

**Первичные водород и гелий: упущенный основной источник энергии
внутренних процессов земли**

Арье (Лев) Гилат¹ и Александр Вол²

¹Geological Survey of Israel (ret.) Jerusalem, Israel (gagilat@hotmail.com)

²Enlightment Ltd. 33 David Pinsky St, Haifa 34454, Israel

(Авторский перевод с английского статьи: Gilat, A., and Vol, A., 2005. Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes. HAIT (Holon Academic Institute of Technology, Israel) Journal of Science and Engineering B, Volume 2, Issue1-2, pp.125-167; on-line site <http://www/hait/ac/il/jse.>)

Тезисы

У признанных сегодня теорий эндогенных процессов Земли не хватает квази-стабильного источника внутренней энергии, которая: (а) практически неисчерпаема; (б) быстро концентрируется; (в) обладает очень высокой плотностью; (г) высвобождается с очень высокой скоростью, соответствующей взрыву, и быстро накапливается в промежутках между сейсмическими толчками и вулканическими пароксизмами; (д) быстро и с малыми потерями переносится на очень большие расстояния. Проявления этой энергии сопровождаются выделением мантийного водорода и гелия, что указывает на высокое содержание этих газов в глубинах Земли. Твердые растворы Н и Не, а также соединения Не с Н, О, Si и металлами были обнаружены в лабораторных экспериментах при сверхвысоких термобарических условиях (РТ-условиях); возможность существования соединений Не-S, Не-Cl, Не-C, Не-N и др. может быть предположена, исходя из их структур и состава природных газов, богатых гелием. Земные глубины характеризуются сверхвысокими РТ-условиями, поэтому весьма вероятно, что эти “экзотические” соединения весьма обычны в ядре и мантии Земли.

В период аккреции Земли первичные водород и гелий были задержаны и складированы в земном ядре и в мантии в виде твердых и жидких растворов и химических соединений, устойчивых только в

условиях сверхвысоких температур и давлений (РТ). Эндотермические реакции образования этих растворов и соединений обеспечили эффективное охлаждение планеты, конечные продукты этих реакций обладают большей компактностью, чем исходные. После формирования планеты начали доминировать экзотермальные процессы дегазации. Стадия за стадией (для различных РТ-условий) описываются: эманация Н и Не из твердого ядра; их всплывание в виде конвективных потоков в жидком ядре; флюсовая плавка твердой мантии и образовании газомангмных (“пиромангма”) диапиров, или плюмов, которые по мере по мере проплавления сквозь твёрдую мантию собирают и концентрируют редкие и рассеянные элементы, образуя He-H, He-O, He-S, He-Si, He-N, He-C, He-Cl, He-F, He-металлы и другие соединения. Постепенный распад этих соединений при постепенном уменьшении давления сопровождается интенсивным выделением энергии. Практически неограниченным по мощности источником энергии землетрясений является мгновенный, подобный взрыву, распад метастабильных соединений гелия и водорода, вызванный сбросом давления в зоне разлома. Повторяющиеся сбросы давлений и взрывы в поднимающихся к поверхности земли гипоцентрах вызывают: (а) быстрое выделение энергии вследствие распада соединений водорода и гелия; (б) освобождение элементарных Н, О, С, S, Cl, F металлов и т.д. сопровождающееся, в основном, поглощением энергии; (в) выделение энергии вследствие серии экзотермических, протекающих с взрывом, реакций синтеза с образованием H₂O, SO₂, H₂SO₄, CO₂, H₂S, HCL, HF и других соединений. Энергия этих реакций достаточна для образования интрузии. Вулканические извержения генерируются поднимающейся пиромангмой, которая разрушает и плавит породы литосферы под давлением продолжающихся взрывных реакций (“вулканических землетрясений”).

Зафиксированная многими исследователями в последние десятилетия чёткая корреляция выделяющегося мантийного изотопа гелия (³He), с восходящими потоками глубинного тепла, свидетельствует об участии гелия в экзотермальных процессах. Измерения и расчеты приводят к выводу, что примерно половина

теплового потока, выделяемого с поверхности Земли, генерируется вышеприведенными реакциями с участием водорода и гелия. Эта энергия впятеро превышает суммарную энергию землетрясений и вулканических извержений.

