


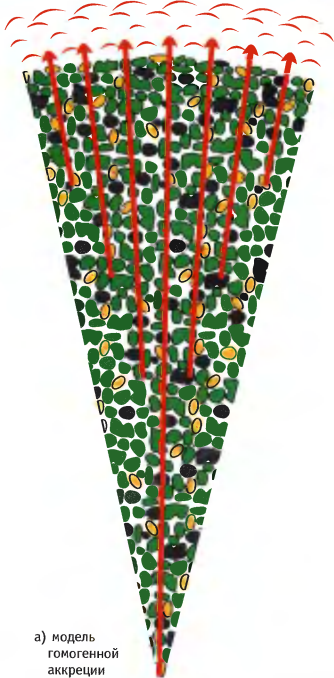


# ГЛАВА 5



## ГОЛУБЫЕ ПОКРОВЫ ПЛАНЕТЫ

-  - железо-никелевые планетезимали
-  - хондритовые планетезимали
-  - углисто-хондритовые планетезимали

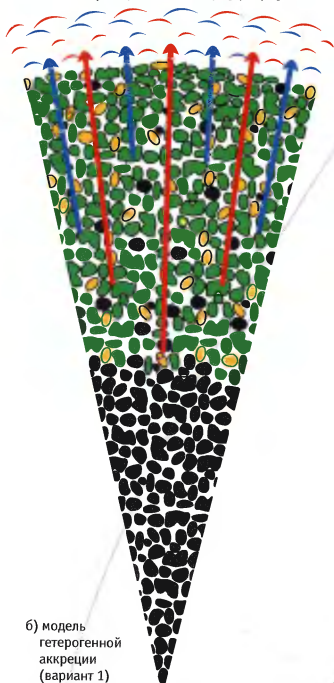
восстановительная первичная атмосфера  
с преобладанием  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$



а) модель  
гомогенной  
аккреции

-  - флюиды, несущие восстановленные компоненты ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ )
-  - флюиды, несущие нейтральные компоненты ( $H_2O$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ )

слабо восстановительная первичная атмосфера,  
содержащая  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $N_2$

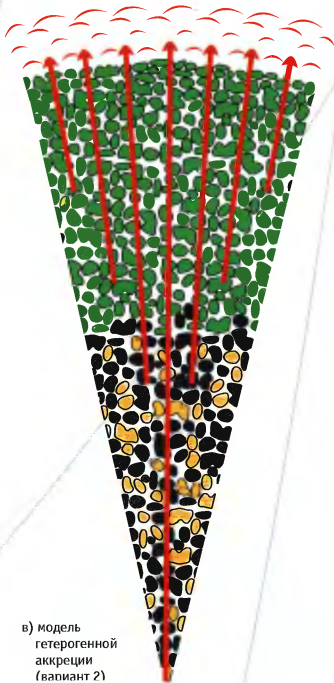


б) модель  
гетерогенной  
аккреции  
(вариант 1)

**И**з Космоса наша планета кажется голубой. Это связано с тем, что она окружена воздушной и водной оболочками - атмосферой и гидросферой. Голубые покровы Земли уникальны. Водная оболочка нашей планеты и вовсе единственная в своем роде: гидросферы, как таковой, больше нет ни на одном теле Солнечной системы. Очень необычна и атмосфера Земли. Правда, газовыми оболочками окружены также Венера и Марс, планеты-гиганты и некоторые их спутники, но только атмосфера Земли содержит большие количества кислорода.

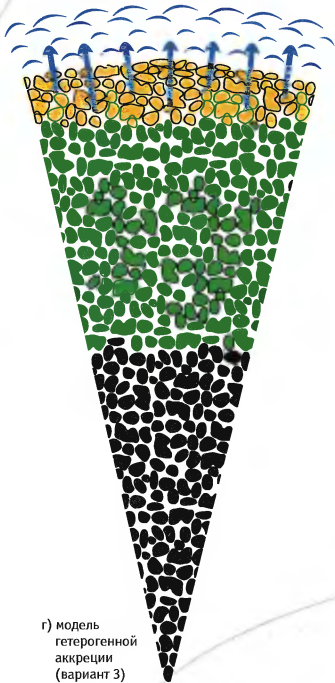
В этой главе вы узнаете, каким образом ученые сумели разобраться в том, что представляют собой вода и воздух, как люди осознали, что вода и воздух образуют две особые планетарные оболочки. И, наконец, вы узнаете о том, что думает современная наука о происхождении и эволюции удивительных голубых покровов Земли.

резко восстановительная первичная атмосфера,  
состоящая из  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$



в) модель  
гетерогенной  
аккреции  
(вариант 2)

нейтральная первичная атмосфера  
с преобладанием  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$



г) модель  
гетерогенной  
аккреции  
(вариант 3)

# ЧТО ТАКОЕ ВОЗДУХ? ЧТО ТАКОЕ ВОДА?

...Гидрогенум два, оксигенум -  
H<sub>2</sub>O - открывайте кран -  
Вот химическое соединение  
Молекула воды - океан."  
Г. Санников

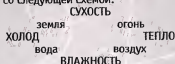
**Е**ще античные ученые пытались постичь, что представляют собой вода и воздух. Мыслители Древней Греции считали, что все существующее в природе состоит из небольшого числа "первичных" элементов. Эта концепция получила свое завершение в работах Аристотеля, который видел начало всех начал в четырех элементах - земле, воде, огне и воздухе - их он полагал простыми и неделимыми.

В Средние века естествоиспытатели сталкивались с явлениями, которые указывали на сложную природу воды и многокомпонентность воздуха. Но приверженность античной догме была сильнее возникавших сомнений, и всего два с половиной века назад вода и воздух все еще считались простыми и неделимыми "первичными элементами".

Смена представлений произошла только во второй половине XVIII века, когда благодаря бурному развитию химии было сделано множество важнейших открытий. Честь установления сложной природы воды и количественного определения состава воздуха принадлежит выдающемуся французскому ученому Антуану Лавуазье (1743-1794). История этих открытий теснейшим образом связана с созданием им теории окисления, которая произвела революцию в химии и сменила господствовавшую в то время концепцию флогистона.

## О СООТНОШЕНИИ АРИСТОТЕЛЕВЫХ "КАЧЕСТВ" И "ЭЛЕМЕНТОВ"

Основой всего существующего в природе Аристотель считал даже не сами "первичные элементы" - землю, воду, воздух и огонь, - а так называемые абстрактные "качества": сухость, тепло, влажность и холод. Сами первичные элементы, как полагал Аристотель, являются проявлениями некой "первичной материи", наделенной всего двумя качествами, в соответствии со следующей схемой:



Так вода, в понимании Аристотеля, представляет собой первичную материю, принявшую в себя качества холода и влажности, воздух - влажности и тепла. Все остальные вещества, по представлению Аристотеля, образовались в результате наделения первичной материи более чем двумя качествами, которые, комбинируясь в различных пропорциях, и составили все многообразие природных веществ.

По мнению Аристотеля, одни вещества могли переходить в другие за счет изменения набора качеств, присущих первичной материи. Металлы, как представлялось, обладали очень близким набором качеств. На этом и основывалась вера средневековых алхимиков в возможность получения золота из других металлов.

## ПОВЕСТЬ О ФЛОГИСТОНЕ ИЛИ ИСТОРИЯ ВЕЛИКОГО ЗАБЛУЖДЕНИЯ.

Первой общехимической теорией, связавшей в единую систему огромный объем накопленных ранее знаний, была теория флогистона. Ее выдвинул в начале XVIII века немецкий химик и врач Георг Эрнст Шталь (1659-1734). Это учение, владевшее умами ученых почти столетие, оказалось ошибочным, но явилось мощным толчком для развития химии. Согласно теории Штала, все вещества, которые горят с выделением пламени, и все металлы, которые при обжигании на воздухе превращаются в окалины (т.е. вещества способные окисляться, как говорят на языке современной химии), содержат в себе особый элемент - флогистон. Горение и окаливание представлялись как процесс потери веществом флогистона. Суть этой теории легко понять, если рассмотреть, как она описывала какую-нибудь простую реакцию окисления. Реакции окисления металлов, например, цинка



представлялись в виде:

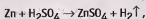
Металл - Флогистон = Окалина

или, что точнее отражает суть дела:

Металл → Флогистон + Окалина

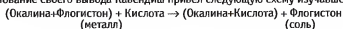
Как хорошо видно из последнего выражения, окалины (т.е. окислы металлов) рассматривались Шталем и его последователями в качестве простых элементарных веществ, а сами металлы (в действительности-то и являющиеся элементарными веществами) считались соединениями двух элементов - флогистона и соответствующей окалины.

Несмотря на ошибочность таких представлений, теория флогистона сыграла огромную прогрессивную роль в развитии химии. Впервые в превращении одних веществ в другие увидели простую комбинацию составляющих их элементов, а не какое-то таинство или смену сочетаний абстрактных аристотелевых "качеств". Концепция флогистона получила широкое распространение и признание, и затем, естественно, начались попытки выделить флогистон в чистом виде. Однажды даже сложилось впечатление, что эта цель достигнута. В 1766 году выдающийся английский естествоиспытатель Генри Кавендиш, изучая реакцию взаимодействия между цинком и серной кислотой:

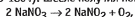


собрал выделяющийся при этом газ и, исследовав его свойства, пришел к выводу, что он является новым, ранее неизвестным веществом. Так был открыт водород, названный вначале "горючим воздухом". Правда, сам Ка-

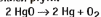
вендиш ошибочно отождествил его с флогистоном, а его интерпретация получила в то время широкое признание других ученых. В обоснование своего вывода Кавендиш привел следующую схему изучавшейся им реакции:



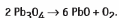
Вскоре был открыт еще один новый газ, ныне известный как кислород. Независимо друг от друга его удалось выделить и описать сразу двум исследователям - в 1769-71 гг. шведу Карлу Вильгельму Шееле (1742-1788), а в 1774 г. англичанину Джозефу Пристли (1733-1804). Шееле получил новый газ путем прокаливания селитры:



а Пристли двумя способами - нагреванием окиси ртути:



и прокаливанием сурика:



Оба ученых установили, что только в присутствии открытого ими газа возможно дыхание и горение, отсюда одно из первых названий кислорода - "огненный воздух". Приверженность концепции флогистона помешала обоим первооткрывателям кислорода правильно понять, что именно они открыли. Новый газ воспринимался ими как воздух, лишенный флогистона, отсюда еще одно его название - "дефлогистированный воздух".

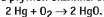
В те же годы ученому миру стал известен еще один газ, который теперь называется азотом. Впрочем, его открытие имело свою предысторию. В 1756 году наш соотечественник Михаил Васильевич Ломоносов (1711-1765) описал свои опыты по образованию окалины у металлов при нагревании последних в заполненных воздухом, но прочно запаянных сосудах. Ломоносов обнаружил, что на образование окалины расходуется только часть воздуха, в то время как другая его часть в реакции не участвует. Тем самым было показано, что воздух состоит, по крайней мере, из двух компонентов.

Эти опыты, однако, не получили широкой известности, и спустя примерно полтора десятилетия к подобным результатам независимо от Ломоносова и друг от друга пришли сразу несколько западноевропейских исследователей. Среди них были Кавендиш, Шееле, Пристли, а также шотландский химик Джозеф Блэк (1728-1799). Блэк предложил своему ученику, тоже шотландцу, Даниэлю Резерфорду (1749-1819) изучить свойства этого газа. В 1772 году Резерфорд опубликовал результаты своих исследований и первооткрывателем азота традиционно, хотя и не совсем справедливо, считают именно его.

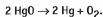
Новый газ не поддерживал ни дыхания, ни горения, поэтому он был назван "мефитическим" (т.е. испорченным) воздухом". Поддерживая концепцию флогистона, Резерфорд, так же как и первооткрыватели водорода и кислорода, не смог правильно разобраться в природе исследованного им вещества. Он считал, что этот новый газ представляет собой воздух, насыщенный флогистоном. Подобной точки зрения придерживались также Кавендиш, Пристли и Шееле.

