

Глава V. ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГОРЯЧЕЙ ЗЕМЛИ

Новая модель устройства Земли, естественно, привносит новые аспекты во все разделы наук о Земле. В этой главе речь пойдет о некоторых принципиальных вопросах, касающихся химических аспектов модели горячей Земли. Разрабатывая принципиально новую теорию, или модель, всегда следует задаваться вопросом, в частности: можно ли найти ответы в самой модели горячей Земли на дискуссионные вопросы? Здесь предпринята попытка, найти такие ответы. Возможно, жизнь сама покажет, насколько всё изложенное ниже действительно имеет отношение к такому удивительному явлению, как планета Земля.

V. 1. Химический состав планеты.

Земля, по нашей модели, как и другие планеты, и их спутники, образовалась одновременно с Солнцем из одного с ним вещества. Различия в средних плотностях планет определяются наличием и размером высокоплотного ядра и концентрацией водорода в оболочках планет и спутников. Развивая модель горячей Земли, в дальнейшем будем полагать, что химический состав планет, спутников и Солнца - одинаков. Выясним, как эта идея может сказаться на решении таких принципиальных в геологии и геофизике вопросов: почему скорость сейсмических волн плавно возрастает с увеличением глубины; почему образовались месторождения полезных ископаемых; почему на Земле и Венере есть и граниты, и базальты, а на Луне - гранитов нет и т.д.

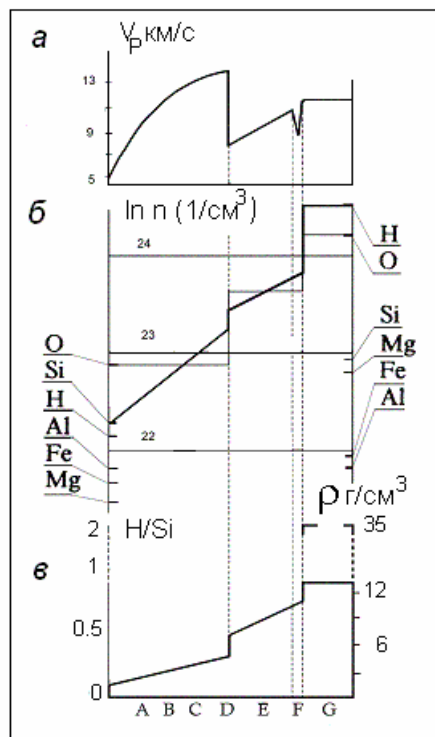


Рис. 5-1. Распределение скорости Р-волн и величины плотности по глубине Земли – а; изменение концентрации химических элементов по глубине Земли – б; параметр H/Si – в.

Рисунок 5-1 демонстрирует высказанную идею. Как следует из нашей модели, в центре Земли химический состав вещества идентичен солнечному. Относительное количество водорода на Земле значительно меньше, чем на Солнце (примерно в 1000 – 10 000 раз). Относительная концентрация остальных элементов во внутреннем ядре соответствует солнечной. Химический состав земной коры хорошо известен. Таким образом, можно подобрать концентрацию химических элементов (в lg штук в см³) так, чтобы изменение химического состава земных оболочек происходило только на фазовых

границах (см. рис. 5-1-б). Концентрация водорода, в отличие от всех других элементов, уменьшается с увеличением радиуса. Очевидно, что такой характер изменения концентрации элементов предполагает особую роль водорода в строении вещества Земли.

V. 2. Роль водорода.

Модель горячей Земли предполагает наличие водорода, как во внутреннем ядре, так и в других ее оболочках, естественно, в значительно меньших концентрациях. Воспользуемся введенным Karato (1990) параметром H/Si, характеризующим отношение концентраций “водород/кремний”. Этот параметр во внутреннем ядре (по нашей модели) примерно равен единице (точнее, 0,66). Согласно Карато, на глубине 100 км величина H/Si порядка 10^{-3} - 10^{-4} . Наши оценки показывают, что на границе ядро-мантия, - отношение H/Si будет около 0,2 - 0,3.

Присутствие водорода в веществе земных оболочек позволяет воспользоваться его удивительной и уникальной способностью образовывать т.н. водородные связи между элементами (атомами, молекулами, ионами и т.п.) вещества. Как будет следовать из дальнейшего изложения, этот подход позволяет найти объяснение свойств и структуры земного вещества альтернативное общепринятой точке зрения.

Итак, вода и лед с их водородными связями обладают уникальными аномальными свойствами. Свойства системы “вода-лед” (резкое изменение плотности и скорости звука на границе жидкость-кристалл) в значительной мере похожи на свойства системы “ядро-мантия” (см. рис. 5-2). Это обстоятельство позволяет нам использовать теории и модели, разработанные для объяснения свойств воды, для толкования свойств и структуры вещества земных оболочек. Однако прежде чем перейти к построению нашей модели, приведем некоторые сведения о свойствах воды, льда и водородных связей.

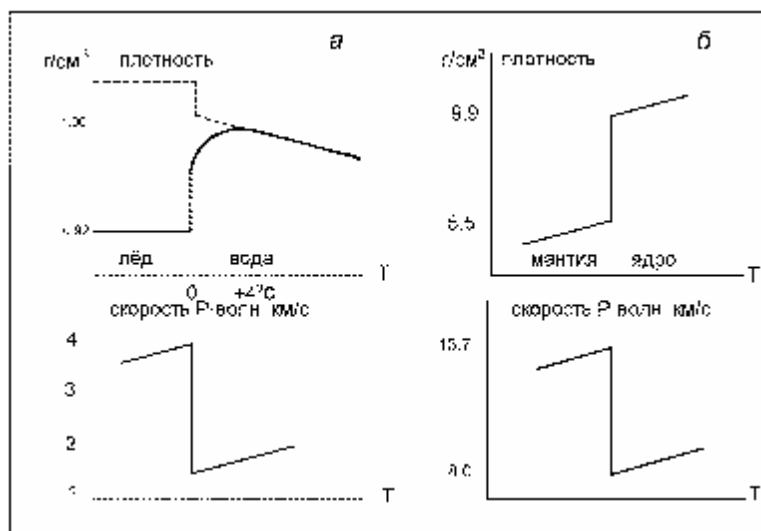


Рис.5-2. Изменение плотности и скорости звука на границе вода-лед - а и границе ядро-мантия – б.

Вода, лед и водородные связи. Вода и лед, это самое распространенное вещество во Вселенной, и в то же время, это самое необычное вещество, обладающее самыми “аномальными” (по сравнению с другими “нормальными” веществами) свойствами. Аномальные свойства воды настолько привычны, что о них обычно не задумываются. Еще Галилей заметил, что жизнь на Земле обязана проявлению водой ее аномальных свойств. Физические и химические свойства воды и льда обсуждаются в научной литературе не менее 200 лет. Аномальное поведение воды обязано, как известно, наличию у нее водородных связей. Вещества, так же обладающие водородными связями, ведут себя аналогично воде. Водородная связь между атомами считается промежуточной между

валентной и Ван дер-Ваальсовой связями. Эта связь может образоваться при наличии атома Н между двумя электроотрицательными атомами, причем с одним из них атом Н связан ковалентной связью. Природа водородной связи состоит в том, что электронная плотность на линии Н...О (N, F и т.п.) смещается к отрицательному атому. Это способствует сближению электронов отрицательных атомов соседних молекул. В результате, расстояния О – О, О – N и т.п. становятся значительно меньше, чем они были бы без наличия атома Н. Явление укорочения длины атомных связей двух молекул А и В: А - В (без водорода) и А - Н...В (с присутствием атома водорода), иллюстрирует таблица 5.1, построенная по данным, приведенным в Физической энциклопедии (1992).

Таблица 5.1.

Н – связь:	энергия ккал/моль	расстояние в Å А - В	расстояние в Å А - Н...В
слабая	0.1 - 1.0	3.0 - 3.5	2.0 - 2.5
средняя	5.0 - 15.0	2.7 - 3.0	1.7 - 2.0
сильная	20 - 60	2.2 - 2.5	1.1 - 1.2

Из таблицы 5.1 следует, что наличие сильной водородной связи приводит к тому, что расстояние между атомами уменьшается примерно вдвое.

Плотность льда меньше плотности воды. Это свойство отличает воду и другие вещества, обладающие водородными связями, от прочих, у которых плотность вещества в твердом кристаллическом состоянии всегда выше, чем плотность его расплава. При переходе жидкости в твердое состояние, молекулы большинства веществ в обычном состоянии располагаются теснее, а само вещество становится плотнее. Однако, это совсем не так у воды. Охлаждая воду, можно наблюдать за поведением ее плотности (см. рис. 5-2-а). В начале плотность ведет себя обычным образом: вода при охлаждении становится все плотнее и плотнее. После охлаждения ее до температуры 4° С она, вопреки общим представлениям, становится легче, а замерзая и образуя лед, - еще легче.

Вода представляет собой гидрид кислорода. Сравним ее свойства со свойствами гидридов элементов, входящих так же как кислород в шестую группу таблицы Менделеева. Данные по температурам плавления и кипения этих гидридов приведены в таблице 5.2. В четвертой строке таблицы указаны примерные величины температур плавления и кипения воды, если бы она была обычным гидридом, и не обладала бы водородными связями. Оценка получена в предположении об обратной зависимости температур плавления и кипения от величины молекулярного веса. Эта зависимость достаточно четко прослеживается для гидридов первых трех столбцов таблицы. Из таблиц 5.1 и 5.2 видно, насколько наличие водородных связей меняет не только плотность упаковки вещества, но и его термодинамические характеристики: Наличие водородных связей в веществе, в нашем случае в воде, приводит к повышению его температуры плавления примерно на 95, а температуры кипения, на 170 градусов. Если бы вода не обладала способностью к образованию водородных связей, то в нормальных условиях она находилась бы только в газообразном состоянии и превращалась в жидкость при температуре порядка -70 °С.

Природа аномального поведения воды была предметом исследований более 200 лет тому назад Г. Кавендиша и А. Лавуазье. Они заложили основы современного понимания природы воды. В 1910 г. физики, американец П. Бриджмен и немец Г. Тамман, обнаружили, что лед может образовывать несколько полиморфных кристаллических модификаций. Понятие о водородных связях было впервые введено в 1920 г. американскими учеными У. Латимером и У. Родебушем. С этих пор водородные связи являются предметом фундаментальных исследований. Английский ученый У. Брэгг, разработавший рентгеноструктурный метод анализа кристаллов, обнаружил, что каждая молекула Н₂О во льду окружена четырьмя другими молекулами. В 1932 году ученик Брэгга проф. Д. Бернал (1934) совместно с Р. Фаулером разработали теорию молекулярной

структуры воды, основанную на интерпретации рентгенографических данных льда. В основе их теории были положены представления о воде как о трехмерной структуре с четверной координацией.

Рентгенографические исследования льда показывают, что ядра кислорода располагаются в нем так же, как атомы кремния в решетке тридимита. Структура жидкой воды, согласно Берналу и Фаулеру, напоминает структуру кварца. При этом каждая молекула H_2O окружена четырьмя ближайшими к ней молекулами. Тридимит и кварц, это два различных кристаллических состояния кремнезема SiO_2 . Химический состав и молекулярные структуры их одинаковы, а плотность кварца выше примерно на 10 %. Это различие обусловлено тем, что, имея одинаковые расстояния между атомами и ближайшими молекулами (т.е. первые координационные сферы), у кварца и тридимита различаются вторые координационные сферы: 4.2 Å - у кварца и 4.5 Å – у тридимита. В последствии выяснилось, что эта аналогия не более чем образное представление воды и льда, т.к. кварцеподобных структур в жидкой воде обнаружить не удалось.