Ключевые слова: землетрясения, извержения вулканов, источники энергии, механизм, упругая отдача, геохимия, физика, водород, гелий, соединения, дегазация (earthquakes, volcanic eruptions, energy sources, elastic strain, mechanism, physical, geochemistry, hydrogen, helium, compounds, degassing).

1. Вступление: современные теории эндогенных процессов и требования к питающему их источнику энергии

1.1 Неадекватность традиционных источников энергии

Современные теории внутренних (эндогенных) процессов Земли (теплового потока, образования горячих точек, тектоники плит, землетрясений и вулканические извержений), предлагают всего три основных источника энергии: распад радиоактивных элементов (U, Th и других), выделение тепла при гравитационной деформации и дифференциации, и тепловой энергии, выделяющейся при ударах метеоритов [1]. Совершенно очевидно, что эти источники производят энергию, рассеянную в большом объеме, или (метеориты) крайне не регулярны. Мы постараемся показать, что не эти источники являются причиной основных эндогенных процессов, и что слабость современной теории заключается именно в отсутствии у нее других, более подходящих источников энергии и энергоносителей. По современным оценкам, тепловой поток с поверхности континентов (65 ± 1.6 мВт/м²) меньше, чем с океанического дна (101 ± 2.2 мВт/м²) [2], хотя радиоактивные элементы, выделяющие значительную часть тепловой энергии, сосредоточены, в основном, в “гранитном слое” континентов и отсутствуют в океанических впадинах. Усредненный тепловой поток с поверхности Земли оценивается в 4.43×10^{13} Вт [2]. По расходу энергии это самый мощный, хотя и не самый яркий из эндогенных процессов; энергетические затраты Земли на намного более впечатляющие землетрясения и извержения вулканов на порядок ниже (около $2-3 \times 10^{12}$

Вт). Большинство исследователей (например, Франсиз [3]) считает, что все известные сегодня источники энергии Земли поставляют только около половины энергии наблюдаемого теплового потока, и что есть необходимость в дополнительном источнике энергии. Иногда обсуждается даже возможность сохранения остаточного тепла от первичного нагрева планеты в период аккреции и гравитационного формирования земного ядра (спустя более четырех миллиардов лет!). Согласно различным подсчетам внутренней энергии поставляемой гравитационной дифференциацией в жидком внешнем ядре Земли, ее количество с трудом доходит до уровня необходимого для генерации магнитного поля Земли (и то только при условии, что коэффициент полезного действия этого процесса будет очень высоким [4]). Но самым большим недостатком перечисленных выше источников энергии является полная невозможность концентрации их энергии.

Предлагаемая ниже модель водородно-гелиевой дегазации в качестве основного источника энергии Земли, докладывалась нами на четырех профессиональных конференциях, начиная с 2000 г. (например, [5, 6]). Насколько нам известно, подобная гипотеза прежде никем другим не предлагалась. По сути, она несколько напоминает предложенную в 1980 г. В. Н. Лариным гипотезу “Гидридной Земли” [7], не очень убедительную из-за сравнительно невысокой плотности гидридов железа и никеля, и не затрагивавшую проблем энергетики Земли. Мы используем дискуссионные данные в многочисленных работах по хорошей корреляции между землетрясениями и фазами приливов-отливов, вызываемых взаимным притяжением Луны и Земли (к примеру, сейсмическая активность на Луне наблюдается только на ее близкой к нам стороне, подверженной лунным приливам-отливам [8]). Мы используем также модель землетрясения, предложенную А.С. Пономаревым [9] (глава 1.2.3), но вместо его “гипотетической жидкости” предлагаем реальные генерирующие энергию реакции с участием водорода и гелия.

1.2 Принятые теории и их слабость в объяснении проблем энергетики процессов.