В конечном счете концепция флогистона исчерпала себя и стала тормозом в дальнейшем развитии химии. Она уводила исследователей от понимания истины и вносила большую путаницу в интерпретацию получаемых ими данных. Первооткрывателям "горючего", "дефлогистированного" и "мефитического воздуха" не удалось самим разобраться в природе обнаруженных ими газов. Это удалось сделать только Антуану Лавуазье, который пришел к выводу, что каждый из этих газов является самостоятельным химическим элементом. Он же дал утвердившиеся потом названия: водород, кислород и азот. В 70-80-х годах XVIII столетия Лавуазье провел несколько опытов, которые по своей сущности были подобны опытам, выполненным до него Ломоносовым, Пристли и Кавендишем. Но в отличие от своих предшественников, французский ученый сопровождал эти опыты точными количественными измерениями. Обладая огромной проницательностью, Лавуазье сумел добиться грандиозных успехов: сокрушить концепцию флогистона, установить количественный состав воздуха, доказать сложную элементарную природу воды и создать теорию окисления.

В 1774 году Лавуазье выполнил опыт подобный опыту Ломоносова, нагревая ртуть в заполненном воздухом запаянном сосуде. Происходившее образование ртутной окалины сопровождалось поглощением части воздуха:



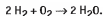
Лавуазье установил, что объем воздуха в этом опыте уменьшается на одну пятую. Оставшиеся четыре пятых первоначального объема представляли собой не поддерживающий горения "мефитический воздух", т.е. азот. Полученную ртутную окалину Лавуазье поместил в другую посуду, который также запаял и подверг высокотемпературному нагреву. В результате этого, как и в опыте Пристли, произошло восстановление металлической ртути и выделение "дефлогистированного воздуха":



Объем выделившегося при этом газа был в точности равен объему газа, поглощенному в первом опыте. Не оставалось никаких сомнений в том, что одна пятая часть воздуха, поглощавшаяся при окалинении ртути, представляла собой именно "дефлогистированный воздух", т.е. кислород.

Проведенные опыты позволили Лавуазье получить первую количественную оценку состава воздуха, а затем пойти еще дальше - опираясь на эти результаты, он создал теорию окисления. Стало ясно, что процессы окисления и восстановления можно объяснить, не привлекая для этого флогистон.

Окончательный удар по концепции флогистона Лавуазье нанес в 1783 году, проведя опыты по синтезу воды из водорода и кислорода:



Он установил, что масса образующейся воды в точности соответствует массе участвующих в реакции газов. Это полностью исключало истолкование этой реакции как распад водорода на воду и флогистон, что было предложено Кавендишем двумя годами ранее. Напротив, теория окисления получила еще одно убедительное подтверждение. Этим опытом также была окончательно установлено, что вода не является простым элементом, как это было принято думать со времен Аристотеля, а представляет собой сложное химическое соединение, в состав которого входят два элемента - водород и кислород.

## ВОЗДУШНАЯ ОБОЛОЧКА ЗЕМЛИ

*"Навек закрыв собой материки и воды,  
Глядит небесный свод на все земные свободы..."*  
В. Шефнер

**А**тмосфера - это внешняя газовая оболочка нашей планеты, удерживаемая у ее поверхности благодаря силам гравитации. Она является средой обитания наземных живых организмов, служит для всего живого надежным щитом от губительных космических излучений, смягчает суточные и сезонные перепады температуры и, наконец, оказывает огромное влияние на ход геологических процессов. По-существу, мы живем на дне огромного воздушного океана, максимально плотно у поверхности Земли и постепенно сходящего на нет с высотой. Четкой верхней границы атмосферы не имеет. Но по мере удаления от земной поверхности количество атмосферного воздуха постепенно убывает: в среднем давление воздуха и его плотность уменьшаются вдвое на каждые 5 км высоты. Это означает, что в нижнем пятикилометровом слое сосредоточено около половины всей массы атмосферы, в десятикилометровом слое -  $3/4$  и т.д. Если бы вся атмосфера обладала одинаковой плотностью, равной плотности воздуха у земной поверхности, то ее высота составляла бы всего 7,9 км. Выше 100 км над поверхностью Земли находится лишь одна миллионная часть атмосферного воздуха, но его присутствие сказывается и на гораздо больших высотах. В частности, оно выражается в медленном торможении космических кораблей на околоземных орбитах.

Хотя из всех оболочек нашей планеты именно у атмосферы пространственные границы определены наименее четко, ее общая масса установлена намного точнее, чем масса любой другой земной оболочки. Массу атмосферы можно определить даже ничего не зная о ее составе - для этого достаточно умножить среднее значение атмосферного давления у земной поверхности на общую площадь поверхности земного шара. Масса земной атмосферы составляет  $5,15 \cdot 10^{18}$  тонн - чуть меньше одной миллионной от общей массы планеты.

По своему химическому составу атмосфера очень однородна. Это и не удивительно, ведь ничто на нашей планете в такой мере не подвержено процессам перемешивания, как ее воздушная оболочка. Главными газами земной атмосферы являются азот и кислород, составляющие вместе более 99% ее объема.

### ОТКРЫТИЕ ВОЗДУШНОГО ОКЕАНА ЗЕМЛИ

Представление об атмосфере, как о воздушной оболочке Земли, убывающей с высотой и удерживаемой благодаря силам гравитации, сформировалось лишь к концу XVII столетия, после того как было открыто атмосферное давление и изучены закономерности его изменения с высотой. До этого представления о воздухе и его распределении в пространстве вокруг земного шара основывались на учении Аристотеля о "первичных элементах".

По Аристотелю четыре "первичных элемента" - земля, вода, воздух и огонь, составлявшие основу всех материальных тел "подлунного" мира, обладали "врожденными свойствами" легкости и тяжести. Представлялось, что в замкнутой сферической Вселенной эти свойства проявляются в стремлении тяжелых элементов двигаться к ее центру, а легких - устремляться вверх к периферии "подлунного" пространства. "Надлунный" мир по Аристотелю был построен из пятого "первичного элемента" - небесного эфира, который не имел ни легкости, ни тяжести, естественным движением которого являлось вечное круговое вращение.

Самый тяжелый из "первичных элементов" - земля, она и составила земной шар в центре Вселенной. Другим "врожденно тяжелым элементом" по Аристотелю являлась вода - она сформировала океаны, моря и реки на поверхности земного шара. А "легкими элементами", для которых естественным движением было движение вверх в высоты "подлунного" мира, Аристотель считал воздух и огонь. Правда, возникал вопрос почему, если воздух стремился улететь вверх, он все таки присутствовал у земной поверхности, а не сосредотачивался весь у самой поверхности лунной сферы. Аристотель объяснял это тем, что "природа боится пустоты" и поэтому, по его представлениям, все пространство "подлунного" мира должно было быть равномерно заполнено воздухом. Сам Аристотель отмечал в своем трактате "О небе", что воздух имеет вес, однако, впоследствии комментаторы его трудов "исправили" это утверждение, и на протяжении веков считалось, что "чистый" воздух веса не имеет. Такое представление об атмосфере, равно как и аристотелев "принцип боязни пустоты" просуществовали в науке в течение двух тысячелетий. Вплоть до начала XVII столетия под атмосферой Земли понимали воздух, заполняющий пространство внутри лунной сферы, не имеющий веса и не оказывающий давления на земную поверхность.

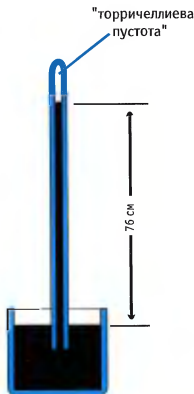
Лишь в начале XVII века ученые впервые столкнулись с фактами, явно противоречащими этим представлениям. Сперва в 1612 году Галилей опытным путем установил, что воздух имеет вес, и даже определил отношение удельного веса воздуха к удельному весу воды, получив значение 1:400 (по современным данным - 1:773,5 при нормальных условиях). А спустя некоторое время был поколеблен и "принцип боязни пустоты". В 1640 году герцог Тосканский решил создать на террасе своего дворца во Флоренции крупный фонтан, и для подачи воды из нижерасположенного озера был построен поршневой насос большой длины, каких до этого еще не строили. Однако вода поднималась вслед за поршнем лишь до высоты 10,3 м, после чего поршень двигался дальше, а вода нет. Получа-

лось, что между поршнем и водой образовывалась пустота, которой, согласно устоявшимся многовековым представлениям, в природе быть не могло. За консультацией обратились к Галилею, на что великий ученый ответил, что хотя природа действительно боится пустоты, но по всей видимости лишь до определенного предела.

Этот случай подтолкнул одного из учеников Галилея, молодого итальянского ученого Эванджелиста Торричелли (1608-1647) поставить в 1644 году свой знаменитый опыт со ртутной трубкой, приведший к открытию атмосферного давления. Сущность опыта заключалась в следующем: в трубку, запаянную с одного конца, наливалась ртуть, затем, зажав открытый конец, трубку переворачивали и опускали открытым концом в чашечку со ртутью. При этом ртуть из трубки не выливалась в чашечку, а лишь опускалась до некоторого предела. Вне зависимости от длины и ширины трубки столбик ртути над ее уровнем в чашечке имел одну и ту же высоту - 76 см.

Этот, на первый взгляд, неброский опыт вызвал большое волнение у ученых. Ведь было очевидно, что пространство над ртутью в опрокинутой трубке является безвоздушным, оно даже получило название "торричеллиевой пустоты". Тем самым окончательно опровергалась античная дога о том, что "природа боится пустоты". Однако необходимо было дать объяснение наблюдаемым фактам. Сам Торричелли объяснял стояние столбика в трубке не стремлением жидкости заполнить образовавшуюся пустоту, как это пытались сделать некоторые ученые, а давлением воздуха на ртуть в чашечке: давление ртутного столба просто уравновешивало соответствующее давление воздуха.

После нескольких лет дискуссий и неоднократных проверок опытов Торричелли его результаты получили всеобщее признание, а само явление давления воздуха стало интенсивно изучаться. Было установлено, что давление воздуха не одинаково на разных высотах. Собственно, в изменении давления с высотой не было ничего удивительного - ведь с подъемом вверх столб воздуха, который давит на единицу площади, становится меньше. Важно было выяснить, как именно уменьшается давление с увеличением высоты. В 1657-58 гг. итальянский ученый Джованни Борелли (1608-1679) провел систематические исследования изменения атмосферного давления и установил, что вначале давление воздуха падает с высотой довольно быстро, но по мере подъема в горы его падение хоть и продолжается, но все более и более медленными темпами. Это означало, что воздух с высотой становится все более и более разреженным. Можно было не сомневаться, что тенденция к разрежению воздуха сохраняется и выше, а значит, в конечном счете воздух и вовсе исчезает. Так стало ясно, что атмосфера - это сравнительно тонкая воздушная оболочка Земли, верхняя граница которой находится где-то сравнительно недалеко от земной поверхности. Аристотелево представление об атмосфере, как о равномерно заполненном воздухом пространстве внутри сферы Луны, окончательно отошло в прошлое.



## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕРЫ

Во второй половине XVIII столетия было выяснено, что воздух представляет собой не единый элемент, а состоит из двух разных газов. Генри Кавендиш, славившийся исключительной тщательностью проводимых им измерений, установил, что объемное содержание кислорода в воздухе составляет 20,84% - ошибка определения составила лишь одиннадцать сотых процента! Вся остальная часть воздуха рассматривалась учеными в то время в качестве другой его составляющей - азота. Правда, Кавендишу удалось установить, что и в самом "азоте" есть какая-то небольшая примесь, обладающая необыкновенной химической устойчивостью, но это открытие не получило должного резонанса, и о нем забыли.

Спустя еще столетие английский ученый Джон Стратт (1842-1919), более известный ныне как лорд Рэлей, обнаружил, что "азот" воздуха тяжелее, чем азот, выделяемый из азотных соединений. Это указывало на наличие в атмосферном "азоте" какой-то более тяжелой примеси, и Рэлей обратился к научному сообществу с призывом разобраться в этой проблеме. Успех выпал на долю самого Рэлей, который в 1894 году сумел вместе с английским химиком Уильямом Рамзаем (1852-1916) выделить этот газ. За свою химическую инертность новый газ получил название "аргон", что в переводе с греческого означает "недеятельный". В дальнейшем выяснилось, что и в самом "аргоне" существуют примеси - другие инертные газы, т.е. гелий, неон, криптон и ксенон.