Таблица 5.2

	Гидриды:	T плавления (°C)	T кипения (°C)	Молекулярный вес:
1	$H_2 Te$	- 60	- 5	129.6
2	$H_2 Se$	- 65	- 40	81
3	$H_2 S$	- 85	- 60	34
4	$H_2 O$	- 95	- 70	18
5	$H_2 O$	0	100	18

Л. Полинг в 1952 году высказал предположение, что структура воды подобна структуре клатратных гидратов. Он предполагал, что у льда и воды, находящихся при различной температуре, количество водородных связей весьма различается. По его данным при 0° С, около 15 % водородных связей оказываются разорванными. По характеру зависимости диэлектрических свойств воды от температуры, удалось выяснить, что при 25° С в жидкой воде 67 % всех молекул $H_2 O$ сохраняют все четыре водородные связи, 23 % - три водородные связи, 7,6 % - две связи и лишь 0,2 % полностью свободные молекулы. Английский физик Д. Ж. Попл предположил, что водородные связи вообще не рвутся, а всего лишь “изгибаются”. Перестройка структуры воды, по Поплу, происходит именно благодаря “изгибанию” водородных связей. Попл предложил рассматривать воду как ассоциат, состоящий из двух структур: обычной и плотноупакованной. Упомянем еще одно, весьма важное свойство водородных связей. Оно называется кооперативностью и означает, что образование одной водородной связи способствует возникновению рядом следующих связей. Идея кооперативности основывается на том, что для образования системы водородных связей требуется меньше энергии, чем арифметическое сложение энергий отдельных связей.

Воспользуемся хорошо известным и широко используемым методом определения термодинамических параметров вещества по скорости звука. Суть метода состоит в использовании связи скорости звука (v) со сжимаемостью вещества:

$$b_{ad} = 1/rv^2,$$

$$b_t = b_{ad} + a^2T/rc_p, \quad (5.1)$$

где b_{ad} - адиабатическая сжимаемость; b_t - изотермическая сжимаемость; r - плотность; T - температура; c_p - теплоемкость при постоянном давлении; a - термический коэффициент расширения. Эти уравнения интегрируются на основе допущения о постоянстве отношения адиабатической и изотермической сжимаемостей, что более или менее справедливо для сравнительно невысоких давлений. Например, в работе (Киселев и др., 1993) плотность и теплоемкость воды были определены вплоть до давлений 7 000 атм. в диапазоне изменения температуры от 20° до 80° С. Здесь же получены точные уравнения

для определения термодинамических свойств газообразных и конденсированных сред по измерениям скорости звука. Показано, что с ростом давления плотность воды линейно возрастает, а теплоемкость - уменьшается. Авторы гарантируют корректность метода и стабильность результатов расчета термодинамических характеристик воды. Возникает естественное желание воспользоваться этими результатами для оценки параметров воды при мегабарных давлениях. По-видимому, для того, чтобы аппроксимировать ход увеличения плотности воды к таким величинам давления и получить точное значение плотности, достаточных оснований нет. Тем не менее, для грубой оценки, если использовать результаты этой работы, то плотность воды при давлении в миллион атмосфер должна быть порядка 10 г/см^3 , что примерно соответствует величине плотности вещества Земли на соответствующей этому давлению глубине. В дальнейшем, для оценки параметров структуры вещества Земли, будем использовать величину скорости звука (сейсмических волн) и принятые в моделях Земли величины плотности.

Скорость звука, плотность и структура вещества мантии. Используем метод оценки величины сжимаемости (b), разработанный для ионных кристаллов (Михайлов и др., 1964). Величина сжимаемости:

$$b = 18R^4/(n - 1) e^2 A. \quad (5.2)$$

Обычно это выражение используется для вычисления не сжимаемости, которая известна из эксперимента, а величины n , где n - показатель степени потенциала взаимодействия, для кристаллов; величина n порядка 10 (Михайлов и др., 1964). Здесь e - заряд электрона, R - расстояние между ближайшими атомами кристалла, а величина A - постоянная Маделунга. Эта формула позволяет оценить величину R по известному распределению скорости звука (скорости Р-волны) в мантии. Однако прежде следует несколько слов сказать о том, что представляет собой величина A .

Межатомное взаимодействие обусловлено перекрытием электронных оболочек соседних атомов, которое может быть записано в форме Борна-Майера: $C \exp(-R/b)$, (C и b - эмпирические константы) плюс вклад потенциальной энергии e^2/R кулоновского взаимодействия. Величина e^2/R может быть представлена как энергия Маделунга (Анималу, 1981) $\Phi_{M(R)}$:

$$\Phi_{M(R)} = - N A e^2/R.$$

Здесь N - плотность атомов (ионов) в кристалле. Сумма Маделунга одномерного ионного кристалла, состоящего из цепочки $2N$ ионов с чередующимся зарядом $\pm q$, характеризуется взаимодействием вида:

$$j(x_{ij}) \left\{ \begin{array}{l} (C/x^n - q/x) \text{ - для ближних соседей,} \\ \pm (q^2/xr_{ij}) \text{ - для остальных случаев,} \end{array} \right. \quad (5.3)$$

C - константа, n - целое число, xr_{ij} - расстояние между i -м и j -м атомами, x - расстояние между ближайшими соседями. Постоянная Маделунга:

$$A/x = \sum (\pm 1)/xr_{ij} = 2(1/x - 1/2x + 1/3x - 1/4x + \dots), \quad (5.4)$$

или:

$$A/x = (2/x) \ln(1+y), \text{ при } y = 1, A = 2 \ln 2. \quad (5.5)$$

Например, для NaCl сжимаемость $b = 3.3 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{дин}$, $A = 1.75$, $R = 2.81 \text{ \AA}$, $n = 9.1$.

Однозначно оценить величину R по данным о сжимаемости (воспользовавшись распределением скоростей Р-волн по глубине мантии) не представляется возможным, однако можно оценить сочетание $R^4/(n - 1)A$. Данные по R можно получить из кривой распределения плотности по глубине мантии, полагая, что химический состав ее на глубине от 700 до 2900 км (в зоне т.н. континуума) постоянен. Положим, что мантия состоит из SiO_2 (что, очевидно, не совсем верно), тогда величина R (в Å) может быть оценена по формуле:

$$R \gg (100/r)^{1/3}, \quad (5.6)$$

где r - плотность вещества мантии (в г/см^3). (Цифра 100 - результат умножения молекулярного веса SiO_2 (60) на массу протона $m = 1,6 \cdot 10^{-24}$ г). Эта зависимость изображена на рис. 5-1-в. Параметр $(n-1)A$ незначительно (примерно на 1/3) меняется по глубине (от 100 до 2900 км), что говорит о некоторой, весьма незначительной перестройке ионной кристаллической структуры вещества мантии.

Оценки показывают, что расстояние R между ближайшими атомами (ионами) в кристаллической структуре вещества мантии меняется от, примерно, 3 \AA на глубине 100 км до $2,6 \text{ \AA}$ - на глубине 2900 км. Здесь мы не учитываем изменений структуры, плотности и, соответственно, величины R в области фазовых переходов происходящих на глубинах 400 и 670 км. Нас интересует область т.н. континуума, в которой наблюдается плавное изменение скоростей звука (P- и S-волн) и плотности в наиболее глубоких слоях мантии. Можно ли получить требуемое по модели изменение величины R для SiO_2 ? Оказывается можно. Выше мы отмечали, что параметр H/Si меняется от величины 0,2 - 0,3 на глубине 2900 км до 0,001 - на глубине 100 км (рис. 5-1-в). Температура вещества мантии на этом расстоянии изменяется примерно в 3 раза (от 2 000 К до 6 000 К). Удельная энергия так же меняется примерно в 3 раза (от 40 до 120 ккал/моль). Как следует из табл. 5.1 (3-я строчка), величина R за счет водородных связей может уменьшиться в два раза. Для ориентировочных расчетов примем, что наличие водородной связи уменьшает величину R от ее начального значения $R_0 = 3 \text{ \AA}$ вдвое. Приняв эти условия, не возникает проблем в подборе такой концентрации H/Si, чтобы изменение величины плотности вещества мантии соответствовало принятой модели Земли. Наша ориентировочная оценка H/Si = 0,2 - 0,3 на глубине 2900 км примерно подтверждается (H/Si = 0,3) расчетами концентрации водорода при подгонке необходимой величины плотности. Относительная концентрация водорода оценивалась по формуле:

$$\text{H/Si} = 1 - (R/R_0)^3. \quad (5.7)$$

В последнее время наибольший интерес у исследователей, занимающихся изучением особенностей строения мантии, вызывает D''-слой. Это слой толщиной примерно 300 км располагается на границе мантии с внешним ядром. Сравнительно недавно было обнаружено (Wysession, 1995), что скорость S-волн на внешней (относительно ядра) границе этого слоя резко возрастает от 7,1 до 7,3 км/с. Согласно мнению большинства исследователей, D''-слой является тем местом, где происходит генерация плюмов (Courtillot and Besse, 1987). Почему это происходит, каков механизм процессов, происходящих в D''-слое? Эти и другие, подобные вопросы, - остаются пока не выясненными.

Не будем сомневаться в том, что модель горячей Земли внутренне непротиворечива и самосогласованна. Тогда мы должны в самой модели найти естественные и очевидные ответы на подобные вопросы. Согласно модели, в области границы ядро-мантия реализуется фазовый переход первого рода "кристаллизация-плавление". В принципе, здесь вещество может, как кристаллизироваться из расплава ядра при соответствующих pT -условиях, так и плавиться при их изменении. Обратим внимание на то, что плотность расплава примерно на 4 г/см^3 больше, чем плотность вещества в кристаллическом состоянии. Как мы отмечали, наличие водородных связей (концентрация H/Si) играет решающую роль в нашей модели. Следовательно, увеличение плотности расплава относительно кристаллического состояния вещества, либо обязано увеличению концентрации H/Si, либо "изгибанию" водородных связей, как это предлагал Попл. Если pT -условия соответствуют преимуществу процессов плавления (и сжатия Земли) над процессами кристаллизации и в области фазового перехода (на границе ядро-мантия) имеется необходимая концентрация H/Si, - плавление реализуется. Если необходимой концентрации H/Si нет, то избыток тепла может пойти на нагрев близлежащего слоя мантии - D''-слоя. Вещество D''-слоя при этом перегревается, становится легче вещества вышележащего слоя и "всплывает".

Сделаем еще одно замечание по поводу вещества D''-слоя. В процессе реализации фазового перехода “кристаллизация-плавление” вещество, если не принимать специальных мер, затвердевает в стеклообразном, метастабильном состоянии. Если создаются необходимые условия, то впоследствии стекло кристаллизуется. Вещество в стеклообразном состоянии (состоянии переохлажденной жидкости) легче (это относится к воде и веществам с водородными связями), чем жидкость (расплав) и кристаллическое состояние. Возможно, именно то обстоятельство, что в D''-слое вещество мантии находится в метастабильном стеклообразном состоянии, приводит к увеличению скорости S-волн на границе его с кристаллическим D'-слоем. Метастабильное вещество D''-слоя легко перегревается при незначительных изменениях рТ-условий и способно к образованию т.н. плюмов.

Насколько нова идея о роли водорода в веществе мантии? Насколько она неправдоподобна? Ничего подобного, подобные идеи неоднократно высказывались авторами ранее. Так, например, авторы (Feldman et al., 1998) обнаружили, что в породах лунного грунта, взятого из окрестностей географических полюсов Луны, избыток водорода не образует льда, а входит в состав гидроксильных групп, предположительно радиационного происхождения. В работе (Mattern et al., 1976) экспериментально изучалось воздействие на окись кремния ядер водорода с энергией от нескольких кэВ до единиц МэВ. При таком воздействии атомы кислорода в SiO₂ оказывались связанными с гидроксильными группами ОН (или ОН). Эти группы не соответствуют никакому химическому соединению гидроксила. Они представляют собой одиночные группы, неупорядоченно расположенные в оксиде-матрице. Наличие гидроксильных групп в SiO₂ и их концентрация определялась по поглощению инфракрасного излучения в диапазоне около 3 микрон. Примеры можно продолжить, все они показывают, что наша постановка проблемы не столь необычна, как это могло показаться.