1.2.1 Энергия генерирования жидкой магмы и ее внедрения

Согласно общему мнению, опирающемуся на геофизические наблюдения, породы земной мантии находятся в твердом состоянии, несмотря на высокие температуры под земной корой; температуры их плавления возрастают с увеличением давления. Общепринято, что магма выделяется из мантии, и что энергия магмы и заключенных в магме газов является единственным источником энергии плутонических процессов. Основа стабильности магмы, одно из важнейших ее термических свойств, заключается в большой разнице между ее удельной теплоемкостью (около 0.3 кал/градус) и теплоемкостью плавления или затвердевания (65 - 100 кал/градус при атмосферном давлении). Соответственно, примерно такое же количество энергии требуется для плавления мантии, как и на ее подогрев примерно на 300⁰С. По понятным причинам, из трех упомянутых выше источников внутренней энергии Земли только радиоактивный распад мог бы быть эффективным для расплавления мантийных пород. Но содержание радиоактивных элементов в мантии недостаточно для того, чтобы их можно было бы принять во внимание (см. Таблицу 1), и поэтому нам приходится сделать вывод, что истинный источник энергии для плавки магмы нам неизвестен.

Изотопы	Период полураспада (10 ⁹ лет)	Тепло-отдача (кал / Г x год)	Содержание в мантии (г /г)	Выделение тепла в год (10 ⁻⁶ кал / г)
U ²³⁸	4.5	0.706	0.03-.13	0.02-0.09
Th ²³²	13.9	0.202	0.12-.52	0.02-0.04
K ⁴⁰	1.3	0.211	0.05-.22	0.01-0.05
Всего:				0.05-0.18

Таблица 1. Содержания главных радиоактивных элементов в мантии и количество выделяемого ими тепла (Williams and McBirney, 1979, табл. 3-1).

Для объяснения расплавления мантийных пород был предложен ряд остроумных, но, тем не менее, неадекватных механических моделей (нагрев в результате трения, тектонический подъем, сбрасывающий давление [10]). Самой интересной выглядит термическая модель флюсовой плавки, в которой температура плавления мантийных пород значительно понижается в результате добавки глубинных газов или воды из погружающихся пород в зоне субдукции [11]. Проблема в том, что суммарное содержание газов (H₂O и CO₂) в океанических базальтах составляет меньше одного процента; оно

настолько меньше насыщающего в глубине мантии, что возникает сомнение, - насколько добавка этих мизерных количеств может быть причиной производства значительных количеств магмы. Таким образом, жидкое внешнее ядро [12], жидкая астеносфера под верхней мантией, источники энергии, вызывающие плавку и подъем мантийных плюмов (диапиров), энергия и формы тепловой конвекции, движущей континентальные плиты и порождающей сейсмичность взаимодействием плит, попадают в число геологических феноменов, для которых нет хорошего объяснения.

Такие же проблемы возникают при попытках объяснить энергетику переплавки осадочных пород (например, процесс гранитизации), и образования вулканических очагов в земной коре, включающее переплавку, раздвижение и подъем включающих пород. В учебниках геологии повторяется утверждение, что фельзитовые или богатые газами магмы низкой плотности могут подниматься цилиндрическими колоннами сквозь породы земной коры, не оставляя, или почти не оставляя следов горизонтальной деформации. Но как показывает практика плавления, расплавление на контакте, даже с подогревом вмещающего материала, происходит со скоростью примерно 1 мм/мин. или 500 м/год, гораздо медленней, чем скорость наблюдаемого подъема вулканической магмы. Особенно маловероятно, чтобы подъем магмы мог произойти сквозь холодные и насыщенные водой горные породы многокилометровой мощности. Одно из двух: или эти породы должны были бы быть раскаленными докрасна, чему нет никаких доказательств, или магма внедряется под давлением, равными давлением взрывов [13].

В природе внедрение большого объема магмы иногда происходит удивительно быстро. Так, за месяц до катастрофического извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) в ноябре 1964 г. сейсмографы зарегистрировали повышенную сейсмическую активность на глубине 105-120 км, в верхней мантии, сопровождавшуюся серией мелко-фокусных землетрясений в земной коре [14]. Вулканологи интерпретировали эту активность как свидетельство того, что заполнение и увеличение объема магматической камеры началось из “корневой зоны” в верхней мантии; получается, что скорость подъема магмы была более 100 км/месяц. Нельзя

не отметить, что для такого быстрого вторжения магмы и плавления вмещающих пород требуются не только большая мощность, но и очень высокая плотность переноса энергии.