По современным данным сухой атмосферный воздух имеет следующий состав (в объемных процентах):

Кроме того, в атмосферном воздухе содержатся переменные количества водяного пара, озона, а также некоторых газов, имеющих промышленное происхождение.

N <sub>2</sub> (азот)	78,09
O <sub>2</sub> (кислород)	20,95
Ar (аргон)	0,93
CO <sub>2</sub> (углекислый газ)	0,03
Ne (неон)	0,0018
He (гелий)	0,00052
CH <sub>4</sub> (метан)	0,00022
Kr (криптон)	0,0001
NO <sub>2</sub> (диоксид азота)	0,0001
H <sub>2</sub> (водород)	0,00005
Xe (ксенон)	0,000008

*"И жадно со дна атмосферы  
Во мраке планетных ночей  
Направятся в горные сферы  
Опять миллионы очей."  
Н. Морозов*

**П**осле того, как было выяснено, что атмосфера представляет собой не просто равномерно заполненное воздухом пространство "подлунного" мира, а газовую оболочку Земли, удерживаемую силами гравитации и состоящую из многокомпонентной смеси газов, ученые стали задумываться о ее вертикальном строении. Открыл эру научного исследования воздушного океана планеты выдающийся французский естествоиспытатель Жозеф Луи Гей-Люссак (1778-1850), который поднялся на воздушном шаре на высоту около 7000 м и отобрал пробы воздуха. Он установил, что его состав на этой высоте не отличается от такового у поверхности. В настоящее время вертикальное зондирование атмосферы регулярно проводится с помощью автоматических метеозондов, а ее верхние слои – с помощью ракет.

Хотя в пределах атмосферы нет никаких резких границ, в ней можно отчетливо выделить различающиеся по своим свойствам слои. **В основе вертикальной структуры атмосферы прежде всего лежит характер изменения температуры воздуха с высотой. В соответствии с этим принципом в атмосфере выделяют 4 слоя: тропосферу, стратосферу, мезосферу и термосферу.** Эти слои различаются количеством и способом получения тепловой энергии, первоисточником которой во всех случаях является солнечное излучение.

Под тропосферой понимают ближайший к поверхности Земли атмосферный слой, в котором температура воздуха быстро убывает с высотой, поскольку основная часть тепловой энергии поступает от нагретой Солнцем поверхности Земли. Скорость убывания температуры воздуха в тропосфере составляет в среднем около  $5^{\circ}\text{C}$  на 1 км высоты. Неравномерность прогресса земной поверхности на разных широтах приводит к интенсивной циркуляции воздушных масс, которой охвачена вся тропосфера. Именно в этом слое происходят интенсивные метеорологические процессы, формирующие климат и погоду. Здесь образуются почти все облака (практически весь водяной пар атмосферы сосредоточен именно в тропосфере), отсюда проливаются на поверхность Земли дожди и выпадает снег. Толщина тропосферы не одинакова в разных местах земного шара: чем меньше тепла получает земная поверхность от Солнца, тем тоньше слой тропосферы над ней. Над полярными районами ее толщина составляет в среднем 6-8 км, в умеренных широтах - 8-13, а над экватором - достигает 18 км. В пределах тропосферы сосредоточено около 80% общей массы атмосферы.

Над тропосферой вплоть до высоты 50 км лежит следующий атмосферный слой - стратосфера, характеризующийся тем, что температура воздуха в нем с высотой не уменьшается, а остается постоянной и, более того, в верхней зоне - на высотах 25-50 км - даже растет. Такой характер температурного режима стратосферы связан с присутствием в ней озона -  $\text{O}_3$ . Озон обладает очень высокой способностью к поглощению ультрафиолетового излучения (в диапазоне длин волн 2000-3000 Å), благодаря чему энергия этой части спектра солнечной радиации переходит в тепловую энергию газовых молекул и происходит дополнительный разогрев стратосферы.

Выше стратосферы на высотах 50 - 80 км лежит мезосфера, распределение температуры в которой практически целиком определяется тепловой энергией, поступающей от земной поверхности. Поэтому температура воздуха в мезосфере с ростом высоты, как и в тропосфере, закономерно падает.

Самым верхним слоем атмосферы является термосфера, начинающаяся на высотах около 80 км. Этот слой характеризуется тем, что температура воздуха в его пределах резко возрастает и на высотах порядка 200-300 км от поверхности Земли достигает около  $1000^{\circ}\text{C}$ . Столь высокая температура в верхней зоне атмосферы Земли обусловлена тем, что азот и кислород поглощают жесткую часть ультрафиолетового излучения Солнца (с длиной волн менее 2000 Å) и энергия этого излучения превращается в тепловую энергию газовых молекул. Учитывая, что воздух на этих высотах очень разрежен, понятие температуры теряет свой привычный смысл, а определяет лишь среднюю кинетическую энергию молекул. Тела, находящиеся в такой "раскаленной", судя по значениям температуры, термосфере, не будут нагреваться от соприкосновения с воздухом, поскольку количество соударяющихся с ними газовых молекул ничтожно мало.

Такое, в общих чертах, разделение земной атмосферы на отдельные слои, выполненное на основании характера изменения температуры с высотой. **Совершенно по другому принципу выделяют ионосферу - зону атмосферы, характеризующуюся значительным содержанием в ней ионов и свободных электронов.** Ионосфера охватывает всю верхнюю часть атмосферы, начиная

с высот порядка 50-80 км. Причиной повышенной ионизации воздуха в этой зоне является разложение молекул атмосферных газов, прежде всего кислорода и азота, под действием различных космических излучений.

Самую внешнюю часть атмосферы, в которой воздух столь разрежен, что отдельные атомы могут, не столкнувшись с другими атомами, беспрепятственно и безвозвратно "уйти" в космическое пространство, называют экзосферой. Она начинается на высоте нескольких сотен километров. В настоящее время установлено, что Земля имеет чрезвычайно разреженный газовый хвост, протягивающийся на сотни тысяч километров в направлении, противоположном Солнцу. Газовый хвост Земли по своей природе родственен хвостам комет, через него атмосфера "утекает" в космическое пространство.

#### ИЗМЕНЕНИЕ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА С ВЫСОТОЙ В НИЖНИХ 100 КМ АТМОСФЕРЫ

#### ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ

По химическому составу атмосфера очень однородна, но все же можно говорить о некоторых небольших различиях между слоями. Прежде всего это касается верхних атмосферных слоев - ионосферы, где происходят процессы диссоциации (разложения) газовых молекул, и, особенно, экзосферы, где происходит избирательная диссипация (рассеяние) различных газов в космическое пространство, т.к. этот процесс протекает интенсивнее у более легких газов. В нижней части атмосферы - в тропосфере и стратосфере - различия в составе воздуха касаются только некоторых второстепенных компонентов - водяных паров, почти полностью сосредоточенных в тропосфере, и озона, присутствующего, главным образом, в стратосфере.

#### ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ

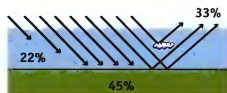
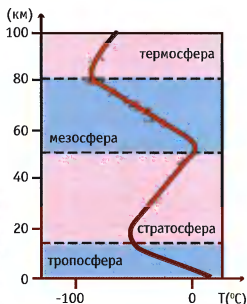
Земная атмосфера весьма прозрачна в оптической части спектра, на которую приходится основная доля энергии солнечного излучения: при прохождении через атмосферу поглощается лишь 22% лучистой энергии Солнца. Еще 33% безвозвратно отражается в космическое пространство от облаков и поверхности планеты, а 45% солнечного излучения поглощается поверхностью суши и моря, нагревая их.

Земная поверхность, средняя температура которой составляет +15° С, переизлучает полученную от Солнца энергию, но уже не в оптическом, а в инфракрасном диапазоне, для которого земная атмосфера далеко не так прозрачна. Инфракрасное (тепловое) излучение в значительной мере поглощается атмосферой, в результате чего происходит ее дополнительный общий разогрев примерно на 22°. Этот глобальный планетарный эффект получил название "парникового", так как аналогичный эффект происходит в обыкновенных сельскохозяйственных парниках: стеклянные стены или полиэтиленовая пленка почти не препятствуют солнечному излучению, которое нагревает землю, но в то же время задерживают тепло внутри парника. Интересно, что парниковый эффект в земной атмосфере обусловлен не ее главными компонентами, которые прозрачны для инфракрасного излучения, а, напротив, ее малыми компонентами - прежде всего, углекислым газом и парами воды, а также озоном.

#### РОЛЬ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ

Помимо дополнительного разогрева стратосферы, наличие озонового слоя приводит к тому, что почти целиком поглощаемое им ультрафиолетовое солнечное излучение (с длиной волн 2000-3000 А) практически не достигает поверхности Земли. Излучение этой части спектра губительно для живых организмов, и озоновый слой играет таким образом роль своеобразного щита, спасающего все живое от этого излучения. Если бы озоновый слой отсутствовал, то жизнь на поверхности нашей планеты просто не могла бы существовать.

Заметим, что общее содержание озона в атмосфере очень невелико - оно не превышает 0,00005%, что соответствует его слою при нормальном давлении толщиной всего в 4 мм! Озон является динамическим компонентом атмосферы - он постоянно образуется под действием ионизирующего излучения Солнца в результате диссоциации и рекомбинации молекул кислорода, после чего довольно быстро разлагается. Максимум концентрации озона приходится на высотный интервал 20-25 км.





*"Вода!  
У тебя нет ни вкуса, ни цвета,  
ни запаха, тебя не опишешь, тобой  
наслаждаешься, не понимая, что  
ты такое. Ты не просто необходима  
для жизни, ты и есть жизнь..."*  
А. де Сент-Экзюпери

**В**ода - одно из самых распространенных веществ на нашей планете. Формы ее нахождения в природе очень разнообразны. Жидкая вода образует океаны и водные объекты суши, в виде подземных вод она присутствует в земной коре. Кроме того, жидкая вода является важнейшей составляющей в тканях растений и животных. Вода в твердом состоянии образует ледники в полярных странах и снежные покровы в высоких и умеренных широтах. В газообразной форме вода на нашей планете присутствует в атмосфере в качестве одного из ее переменных компонентов (пар), а также в глубоких недрах земной коры и мантии, где она в смеси с другими веществами образует так называемые горячие флюиды, заполняющие мельчайшие трещины и полости в горных породах.

Во всех вышеперечисленных случаях вода находится в свободном состоянии - то есть ее молекулы не связаны какими-либо прочными связями с молекулами других веществ. Но природная вода может находиться еще и в связанном состоянии, входя в состав разных минералов в виде ассоциированных молекул  $H_2O$  или гидроксильных групп (ОН). В природе существуют сотни водосодержащих минералов. Например, такие широко известные минералы как гипс  $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$  или опал  $SiO_2 \cdot n H_2O$  содержат ассоциированные молекулы воды, а слюдястый минерал мусковит  $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$  и глинистый минерал каолинит  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  содержат воду в виде гидроксильных групп.

Каждая из форм нахождения воды на нашей планете не является чем-то изолированным и неизменным. Все виды воды связаны друг с другом непрерывными переходами и тем самым образуют единую систему. Эту систему всех планетарных вод, как свободных, так и связанных, иногда называют гидросферой в широком смысле слова. В более узком, и более употребимом смысле, в котором мы и будем использовать его дальше, гидросфера - это совокупность вод Мирового океана, водных объектов суши и подземных вод, а также вод, сосредоточенных в виде льда. Полярные и высокогорные ледники, а также многолетняя мерзлота составляют особую часть гидросферы - криосферу.

#### САМОЕ УДИВИТЕЛЬНОЕ ВЕЩЕСТВО ПЛАНЕТЫ.

Вода является не только одним из самых распространенных веществ на Земле, но и, без сомнения, самым удивительным. Достаточно сказать, что практически все физические свойства воды являются аномальными - то есть резко отличаются от соответствующих свойств ее химических аналогов.