Внешнее ядро. Внешнее ядро жидкое и конвективное, поэтому структура его вещества, по всей видимости, должна быть более или менее равномерной и однородной по глубине. Известно, что скорость звука и плотность вещества ядра более или менее равномерно увеличиваются по глубине. Как мы отмечали выше, могут быть две причины повышения плотности жидкости (расплава) с повышением давления. Это, либо увеличение концентрации водородных связей, либо их “изгибание”. Возможно, вторая причина, так же как и первая, имеет место в нашем случае. Тем не менее, рассматривать ее не будем, так как идея Попла не нашла удовлетворительной теоретической проработки. Таким образом, остановимся на первой идее. Конвекция вещества внешнего ядра, казалось бы, должна основательно его “перемешать” и уравнять по глубине концентрацию Н/Si. Однако если внутреннее ядро является источником водорода, постоянно “подпитывающим” другие оболочки Земли, то вдоль радиуса внешнего ядра возникает градиент концентрации Н/Si и концентрации водородных связей. В этом плане, вещество внешнего ядра можно рассматривать как двухструктурную жидкость, состоящую из “обычной” компоненты и компоненты переуплотненного вещества. Изотермическая сжимаемость такой жидкости равна (Михайлов и др., 1964):

$$b_t = (V_2/V) b_2 + (V_1 b_1 - V_2 b_2) k_1 / V + (\Delta V^2 / VRT) k_1 (1 - k_1). \quad (5.8)$$

Первые два члена этого уравнения представляют упругую часть сжимаемости жидкости, последний член - структурную сжимаемость, связанную с перестройкой жидкости при изменении давления. Здесь k_1 - концентрация обычной компоненты, $V = k_1 V + k_2 V$, b_1 и b_2 - сжимаемости первой (обычной) и второй (переуплотненной) фаз. Уравнение описывает зависимость сжимаемости от температуры. Увеличение температуры приводит к увеличению межмолекулярных расстояний, что ведет к увеличению b . Увеличение относительного числа молекул во второй структуре, которая более упакована, чем первая ($b_1 > b_2$), приводит к уменьшению b . С температурой уменьшается структурная часть

сжимаемости, что ведет к уменьшению b . Эти рассуждения носят качественный характер и не претендуют на количественные оценки.

К качественным оценкам можно отнести так же использование для жидкости (и расплава) т.н. правила Рао. Согласно этому правилу (Михайлов и др., 1964), отношение температурного коэффициента скорости звука в жидкостях к температурному коэффициенту объемного расширения, остается постоянным и равным примерно трем. Отсюда следует соотношение Рао: $v^{1/3}(m/r) = Ra$, здесь v - скорость звука, m и r - молекулярный вес и плотность жидкости. Плотности и скорости звука в веществе внешнего ядра известны. Это позволяет оценить изменение величины m по глубине, если наша жидкость подчиняется правилу Рао. Согласно этому правилу, величина m должна возрастать по мере приближения к границе внутреннего ядра. Обратим внимание на то, что при увеличении m должна уменьшаться концентрация H/Si (см. рис 5-1-в), т.к., в определенном смысле, $m \sim 1/(H/Si)$. Поэтому, даже если расплавленное состояние внешнего ядра подчиняется правилу Рао, оценить изменение величины m по нему нельзя, т.к. значительно больший вклад в это значение дает внешняя концентрация H/Si, которая подбирается таким образом, чтобы плотность и скорость звука соответствовали величинам, наблюдаемым экспериментально. По-видимому, эта ситуация аналогична воде, у которой на границе кристалл-расплав концентрация водородных связей резко возрастает. Среднее расстояние между атомами на этой границе уменьшается от 2,6 Å до 2,2 Å, концентрация H/Si возрастает от 0,3 до 0,5, а молекулярный вес уменьшается от 21 до 17. Тенденция увеличения H/Si сохраняется вплоть до границы внутреннего ядра.

Внутреннее ядро и F-слой. Скорость звука во внутреннем ядре, в отличие от других земных оболочек, практически постоянна на всей длине его радиуса и равна 11,2 км/с. (Это свойство внутреннего ядра нигде в литературе специально не обсуждалось, хотя явно его достойно). Несмотря на то, что внутреннее ядро было обнаружено И. Леманн еще 60 лет тому назад (Lehman, 1936), его свойства (плотность, добротность и пр.) до сих пор обсуждаются в научной литературе. Дело в том, что оценки термодинамических и структурных параметров вещества внутреннего ядра далеко не однозначны. Принято считать, что внутреннее ядро представляет собой кристаллическое железо. Этот вопрос подробно обсуждался в Главе III, где было показано, что железо не может быть основным и единственным компонентом внутреннего ядра. Согласно нашей модели горячей Земли, внутреннее ядро «заполнено» горячим, пересжатым газом (пылевой кристаллической плазмой). В Главе III приводится оценка сжимаемости кристаллической плазмы, сжатой мегабарным давлением. Плотность вещества внутреннего ядра (в пределе) могла бы достигать на ранних этапах эволюции 35 г/см³. Реально плотность, по-видимому, меньше. В свое время Буллен оценил плотность вещества внутреннего ядра примерно в 20 г/см³ (т.н. модель “В”). Как показали недавние исследования, рассчитанная величина добротности внутреннего ядра равна измеренной (по затуханию собственных колебаний), только при условии использования при расчетах модели “В” (Giardini et al., 1988).

Выше мы оценивали величину m ($m \approx 10$) по величине скорости звука во внутреннем ядре. Вещество внутреннего ядра, согласно нашей модели, сжато внутренним давлением до такой степени, что ионы скорее напоминают кристаллическую структуру, подобную металлу, а электроны, так же как в металле, “свободны”. Ионы можно представить как твердые невзаимодействующие сферы. В этом случае, можно воспользоваться известной формулой скорости звука, рассчитанной для модели твердых невзаимодействующих сфер (Михайлов и др., 1964):

$$v = (3kT/m)^{1/2} (1 + pd/kT). \quad (5.9)$$

Здесь p - одномерное давление, d - диаметр частицы ($d = R$, в нашей модели), m - ее масса. Из этой формулы можно получить:

$$(\sqrt{v}/\sqrt{T})_p = 1/2T (3kT/m)^{1/2} (1 - pd/kT). \quad (5.10)$$

При $pd/kT > 1$, температурный коэффициент скорости положителен, при $pd/kT < 1$, - отрицателен. Скорость v остается постоянной (что и наблюдается в G-ядре) при $(pd/kT) = 1$. Прежде чем оценить величину d (R), необходимо выяснить, что такое одномерное давление p . Положим, что величина p , это давление в центре Земли, деленное на площадь поверхности внутреннего ядра, тогда величина d (или, R) равна примерно: $R = 1,5 \text{ \AA}$. Такое же значение R получается при оценке его по величине плотности. Концентрация H/Si во внутреннем ядре, как мы отмечали выше, порядка $2/3$ (0,66).

V. 3. Теория флуктуаций и концентрация элементов в земной коре.

Как известно, «... любое месторождение полезных ископаемых представляет собой исключительное природное явление, и задача геолога сводится к определению геологических и физико-химических условий, приведших к локальной концентрации минерального сырья на фоне его регионального рассеяния» (Смирнов, 1969, стр. 10). Содержание ценных компонентов в рудных месторождениях всегда больше среднего содержания их в горных породах земной коры (их кларка). Например, для свинца оно выше кларка в 600 раз ($A = 600$), для молибдена и урана в 200-250 раз, для меди и золота в 100 раз, для никеля, ванадия и цинка в 50 раз, для олова в 25 раз, для железа в 8-10 раз ($A = 10$) и т.д. Следовательно, месторождения полезных ископаемых представляют собой местное повышение концентрации тех или иных элементов и их природных химических соединений, на общем фоне их рассеяния в земной коре. Заметим, что общий объем полезных элементов собранных в месторождениях ничтожен по сравнению с их массами, содержащимися в земной коре.

Месторождения полезных ископаемых и их повышенная концентрация приурочены к разломам в земной коре. Более масштабный подход к этим явлениям, выявляет некоторую общность, состоящую в том, что эти разрозненные группы проявлений повышенной концентрации полезных элементов объединяются в обширные пространственные структуры. Размеры таких структур (иногда называемых «поясами») соизмеримы с земным радиусом. По всей вероятности, появление таких глобальных «поясов», это общеземное, а не какое-либо локальное, местное явление.

Создавая физически непротиворечивую модель процессов, происходивших на Земле в течение времени ее существования от момента зарождения до наших дней, необходимо учитывать следующее:

- размеры исследуемого явления говорят о его общепланетарном происхождении;
- флуктуации концентрации полезных элементов и их соединений значительно (в десятки и сотни раз) превышают их исходную концентрацию в веществе земной коры.

Добавим к этому некоторые соображения, касающиеся исходного состояния вещества планеты. Как известно, в модели «холодной» Земли ее кора представляет собой слипшиеся частицы протопланетного вещества. В этом случае, флуктуации концентрации и образование протяженных поясов могут быть вызваны, по-видимому, только тем, что они получились такими в результате действия каких-то локальных механизмов аккреции. Такой подход к проблеме в принципе возможен, однако он, на наш взгляд, не поддается исследованию и анализу, и, с точки зрения физики, - просто не интересен. Эта задача выглядит значительно более перспективной в том случае, когда Земля находилась на начальном этапе своей эволюции в газообразном состоянии. Поясним, что лишь в этом случае оказывается возможным протекание процессов, общих для всей Земли и приводящих к локальному изменению концентрации тех или иных химических элементов и их соединений. В физике подобные процессы рассматриваются с позиций хорошо развитой теории флуктуаций. Будем следовать теории флуктуаций, изложенной в книге М.А. Леонтовича (1983).

Модель. Рассмотрим вещество, которое может представлять собой идеальный газ или раствор, содержащий молекулы или взвешенные коллоидные частицы, занимающее объем

V и содержащее N частиц. Выделим внутри него некоторый объем V_o . Найдем средний квадрат отклонения числа частиц n находящихся в объеме V_o от его среднего значения \bar{n} и вероятность того, что число частиц в этом объеме равно n .

Вероятность того, что некоторая частица находится внутри объема V_o , равна $p = V_o/V$. Среднее число частиц в объеме V_o равно $\bar{n} = Np$. Среднее квадратичное отклонение, согласно Леонтовичу:

$$(n - \bar{n})^2 = \bar{n} (1 - p). \quad (5.13)$$

Если вероятность $p = V_o/V$ очень мала и ею можно пренебречь по сравнению с единицей (если объем V_o очень мал по сравнению с V), то формула обращается в:

$$(n - \bar{n})^2 = \bar{n}. \quad (5.14)$$

Эта формула играет основную роль в теории явлений, связанных с флуктуациями.

Квадрат относительного отклонения числа частиц от среднего:

$$K^2 = (n - \bar{n})^2 / (\bar{n})^2 = 1/n = 1/N_1 V_o, \quad (5.15)$$

где N_1 – среднее число частиц в единице объема (концентрация частиц).

Данные. Согласно теории флуктуаций, относительные отклонения концентрации уменьшаются с увеличением объема V_n и концентрации частиц N . Положим, что V_n это объем земной коры, $V_n = \text{const}$, тогда зависимость $K^2 \sim 1/N$ показывает, что в системе имеют (или имели раньше) место флуктуации. Выше мы отмечали, что концентрация полезных элементов в породах рудных месторождений тем выше, чем ниже его кларковое содержание. Рисунок 5-3 показывает отношение концентрации некоторых химических элементов N солнечного вещества к относительной концентрации их K в земной коре (в log-log координатах). Видно, что для некоторых элементов, таких как, например, Pb, Mo, Cu, Ni, можно записать: $K^2 \sim N^D$, где $D < 1$ ($D \approx 2/5$). Железо и олово не попадают в эту зависимость, однако, если учесть, что мы использовали данные по N солнечного вещества, а в земных гранитах относительная концентрация железа примерно в 3-4 раза меньше, чем на Солнце, хондритах и базальтах, то и железо «оказывается на этой прямой». Вероятно, можно найти причину, по которой и Sn окажется в общей зависимости с другими элементами. Эти факты служат иллюстрацией того, что распределение полезных элементов в земной коре имеет флуктуационный характер.

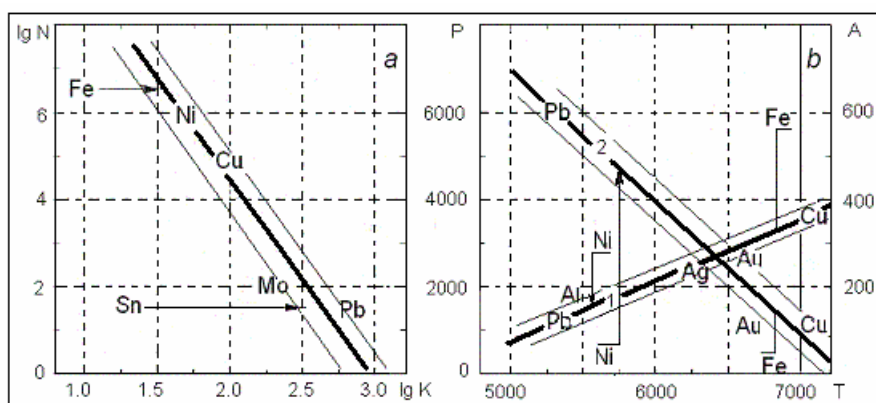


Рис. 5-3. Связь концентрации химических элементов в земной коре K с концентрацией N их на Солнце (Смирнов, 1969) – *a*. Критические параметры элементов $T_{кр}$ и $P_{кр}$ (1) и A (2) для тех же элементов – *b*.