1.2.2 Загадочная энергия озер жидкой лавы

Халемаумау (Гавайи), самое знаменитое из долгоживущих озер жидкой лавы, кипело в кратере вулкана Килауэа с 1823 по 1924 год, и исчезло во время извержения. Его уровень поднимался и опускался, менялась интенсивность кипения, многочисленные путешественники приезжали посмотреть на огненное озеро даже из Европы. Т. Джаггар [15] и его сотрудники из расположенной всего в полукilометре от этого озера вулканологической лаборатории регулярно измеряли температуру лавы у поверхности (около 1140°C), глубину озера, от 131 м. до нуля, когда от озера оставались только лужи, и регулярно составляли топографические карты. Никакого жерла, которое соединяло бы лавовое озеро с мантией на многокилометровой глубине, не было, но, тем не менее, озеро, подпитываемые из немногих трещин, получало каким то образом энергию из мантии.

Г. Тазиев [16] столкнулся в 1977 г. с такой же загадкой, когда конус вулкана Ньирагонго (Заир, Африка) растрескался в результате небольшого землетрясения. Лавовое озеро в его кратере вылилось, затопив в течение 25 минут 2000 га плантаций базанитовой лавой температурой в 1100°C . Тазиев обследовал чуть остывший кратер, и, к своему удивлению, не нашел в нем ни зияющего жерла вулкана, ни даже просто фумарол. Сделанные там же чуть раньше замеры, и подсчеты Тазиева показали [17], что мощность тепловой энергии, излучаемой с поверхности кипящего лавового озера Ньирагонго, составляла 960 МВт (мегаватт) в 1959 г., и 12200 МВт в 1977 г. (когда его уровень повысился, и площадь увеличилась). Последняя цифра равняется суммарной мощности электростанций Израиля в 2004 г. или трехкратной мощности всех четырех энергоблоков Чернобыльской АЭС.

Обычное для учебников объяснение энергоснабжения лавовых озер конвекционной циркуляцией лавы-магмы нуждается в доказательствах, а их нет; само утверждение, что кипящая лава может циркулировать по трещинам или узким трубам на многокилометровые глубины до мантии, кажется крайне неубедительным. По-видимому, из всех известных нам

природных источников энергии единственными подходящими для подогрева лавовых озер могут быть только мощные потоки горючих газов, типа тех, которые вырывались из вулканов Везувий (1906 г.), Этна (1969-1970 гг. и в 2001 г.), и множества других.

Учебники геологии утверждают, что единственным источником энергии плутонических процессов является магма и содержащиеся в ней газы, т.е. магма является и носителем и источником энергии. Но некоторые исследователи считали иначе, к примеру, Е. Мархинин [18, стр. 63] цитирует из книги “Die Geschichte des Vesuvus” впечатления авторов, Альфано и Фридендера, наблюдавших извержение Везувия в 1906 г: “Нет и не может быть каких-либо точных измерений газов, но, судя по размеру канала и скорости выделения, кажется, что не только объем, но также и вес газов должен быть во много раз больше, чем вся масса пепла и лавы”. Комментарий Мархинина (там же) традиционен: “Оценки Фридендера ... и Альфано противоречат данным о растворимости воды в силикатных расплавах и не могли соответствовать действительности”.

Но есть и химические доказательства воздействия источников энергии, не связанной с выделяющейся лавой. Так, лавы необычной композиции, такие как карбонатные лавы (и пепел) вулкана Олдойнио Ленгаи в восточной Африке или состоящие из серы лавы вулкана Сиретоки-иоу-сан на о. Хоккайдо, ясно показывают, что по крайней мере в этих случаях, первичная магма, по определению силикатная, не могла быть носителем энергии, иначе силикаты были бы найдены в продуктах извержения. Ниже мы постараемся показать, что возможно существование газовых потоков, не связанных с выделяющейся магмой (т.е. с лавой).

1.2.3. Землетрясения и извержения вулканов

Землетрясения и извержения вулканов рассматриваются в учебниках порознь и объясняются по-разному, хотя многие и отмечают, что эти явления совпадают в пространстве и времени. Большинство землетрясений и извержений вулканов происходят на глубинных разломах на границах плит, в зонах рифтов и трансформенных разломов (Рис. 1).