Само существование на нашей планете воды в жидком состоянии обусловлено аномальностью таких ее свойств, как температура кипения и температура замерзания. Эти характеристики не являются случайными, и в рядах химических аналогов они закономерно изменяются в зависимости от молекулярного веса вещества. Химическими аналогами воды являются гидриды теллура, селена и серы:  $H_2Te$ ,  $H_2Se$  и  $H_2S$ . В этом ряду с уменьшением молекулярного веса происходит и уменьшение температур кипения и замерзания. Вода, являющаяся гидридом кислорода  $H_2O$ , должна была бы, согласно этой закономерности, кипеть при температуре минус  $70^\circ C$ , а замерзать при температуре минус  $90^\circ C$ . Если представить, что вода обладала бы "нормальной" температурой кипения, то в условиях температурного режима Земли она практически всегда и везде находилась бы в парообразном состоянии. В таком фантастическом мире водоемы могли бы возникать только в окопозлоусных районах и лишь в зимнее время.

Аномальность еще одной термической характеристики воды - удельной теплоемкости - определяет стабильность температурного режима на нашей планете. Для того, чтобы нагреть массу воды на  $1^\circ C$ , требуется гораздо больше тепла, чем для того, чтобы произвести нагревание на  $1^\circ C$  такой же массы любого другого жидкого или твердого вещества. Благодаря исключительно высокой термической инертности воды, Мировой океан как нельзя лучше выполняет роль гигантского планетарного терморегулятора, сглаживая суточные и сезонные перепады температуры. В дневное время, а также летом, водные массы медленно нагреваются, поглощая при этом много тепла, что не позволяет воздуху разогреваться слишком сильно. По ночам и в зимние периоды, наоборот, водные массы медленно остывают, выделяя накопленное ранее тепло, что не позволяет воздуху чрезмерно охлаждаться. Суточное и сезонное терморегулирование по своей сути подобны, но сезонное отличается большей амплитудой колебания температуры, и большей мощностью водной массы, задействованной в этом процессе. Для того, чтобы оценить роль аномально высокой теплоемкости в стабилизации температурного режима на Земле, достаточно вспомнить, что суточные перепады температуры в пустынях достигают  $60^\circ$  и более. Если бы вода обладала удельной теплоемкостью, свойственной большинству веществ (например, горным породам), то климат нашей планеты повсеместно характеризовался бы очень резкими суточными и сезонными колебаниями температуры, что сделало бы нашу малопригодной для жизни.

Очень важной является и такая аномалия воды, как уменьшение плотности при переходе в твердое состояние, что резко отличает ее от других веществ. Если бы вода не обладала этой аномалией, то лед, образующийся зимой на поверхности водоёмов, тонул бы и накапливался на дне, не успевая растаять в течение теплого сезона. Это привело бы, в конечном счете, к замерзанию на всю глубину водоёмов полярных и даже умеренных широт.

Необычным образом изменяется плотность воды не только при замерзании, но и при нагревании. Если почти у всех веществ при нагревании плотность уменьшается, то у воды в интервале температур от 0° до 4° С, нагревание сопровождается сжатием, то есть увеличением плотности. И хотя оно очень невелико: всего от 0,99984 г/см<sup>3</sup> при 0° С до 1,00000 г/см<sup>3</sup> при 4° С, эта аномалия воды играет очень важную роль в динамике вод и температурном режиме пресных водоемов (у соленой морской воды такой аномалии нет). Летом верхние слои в водоемах нагреваются, а нижние остаются сравнительно холодными. Такое положение устойчиво, так как верхние слои менее плотные, чем нижние. С наступлением холодного сезона вода в приповерхностном слое начинает остывать, и становясь более плотной, погружается ко дну. То же происходит и с новыми порциями воды, оказавшимися у поверхности. Происходящее таким образом интенсивное перемешивание ведет к выравниванию температуры по всему объему водоема и сравнительно быстрому его остыванию. Так продолжается до тех пор, пока температура воды не достигнет 4° С. После этого вода, продолжая остывать в приповерхностном слое, имеет уже меньшую плотность, чем вода во всей нижерасположенной части водоема. Положение вновь становится устойчивым, и перемешивание прекращается. Приповерхностный слой продолжает остывать и вскоре замерзает, а основной объем водоема остается сравнительно теплым и имеет температуру около 4° С. Если бы вода не обладала этой аномалией, то перемешивание в пресных водоемах продолжалось бы до тех пор, пока температура воды не достигла 0° С. В этом случае большинство водоемов суши промерзло бы в зимнее время, что сделало бы эти водные объекты непригодными для существования в них многих представителей водной флоры и фауны.

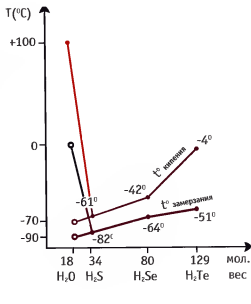
Первопричина аномальности физических свойств воды заключается в наличии между ее молекулами особого вида межмолекулярного химического взаимодействия - водородных связей, которые отсутствуют у химических аналогов воды. Если бы любое из аномальных свойств воды каким-то невероятным образом вдруг стало "нормальным", это имело бы самые серьезные общепланетарные последствия. Не будет преувеличением сказать, что такие важнейшие особенности нашей планеты, как наличие на ней океанов, морей и рек, ледников и сезонных снежных покровов, сравнительно устойчивый на протяжении миллионов лет климат и, наконец, наличие самой жизни - все это в решающей мере обусловлено аномальностью свойств воды.

#### КАК МНОГО ВОДЫ НА ЗЕМЛЕ?

Задумываясь о том, как распределена вода на поверхности планеты и сколько ее общее количество на Земле, люди начали давно. Еще с античных времен господствовало представление о том, что площадь суши значительно превосходит площадь моря. С началом эпохи Великих географических открытий стало ясно, что это не так, и что площадь моря, по крайней мере, не меньше, чем площадь суши. Правильное же представление о том, в каком соотношении находятся на нашей планете суша и вода, сложилось к концу XVIII столетия, когда были в основном завершены открытия в океанах и положены на карту очертания всех материков (кроме Антарктиды). К этому времени стало понятно, что основная часть поверхности нашей планеты покрыта водой. Напомним, что Мировой океан занимает около 71% поверхности Земли.

Представление о единстве морей и океанов нашей планеты начало складываться после того, как в 1519-22 гг. экспедиция Фернана Магеллана (1480-1521) совершила первое кругосветное плавание. В конце XVIII века французский географ Кларк де Флерье на основании результатов, полученных мореплавателями в эпоху Великих географических открытий, окончательно обосновал представление о единстве всех океанов и морей планеты и ввел в употребление понятие Всемирный или Мировой океан, под которым подразумевалась единая, охватывающая весь земной шар водная оболочка. А в 1875 году знаменитый австрийский геолог Эдуард Зюсс (1831-1914) для обозначения всей совокупности вод Мирового океана, водных объектов суши, подземных вод, а также вод, сосредоточенных в ледниках, ввел понятие "гидросфера".

Первая попытка определить объем воды, сосредоточенный в океанах и морях на нашей планете была предпринята еще в середине XVII века выдающимся нидерландским географом Бернхардом Варениусом (1622-1650). Исходя из присущих тому времени ошибочных представлений о том, что площадь океанов и морей составляет около половины площади земной поверхности, а их средняя глубина - около 2,6 км, Варениус получил значение, равное примерно половине реального объема. Согласно современным расчетам, выполненным А. Поддєрвартом, общая масса свободной воды на Земле (без учета горячих флюидов нижней части земной коры) равна  $1644 \cdot 10^{15}$  т, что составляет около одной четырехтысячной от общей массы планеты.



Форма нахождения Свободной воды	Масса (10 <sup>15</sup> т)	Процент от всей массы
Мировой океан	1420	86,48
Подземные воды	201	12,16
Ледники	22	1,33
Водные объекты суши	0,5	0,03
Атмосфера	0,013	0,001
Флора и фауна	0,001	0,0001

## В ВЕЧНОМ ДВИЖЕНИИ

"...Когда в бескрайности природы  
Где, повторяюсь, все течет,  
Растут бесчисленные своды  
И каждый свод вращает в свод..."  
И. Гёте

**В**заимные переходы воды между Мировым океаном, атмосферой, водными объектами суши, растительным покровом, подземными водами, а также ледниками называются **круговоротом воды в природе (влагооборотом)**. Эти переходы осуществляются путем испарения воды, выпадения твердых и жидких атмосферных осадков, просачивания воды через грунт, речного и подземного стока, таяния снега и льда и некоторыми другими способами. **Первопричиной этого кругооборота является действие солнечной энергии и силы тяжести.**

Однако, влагооборот на Земле не исчерпывается обменом воды между гидросферой, атмосферой и биосферой. В земной коре происходят различные геологические процессы, сопровождающиеся переходом воды из свободного состояния в связанное и наоборот. Кроме того, существует водообмен между внешними и внутренними частями планеты. И, наконец, происходит некоторый водообмен между Землей и космическим пространством.

**КРУГООБОРОТ ВОДЫ В ПРИРОДЕ**

Благодаря влагообороту, все формы нахождения воды в природе, связаны непрерывными взаимными переходами, и поэтому вода в каждой форме непрерывно обновляется. Наиболее быстро, всего за 10 дней такое обновление происходит в атмосфере. Это означает, что за 10 дней на нашей планете выпадает такая масса осадков, которая соответствует общей массе водяного пара в атмосфере. Так как содержание влаги в атмосфере в целом остается неизменным, то, за это же время в атмосферу испаряется такое же количество воды, что и выпало в виде осадков.

Испарение воды является мощнейшим планетарным процессом, на который расходуется примерно четверть всей поступающей на Землю солнечной энергии. Каждую минуту с поверхности океана, водоемов суши и ледников испаряется в атмосферу около одного кубического километра воды. В течение года с поверхности водоемов в среднем по планете испаряется слой толщиной около 1,3 м. Из этого следует, что огромный Мировой океан полностью обновляет (по объему) содержащуюся в нем воду примерно за 3 тысячи лет, а водоемы суши - в среднем за 7 лет.

Подземные воды, находящиеся в верхних слоях земной коры, обновляются за период около 5 тысяч лет. Их питание происходит за счет просачивания атмосферных осадков, а расход - путем подземного стока в поверхностные водные объекты, а также испарения растениями (растения извлекают воду из грунта с помощью корневой системы, а испаряют в атмосферу через поверхность листьев).

Даже ледники, кажущиеся застывшими и вечными, на самом деле очень подвижны. Обновление ледников происходит довольно быстро - так, грандиозный антарктический ледник обновляет свою массу примерно за 9 тысяч лет.

Разумеется, в любом из элементов гидросферы есть пассивные части, почти выключенные из процесса водообмена, поэтому вышеприведенные оценки являются осредненными. Например, под обновлением антарктического ледника за 9 тысяч лет подразумевается, что за это время за счет оттока айсбергов и испарения с поверхности теряется масса льда, равная массе всего ледника. При этом такая же масса накапливается за счет выпадения осадков. Какие-то части ледника при этом остаются почти неподвижными, но зато в других полное обновление льда происходит очень быстро.

Другие процессы водообмена на нашей планете протекают гораздо медленнее, однако их направленное действие на протяжении всей геологической истории приводит к значительным эффектам. Так, огромные массы свободной воды выводятся из активного кругооборота при образовании осадочных пород. В результате вода из свободного состояния переходит в связанное. Считается, что масса связанной воды в горных породах земной коры составляет около половины всей массы воды современного Мирового океана. В то же время протекают и обратные процессы: при высокотемпературном прогреве и переплавлении горных пород происходит высвобождение связанной воды и возрожденные воды по трещинам и разломам земной коры вновь поступают к поверхности, чтобы принять участие в вечном круговороте воды на Земле.

