофитизм у растений	Галофиты
Mg	Мраморность листьев и хлороз у растений, Травяная тетания у животных		
Al	-	Изменение флоры в квасцовых озерах вулканических областей	Алюминиевые растения
Si			Кремневые растения и животные
P	Остеопороз и другие заболевания костей у животных и характерная пурпурность листьев		

S	Недостаточно изучено		Серная флора
Ca	Остеопороз и другие заболевания у животных (Ca в траве меньше 0,1 %)		Кальциевая флора
Mn	Хлороз и др заболевания растений	Заболевания у растений	
Fe	Хлороз у растений, анемии у животных		
Co	Анемии скота, при содержании в почве менее $2 \cdot 10^{-6}$ %		
Cu	Специфическое заболевание у животных, при сод ниже 10^{-4} %, у растений особенно чувствительны злаки		
Zn	Заболевания растений	Изменчивость растений на галмейных почвах	Цинковая флора
Se		«щелочная болезнь» животных, изменчивость у растений, при содержании в почве выше $n \cdot 10^{-5}$ %	
Sr		«стронциевый рахит» у животных при высоком содержании в почве и воде	
Mo	Болезни растений, особенно бобовых	Заболеваемость скота при высоком содержании в почве	
I	Зоб у животных, при содержании в почвах ниже 10^{-5} %		

Таблица 45 - Расчет индекса загрязненности воды (ИЗВ) для р.Иртыш за 2002 г. (по Слажнева Т.И.)

Наименование	Южный водозабор г.Павлодар	Подводящий канал ОАО «ЕЭЮ» > г.Аксу	Спасательная станция г.Павлодар	Выше сброса ГОС г.Павлодар	Ниже сброса ГОС г.Павлодар	Северный водозабор	с. Мичурино
БПК полное	3,4:3=1,13	2,6:3=0,9	3,02:3=1 -	3,5:3=1,2	3,9:3=1,3	3,3:3=1,1	3,5:3=1,2
Растворенный кислород	8,77:6=1,5	10,2:6=1,7	9,7:6=1,6	8,7:6=1,5	9,0:6,01,5	8,9:6,1,6	9,5:6=1,6
Взвешенные вещества	23:21,4=1,1	13,3:21,4=0,6	17,0:21,4=0,8	36,6:21,4=1,7	36:21,4=1,7	25:21,4=1,16	16:21,4=0,7
Нефтепродукты	0,05:0,05=1	0,12:0,05=2,4	0,18:0,05=3,6	0,2:0,05=4	0,08:0,05=1,6	0,13:0,05=2,6	0,14:0,05=2,8
Фосфаты	0,05:0,25=0,4	0,1:0,25=0,4	0,1:0,25=0,4	0,58:0,25=2,3	0,55:0,25=2,2	0,04:0,25=0,16	0,13:0,25=0,5

Железо	0,15:0,1 =1,5	0,1:0,1 =1	0,15:0, 1=1,5	0,12:0,1 =1,2	0,13:0,1 =1,3	0,16:0 ,1=1,6	0,1 7:0,1=1, 7
ИЗВ сред.	1,1	1,16	1,48	1,98	1,6	1,35	1,4