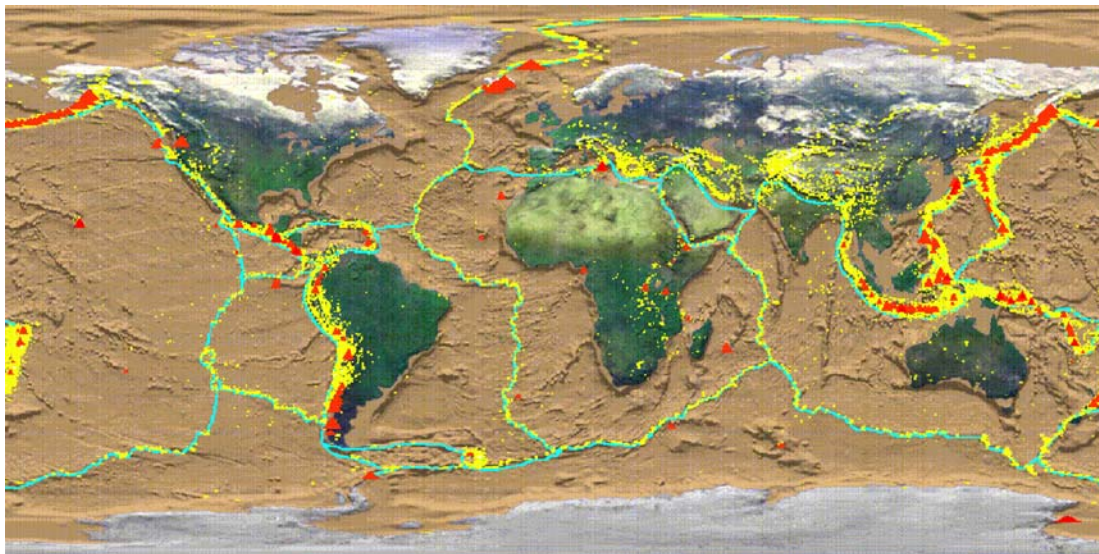


Рис. 1 Компьютерная карта поверхности планеты Земля, показывающая границы плит (голубые линии) и иллюстрирующая хорошую корреляцию активных вулканов (красные треугольники) и эпицентров землетрясений (желтые точки). (Компиляция по данным Интернета, в основном, по сайтам американской геологической службы, Смитсонского Института и НАСА).

Землетрясения предворяют и сопровождают вулканические извержения, но далеко не каждое землетрясение кульминирует извержением вулкана. До того как Рид [19] предложил свою широко подхваченную теорию “землетрясения как результата деформации пород под действием накопившейся упругой энергии”, доминировало мнение, что землетрясения и извержения вулканов происходят под действием тех же самых сил (см. Сэр Чарльз Лайель[20], 1875 г; Чарльз Дарвин [21], 1842-1846). Прекрасно подготовленные и еще не корруптированные никакими теориями наблюдатели-энциклопедисты дают полные, многосторонние описания катаклизмов, в которых подземные взрывы и наземные извержения газов являются интегральной частью землетрясений, а само землетрясение служит спусковым механизмом извержения вулкана. Принятые сегодня теории упругой отдачи, дилатансии и лавинного трещинообразования основаны на полевых наблюдениях последствий землетрясения в твердых породах при атмосферных условиях. С точки зрения механической модели Рида, слипание блоков и их последующий разрыв следовало бы ожидать на разломах, где доминирует сжатие, то есть в зонах сдвиговых или надвиговых перемещений; тем не менее, большая часть землетрясений происходит в

зонах субдукции (Рис. 1), где доминирует растяжение [22]. Похожими теориями пытаются объяснить средне- и глубоко-фокусные “тектонические” землетрясения, глубиной до 700 км, эпицентры которых генерируются при сверхвысоких РТ-условиях нижней литосферы и мантии. На самом деле, упругие напряжения могут накапливаться только в породах верхней литосферы, до глубины не более 20 км; на большей глубине температуры превышают треть температуры плавления пород и породы становятся пластичными [23], то есть, теория упругой отдачи там не применима. Эпицентры так называемых “вулканических” землетрясений обычно имеют место на глубинах 0-3 км, внутри вулканической камеры или на ее границах, где ни накопления упругих напряжений, ни срывов пород по разломам быть не может.