Значительные объемы воды поступают к поверхности планеты из мантии. Такие воды, которые еще никогда не участвовали во влагообороте в приповерхностных оболочках, называются ювенильными, что в переводе с латинского означает "юные". Ювенильные воды отщепляются на больших глубинах из расплавленных базальтовых магм и по трещинам и разломам устремляются вверх - в верхние зоны земной коры, где и включаются в активный водообмен. Современные оценки привнеса ювенильных вод из мантии составляют от 70 до 400 · 10<sup>6</sup> тонн воды ежегодно. В рамках теории тектоники плит считается, что есть и обратный процесс - поступление воды в мантию. Вместе с погружающимися в процессе субдукции литосферными плитами уходит в мантию и содержащаяся в них свободная и связанная вода, однако количественная оценка этого процесса до сих пор очень дискусионна.

Еще большие трудности представляет оценка интенсивности водообмена нашей планеты с космическим пространством. Непосредственное поступление воды с метеоритным веществом совсем невелико - около 25 тонн в год. Но помимо этого, наша планета подвергается "бомбардировке" потоками так называемых космических лучей, состоящих, в основном, из быстро летящих и обладающих большой энергией протонов, которые в верхних слоях атмосферы соединяются с присутствующими там свободными электронами и превращаются в атомы водорода. Новообразованный водород соединяется с атмосферным кислородом, и, следовательно, происходит образование воды. В то же время, в верхних слоях атмосферы происходит и распад молекул воды под действием космического излучения. При этом атомы водорода, в большей мере чем другие атомы, покидают пределы земной

атмосферы, диссипируя в космическое пространство. Количественная сторона этого процесса остается пока не выясненной.

Так осуществляется Большой круговорот воды на Земле, в котором ярко находит свое отражение взаимосвязь и взаимодействие всех оболочек планеты.

## ОТЧЕГО НА ЗЕМЛЕ ТЕКУТ РЕКИ?

На протяжении многих веков оставалось полной загадкой, откуда берется вода, которая течет в реках, и в чем, например, причина великих нильских разливов? Некоторые ученые, в частности Платон, считали, что первоисточником речных вод является огромная подземная пещера, куда по каналам поступает морская вода. Иных представлений придерживался Аристотель, который полагал, что реки текут с гор, а питают их дожди, которые выпадают в горах, где из-за холода условия для конденсации атмосферной влаги лучше, чем в низинах. В своем энциклопедическом труде "Метеорологика" великий философ рассматривает нижнюю атмосферу как сферу не только воздуха, но и воды, потому, что здесь влага, испаряющаяся с земной поверхности, снова охлаждается, конденсируется и выпадает в виде дождя. Дождевая вода, полагал Аристотель, питает реки, а также после просачивания через грунт поступает в подземные пустоты, давая затем начало родникам.

К сожалению, взглядам Аристотеля не суждено было стать общепризнанными. Слишком малым казалось количество воды, выпадающее вместе с дождями, в сравнении с огромным объемом речного стока. Отсутствие каких-либо количественных данных не позволяло ученым правильно оценить роль процессов испарения воды и выпадения атмосферных осадков. В результате, вплоть до второй половины XVII века считалось, что источником питания речных вод являются подземные воды, а те, в свою очередь, происходят из морской воды, которая каким-то образом поступает в подземные пустоты и полости, изливаясь затем на поверхность в виде родников и рек. Эти глубоко ошибочные взгляды основывались, в свою очередь, на других заблуждениях: считалось, что в земных недрах существуют большие пустоты и что в природе есть силы, способные перемещать громадные массы воды против силы тяжести.

Великий итальянский художник и мыслитель Леонардо да Винчи рассматривал Землю как живой организм, пронизанный жилами, по которым "вода... поднимается из последней глубины моря до высочайших вершин гор и, изливаясь по прорвавшимся жилам, возвращается к указанному уже нисхождению". Сходных взглядов придерживался и Кеплер, сравнивавший Землю с исполинским животным, переваривающим воду. В 1664 году немецкий естествоиспытатель Атанасиус Кирхер (1601-1680) опубликовал книгу "Подземный мир", пользовавшуюся широкой популярностью среди своих современников. В этой работе излагались совершенно фантастические воззрения, согласно которым, в теле Земли существуют "каналы" циркуляции воды. Некоторые из них, разветвляясь, выходят на дневную поверхность в виде родников, крупные каналы соединяют под землей моря, например, Каспийское и Черное, а самый главный канал будто бы проходит от Северного полюса к Южному. На Северном полюсе находится огромная воронка, через которую воды океана вливаются в недра Земли, а на Южном - выходят на поверхность. Низвержением вод в глубины планеты через отверстия на дне моря Кирхер объяснял водовороты воды, в частности - мистический водоворот Мальстрем у берегов Норвегии.

Во всех этих гипотезах необходимо было объяснить, как соленая морская вода превращается в пресную речную. Некоторые ученые считали, что морская вода опресняется по мере ее фильтрации через грунт, однако наиболее распространенной точкой зрения было представление о том, что соленая морская вода проходит перетонку в подземных пустотах под влиянием "жара" земных недр.

По всей вероятности, первым, кто имел вполне современное представление о круговороте воды, был французский естествоиспытатель Бернар Палисси (1510-1590). Еще в 1580 году, основываясь на своем опыте устройства артезианских колодезь, он пришел к выводу, что все родники питаются дождевыми водами. Но его взгляды, изложенные в книге "Воды и родники" не получили широкого признания.

Доказать тот факт, что именно атмосферные осадки являются главным источником питания речных вод, выпало на долю французских естествоиспытателей Пьера Перро (1608-1680), брата великого сказочника Шарля Перро, и Эдма Мариотта (1620-1684). Они измерили общее количество осадков, выпавших в бассейне Сены в 1668-1670 гг. и сравнили его с речным стоком Сены за тот же период. Оказалось, что общее количество атмосферных осадков, выпавших на территории бассейна, не только не меньше, а даже в 6 раз больше, чем весь сток реки! Тем самым было доказано, что атмосферных осадков с лихвой хватает, чтобы обеспечить питание рек.

Несколькими годами позже Эдмунд Галлей показал, что объем воды, испаряющийся с поверхности Средиземного моря, равен количеству воды, которое поступает в него с речными водами. Так было окончательно установлено, что испарение воды и выпадение атмосферных осадков являются мощнейшими процессами, играющими главную роль в круговороте воды на Земле.

## СОТВОРЕНИЕ? КОНДЕНСАЦИЯ? ДЕГАЗАЦИЯ!

*"...И Солнце вспыхнуло пожаром,  
И детский вид свой окружая,  
Запелась водным шаром  
Новорожденная земля, -  
И в каплях слез благовейных  
Вода хладя потекла,  
И в углубившихся бассейнах  
Блестящим зеркалом легла, -  
И над водами дух природы  
Промчался, бурной мощи полн,-  
И всколыхнувшись воды  
Заговорили шумом волн..."*  
В. Бенедиктов

**В**опрос о том, откуда на Земле появились вода и воздух, волновал умы ученых еще в античные времена. Так, пытаясь объяснить происхождение воды, великий древнегреческий мыслитель Платон выдвинул гипотезу о Тартаре - огромном подземном водоеме в центре земного шара, который якобы и является родоначальником всех морей и океанов. В Средние века вопрос о происхождении воды и воздуха "решался" гораздо проще - считалось, что все, что существует на Земле и во Вселенной, создано по Воле Божьей и с тех пор является абсолютно неизменным.

Но уже в конце XVII века появляются первые, хотя и весьма смутные догадки о том, что атмосфера и океан не были сотворены Господом, а возникли на нашей планете в результате ее эволюции. В 1693 году выдающийся немецкий мыслитель Вильгельм Лейбниц (1646-1716) в своих знаменитых трактатах "Протогея" и "Теодицея" впервые сформулировал представление о том, что наша планета имеет "горячее начало" - то есть она когда-то была раскалена. По мере ее остывания, вода, содержащаяся до того в парообразном состоянии, сконденсировалась и образовала океан.

После того, как широкое признание получила ранняя небулярная гипотеза Канта-Лапласа, представления о "горячем начале" Земли, а, следовательно, и об образовании океана в результате конденсации, как казалось, нашли свое теоретическое обоснование. Согласно гипотезе Канта-Лапласа Земля образовалась из горячего газового облака, при этом считалось, что твердая часть планеты сформировалась из ранних конденсатов наиболее тугоплавких веществ, водная оболочка нашей планеты рассматривалась как наиболее поздний конденсат остывающего первичного облака, а воздушная - как сохранившийся реликт самых легколетучих компонентов первичного облака, которые молодой Земле удалось удержать благодаря силам притяжения.

В пятидесятые-шестидесятые годы XX века в науке произошла смена космогонических представлений - утвердилась новая небулярная гипотеза, согласно которой "начало" Земли вовсе не было "горячим": Земля образовалась в результате аккреции пылевых (каменистых и металлических) частиц, то есть имела "холодное начало". Ледовые частицы в аккреции Земли не участвовали - в этой сравнительно "теплой" околосолнечной области протопланетного диска их просто не было. Тем не менее, вода и другие легкоплавкие компоненты все-таки вошли в состав твердого тела первичной Земли вместе с материалом, соответствующим метеоритам группы углистых хондритов. Напомним, что содержание адсорбированной и химически связанной воды в углистых хондритах иногда достигает 20%.

Адсорбционные и гидратационные связи, с помощью которых вода удерживается в углистых хондритах, являются очень непрочными, и поэтому при последовавшем вслед за аккрецией разогреве недр нашей планеты вода и другие "летучие" (то есть такие компоненты, которые легко переходят при нагревании в газообразное состояние) должны были высвобождаться. Происходила так называемая "дегазация" земных недр, и именно этот процесс является ответственным за образование атмосферы и гидросферы. Это общепринятое ныне представление было впервые сформулировано в начале пятидесятых годов известным американским геохимиком Уильямом Руби.

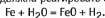
### КАКОЙ БЫЛА ПЕРВИЧНАЯ АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ?

Представление о том, что атмосфера и гидросфера нашей планеты образовались в результате дегазации земных недр получило фактически всеобщее признание в современной науке. В настоящее время обсуждается не сам факт дегазации, а механизмы ее протекания.

Важнейшим источником летучих компонентов, поступающих из земных недр, является углисто-хондритовый материал (см. раздел 2.7), который вошел в состав нашей планеты во время ее аккреции. Этот материал в большом количестве содержал воду, а кроме того, довольно много органических соединений, которые при термическом разложении могли дать начало различным углеродсодержащим газам (метану  $CH_4$ , окиси и двуокиси углерода -  $CO$  и  $CO_2$ ). В результате аккреции в земных недрах оказались и некоторые другие газы, в т.ч. и инертные, но их общее количество должно было быть сравнительно небольшим.

На первый взгляд может показаться, что в процессе дегазации должны выделяться те же летучие компонен-

ты, которые были "захоронены" в теле планеты во время аккреции, но это не совсем так. Напомним, что почти треть материала, из которого сформировалась Земля, была представлена железо-никелевыми частицами. В условиях разогретых недр освобождающаяся вода должна реагировать с металлическим железом:



Благодаря этой реакции по крайней мере часть воды восстанавливалась до водорода, который многими исследователями считается главным компонентом дегазирующих из недр флюидов. Подобным образом происходило восстановление металлическим железом и некоторых других летучих компонентов.

Но в какой мере летучие, высвобождавшиеся из углисто-хондритового материала, прореагировали с металлическим железом? Были ли они восстановлены полностью или только частично? Это определится прежде всего тем, как были пространственно распределены углисто-хондритовый и металлический материал по объему только что образовавшегося земного шара, т.е. по существу тем, в каком порядке проходила аккреция этих двух видов первичного материала. На вступном развороте настоящей главы приведены четыре варианта первичного распределения углисто-хондритового и металлического материала в объеме земного шара (один - для модели гомогенной аккреции, а еще три - для разных вариантов модели гетерогенной аккреции). Ниже разбирается, каким должен был быть состав дегазировавших флюидов и, соответственно, состав первичной атмосферы в каждом из этих случаев.