Обсуждение. Естественно поставить вопрос, от чего зависят флуктуации данного параметра, можно ли говорить о свойствах системы, зная флуктуацию ее параметров? Ответ на эти вопросы был дан в работах Смолуховского и Эйнштейна, которые предложили использовать так называемый принцип Больцмана, связывающий отношение вероятностей двух каких-нибудь неравновесных состояний изотермической системы с

разностью их свободных энергий (или энтропий – для энергетически замкнутой системы).

Как известно, средний квадрат флуктуации объема выделенной массы сжатого (не идеального) газа или жидкости определяется выражением (Леонтович, 1983, стр.271):

$$V^2 = (V - \bar{V})^2 = kT V_o / (-v_o \cdot \partial p / \partial v). \quad (5.16)$$

Средний квадрат флуктуации концентрации, так же как флуктуации объема, пропорционален изотермической сжимаемости – $1/v_o \cdot \partial v / \partial p$:

$$(\Delta \bar{n})^2 = (n^2/v) \cdot kT / (-\partial p / \partial v). \quad (5.17)$$

Эта формула показывает, что средний квадрат флуктуации концентрации зависит как от начальной концентрации, так и от изотермической сжимаемости и температуры. Она позволяет оценить термодинамические характеристики системы, если известны её параметры флуктуации. Так как в интересующем нас случае: $K^2 = (\Delta \bar{n})^2 / n^2 \gg 1$, а сжимаемость большинства физических тел (в том числе и расплавов горных пород) известна (по крайней мере, по порядку величин), то возникает возможность оценить температуру, при которой, в заданном объеме вещества, могут возникнуть такие большие флуктуации плотности. Оказывается, что для их возникновения «разумной» величины температуры, например температуры плавления металла, явно недостаточно.

Известно, что флуктуации объема, плотности и концентрации становятся очень большими при приближении к критической точке данного вещества (или его компонента), так как при этом $\partial p / \partial v$ стремится к нулю. Это явление носит название фазового перехода второго рода (ФП-2) «критическая точка равновесия жидкость-пар» (Паташинский, Покровский, 1982). В частности, наличие в системе ФП-2 объясняет очень сильное рассеяние света веществом, находящимся в состоянии, близком к критическому. Это, так называемая, «критическая опалесценция». Для нашей модели это означает, что если образование месторождений имеет флуктуационный характер, то они могли бы возникнуть только при температуре вещества земной коры, приближающейся к критической. По порядку величины, это тысячи градусов, например, критические температуры $T_{кр}$ и давления $P_{кр}$ (бар) для некоторых элементов: Pb = 5395 К, 1065 бар; Al = 5445 К, 1920 бар; Cu = 7010 К, 3545 бар и т.д. (рис. 5-3-b) (Кузнецов, 1985; Басин, 2002). В этих работах приведены критические давления, объемы и энтропии ряда химических элементов. Можно считать, что $T_{кр}$ интересующих нас химических элементов, по порядку величины, около 10 000 К.

Возможный механизм. Физику расслоения растворов можно рассмотреть в качестве примера физического механизма, приводящего к образованию вещества с повышенной концентрацией некоторых элементов. Допустим, что исследуемое нами вещество представляет собой раствор полезных элементов в матрице. Нас будут интересовать условия, при которых полезные элементы не смешиваются с матрицей. Оказывается, что при заданном давлении, в ряде случаев имеется две температуры, выше которой (T_1) и ниже другой (T_2) раствор смешивается. В интервале температур: $T_2 < T < T_1$ – часть раствора расслаивается. Температура T_1 близка к критической температуре смешения веществ. Возможно, что вблизи нее (как и при критической температуре индивидуального вещества, где $\partial p / \partial v = 0$), в смеси веществ самопроизвольно возникают волны сжатия и разрежения и оно распадается на жидкость и пар. Температура T_1 называется в физике растворов верхней критической температурой смешения. В некоторых растворах возникает и нижняя температура смешения T_2 . Ее появление вызвано ослаблением притяжения молекул (атомов) растворенного вещества вследствие «экранирующего» воздействия растворителя при понижении температуры (Веденов, 1984).

Рассмотрим задачу, в которой флуктуация концентрации меняется в пространстве. Задача сводится к оценке вероятности распределения флуктуаций в пространстве, или иначе, сводится к вопросу о вероятности того или иного вида функции, дающей зависимость рассматриваемой величины от координат. Теория флуктуаций, как правило,

имеет дело с флуктуациями статистически независимыми. Однако в нашей задаче имеется несомненная взаимная зависимость функций (в нашем примере, - это локальные месторождения, объединенные в общую геологическую структуру). Теория флуктуаций, развитая в работах Смолуховского и Эйнштейна, не годится для жидкости в состоянии, близком к критическому. Орнштейн и Цернике обобщили теорию таким образом, чтобы она была справедлива и для критического состояния. При этом они отказались от прежнего допущения о статистической независимости флуктуаций в разных объемах жидкости и допустили, что между этими флуктуациями имеется статистическая зависимость. Она убывает вместе с увеличением расстояния между отдельными флуктуациями, так что флуктуации в удаленных объемах оказываются между собой статистически независимыми.

Связь между флуктуациями в объеме жидкости при критической температуре обуславливается силами межмолекулярного взаимодействия, однако, она может действовать на расстояниях, значительно превышающих радиус взаимодействия. Это может происходить потому, что сжимаемость вещества вблизи критической точки очень велика и уже малые силы могут вызывать значительные изменения, как плотности вещества, так и концентрации входящих в него элементов. Статистическую связь флуктуаций и ее зависимость от величин пространственных размеров можно характеризовать некоторым расстоянием:

$$R = r - r'. \quad (5.18)$$

Из теории Орнштейна и Цернике следует определение функции вероятности p_R :

$$p_R = (kT/4\pi s^2) \times (e^{-cR/s}), \quad (5.19)$$

$$c^2 = [(-v' \cdot \rho/v) \cdot s^2]^{-1},$$

где s - некоторая постоянная, тем большая, чем на большие расстояния простирается связь между флуктуациями.

Рассмотрим в качестве примера флуктуации поверхности жидкости, возникающие как тепловые движения в поле силы тяжести. Леонтович показывает, что функция p_R дает воронкообразную форму поверхности жидкости в том случае, когда в точке (x, y) действует сосредоточенная вертикальная сила, равная kT . Функция s оказывается (в этом примере) зависящей от силы тяжести и величины поверхностного натяжения жидкости.

Для отыскания функции p_R , характеризующей узкую протяженную область, такую как «пояс», действия силы тяжести и высокой температуры оказывается недостаточно. Этой «недостающей» силой может оказаться вращение Земли и возникающая при этом сила Кориолиса. Действительно, можно представить себе некоторую модель, в которой глобальные разломы, горные пояса и другие крупные геологические структуры, образовались не без участия вращения Земли (Стовас, 1975). В этом случае, возможно, оценка вида функции p_R покажет наблюдаемые геологами «пояса».

V. 3. Проблема гранитов и базальтов.

Постановка задачи. Известные всем граниты по-своему уникальны и даже загадочны. Граниты обнаружены только на Земле и, возможно, на Венере. Если земные базальты ничем не отличаются от базальтов лунных, то граниты, в этом смысле, «неповторимы». (Мы используем обобщенные понятия «гранитов» и «базальтов», имея в виду не столько их минералогические различия, сколько различия в их химическом составе). Информация об обнаружении «гранитов» на Венере следует из результатов анализа грунта, полученных автоматической станцией «Венера-8», аппаратура которой зарегистрировала повышенное содержание калия, урана и тория, характерное для гранитов. Остальные аналогичные станции «Венера» также определяли наличие этих элементов, но уже в концентрациях, более близких к базальтам (Ксанфомалити, 1985).

Сходство и различия тектономагматического развития Земли и Луны изучали Шарков и Богатилов (1999). Они показали, что главная особенность Луны, это её близость к палеопротерозойской (кратонной) стадии развития Земли. На Луне полностью

отсутствуют гранитоиды. Древнейший (4.45-4.25 млрд. лет) магматизм материков Луны близок к земной палеопротерозойской стадии. Вторая стадия развития Луны 3.8-3.2 млрд. лет тому назад, характеризуется генерацией морских базальтов, аналогичных базальтам срединно-океанических хребтов Земли. Различия в эволюции Земли и Луны авторы связывают с «различными энергетическими возможностями этих планетных тел» (стр. 415). По этому поводу американский геолог астронавт Р. Шмитт заметил: «Луна - это запыленное окно в прошлое Земли».

Граниты встречаются исключительно на континентах. Обнаруженные в Тихом океане небольшие “островки” гранитов были, по всей видимости, оторваны от материков и “транспортированы” при спрединге и разрастании океанов. Уникально соотношение химических элементов в “граните”. Если в “базальте” процентный состав породообразующих элементов повторяет состав хондритов и состав тяжелых элементов в атмосфере Солнца, то “граниты” заметно обеднены тяжелыми элементами: железом и магнием. С другой стороны, в “гранитах” значительно больше радиоактивных элементов: урана, тория и калия.

Проблема “базальт-гранит” давно, и не без основания, занимает геологов. Принято считать, что образование гранитов связано с направленным метаморфизмом, в результате действия которого произошло вымывание “лишних” и привнесение “дополнительных” химических элементов. В результате из первоначальной “базальтовой” оболочки получилась “гранитная” кора. Заметная роль в этом процессе отводится воде, магматическим процессам и “продувке” коры флюидами. Возможно, эта модель верна, но как могли образоваться “граниты” на Венере, где воды не было, или почему их нет на Луне, где магматические процессы “налицо”? Почему в настоящее время, когда на Земле полно и базальтов, и воды, не находят следов современной “гранитизации”? Вопросов можно задать еще очень много. Действительно, на каждый из них имеется ответ. Все ответы базируются на модели холодной Земли, однако, связать ответы в какую-либо правдоподобную концепцию не удастся. Тем не менее, не будем критиковать эту модель. Наша задача состоит в том, чтобы найти ответы, естественным образом следующие из модели горячей Земли. Можно ли получить “гранитизацию” первичного вещества базальтового состава на раннем этапе эволюции Земли? Попытаемся ответить на этот вопрос.

Гипотеза “гранитизации”. Воспользуемся известными данными по составу базальтов и гранитов. В Таблице 5.3 приведены относительные концентрации атомов в составе Солнца. За единицу принята концентрация водорода $N = 10^{12}$ частиц. В таблице 5.4 приведены осредненные данные по химическому составу гранитов и базальтов. В таблице 5.5 - тоже для элементного состава.

Таблица 5.3

	H	He	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
lg N	12.0	11.7	8.72	8.96	6.3	7.4	6.2	7.5	7.3	4.7	6.1	6.6

Таблица 5.4

	Si O ₂	Ti O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Fe O	Mn O	Mg O	Ca O	Na ₂ O	K ₂ O
Базальт	48.0 %	3.0	12.0	2.0	8.0	0.1	14.0	10.0	2.0	0.3
Гранит	73.0 %	0.5	13.0	1.3	1.6	0.04	0.6	2.2	3.6	3.7

Таблица 5.5

	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K
Базальт	18 %	6.1	8.0	16	3.5	1.5	0.25
Гранит	33 %	8.6	2.5	0.5	1.2	2.5	3.55

На рис. 5-4 схематически изображена диаграмма, показывающая каким образом, взяв две части вещества с химическим составом, эквивалентным базальту, и “отняв” от этого вещества некоторую часть элементов определенной концентрации, можно получить другое вещество, по составу эквивалентное “граниту”. (Химические составы “базальта” и “гранита” нормированы таким образом, чтобы количество кремния было одинаковым в обоих составах). Если в процессе образования гранитной коры в нашей модели можно найти непротиворечивые механизмы, позволяющие обеспечить “потерю” этих элементов, проблема преобразования базальта в гранит (т.е. гранитизация базальта) может оказаться близкой к решению. Естественно, эта задача решается в контексте модели горячей Земли на той её стадии, когда все вещество планеты, включая ее самые верхние слои, было очень горячим. Эта система была открытой для того, чтобы химические элементы и их соединения, обладающие наибольшей летучестью, были способны покинуть Землю, т.е. диссипировать. Как следует из модели образования планет, только Земля и Венера были, с одной стороны, достаточно “разогреты” для осуществления этого процесса, а, с другой, они были слишком малы (по сравнению с “большими” планетами) для того, чтобы удержать своим гравитационным полем летучие элементы и их соединения. На таких планетах как Марс и Меркурий их вещество на поверхности планет никогда не нагревалось до температуры выше температуры плавления. Поэтому рассматриваемых явлений там происходить не могло. Следовательно, на этих планетах не может быть (по нашей модели) и гранитов.