А) В рамках гипотезы гомогенной аккреции считается, что разные типы материала, сформировавшие тело Земли, в т.ч. металлический и углисто-хондритовый, были равномерно распределены по объему и хорошо перемешаны, что способствовало интенсивному протеканию восстановления воды, а также других летучих компонентов металлическим железом. Поэтому первичная атмосфера, в рамках гипотезы гомогенной аккреции должна была характеризоваться заметным преобладанием восстановленных газов: водорода  $\text{H}_2$ , метана  $\text{CH}_4$ , аммиака  $\text{NH}_3$ , то есть характеризоваться восстановительными условиями.

Б) В рамках гипотезы гетерогенной аккреции существует несколько вариантов изначального распределения в недрах Земли углисто-хондритового материала, ответственного за дегазацию. В наиболее распространенном варианте предполагается, что в начале аккреции сформировалось лишенное летучих металлическое ядро, которое затем "обросло" существенно хондритовой мантией с примесью металлического и углисто-хондритового материала. В этом случае дегазирует не весь объем планеты, как в случае гомогенной модели, а только ее мантия. Так как металлического железа в первичной мантии было сравнительно немного, то значительная часть летучих высвобождавшихся при разогреве недр, достигала поверхности планеты, не вступая в реакцию с ним. В этом случае в составе первичной атмосферы наряду с восстановленными газами существенную роль должны были играть такие устойчивые в нейтральной обстановке газы, как пары воды  $\text{H}_2\text{O}$ , азот  $\text{N}_2$ , углекислый газ  $\text{CO}_2$  и некоторые другие. Иными словами, в соответствии с такой моделью первичная атмосфера Земли должна была иметь слабо восстановительный характер при заметной роли нейтральных газов.

В) В другом варианте гипотезы гетерогенной аккреции предполагается, что изначально образовавшееся ядро было не чисто металлическим, а включало в себя некоторое количество хондритового и углисто-хондритового материала. Мантия же, напротив, состояла только из "сухого" хондритового материала без примеси углистых хондритов. В такой модели дегазирует лишь ядро планеты, при этом выделяющиеся газы должны быть максимально восстановленными, ведь углисто-хондритовый материал находится в этом случае в наибольшем контакте с металлическим железом. Этот вариант предполагает, что первичная атмосфера Земли должна была характеризоваться резко восстановительными условиями.

Г) И, наконец, существует еще один вариант, который можно назвать моделью "ультрагетерогенной" аккреции, согласно которой сначала образовалось чисто металлическое ядро, затем "сухая" мантия, а на завершающих стадиях аккреции - углисто-хондритовая "протокора". Согласно такой структуре изначального распределения материала в теле планеты, дегазирует только самый верхний ее слой - протокора. Эта модель резко отличается от всех вышеупомянутых тем, что в ней углисто-хондритовый материал и выделяющиеся из него летучие компоненты вообще не соприкасаются с металлическим железом. Поэтому такая модель предполагает, что в первичной атмосфере ведущую роль должны были играть пары воды, углекислый газ, азот и другие невосстановленные газы, то есть первичная атмосфера должна была быть нейтральной.

Как видим спектр представлений о том, какой была атмосфера на заре земной истории, очень широк.

## КОГДА ПОЯВИЛИСЬ ПЕРВЫЕ ВОДОЕМЫ?

В рамках гипотезы дегазации образование первичных гидросферы и атмосферы нашей планеты по существу является единым процессом - вода и разнообразные газы, захороненные во время аккреции в земных недрах, высвобождались одновременно. Тем не менее, гидросфера как таковая возникла все же несколько позднее, чем атмосфера, хотя бы потому, что вода не может ни при какой температуре существовать в жидкой форме, если внешне давление составляет менее 4,58 мм ртутного столба. Когда именно на Земле появились первые водоемы, сказать очень трудно - быть может сразу после того, как давление превысило вышеуказанную критическую величину, а быть может прошли еще сотни миллионов лет. Это зависит от того, какой была температура у поверхности Земли. Поскольку представления об условиях, царивших на нашей планете на заре ее истории, носят в основном умозрительный характер и зачастую весьма противоречивы, ограничимся лишь моментами, о которых можно судить весьма определенно. Разогрев и дегазация земных недр в той или иной мере должны были начаться уже в ходе аккреции планеты, поэтому когда земной шар достиг своих современных размеров, вокруг него, предположительно, уже существовала первичная атмосфера. Водоемы же были на Земле по крайней мере 3,8 млрд. лет назад - во всяком случае, такой возраст имеют наиболее древние из известных пока пород, о которых можно достоверно утверждать, что они сформировались в водной среде (комплекс Исуа в Западной Гренландии). Поскольку некоторые особенности пород этого комплекса свидетельствуют о том, что в эпоху их формирования на Земле уже существовала жизнь, о чем пойдет речь в разделе 6.4, то можно предполагать, что первые водоемы на нашей планете возникли гораздо раньше.

## АТМОСФЕРА И ГИДРОСФЕРА: СЦЕНАРИИ ЭВОЛЮЦИИ

*"...в этих медленных, инертных  
Преображеньях естества -  
Залог бессмертия для смертных  
Первоначальные слова."  
Н. Гумилев*

**У**ченые, видимо, еще долго будут спорить о том, как именно происходила дегазация Земли. Одни считают, что она имела катастрофический характер, то есть произошла в течении сравнительно короткого периода на самых ранних этапах существования нашей планеты, а затем сменялась очень медленным остаточным истечением летучих компонентов из недр, продолжающимся и до сих пор. Другие же полагают, что дегазация происходила равномерно в течение всей истории существования нашей планеты, а третьи - что ее интенсивность даже возрастала со временем.

В случае ранней катастрофической дегазации огромные количества летучих поступили к поверхности планеты уже в ходе ее аккреции и в течение короткого времени после ее завершения. Первичная атмосфера при таком сценарии должна была быть очень массивной - во много раз более массивной, чем нынешняя. Кроме того, из-за сильного парникового эффекта она должна была быть и очень горячей. В общем, первичная атмосфера Земли согласно катастрофической модели дегазации во многом напоминала современную атмосферу Венеры - очень массивную и очень горячую, поэтому ученые, придерживающиеся таких представлений, называют ранний этап истории Земли "венерианским". Со временем, благодаря диссипации в космическое пространство значительной части газов, масса земной атмосферы существенно уменьшилась, и она остыла до температуры, при которой началась конденсация воды. "Венерианский" этап развития Земли на этом закончился. Огромные массы находившихся в атмосфере водяных паров сконденсировались и образовали первичный океан, который по объему почти не уступал современному.

В случае равномерной или возрастающей дегазации, количество летучих компонентов, поступающих на ранних этапах истории планеты к ее поверхности, было небольшим, при этом основная их часть быстро рассеивалась (диссипировала) в космическое пространство. Небольшая часть газов, которая была удержана притяжением Земли, образовала первичную атмосферу. Такая атмосфера должна была быть очень холодной, поскольку парниковый эффект в малоомощной разреженной атмосфере очень слаб. Сторонники этого сценария дегазации называют самый ранний этап истории нашей планеты "лунным". Этот термин прочно утвердился в науке, но заметим, что справедливее было бы назвать его "марсианским", ведь именно Марс в настоящее время обладает подобной атмосферой - очень разреженной и холодной. Луна же, во всяком случае в настоящее время, по-прежнему, не имеет никакой газовой оболочки.

Со временем, по мере накопления удерживаемых земным притяжением газов, первичная атмосфера Земли становилась все более и более плотной. Жидкой воды на поверхности Земли какое-то время не существовало: слишком низким было атмосферное давление. Зато на Земле могли существовать обширные, хотя и очень тонкие снежно-ледовые покровы подобные полярным шапкам Марса. Лишь после того, как давление и температура в приповерхностных слоях атмосферы достигли значений, при которых может существовать жидкая вода, на планете появились первые водоемы. "Лунный" или, точнее говоря, "марсианский" этап истории нашей планеты на этом завершился.

В ходе дальнейшей дегазации водяные пары и различные газы продолжали поступать к земной поверхности в количествах, превышающих их потери за счет рассеяния в космическое пространство и связывания в различные минеральные соединения. В рамках такого сценария равномерной или возрастающей со временем дегазации, масса воздушной и водной оболочек Земли неуклонно увеличивалась в течение всей геологической истории.

Каким бы ни был в действительности самый ранний этап истории нашей планеты - "венерианским" или "марсианским", с появлением на Земле первых водных бассейнов наступил принципиально иной, собственно "земной" этап ее развития. Наличие на поверхности планеты жидкой воды самым серьезным образом повлияло на общий ход эволюции других ее периферийных оболочек - атмосферы и литосферы. Газы, содержащиеся в первичной атмосфере, стали частично растворяться в воде возникших океанов. Так как все газы имеют свой предел насыщения, то для каждого из них установилось свое, присущее только ему равновесие между содержаниями в воде и воздухе. Однако если газ, растворенный в воде, вступал в химические реакции, то его содержание в воде снижалось, и для поддержания равновесия требовалось растворение новых порций этого газа, которые, попадая в воду, также расходовались в химических реакциях. Самым ярким примером тому является углекислый газ, который, попадая в воду в больших количествах, через цепочку промежуточных реакций с растворенными в воде ионами кальция и магния расходовался на образование карбонатных пород (доломитов и известняков). В результате атмосфера Земли оказалась поч-

ти полностью "очищенной" от углекислого газа, которого, судя по гигантскому объему карбонатных пород в земной коре, когда-то было в атмосфере очень много. На самых ранних этапах земной истории образование карбонатных пород шло чисто химическим путем, но по мере развития жизни ведущую роль стало играть биогенное осаждение: формировались огромные толщи карбонатных пород, сложенных останками живых организмов (например, мели, ракушечниковые и коралловые известняки).

Появление на Земле гидросферы самым серьезным образом повлияло и на эволюцию литосферы, в верхней части которой сформировался мощный и очень разнообразный по составу пород осадочный чехол, подобного которому нет ни на одной другой планете. Но самым главным следствием возникновения гидросферы были все же не эти, пускай даже грандиозные, преобразования в атмосфере и литосфере – существование водоемов было одним из обязательных условий для появления на нашей планете жизни. Но это уже совсем другая история, о которой пойдет речь в следующей главе.

#### СРАВНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АТМОСФЕР ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Атмосферы Венеры и Марса резко отличаются по химическому составу от атмосферы Земли. Венерианская атмосфера состоит из углекислого газа (около 96,5 объемных %) с примесью азота (около 3,5%), а марсианская – также, в основном, из углекислого газа (около 95%) с примесью азота (до 3%) и аргона (до 2%). Содержание других газов в атмосферах обеих планет незначительно. Еще одна планета земной группы – Меркурий, так же как и Луна, атмосферы, в обычном понимании этого слова, не имеет.

Хотя атмосферы Венеры и Марса очень похожи по химическому составу, они очень резко различаются по своим физическим характеристикам. Атмосфера Венеры очень горячая и плотная – у поверхности планеты средняя температура составляет 480° С, а давление 90 атм. Атмосфера Марса, напротив, очень холодная и разреженная – средняя температура у поверхности равна -55° С, а давление – лишь 0,006 атм.

В атмосфере Венеры установлено присутствие до 0,2% паров воды, но из-за очень высокой температуры ни в жидкой, ни тем более в твердой форме вода на поверхности этой планеты существовать не может. Пары воды в небольших количествах присутствуют и в атмосфере Марса (0-0,2%). На поверхности планеты вода присутствует в виде льда, составляющего основную массу знаменитых полярных шапок Марса. Жидкой воды на поверхности Марса нет. Хотя температура в экваториальной зоне Марса иногда и поднимается выше 0° С, но атмосферное давление у марсианской поверхности ниже критического для жидкой воды значения 4,58 мм ртутного столба. Тем не менее, на поверхности Марса отчетливо видны высохшие русла и другие формы рельефа, связанные с течением жидкой воды. По-видимому, в прошлом атмосферное давление у поверхности Марса было несколько выше. Есть все основания полагать, что жидкая вода в настоящее время присутствует в неглубоких марсианских недрах, где и температура, и давление соответствуют диапазонам существования воды в жидкой форме.