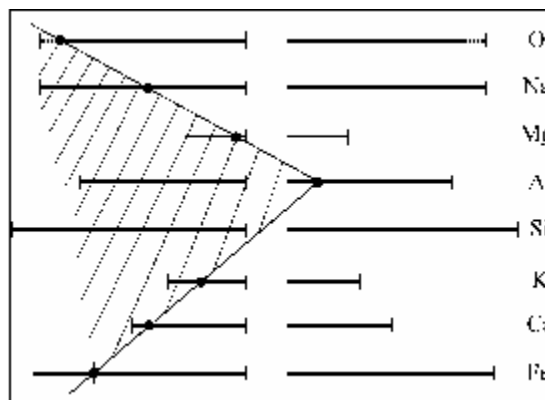


Рис. 5-4 Диаграмма гранитизации: получение гранита (заштрихованная часть) из двух исходных частей базальта.

До тех пор, пока вещество, из которого впоследствии образовалась земная кора, находилось в газообразном состоянии (“вскоре” после образования планеты) мы можем применительно к нему пользоваться формулами кинетической теории газов. Скорость диссипации определяется формулой Джинса:

$$n = n_0 \left(\frac{c^2}{6\pi} \right) \exp(-3gR/c^2) \times (1 + 3gR/c^2), \quad (5.20)$$

где n - число частиц, покидающих площадь в 1 см^2 в секунду; n_0 - концентрация частиц (см^{-3}); g - ускорение силы тяжести; R текущее значение земного радиуса, c - средняя квадратичная скорость частиц:

$$c^2 = 3kT/m. \quad (5.21)$$

Здесь: k - постоянная Больцмана, T - температура, m - масса частицы. Так как $m = m_p$, где m_p - масса протона, то водород покинет Землю раньше остальных газов. Естественно, нам точно не известны величины g , R и T во время процесса гравитационной конденсации, поэтому наши оценки носят качественный характер. По мере того, как Земля “теряла” водород в момент своего формирования в планету, диссипировали и другие элементы: кислород, азот, кремний, магний и др., так как все они, по модели горячей Земли, находились в этот момент в газообразном состоянии.

В момент остановки процесса формирования планеты, т.е. окончания гравитационной конденсации (гравитационного коллапса, самогравитации), начался период её охлаждения, сначала поверхности планеты, а потом и её внутренних оболочек. Охлаждение поверхности планеты возможно только за счет передачи тепла через излучение. При т.н. радиационном охлаждении, происходит диффузия излучения через “оптически толстое тело”, т.е. через плотную атмосферу, окружавшую Землю на самой ранней стадии её формирования.

Раннюю стадию такого процесса мы рассмотрели в третьей главе. Температура T_1 отличалась от начальной T_0 как:

$$T_1 = T_0 (1 - a_0 T_0^3), \quad (5.22)$$

где a_0 - как и раньше, функция, зависящая от толщины слоя, через который идет диффузия излучения, времени охлаждения t , химического состава атмосферы, её плотности и т.д. Оцененная нами ранее величина a_0 для интервала температур $T_0 = 10^3$ К и ниже и периода охлаждения $t_0 = 10^9$ лет была порядка $a_0 = 10^{-9}$ К⁻³.

В интересующем нас сейчас случае: $T_0 = 10^4$ К, а $T_1 = 10^3$ К, коэффициент a_1 оказывается равным примерно 10^{-12} К⁻³. Если считать, что и давление и химический состав атмосферы те же, что и в рассмотренном нами ранее случае (что, по-видимому, не совсем так), то время охлаждения t_1 можно оценить из пропорции: $a_0/a_1 = t_0/t_1$. Величина t_1 оказывается порядка 10^6 лет. По всей видимости, эта величина может быть определена нами с точностью до порядка величины:

$$10^5 < t_1 < 10^7 \text{ лет.}$$

Зная эту величину, а так же зная величину температуропроводности вещества, можно оценить толщину обменного слоя, т.е. слоя, в котором происходят процессы охлаждения, массопереноса, где возможны процессы разделения химического состава вещества Земли. Положим величину коэффициента температуропроводности ζ порядка $1 \text{ см}^2/\text{с}$, толщина обменного слоя $d \approx (\zeta t_1)^{1/2} = 60 \text{ км}$. Оценим величину d иначе, воспользовавшись известной барометрической формулой, осознавая, что она справедлива только для современной атмосферы. Тем не менее, упрощая барометрическую формулу, получим:

$$d \approx 2 \times 10^4 (1 + 0.003 T) \lg(p_1/p_2). \quad (5.23)$$

Подставляя: $T = 10^4$ К и $\lg(p_1/p_2) \approx 5$, величина d оказывается того же порядка (50 км).

Будем считать, что в процессе гравитационного сжатия и формирования Земли как планеты, она представляла собой шар, состоящий из горячего переуплотненного ($r \approx 35 \text{ г/см}^3$) вещества, окруженный достаточно плотной газовой оболочкой, толщиной примерно 50 км. Температура внешней части оболочки составляла примерно 10^3 К, внутренней - 10^4 К, плотность менялась, соответственно, от 0 до 35 г/см^3 . Эта оболочка, с одной стороны, экранировала пересжатое и переуплотненное вещество Земли от тепло- и массообмена с окружающим Землю космическим пространством и, с другой, сама являлась открытой системой, в которой происходил такой обмен. Вещество оболочки охлаждалось, конденсировалось и кристаллизовалось и, в конечном счете, по нашей модели, превратилось в гранитную кору, покрывающую все материки.

Концентрация более тяжелых элементов на внутренней границе оболочки была, естественно, выше, чем на поверхности, т.е. на её внешней границе. Это обеспечило действие механизма газовой концентрационной диффузии. Тепловой поток направлен в сторону градиента концентрации, что способствовало возможности проявления механизма термодиффузии, когда тяжелые и большие по размерам атомы (молекулы) “выносились” в более холодную часть, т.е. к поверхности оболочки, откуда они могли быть потеряны за счет диссипации в космос. Все перечисленные механизмы протекали на фоне тепловой конвекции, которая ещё больше усиливала их эффективность.

Концентрационная диффузия определяла перенос частиц (атомов, молекул) от границы слоя к поверхности в соответствии с начальными концентрациями и различием в тепловых скоростях, обязанным различию в атомных весах элементов. Термодиффузия обеспечивала преимущественный перенос больших по размеру и более тяжелых частиц.

Оба этих, в принципе возможных, механизма протекали в водородной среде, причем термодиффузионное разделение эффективнее происходит тогда, когда концентрации легких частиц (водорода) и тяжелых (железо, кремний, магний и т.п.) становятся более или менее соизмеримы. Это означает, что термодиффузия будет значима в тот момент, когда Земля уже потеряла значительную долю водорода, а температура её вещества - ещё превышала критическую.

В отличие от концентрационной диффузии, скорость которой определяется величиной D_{12} , термическая диффузия характеризуется коэффициентом D_T и термодиффузионным отношением $k_T = D_T/D_{12}$. В свою очередь, величина k_T зависит от концентрации частиц n и термодиффузионной постоянной b :

$$k_T = b n_{10} n_{20},$$

где n_1 и n_2 - относительные концентрации частиц первого сорта: $n_{10} = n_1/(n_1 + n_2)$ и второго: $n_{20} = n_2/(n_1 + n_2)$. Перенос более “тяжелых” и больших по размеру частиц в более “холодную” область оболочки определяется формулой Грю и Иббса (1956):

$$\nabla n / \nabla r = - k_T / T \cdot \nabla T / \nabla r. \quad (5.24)$$

Из этих формул следует, что для одинаковых температурных условий и одинаковой начальной концентрации “тяжелых” частиц различного веса и размера, эффект их термодиффузионного разделения определяется коэффициентом b , который индивидуален для каждого вещества (Грю и Иббс, 1956).

Будем считать частицами первого сорта атомы водорода, второго - атомы более “тяжелых” элементов. Для качественной оценки эффекта термодиффузионного разделения и упрощая формулу для параметра b , можно получить, что $b \sim m^{1/2} r$, т.е. он в большей степени зависит от размера, чем от массы частиц. Воспользуемся полученным выражением и оценим насколько различен эффект термодиффузионного разделения для порообразующих элементов. Параметр b для калия оказывается выше, чем для других элементов, однако, его так мало в исходном “солнечном” веществе, а мы оговаривались, что эффекты термодиффузионного разделения эффективны при условии примерного равенства концентраций тяжелых и легких компонент, что мы вынуждены исключить калий из рассмотрения. Это обстоятельство тем более нам на пользу, так как концентрацию калия, для того, чтобы из базальта “сделать” гранит, мы должны не уменьшать, а наоборот, увеличивать.

После калия, по величине параметра b , идут: кальций, железо, натрий, магний. Термодиффузионный эффект, как мы отмечали, сильнее проявляется тогда, когда начальная концентрация разделяемых веществ - выше. Обозначим начальную концентрацию разделяемого за счет термодиффузии элемента через n_0 , а оставшуюся после разделения, - n_1 , “потерянную”, через n_2 , тогда: $n_2 = b n_0$. Как отмечалось выше, нас интересует, каким образом может быть “потеряна” та “лишняя” часть вещества, без которой после естественных процессов конденсации и кристаллизации мы могли бы “получить” гранит, взяв базальт в качестве исходного вещества. Возьмем две части (в процентах) вещества базальтового состава и “отнимем” одну часть гранитового (рис. 5-4). При этом получим “остаток”, который Земля должна “потерять”, например, за счет диффузии и последующей диссипации. На рис. 5-5-а, в числителе приведена удвоенная концентрация элементов, свойственная базальтам, в знаменателе, - одна “порция” гранитов. На рис. 5-5-б изображен “остаток”, как результат вычитания концентрации элементов гранита из удвоенной концентрации базальтов. Рис. 5-5-в показывает относительную величину коэффициента b , а рис. 5-5-г - результат действия механизма термодиффузионного разделения. Сравнивая рис. 5-5-б и 5-5-г видно, что нам удалось получить гранит из двух “навесок” базальта практически на всех основных элементах кроме, пожалуй, магния и железа. Для завершения процесса “гранитизации” базальта, нам необходимо найти еще один способ, который мог бы привести к дополнительной “потере” магния и железа.

Как уже отмечалось, диффузионные процессы термического разделения происходят при вполне определенных условиях: вещество находится в газообразном состоянии, имеется различие между частицами по массе и размеру, существует температурный градиент. По нашим оценкам, такие условия могли иметь место на Земле на самой ранней стадии её формирования. Принципиальным моментом является то, что такие явления на Земле происходили одновременно со стадией формирования Солнца. Оно, по модели, поглощает газы и летучие элементы, преодолевающие гравитационное притяжение Земли. По мере остывания оболочки обменного слоя Земли, - в нем начали образовываться химические соединения. Так как процессы синтеза происходили в водородной среде, возникали преимущественно гидриды. Далее, по мере истощения водорода в обменном слое, определенную роль в синтезе летучих соединений начинали приобретать кислород и углерод (точнее, радикалы CO).

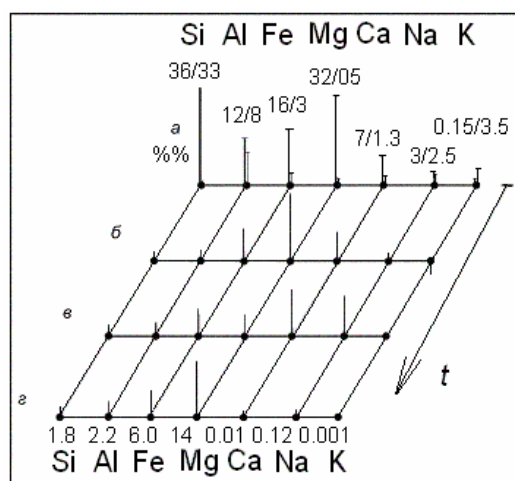


Рис. 5-5 Этапы гранитизации: начальный этап – а; удаляемые элементы и их концентрация – б; термодиффузионная постоянная – в; «остаток» – з.

Идея транспортировки химических элементов, в частности металлов, из глубин Земли с помощью присоединения к ним (или химической связи) летучих легандов не нова. В свое время такую модель развивал в ИГиГ СО РАН Р.М. Слободской (1981). Этому вопросу посвящен ряд фундаментальных исследований, проводимых в институте геологии рудных месторождений М.И. Новгородовой (1983, 1991) и Е.Ю. Буслаевой (1989). Несколько лет тому назад группа сотрудников из ИГиГ и института вулканологии (Камчатка) провели эксперимент по регистрации карбониллов железа в кальдере вулкана Узон на Камчатке (Балдин и др., 1983). По всей видимости, факт образования в Земле элементоорганических соединений с металлами и маталлоидами - беспорен. Например, сравнительно недавно был обнаружен самородный магний (Новгородова, 1991), несколько ранее - алюминий. Принято считать, что эти металлы транспортируются из недр Земли с помощью органических соединений. В принципе, подобные явления вполне могли происходить на Земле на более ранних этапах её эволюции. Для того чтобы транспортировка элементов с помощью летучих легандов могла происходить в нашей модели "гранитизации", необходимо лишь «обеспечить» необходимые для их синтеза pT -условия.

Вернемся еще раз к интересному событию - обнаружению самородного магния. Как следует из сообщения, по данным масс-спектрометрического анализа, в газовой фазе, выделенной из образца самородного магния, содержится (в объемных процентах): водород - 89.9; метан - 0.6; закись углерода - 0.3 и углекислый газ - 1.4. Кроме того, присутствует рассеянный тонкодисперсный углерод - 8.1 %, обогащенный легкими изотопами. Автор сообщения считает, что магний мигрировал в потоке флюидов углеводороды - водород.

Нельзя считать, что приведенный выше пример можно напрямую использовать для объяснения возможного пути транспортировки магния и железа с целью “удачной” “гранитизации” исходного базальта. Тем не менее, этот случай демонстрирует принципиальные возможности того, что на Земле могли проходить процессы избирательной транспортировки элементов. Можно привести и другие варианты аналогичных механизмов, в частности, путем образования летучих гидридов. Правда, не все элементы образуют гидриды, например, железо. В этом случае, транспортером железа могла бы выступить карбонильная группа, для алюминия - алкильная или этильная и т.п.

Обратим внимание на деталь, имеющую принципиальное значение в нашей модели. Речь пойдет о том, что у сопутствующего самородному магнию углерода обнаружено обогащение его легкими изотопами. Этот факт можно интерпретировать следующим образом. Предположим, что наша модель “гранитизации” реальна. Отсюда следует, что часть протокоры представляла собой открытую систему, изотопный состав элементов которой мог, и, по-видимому, обязан был измениться по сравнению с составом той части вещества, которая находилась в состоянии закрытой системы. Здесь необходимо акцентировать внимание на известном экспериментальном факте, что более легкие изотопы испаряются быстрее, чем более тяжелые. В такой открытой системе как гранитная протокора на определенном этапе эволюции Земли должны были существовать большие температурные градиенты. Это не могло не привести к термодиффузионному разделению не только элементов (что мы отмечали выше), но и к разделению их изотопов. Ранее показано, что увеличение температурного градиента в геохимической системе приводит к утяжелению отношения изотопов ртути (Кузнецов, Оболенский, 1980). Согласно нашей модели, вещество мантии Земли, не подвергшейся дифференциации, должно быть обогащено легкими изотопами. Согласно модели горячей Земли, состав вещества мантии (соответствующий базальтам) идентичен и с солнечным веществом. В этом случае, возвращаясь к обсуждению находки самородного магния, сопутствующий ему изотопно облегченный углерод должен быть мантийного происхождения. Следуя изложенной выше модели “гранитизации”, магний, входящий в состав вещества открытой системы, вообще должен был быть “потерян” на самом раннем этапе эволюции Земли.

Среди элементов, сопутствующих магнию, - такие элементы как: кремний, алюминий, железо и кальций. То есть, это те самые элементы, которые необходимо было бы “потерять” в нашей модели гранитизации базальтов. Этот факт, если не подтверждает справедливость наших предположений, то, во всяком случае, не отрицает их. Согласно нашей модели, эти элементы каким-либо способом были “транспортированы” из мантии. Этот факт является демонстрацией возможности подобной транспортировки и миграции химических элементов в Земле.

В качестве поддержки нашей модели о разделении изотопов ртути, сошлемся на работу Э.М. Галимова (1988) по результатам измерения отношения изотопов кислорода $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в осадочной оболочке Земли. Показано, что в течение различных этапов эволюции Земли, связанных с повышением величины температурного градиента, наблюдается “потяжеление” кислорода (увеличение относительной концентрации ^{18}O). Сравнивая это отношение изотопов для океанической воды и осадочной оболочки, автор приходит к нетривиальному выводу, имеющему важное значение для нашей модели, и подтверждающему её правомерность: “Океан образовался отнюдь не сразу после завершения формирования Земли. Первые полмиллиарда лет водяная оболочка на Земле была не развита, если существовала вообще” (Галимов, 1988, стр. 981). Согласно нашей модели, земная оболочка могла остыть до температуры примерно 100°C около 3.8 млрд. лет тому назад.

В принципе, можно сделать оценку, аналогичную той, которую мы делали для термодиффузионного разделения элементов, и показать, что «остаток» элементов нашего вещества (изображенный на рис. 5-5) может быть «вынесен» и удален с помощью элементоорганических транспортеров. Можно, например, рассчитать коэффициент g ,

показывающий отношение давления пара летучего вещества (при заданной температуре) к давлению газа на границе обменного слоя, а дальше, аналогично предыдущему, оценить величину $n_2 = gn_0$ и т.п. Зная ход температурных зависимостей, к примеру, карбонила железа и триэтилалюминия, можно показать, что железо будет убывать из нашего “остатка” с большей скоростью, чем алюминий и т.п. Однако, как и в случае с термодиффузией, подобные оценки носят исключительно качественный характер. Они приводятся нами только для иллюстрации того, что подобное явление в принципе возможно, а, следовательно, возможна и предлагаемая модель гранитизации первоначально “базальтоподобного” вещества. По мере дальнейшего охлаждения газообразного вещества обменного слоя, в нем начинаются процессы конденсации, а затем и кристаллизации.

Конденсация и кристаллизация вещества обменного слоя. Процессы конденсации первичного земного вещества рассматривались многими авторами гипотез аккреции планет из солнечной туманности. Обычно в таких случаях у авторов имелось две возможности выбрать, либо гомогенную аккрецию из равномерно перемешанной смеси веществ, либо гетерогенную, когда сначала образуется ядро из железа, а потом мантия - из силикатов. В зависимости от такого выбора, возникали те или иные проблемы, связанные с образованием ядра, природой границы между ядром и мантией, обособлением внутреннего ядра и т.п. Собственно проблемы, связанные с конденсацией, мало зависели от выбора модели. Общепринято считать, что первоначальное вещество конденсировалось в том виде и составе, в котором оно находится и в наше время. Так, например, А.Е. Рингвуд (1982), приводя данные по температурной зависимости конденсации элементов из газа солнечного состава, принимает во внимание либо простые вещества - химические элементы (Al, Ti, Ca, Si, ...), либо их окислы. Правда, есть и другие модели, несколько отличающиеся от этой. Например, Н.П. Семенов (1990), предлагая кислородно-водородную модель Земли, считает, что поначалу окисленные породы земной коры, потом были восстановлены водородом из ядра Земли.

В отличие от предыдущих моделей, согласно нашей, - процессы конденсации происходили в водородной среде и поэтому образовывались преимущественно гидриды, которые, на более поздних этапах эволюции Земли, окислялись при кислородной “продувке”. Вещество при этом находилось в конденсированном, расплавленном состоянии. Наша задача здесь состоит в том, чтобы найти физически непротиворечивые механизмы “гранитизации” вещества, изначально базальтового состава, во-первых, и, во-вторых, “обеспечить” его повышенным содержанием радиоактивных элементов. С первой задачей мы, возможно, как-то справились, однако, решения второй задачи на самой ранней стадии формирования гранитной коры Земли, когда её протовещество находилось ещё в газообразном состоянии, не находится. Нам остается поискать решения второй задачи на этапе расплавленного состояния вещества коры.

Протогранитное вещество обменного слоя Земли находилось сначала в газообразном состоянии. Затем оно конденсировалось, превращаясь в расплав, окружающий высокоплотное и горячее ядро, из которого затем выделяется мантия, внешнее и внутреннее ядро. Расплавленная “кора” находилась под очень высокими градиентами температуры и величины силы тяжести. Они оказали принципиальное значение на процессы дифференциации его вещества. В расплавленной коре могло происходить термодиффузионное разделение химических элементов в жидкости, т.н. эффект Соре (Грю, Иббс, 1956). Проявление эффекта Соре - может быть одним из возможных механизмов концентрирования таких элементов как K, U, Th. В подтверждение сказанному, приведем пример разделения элементов, описанный в этой книге. Сплав олова с медью (в других примерах, со свинцом, кадмием или цинком) помещался в кварцевую трубку и нагревался таким образом, что температура на одном конце трубки была 360° С, а на другом, доходила до 900° С. После выдержки в таком

режиме в течение 10 дней, сплав быстро охлаждался до затвердевания и состав его определялся химически. Во всех четырех сплавах было обнаружено, что олово диффундировало против направления температурного градиента, каков бы ни был начальный состав сплава, концентрация олова оказывалась на 8 - 10 % выше у горячего конца трубки. Эксперименты по термодиффузионному разделению веществ, находящихся в расплавленном состоянии показали, что чем выше температурный градиент, тем эффективнее разделение. И ещё, эффект Соре наблюдается далеко не у всех веществ. Грю и Иббс (1956), анализируя результаты экспериментов по эффекту Соре, приходят к выводу, что “объяснение даже этих общих результатов требует больше знаний о жидком состоянии, чем мы имеем в настоящее время” (стр. 152).

В принципе, можно предложить возможность экспериментальной проверки этой гипотезы (если таких экспериментов ранее не проводилось), для чего расплав гранита нужно поместить в кювету с большим температурным градиентом, выдержать большое время и убедиться концентрируются ли радиогенные элементы.

Упомянем еще один из возможных механизмов дифференциации вещества в расплавленной мантии. Это явление названо его автором академиком А.П. Виноградовым “зонной плавкой” (1962). Разделение вещества на “базальт” и “дунит” (более тяжелую фракцию) наблюдалось экспериментально: Вещество каменных метеоритов помещалось в молибденовый контейнер, который, в свою очередь, в графитовую трубку. С помощью высокочастотного генератора осуществлялся локальный нагрев образца до температуры 1500 °С, причем зона нагрева перемещалась вдоль образца. В результате легкоплавкая фаза расплава диффундировала вдоль градиента и скапливалась в одном конце контейнера. При охлаждении она застывала в виде стеклообразной базальтовой массы, по химическому составу более кислой, чем материал хондрита. Оставшаяся, более тугоплавкая масса, представляла собой оливиновую породу - дунит.

В модели горячей Земли дифференциация вещества может происходить, например, на фронте кристаллизации на границе ядро-мантия. Эта задача близка к одной из известных в математической физике задач - задаче Стефана о физике процессов, происходящих на фронте промерзания.

V. 4. Нефть и газ в контексте модели горячей Земли,

Проблема образования нефти и газа обсуждается среди специалистов до сих пор и, несмотря на всю свою значимость для человечества, все еще не имеет однозначного решения. Высказываются разные мнения по поводу органической и неорганической природы месторождений нефти и газа, выдвигаются и обсуждаются те или иные способы синтеза углеводородов в земных недрах, определяется роль водорода и тепла в этом процессе.