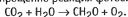
#### ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

Несмотря на многообразие представлений о том, какой именно была древнейшая атмосфера Земли, все исследователи единодушны в одном: по своему составу она была совершенно иной, чем та азотно-кислородная оболочка, которая окружает нашу планету сейчас. Вследствие каких же процессов химический состав земной атмосферы мог претерпеть столь кардинальные изменения?

В первую очередь отметим избирательную диссипацию легких газов. Известно, что в любой газовой смеси молекулы всех составляющих ее газов обладают, в среднем, одной и той же кинетической энергией  $\mu v^2/2$ . Из этого следует, что молекулы легких газов, находящихся в смеси, в среднем, движутся гораздо быстрее, чем молекулы более тяжелых газов. В силу этого доля молекул, обладающих скоростью выше второй космической (11,2 км/сек) и способных навсегда покинуть нашу планету, гораздо выше среди легких газов. Таким образом, даже если первичная атмосфера Земли была резко восстановительной, она должна была довольно быстро преобразоваться в нейтральную, существенно углекислую. Избирательная диссипация таких легких газов, как водород  $H_2$  (молекулярный вес  $M=2$ ) и гелий  $He$  (атомный вес  $M=4$ ), сравнительно быстро "очистила" от них атмосферу, в то время как сравнительно тяжелые газы, прежде всего, двуокись углерода  $CO_2$  ( $M=44$ ), а также азот  $N_2$  ( $M=28$ ), аргон  $Ar$  ( $M=40$ ), напротив, накапливались бы в атмосфере. Что касается метана  $CH_4$  и аммиака  $NH_3$ , то атмосфера лишилась этих газов вследствие распада их молекул под действием интенсивного космического ультрафиолетового излучения, при этом высвобождавшийся водород диссипировал в космическое пространство.

Если бы на поверхности Земли не возникли открытые водоемы, то, по-видимому, наша планета, так же как и ее ближайшие соседи Марс и Венера, обладала бы атмосферой, почти нацело состоящей из углекислого газа. Но, так как огромные количества углекислоты постоянно расходовались на образование морских карбонатных осадков, то земная атмосфера оказалась почти полностью "очищенной" и от этого компонента. Роль доминирующего газа в атмосфере Земли постепенно перешла к азоту, который, будучи достаточно тяжелым и химически пассивным, не подвергался интенсивной диссипации и почти не расходовался в ходе химических реакций.

Современная атмосфера, однако, является не азотной, а азотно-кислородной. Присутствие больших количеств свободного кислорода, этого крайне агрессивного в химическом отношении газа, является уникальной особенностью земной атмосферы, обусловленной процессами фотосинтеза, протекающими в зеленых клетках растений под действием солнечного света. Упрощенно реакция фотосинтеза может быть представлена в виде:



В отличие от пассивного азота, кислород является динамическим компонентом нашей атмосферы. Ежегодно посредством фотосинтеза создается около 200 млрд. тонн кислорода, но столько же поглощается и в процессах дыхания, окисления органических остатков и некоторых минеральных соединений. Полное обновление всей массы кислорода в атмосфере происходит примерно за шесть тысяч лет.



## ПОЧЕМУ ОКЕАН СОЛЕНЫЙ?

"Океан, мой древний прародитель,  
Ты хранишь тысячелетний сон.  
Светлый сумрак, жизнедатель, мститель,  
Водный, в глубь ушедший, небосклон!  
Зеркало предвечных начинаний,  
Видевшее первую зарю,  
Знающее больше наших знаний,  
Я с тобой, с бессмертным, говорю!..."  
К. Бальмонт

**С**реди вопросов, связанных с возникновением и эволюцией Мирового океана, вопрос о происхождении его солевого состава является одним из самых дискуссионных. На протяжении долгого времени считалось, что соли были просто вымыты подземными водами из горных пород земной коры и вместе с речным стоком поступили в океан. Действительно, любая даже самая пресная речная вода всегда содержит в своем составе какое-то количество растворенных солей. Поступив вместе со стоком рек в океан, вода затем испарялась, а растворенные в ней соли накапливались. Согласно этим представлениям солевая масса современного океана - результат постепенного накопления солей в течении всей геологической истории, а первичный океан, таким образом должен был быть пресным.

Правда, бросалось в глаза, что количественные соотношения различных ионов в речных и океанических водах резко различаются. В речных водах, как правило, преобладают ион кальция  $\text{Ca}^{2+}$  и гидрокарбонат-ион  $\text{HCO}_3^-$ , а в морских - ионы натрия  $\text{Na}^+$  и хлора  $\text{Cl}^-$ . Но это несоответствие объясняли тем, что катионы и анионы не только постоянно поступают в океаническую воду, но и выводятся из нее. Например, те же ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$  интенсивно выводятся из океанической воды при образовании таких пород, как известняки и мела. В то же время ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ , напротив, практически не выводятся из состава океанической воды.

Представление о формировании солевого состава Мирового океана за счет вымывания солей из горных пород континентов пришлось пересмотреть после исследований выдающегося норвежского геолога Виктора Морица Гольдшмидта (1888-1947). В сороковые годы XX века Гольдшмидт провел полу-чужие большой резонанс опыты по выщелачиванию (вымыванию) различных элементов из горных пород, наиболее распространенных в земной коре. Неожиданно оказалось, что с позиций гипотезы о формировании солевой массы океана за счет речного стока можно объяснить только катионную часть состава. Все главные катионы вымывались из горных пород в достаточно больших количествах. Что же касается анионов, в частности, самого распространенного из них - хлор-иона  $\text{Cl}^-$ , то его, в опытах, переходило в воду слишком мало, чтобы напрямую связать его происхождение в воде океана с выщелачиванием континентальных горных пород. Поэтому для объяснения того, откуда в океане так много хлора и некоторых других анионов, необходимо было поискать другой источник.

Первое предположение об этом источнике было выдвинуто Уильямом Руби, который заметил, что главные анионы океанической воды:  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ , а также многие второстепенные, такие как  $\text{Br}^-$ ,  $\text{H}_2\text{BO}_3^-$  и  $\text{F}^-$ , можно получить, растворив в воде соответствующие кислоты: соляную -  $\text{HCl}$ , серную -  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , бромистую -  $\text{HBr}$ , борную -  $\text{H}_3\text{BO}_3$  и плавиковую -  $\text{HF}$ . Все эти кислоты обладают одним общим свойством - высокой летучестью, то есть легко переходят при нагревании в газообразное состояние. Руби обратил внимание и на тот факт, что все эти кислоты, как правило, присутствуют в составе вулканических газов. Именно это и привело Руби к выводу, что в процессе дегазации глубоких земных недр вместе с водой и другими компонентами к поверхности Земли поступали и летучие кислоты, которые растворялись в воде с образованием соответствующих анионов. Иными словами, согласно представлениям Руби, анионы присутствовали в океанической воде изначально, и обязаны своим происхождением одновременной дегазации воды и летучих кислот.

Представления Гольдшмидта и Руби получили свое развитие в работах нашего соотечественника академика Александра Павловича Виноградова (1895-1975). Он подробно исследовал химический состав вулканических газов Курильской и Камчатской гряд и количественно обосновал предположение Руби о формировании анионной части океанической воды за счет дегазации летучих кислот из глубоких недр. Кроме того, Виноградов уточнил происхождение второго по значимости аниона морской воды - сульфат-иона  $\text{SO}_4^{2-}$ . Оказалось, что сера присутствует в вулканических газах, не в виде паров серной кислоты, а, главным образом, в виде сероводорода  $\text{H}_2\text{S}$  и в свободной форме. Следовательно, в водах первичного океана должны были изначально накапливаться не сульфат-ионы, а сероводород и свободная сера. И только со временем, когда морские водоросли стали вырабатывать большие количества кислорода, эти формы серы должны были бы окислиться с образованием сульфат-иона, широко распространенного в составе современных океанических вод.

По представлениям Виноградова обогащение кислотами вод первичного океана могло быть как прямым - в случае подводных извержений, так и опосредованным - через атмосферу, куда они поступали в составе вулканических "кислых дымов", а затем вместе с дождями - в океан. Содержащая сильные кислоты вода первичного океана должна была обладать повышенной химической "агрессивностью" и быстро выщелачивать из горных пород различные катионы, что в конечном счете и привело к

формированию того солевого состава океанической воды, который существует в настоящее время. Таким образом, согласно гипотезе Виноградова, солевой состав океана сформировался из двух источников: катионная часть - за счет выщелачивания горных пород земной коры, а анионная - за счет дегазации летучих кислот из глубинных недр.

Первичный океан, в соответствии с этой гипотезой, не был пресным, он изначально содержал в своем составе сильные кислоты. Впрочем, "кислого" океана, как такового, по всей видимости, тоже никогда не было, ведь превращение кислых вод в соленые за счет поступления катионов из выщелачиваемых горных пород должно было осуществиться очень быстро, и океан практически с самого начала должен был быть соленым.

Такое представление получило довольно широкое признание. Но заметим, что во взглядах Гольдшмидта, Руби и Виноградова далеко не все является бесспорным. Не будем забывать, что в науке никогда не надо торопиться ставить точку.

#### СОВРЕМЕННЫЙ СОЛЕВОЙ СОСТАВ МИРОВОГО ОКЕАНА

Благодаря интенсивному перемешиванию воды Мирового океана очень однородны по своему солево-му составу. Соотношение растворенных в морской воде солей, присутствующих в ионной форме, фактически одинаково в любой точке Мирового океана. Ниже приведен выраженный в массовых процентах катионно-анионный состав океанической воды (общая сумма растворенных солей принята за 100%):

Все остальные, растворенные в океанической воде катионы и анионы, составляют лишь около 0,01% от их общей массы, из них наиболее заметную роль играют анионы F<sup>-</sup>.

Средняя солёность воды Мирового океана, то есть масса солей, растворенных в одном килограмме морской воды составляет 35 г/кг, а ее колебания, как правило, очень незначительны: 33-36 г/кг.

#### ВОЗРОЖДЕНИЕ СТАРОЙ ИДЕИ

В начале восьмидесятых годов российские геологи Марина Анатольевна Мартынова и Андрей Федорович Грачев поставили под сомнение ряд положений, лежащих в основе выводов Гольдшмидта, Руби и Виноградова, и возродили на новой фактической основе старую гипотезу, согласно которой солевой состав океана (как катионный, так и анионный) сформировался только за счет поступления солей в составе речного стока с континентов, т.е. за счет выщелачивания горных пород континентальной коры. Первичный же океан, согласно этой гипотезе, содержал минимальное количество солей, т.е. был пресным. Взгляды Мартыновой и Грачева пока не получили широкого признания, но заметим, что их гипотеза не имеет внутренних противоречий и хорошо согласуется с другими геологическими данными. Рассмотрим ее подробнее.

Прежде всего Мартынова и Грачев отметили, что выводы Виноградова о формировании анионного состава океанической воды за счет дегазации летучих кислот кажутся несостоятельным в свете теории тектоники плит. Виноградов сопоставлял анионный состав океанической воды с вулканическими газами Курильской и Камчатской гряд, т.е. вулканической области, связанной с зоной субдукции. Но флюиды, которые поднимаются к поверхности Земли в зонах субдукции, являются скорее продуктом дегазации вещества погружающейся литосферной плиты, а не глубокими мантийных недр. Поэтому сходство составов анионной части океанической воды и газов вулканов, связанных с зонами субдукции, есть результат того, что погружающаяся в мантию плита насыщена океанической водой и ее солями, которые и превращаются в "кислые дымы".

Представление о составе летучих компонентов, которые дегазируют из самой мантии, можно получить, анализируя состав вулканических газов, поступающих в зонах спрединга, где происходит подъем мантийного вещества к поверхности, например, в Исландии. Мартынова и Грачев обратили внимание, что вулканические газы спрединговых зон резко отличаются по составу от вулканических газов, связанных с зонами субдукции. Прежде всего, эти газы совсем не содержат в своем составе сильных летучих кислот, а представлены, главным образом, свободным водородом H<sub>2</sub>, азотом N<sub>2</sub>, окисью и двуокисью углерода CO и CO<sub>2</sub>, метаном CH<sub>4</sub> и некоторыми другими компонентами. Если первичный океан был сформирован флюидами подобными современным исландским, то он должен был быть пресным.

Заметим, что далеко не безупречен и вывод Гольдшмидта о невозможности формирования анионного состава океанической воды за счет выщелачивания горных пород, ведь в настоящее время хлор (главный анион океанической воды) переходит в раствор в очень незначительных количествах лишь потому, что в современных породах земной коры его очень мало. По-видимому, горные породы современной континентальной коры к настоящему времени уже просто хорошо "промыты" от солей, которые в той или иной форме содержались в них изначально.

Катионы		Анионы	
Na <sup>+</sup>	30,6%	Cl	55,05%
Mg <sup>2+</sup>	3,69%	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,68%
Ca <sup>2+</sup>	1,16%	HCO <sub>3</sub>	0,4%
K <sup>+</sup>	1,0%	Br	0,19%
Sr <sup>2+</sup>	0,03%	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub>	0,07%

# ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ

## К разделу 5.1. ЧТО ТАКОЕ ВОЗДУХ? ЧТО ТАКОЕ ВОДА?

1. Какие "качества" и "первичные элементы" выделял Аристотель? Комбинациями каких пар "качеств" характеризовались вода и воздух?
2. Кем, когда и при изучении каких химических реакций были открыты водород, кислород и азот?
3. Кто и каким образом установил, что воздух на 1/5 состоит из кислорода и на 4/5 из азота?
4. Кто и каким образом доказал, что вода является сложным веществом, состоящим из кислорода и водорода?

## К разделу 5.2. ВОЗДУШНАЯ ОБОЛОЧКА ЗЕМЛИ

1. Что подразумевал под атмосферой Аристотель? Когда сформировалось современное представление об атмосфере как о газовой оболочке нашей планеты, постепенно сходящей на нет с увеличением высоты?
2. Кто и когда открыл атмосферное давление? Кто и когда впервые исследовал изменение атмосферного давления с высотой?
3. В каком высотном интервале от поверхности Земли сосредоточена половина массы ее атмосферы? Какая часть массы атмосферы находится на высотах выше 100 км?
4. В чем проявляется присутствие небольших количеств воздуха на высотах в несколько сотен км?
5. Как можно рассчитать общую массу земной атмосферы?
6. Каковы содержания (в объемных процентах) четырех наиболее распространенных компонентов земной атмосферы?
7. Какие компоненты содержатся в земной атмосфере в переменных количествах?

## К разделу 5.3. СЛОИ АТМОСФЕРЫ

1. Какие четыре слоя выделяются в атмосфере по характеру изменения температуры с высотой? На каких высотах расположены границы между этими слоями?
2. В каких двух слоях атмосферы температура воздуха с высотой убывает, а в каких двух, наоборот, возрастает?
3. Что является непосредственным источником тепловой энергии для тропосферы и мезосферы?
4. За счет чего происходит дополнительный разогрев термосферы и стратосферы?
5. Какие компоненты атмосферного воздуха поглощают ультрафиолетовое излучение в термосфере, и какие - в стратосфере?
6. Какая часть волнового диапазона солнечного излучения поглощается в термосфере, и какая - в стратосфере?
7. Почему, несмотря на то, что температура воздуха в термосфере достигает 1000° С и выше, космические аппараты, длительное время находящиеся в этой зоне, не нагреваются?
8. В каком слое атмосферы происходят почти все метеорологические процессы?
9. Что является причиной циркуляции воздушных масс, которой охвачена вся тропосфера?
10. Как в пределах тропосферы уменьшается температура воздуха с высотой?
11. Как изменяется толщина тропосферы в зависимости от географической широты? С чем связаны эти изменения?
12. Какая часть энергии солнечного излучения поглощается земной поверхностью и расходуется на ее разогрев, какая поглощается атмосферой, а какая отражается в космическое пространство?
13. В каком волновом диапазоне земная поверхность переизлучает поглощенную солнечную энергию?
14. В чем состоит сущность парникового эффекта и какими компонентами атмосферного воздуха он определяется?
15. На сколько градусов повышена средняя температура атмосферы из-за парникового эффекта? Чему равна средняя температура земной поверхности?
16. Что такое "озоновый слой"?
17. В каком высотном интервале он располагается и благодаря каким процессам формируется?
18. Какова роль озонового слоя для всего живого на Земле?
19. По каким принципам в верхней части земной атмосферы выделяют ионосферу и экзосферу? За счет чего в верхних слоях атмосферы ионизация воздуха резко возрастает?
20. Что такое газовый хвост Земли?
21. С чем связаны некоторые изменения химического состава воздуха с высотой?

## К разделу 5.4. ВОДА НА ЗЕМЛЕ

1. В каких формах встречается вода в верхних оболочках нашей планеты?
2. Какая вода называется "свободной", а какая "связанной"? Каким образом вода может быть связана в различных минералах?
3. Что называется гидросферой? В каких двух значениях используется этот термин?
4. Что такое криосфера?
5. Чему равна общая масса свободной воды в приповерхностных оболочках Земли, какую долю от массы всей нашей планеты она составляет, и как она распределена между основными частями гидросферы?
6. Какое количество воды сосредоточено в живых организмах, а также в виде паров в атмосфере?
7. Как изменились представления о соотношении площади суши и моря на поверхности Земли?
8. Когда стало складываться представление о единстве морей и океанов на Земле. Что называется Мировым океаном?
9. Когда и кем была предпринята первая попытка оценить объем воды, сосредоточенный в морях и океанах?
10. Каковую роль в общепланетарных процессах и явлениях играют такие свойства воды как:  
а) аномально высокие температуры кипения и замерзания; б) аномально высокая удельная теплоемкость;  
в) уменьшение плотности при замерзании; г) увеличение плотности при нагревании от 0° до 4° С?
11. В чем причина аномальных физических свойств воды?

## К разделу 5.5. В ВЕЧНОМ ДВИЖЕНИИ

1. Что называется круговоротом воды в природе? Что является его движущими силами?
2. За сколько дней обновляется вся масса атмосферной влаги?
3. Какой объем влаги ежедневно испаряется с поверхности земного шара? Какой слой воды испаряется в среднем по планете с поверхности водоемов в течение суток?
4. Где и как происходят переходы воды из свободного состояния в связанное и наоборот?

5. Какое количество воды сосредоточено в земной коре в связанном виде? Какие воды называют возрожденными?
6. Как происходит водообмен между земной корой и мантией?
7. Какие воды называются ювенильными? В каких зонах происходит привнос ювенильной воды из мантии? В каких зонах предполагается обратный процесс?
8. Как происходит водообмен между нашей планетой и космическим пространством?
9. Какие представления о происхождении речных и подземных вод преобладали вплоть до второй половины XVII столетия?
10. Кто и каким образом доказал, что главным источником питания речных вод являются атмосферные осадки?

#### **К разделу 5.6. СТВОРЕНИЕ? КОНДЕНСАЦИЯ? ДЕГАЗАЦИЯ!**

1. Как в рамках представлений о "горячем начале" Земли объяснялось происхождение ее атмосферы и гидросферы? Почему это объяснение несовместимо с современными представлениями об образовании нашей планеты?
2. Какие вещества называют "летучими"?
3. Каким образом вода и другие летучие вошли в состав формирующегося земного шара, несмотря на то, что в этой части протопланетного диска ледовые планетезимали отсутствовали?
4. Почему после образования нашей планеты захороненные в ее недрах летучие вещества начали высвобождаться?
5. Кто и когда впервые сформулировал представление о дегазации земных недр?
6. Какая из двух оболочек нашей планеты появилась раньше: атмосфера или гидросфера? Что можно уверенно сказать о возрасте атмосферы и гидросферы?
7. Почему, несмотря на некоторое различие во времени образования атмосферы и гидросферы, их формирование следует рассматривать как единый природный процесс?
8. Почему состав дегазирующих веществ должен был отличаться от состава легколетучих веществ, захороненных в недрах Земли вместе с углисто-хондритовым материалом?
9. Почему состав первичной атмосферы должен был зависеть от первичного пространственного распределения хондритового, углисто-хондритового и металлического материала внутри земного шара?

#### **К разделу 5.7. АТМОСФЕРА И ГИДРОСФЕРА: СЦЕНАРИИ ЭВОЛЮЦИИ**

1. Какой была первичная атмосфера Земли в случае ранней катастрофической дегазации?
2. Что вкладывают в понятие "венецианский" этап истории Земли?
3. Почему на Венере в настоящее время не могут существовать какие-либо водоемы? Почему венецианская атмосфера является очень горячей?
4. Какой была первичная атмосфера Земли в случае, если дегазация недр происходила равномерно в течение всей геологической истории или даже возрастала со временем?
5. Что вкладывают в понятие "лунный" или "марсианский" этап истории Земли?
6. Почему на поверхности Марса в настоящее время не могут существовать какие-либо водоемы?
7. Что указывает на существование в прошлом открытых водоемов на поверхности Марса?
8. Почему считается, что жидкая вода присутствует на Марсе на небольшой глубине от его поверхности?
9. В какой форме вода все же присутствует на поверхности Марса в настоящее время?
10. Какое событие знаменует начало "собственно земного" этапа развития Земли?
11. Как образовались и какими были первые водоемы в случае, если самые ранние этапы земной истории проходили по "венецианскому" или по "марсианскому" сценарию?
12. Происходит ли дегазация земных недр в настоящее время?
13. Почему в космическое пространство преимущественно диссипируют газы, обладающие небольшим молекулярным весом?
14. Почему, даже если первичная атмосфера состояла главным образом из восстановленных газов (водород, метан, аммиак и др.), она должна была сравнительно быстро преобразоваться в нейтральную, состоящую главным образом из углекислого газа?
15. Какие геологические данные указывают на то, что когда-то в земной атмосфере содержание углекислого газа было гораздо более высоким, чем в настоящее время?
16. Почему земная атмосфера практически полностью очищена от углекислого газа, в то время как марсианская и венецианская атмосферы почти нацело состоят именно из него? Какую роль в этом сыграла жизнь?
17. Почему в настоящее время именно азот является преобладающим газом земной атмосферы?
18. Какое происхождение имеет свободный кислород земной атмосферы и почему этот газ практически отсутствует в атмосферах Марса и Венеры?
19. Как быстро происходит обновление всей массы кислорода земной атмосферы?

#### **К разделу 5.8. ПОЧЕМУ ОКЕАН СОЛЕННЫЙ?**

1. Что называют соленностью морских вод? Чему равна средняя соленность вод Мирового океана?
2. Какие катионы и анионы являются наиболее распространенными в составе морской воды? Можно ли сказать, что морская соль более чем на три четверти представлена поваренной солью?
3. Как в конце XIX - начале XX века большинство ученых объясняло формирование солевого состава Мирового океана?
4. Как можно объяснить несоответствие солевого состава Мирового океана и минерального состава суммарного речного стока?
5. Почему после опытов В. Гольдшмидта был сделан вывод о невозможности формирования анионного состава морской воды за счет поступления анионов вместе с речным стоком?
6. Какие аргументы выдвигали У. Руби и А.П. Виноградов в пользу того, что анионный состав морской воды сформировался за счет дегазации земных недр?
7. Из какого источника по представлениям А.П. Виноградова сформировался катионный состав морской воды?
8. Каким был первичный океан согласно гипотезе А.П. Виноградова и согласно гипотезе М.А. Мартыновой и А.Ф. Грачева: пресным, кислым или соленым?
9. Почему о составе флюидов, дегазирующих из глубоких недр нашей планеты, скорее следует судить по составу вулканических флюидов зон срединна, а не зон субдукции?
10. Как в рамках гипотезы М.А. Мартыновой и А.Ф. Грачева объясняется соответствие состава "кислых дымов" вулканов, связанных с зонами субдукции, анионному составу морской воды?
11. Как можно объяснить то, что содержание хлор- и сульфат-ионов в горных породах современных континентов явно недостаточно для того, чтобы за счет их выщелачивания сформировался анионный состав морской воды?