Рассмотрим модельную задачу, которая возможно имеет отношение к проблеме образования углеводородов. В любом случае, по своей постановке, эта задача находится в контексте нашей модели. Представим себе, что имеется некая газопроницаемая осадочная толща, в которой произвольным образом распределен углерод. Это может быть неорганический графит, или остатки органической жизни. Не будем делать различий, важно, что углерод, либо его соединения, - не летучи. “Продуем” эту среду водородом с одновременным её нагревом тепловым фронтом. Как следует из книг и статей по происхождению нефти и газа и формированию их месторождений, в таком случае могут образовываться углеводороды. Они, в отличие от первичного углерода, в достаточной степени летучи и способны диффундировать вдоль направления продувки и направления теплового фронта. Если на их пути встречается преграда, непроницаемая для углеводородов, то здесь может возникнуть и сформироваться месторождение (такая модель тривиальна и в достаточной степени очевидна). Легко убедиться, что в этой модели присутствуют два взаимозависимых процесса: диффузия (перколяция) и дрейф (массоперенос). Свойство диффундировать углеводороды приобретают при водородной

“продувке”, т.е. при массопереносе – дрейфе. В свою очередь, заметная прибавка подвижных частиц углеводородов к массе «продуваемого» водорода, меняют параметры массопереноса. Таким образом, образование углеводородных кластеров-фракталов приводит к прекращению процесса переноса.

Как известно, структура, включающая два взаимосвязанных механизма: дрейф и перколяцию, обладает способностью к самоорганизации (Хакен, 1980). Как известно, подобные процессы самоорганизации описываются известным уравнением Фоккера-Планка (ФП). Физический смысл решения уравнения ФП можно представить как зависимость вероятности появления функции с определенным потенциалом от величины этого потенциала. Чем выше потенциал (энергия, площадь поверхности и т.п.), тем меньше вероятность появления этого решения ($1/f$ фликкер-шум). В нашей задаче это означает, что должна наблюдаться линейная зависимость (в логарифмических координатах) между энергетическим параметром, характеризующим нефтяное или газовое месторождение и частотой встречаемости месторождений подобного типа. В принципе, если формирование месторождений углеводородов (УВ) происходит как процесс самоорганизации (а именно так реализуется преобладающее большинство процессов в Природе), то должна наблюдаться аналогичная зависимость. Показатель угла наклона такой прямой характеризует величину фрактальной размерности (Федер, 1991). Рядом авторов, в том числе и в этой книге, было показано, что по мере того, как система самоорганизуется все в большей и большей степени, величина фрактальной размерности убывает.

Проиллюстрируем сказанное на таком примере. В начале процесса мы имели некий объем, занятый углеродом. Топологическая размерность объема - тройка. По мере того, как происходила “прокачка” водородом, образование УВ и их диффузия в направлении “продувки”, топологическая размерность области УВ убывала, стремясь к двойке и меньше. В этом случае толщина обогащенного УВ слоя стремится к минимуму, структура становится двумерной и меньше, напоминая известный «ковёр Серпинского». Таким образом, оценивая степень фрактальности ряда месторождений, можно сказать, насколько успешной была самоорганизация в процессе их образования.

Рассмотрим решение уравнения ФП, связанное с пространственным распределением зон повышенной концентрации УВ, т.е. с пространственным распределением месторождений. Примем, что месторождения УВ возникли в процессе самоорганизации некой геологической структуры, тогда они фрактальны. Воспользуемся параметром фрактальности, аналогичным тому, что используется для облаков, т.е. отношению площади поверхности месторождений S к их периметру P : $P = S^{D/2}$. (Для месторождений УВ это может быть совсем другой параметр, его ещё необходимо найти, но, в любом случае, будет выполняться общее для таких структур правило: больших месторождений - мало, меньших, - больше, ещё меньших, - ещё больше и т.д.). Показатель наклона прямой в координатах \log - \log определяет величину фрактальной размерности, величина которой, в свою очередь, показывает степень самоорганизации. По-видимому, для геологов-нефтяников особый интерес приобретает проблема cutoff, т.е. проблема ограничения величины и числа крупных месторождений. В последнее время эти проблемы оказались в сфере интересов новой области физики, занимающейся проблемой самоорганизованной критичности.

Как было показано в работе (Ваk et al., 1987) и серии последующих работ различных авторов, системы с большим количеством взаимодействующих элементов естественным образом эволюционируют к критическому состоянию, в котором любое малое событие может привести к катастрофе или резкой смене состояния. Это состояние системы было названо авторами состоянием самоорганизованной критичности.

Согласно этой теории, составные части системы никогда не достигают равновесия, а эволюционируют от одного метастабильного состояния к другому. Авторы демонстрируют основную идею своей теории на примере с кучей песка. Песчинки

высыпаются медленно и равномерно и всегда из одного и того же места. Песчинки образуют кучу, склон которой становится все круче, до тех пор, пока песчинки не образуют лавины. Считается, что система (куча песка) перед тем, как на неё упала последняя песчинка, находится в критическом состоянии. Песок сыплется с постоянной скоростью, а его количество меняется со временем и график этой величины представляет собой набор случайных хаотических чисел различной длительности, это фликкер-шум или шум мерцания. От белого шума он отличается тем, что система “помнит” все предыдущие сигналы.

Баком и др. (1987) было получено наиболее убедительное доказательство генерации фликкер-шума и образование самоорганизованной критичности двумерной структурой, включающей 100×100 маятников, связанных между собой торсионными пружинами. Начальное условие состоит в том, что маятники нестабильны. Затем система почти уравнивается и достигает т.н. локально минимально стабильного (т.е. максимально чувствительного) состояния. Предположим, что мы толкнем один маятник, ослабляя силу, удерживающую его в квазистабильном состоянии. Это вызовет колебания соседних маятников и возмущение (шум) будет передаваться посредством эффекта домино. Если в конце процесса все маятники вернутся в исходное состояние, то система стабильна к малым возмущениям. Ситуация существенно отличается, если возмущение будет усиливаться при его распространении, эта конфигурация уже нестабильна к малым возмущениям. Такая система эволюционирует и в ней образуется всё больше и больше минимально стабильных состояний, которые начнут задерживать распространение шума. Система придет в стабильное состояние в том случае, когда шум не сможет распространяться сколь угодно далеко. В этой ситуации можно ожидать возникновение пространственно-инвариантной структуры минимально стабильных состояний, т.е. образования самоподобных фрактальных структур.

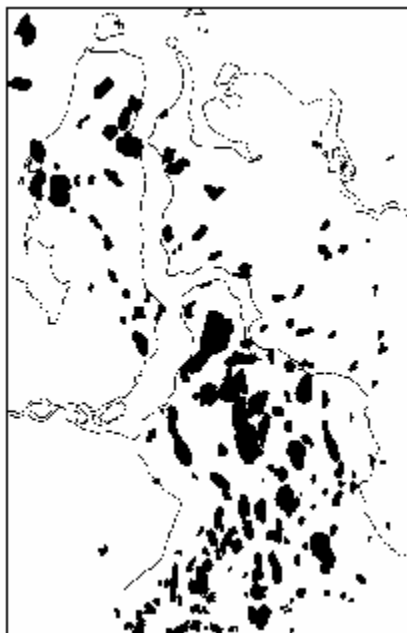


Рис. 5-6. Обзорная карта газовых и нефтяных месторождений севера Тюменской области.

Компьютерное моделирование с использованием алгоритма Бака и др. показало, что P и S образующихся кластеров соответствуют полученным из наблюдений для облаков: $D \approx 1.33$. Этот факт показывает, что двумерная структура будет самоорганизующейся, если она образует кластеры, периметр которых P пропорционален их площади S : $P = S^{D/2}$. Т.о., если реальная структура, содержащая месторождения УВ, обладает аналогичными свойствами, то это может открыть новый подход к проблеме образования УВ, как к открытой структуре, способной к самоорганизации.

Воспользуемся картой месторождений УВ расположенных на севере Тюменской области (см. рис. 5-6). В поле нашего зрения попали 150 месторождений, в основном небольших, однако, здесь представлены и такие гиганты как Уренгой. Подсчет периметров и площадей месторождений УВ показал, что в масштабе $\log P - \log S$ все данные располагаются около общей прямой (рис. 5-7-а). Число месторождений от их величины в \log - \log масштабе представлено на рис. 5-7-б (tg угла наклона прямой = -1.15), а на рис. 5-7-в изображена зависимость фрактальной размерности $D = 2 \lg P / \lg S$ от площади S ($D = 1.85$). Этот рисунок показывает, что чем меньше размер залежи, тем больше размерность D . Главной причиной этого, по-видимому, является то, что используемая нами карта недостаточно подробна для выявления более мелких деталей залежей.

Анализируя рис. 5-7, можно отметить, что полученный результат по выявлению фрактальности структур залежей углеводородов идентичен результатам численного моделирования с алгоритмом Бака и др. по самоорганизованной критичности на двумерных решетках. По-видимому, идею аналогии между месторождениями УВ и облаками можно признать удачной. Для того чтобы оценить область «обрезания» (cutoff) по всей видимости, мала статистика, это может означать, что-либо в этой области не выявлены более мелкие месторождения, либо крупные представляют собой не самостоятельные образования, а сумму более мелких. Получившаяся у нас фрактальная размерность D для залежей УВ больше, чем для облаков. Это может означать, что самоорганизация облаков происходит более эффективно, чем УВ. Однако это может означать и то, что на карте не нанесены более подробные детали строения УВ структур.

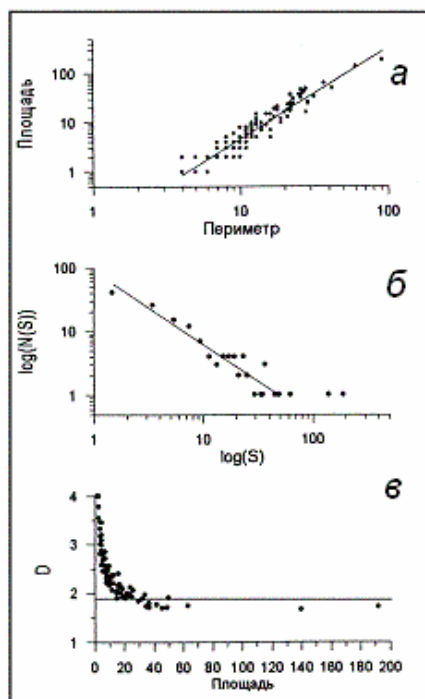


Рис. 5-7. Фрактальный характер нефтяных месторождений: а) периметр P - площадь S в \log - \log масштабе; б) число месторождений N - площадь S ; в) фрактальная размерность $D = 2 \lg P / \lg S$, как функция S .

Предлагаемый подход имеет смысл применить для других нефтяных и газовых регионов и даже внутри них. Возможно, это окажется полезным для понимания природы образования нефтяных и газовых месторождений и для более эффективного их использования.

V. 5. Могли ли образоваться алмазы на поверхности Земли?

Алмаз - наиболее изученный минерал. Согласно (Харькив и др. 1997), каждый год публикуется более 1000 статей и монографий, посвященных алмазу. Не раскрывая широко эту очень интересную тему, мы попытаемся ответить на вопрос, могли ли образоваться алмазы на поверхности Земли, или они возникли на очень большой глубине и затем были вынесены на дневную поверхность. Геологи считают, что алмазы сформировались в условиях их термодинамического равновесия, хотя известны алмазы ударного (импактного) происхождения. Считается, что средний возраст алмазов 3.2-3.5 млрд. лет, в то время как возраст пород кимберлитовых трубок «всего лишь» 90 - 170 млн. лет. Имеются данные, что возраст некоторых алмазов сравним с возрастом нашей планеты (Озима, 1990). Месторождения алмазов сосредоточены в пределах древних структур Земли, консолидация которых завершилась 2.5 млрд. лет тому назад. Преобладающее большинство специалистов считают, что алмаз доставлен на поверхность Земли примерно с глубины 140-280 км. Поэтому мантийный алмаз важен как источник информации о событиях, происходящих на ранних этапах формирования Земли, во-первых, и как источник информации о верхней мантии, во-вторых.

Как известно, для алмаза, где бы он ни был образован, - на Земле или лаборатории, необходимо создание определенных pT -условий. Давление p должно быть не менее 40 кбар, а температура T , около 1000 °С. На Земле такие условия существуют в мантии на глубине примерно 100 км, что, как принято считать, однозначно определяет место их “производства”. Затем, каким-то способом алмазы “транспортируются” на поверхность Земли, где их обнаруживают в т.н. трубках взрыва - диатремах (Милашев, 1984). Такие трубки напоминают жерла вулканов, что и определило способ их транспортировки - в лаве вулкана. Всё было бы хорошо, но в этой привычной для всех схеме есть небольшой, но неприятный дефект. Дело в том, что при такой транспортировке алмазы из области pT -условий устойчивого их существования в мантии обязаны перейти в такую область, где они существовать не могут и где углерод существует только в состоянии графита (см., например, Озима, 1990; Кузнецов, 1992).

Алмазы стабильны на глубине ниже 150 км, а на более высоких горизонтах они становятся неравновесными и переходят в графит, причем, этот переход происходит очень быстро при высоких температурах внутри Земли. Следовательно, если алмазы, образовавшиеся в недрах Земли, будут вследствие мантийной конвекции перенесены на глубину менее 100 км, они разрушатся и превратятся в графит (Озима, 1990).

В pT -условиях земной поверхности алмазы устойчивы. Заметим, что буквально все алмазы на Земле образовались раньше одного миллиарда лет назад, т.е. на самой “ранней” стадии эволюции Земли. Более того, совсем недавно Соболевым и Шацким было доказано, что алмазы образовались в породах земной коры (Sobolev, Shatsky, 1990). Напомним, что согласно модели горячей расширяющейся Земли, 1 млрд. лет назад pT -условия, необходимые для образования алмаза, существовали практически на её поверхности, точнее, на самых малых глубинах земной коры. Продемонстрируем справедливость этого утверждения.

В главе III показано, что pT -параметры на поверхности Земли и в её коре на раннем этапе её эволюции значительно отличались от современных. Там же показано, что резкое изменение термодинамических характеристик Земли началось примерно 160-200 млн. лет назад, т.е. этот период совпадает с периодом образования трубок взрыва. Наша модель недостаточно точна для того, чтобы однозначно определить глубину земной коры, на которой величины давлений и температур соответствовали условиям, необходимым для синтеза алмазов. Так же сложно определить период времени эволюции Земли, когда эти параметры были именно такими, какие нужны для синтеза. Базируясь на нашей модели, по-видимому, можно утверждать, что на глубине порядка 5-10 км в земной коре

примерно 1 млрд. лет тому назад, pT -условия вполне могли соответствовать тем, которые необходимы для синтеза алмазов. Как следует из модели горячей Земли, 160-200 млн. лет назад началось довольно резкое охлаждение её оболочек, как внутренних, так и внешних. Термодинамическое равновесие оболочек достигалось путем конвективного тепло- и массопереноса в т.н. астеносферных зонах. В тех местах Земли, где конвекции не удавалось развиться, её вещество сохранялось в перегретом и переуплотненном виде. Переуплотнение вещества, как мы отмечали в начале главы, достигается увеличением количества водородных связей. Таким образом, Земле был необходим некий механизм, с помощью которого можно было бы освободиться от тепловой и гравитационной энергии, возникшей в некоем объеме, где ранее образовались алмазы. Как мы неоднократно отмечали, Земля располагает несколькими способами "сброса" энергии: землетрясения, горные удары, вулканизм, плюмы. Если ни один из этих способов по той или иной причине Земле «не подходил», следовало «изобрести» ещё один.

Вполне возможно, что образование трубок взрыва - диатрем, это как раз и есть такой способ, которым Земля «воспользовалась» на одном из этапов своей эволюции. Суть его, в рамках нашей модели, заключается в быстром, взрывном освобождении нагретого до высокой температуры водорода, за счет разрыва водородных связей и выделения теплоты порядка 10 ккал/моль (см. Табл. 5.1). Экзотермическое выделение энергии (теплоты) связи приводит к ещё большему нагреву водорода. Может развиться тепловой взрыв и дальнейшее истечение горячих газов. Именно такая причина считается Милашевым (1984) как наиболее вероятная для образования диатрем. Явление подобного спонтанного перехода, связанного с разуплотнением, декомпрессией вещества, имеет смысл реологического взрыва (Ярославский, 1982). Он должен отличаться от классического химического или ядерного взрыва, когда имеется взрывчатое вещество (ВВ), а порода дробится и выносится с помощью газов, выделяющихся при детонации ВВ. В нашей ситуации более вероятен случай объемной детонации, наиболее близкий известный аналог которой, например, детонация газообразных ВВ или пыли. Сделаем необходимые оценки.

Стандартная трубка взрыва согласно данным, приведенным в (Милашев, 1984), представляет собой конус. Радиус основания конуса ~ 300 м, глубина ~ 2 км, радиус «острия» конуса ~ 20 м. Объем типовой диатремы $\approx 2.5 \cdot 10^7$ м³, а энергия, необходимая для дробления горной породы и выноса её из объема трубки, должна быть не менее $2.5 \cdot 10^{14}$ Дж. Плотность энергии оказывается порядка 10^7 Дж/м³, или 10^8 эрг/см³. Если допустить, что разуплотнение вещества в процессе его адиабатического охлаждения порядка самого объема, то «сбрасываемое» в этом процессе давление оказывается порядка 0.1 - 1 кбар. Эта оценка делается таким образом. Предположим, что величина g изменилась на $1/2g$. Давление p на глубине 10 км ≈ 2 кбар, следовательно, разуплотнение соответствует изменению p на 1 кбар и меньше. Необходимая плотность водорода n должна быть: $n = p/kT$, где $T = 10^3$ К, а k – постоянная Больцмана, что после подстановки дает: $n = 10^{21} - 10^{22}$ см⁻³. Общее количество атомов Si в см³ примерно равно 10^{24} , отношение H/Si, по нашей модели, должно быть порядка 10^{-3} , что примерно совпадает с нашими оценками. Если принять энергию водородной связи 10 ккал/моль, то на водород приходится примерно 1/30 часть, или около 1 кДж/г, что примерно в 4 раза меньше чем удельная энергия тротила. По оценке Милашева (1984), для создания типовой трубки взрыва необходимо примерно $2.5 \cdot 10^{14}$ Дж или, в тротиловом (TNT) эквиваленте 10^{11} г TNT. По нашим оценкам, эффективность перегретого вещества диатремы примерно в 4 раза меньше. Примем, что она хуже в 10 раз. Тогда масса ВВ должна быть порядка 10^{12} г, а масса самой трубки равна $5 \cdot 10^{13}$ г, что в 50 раз больше, чем масса ВВ. Можно сделать вывод, что идея образования объемного взрыва вещества диатремы, выброса материала на поверхность Земли и охлаждение части вещества её недр вполне правдоподобна. По-видимому, имеет смысл учитывать и этот диссипативный механизм, так же как, дрейф материков, землетрясения, вулканизм, образование плюмов и т.п. Заканчивая этот раздел, на вопрос о

том, могли ли образоваться алмазы на поверхности Земли, мы, по-видимому, можем ответить утвердительно.

Выводы

В пятой главе приведены несколько эпизодов, следующих из модели горячей Земли. Возможно, они имеют некоторое отношение к геохимии, т.е. к науке, изучающей химические процессы, происходящие в Земле, скорее, на её поверхности, и на очень небольших глубинах. Наиболее вероятно, что эти эпизоды общепринятыми догмами геохимии никак не могут быть восприняты в изложенном здесь виде. Время для этого, скорее всего, ещё не пришло. Автор и не ставил перед собой такой задачи. Основная цель, которую преследовал автор, помещая настоящую главу в книгу по физике горячей Земли, состояла в том, чтобы показать, что в науке о Земле имеются альтернативные подходы и их учет, возможно, в будущем, поможет найти более верные решения в такой сложной проблеме как физика и химия Земли.

Литература

- Анималу А. Квантовая теория кристаллических твердых тел. М.: Мир. 1981. 574 с.
- Балдин, М.Н., Павлов А.Л., Кузнецов В.В. и др. Пентакарбонил железа $\text{Fe}(\text{CO})_5$ в газогидротермах вулкана Узон (Камчатка). ДАН СССР. 1983. Т. 269. № 2. С. 458-460.
- Басин А.С. Основные параметры критической точки металлов с плотноупакованной кристаллической структурой. Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2002. № 10. С. 83-88.
- Бернал Дж., Фаулер Р. Структура воды и ионных растворов. УФН. 1934. Т. 14. № 5. С. 586-644.
- Буслаева Е.Ю., Новгородова М.И. Элементоорганические соединения в проблеме миграции рудного вещества. М.: Наука. 1990. 151 с.
- Введенков А.А. Физика растворов. М.: Наука. 1984. 110 с.
- Виноградов А.П. Происхождение оболочек Земли. Изв. АН СССР. Серия геологическая. 1962. № 11. С. 3 - 17.
- Галимов Э.М. О возникновении и эволюции океана по данным об изменениях $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ осадочной оболочки Земли в ходе геологического времени. ДАН СССР. 1988. Т. 299. № 4 С. 977-981.
- Грю К.Э., Иббс Т.Л. Термическая диффузия в газах. М.: ГИТТЛ, 1956, 183 с.
- Киселев О.Е., Тихонов Д.А., Саркисов Г.Н., Сарвазян А.П. Определение термодинамических характеристик вещества по измерениям скорости звука. ДАН. 1993. Т. 331. N.3. С. 302-305.
- Ксанфомалити Л.В. Планета Венера. М.: Наука. 1985. 375 с.
- Кузнецов В.В., Оболенский А.А. Возможный механизм природного фракционирования изотопов ртути. ДАН СССР. 1980. Т. 252. № 2. С. 459-460.
- Кузнецов В.В. Эффекты фазовых переходов при воздействии на вещество энергии высокой плотности. Новосибирск: ИГиГ. 1985. 72 с.
- Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. Новосибирск: Наука. 1992.
- Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика. М.: Наука. 1983.
- Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра. 1984. 268 с.
- Михайлов И.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.П. Основы молекулярной акустики. М.: Наука. 1964. 514 с.
- Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. М.: Наука. 1983, 286 с.
- Новгородова М.И. Обнаружен самородный магний? Природа. 1991. № 1. С.32-33.
- Озима М. Глобальная эволюция Земли. М.: Мир. 1990. 164 с.
- Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. М.: Наука. 1982.

- Рингвуд А.Е. Происхождение Земли и Луны. М.: Недра. 1982. 293 с.
- Семенов Н.П. Кислородно-водородная модель Земли. Киев: Наукова думка, 1990. 247 с.
- Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. М.: Недра. 1969. 687 с.
- Слободской Р.М. Элементо-органические соединения в магматогенных и рудообразующих процессах. Новосибирск: Наука. 1981. 135 с.
- Стовас М.В. Избранные труды. М.: Недра. 1975. 155 с.
- Федер Г. Фракталы М.: Мир. 1991.
- Физическая энциклопедия. Т. 3. М.: БРЭ. 1992. с.78-81.
- Хакен Г. Синергетика. М.: Мир. 1980. 404 с.
- Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Зуев В.М. История алмаза. М.: Недра. 1997. 600 с.
- Шарков Е.В., Богатииков О.А. Сходство и различия тектономагматического развития Земли и Луны: современный взгляд. *Астрономический вестник*. 1999. Т. 33. № 5. С. 415-429.
- Ярославский М.А. Реологический взрыв. М.: Наука. 1982. 193 с.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise. *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 59. P. 381-384.
- Courtillot V., Besse J. Magnetic field reversals, polar wander, and core-mantle coupling. *Science*. 1987. V. 237. P. 1140-1147.
- Giardini D., Li X.D., Woodhouse J.H. Splitting function of long-period normal modes of the Earth. *J. Geophys. Res.* 1988. V.93. №. B 11. P. 13716 - 13742.
- Feldman W.C., Binder A.B., Malrice S., et al. First positive indication of water ice at the lunar poles. *Eos Trans. AGU 79 (17) Spring. Meet. Suppl.* 1998. S.190.
- Karato S. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. *Nature*. 1990. V. 347. P. 272-273.
- Lehman I. P' . Bureau Centrale Seismologique Internationale Travaux Scientifiques. 1936. V. A 14. P. 3-31.
- Mattern P.L., Thomas G.J., Bauer W. Hydrogen and helium implantation in vitreous silica. *J. Vac. Sci. Technol.* 1976. V. 13. N. 1. P. 430-436.
- Sobolev N.V., Shatsky V.C. Diamond inclusion in garnets from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation. *Nature*. 1990. V. 343. P. 742-746.
- Wysession M.E. Seismic images of the core-mantle boundary. *GSA TODAY*. 1995. V. 5. N. 12. P. 238-240, 256, 257.