Как оказалось, проблемы с теорией упругих напряжений есть даже в верхней зоне земной коры. Все эксперименты с попытками замерить предваряющее землетрясение накопление напряжений результатов не дали. Более того, выяснилось, что спад напряжений в результате землетрясения (примерно $10^3 - 10^4$ Дж/м³) намного меньше, чем средний уровень напряжений в верхней зоне земной коры ($10^6 - 10^7$ Дж/м³ [24]). Широко подхваченная гипотеза самоорганизующегося сверхкритического состояния пород литосферы, якобы находящихся в состоянии перманентного сверхкритического давления [24], кажется слишком смелой, особенно когда речь идет о границах между плитами. При образовании трещин падение напряженности материала достигает 90 %. Материал в состоянии сверхкритического давления обладает свойствами расплава, до предела насыщен энергией и не способен к ее дополнительному поглощению, т.е. не способен поглощать даже слабые волны; тем не менее, литосфера поглощает даже мощные волны от сильных взрывов. Давление ниже сверхкритического является необходимым условием для поддержания трещин в открытом состоянии; а всем известно, что открытых трещин в зонах разломов - бесчисленное множество.

Увеличение магнитуды землетрясения на каждую единицу шкалы Рихтера соответствует примерно 30-кратному усилению высвобождаемой энергии [1, стр. 267]. Гуттенберг и Рихтер подсчитали [25], что в год происходит около 20 землетрясений с магнитудой более 7, около 100

землетрясений с магнитудой более 6, чуть меньше тысячи – более 5, и около 50 000 землетрясений с магнитудой более 3. Понятно, что соотношение Гуттенберга-Рихтера является проявлением некоего закона постоянства расхода энергии. Активные процессы, составляющие некое отдельное землетрясение, продолжаются иногда несколько лет, - от первого предваряющего толчка (форшока) к главному (землетрясение), - и до последнего заключающего толчка (афтершока). При некоторых землетрясениях наблюдались несколько мощных толчков одинаковой или близкой магнитуды (например, Газлийские землетрясения 1976 г, когда два главных толчка магнитудой 7.0 и 7.3 последовали с промежутком всего в пять недель [26]). Современная теория землетрясений (многолетнее накопление энергии и последующий срыв) явно нуждается в дополнительном механизме, который объяснил бы чрезвычайно быстрое накопление энергии после главного толчка до последующих, иногда не менее мощных. Рикитакэ [27] обнаружил, что, несмотря на все опубликованные анекдотические истории о кратковременных предвестниках землетрясений, наблюдается линейная корреляция продолжительности форшоков и магнитуды главного толчка. Мы полагаем, что при всем пессимизме, определяющем отношение современной сейсмологии к возможности кратковременных предсказаний землетрясений, какая-то чудовищная энергия должна накапливаться в определенной точке, в какой-то форме, и каким-то образом детонироваться и освободиться.

Многочисленные геофизические и геохимические аномалии, предваряющие и сопутствующие и землетрясения, и извержения вулканов, так же как и их источники энергии, пока еще не вполне понятны. Среди них: (1) мощные выбросы газов перед и вовремя землетрясений [28, 29], и вулканических извержений [30]; (2) аномально высокое инфракрасное излучение, т.е. выделение тепла, предваряющее также мелко-фокусные землетрясения [31, 32]; (3) предваряющие землетрясения радио- и акустические- шумы [33]; (4) рассеянное свечение и шаровые молнии [28]; (5) уменьшение глубины (“всплывание”) гипоцентров афтершоковых землетрясений [9]; (6) вполне замеряемые “вспухания” земли, предваряющие и землетрясения [9], и извержения; (7) связанные с землетрясениями циклы напряжений и изменения режимов подземных вод

[34]. Хорошая корреляция между землетрясениями (и извержениями вулканов) и лунными приливами-отливами, отмечалась целым рядом исследователей в многочисленных публикациях.

Частичное объяснение выше указанным аномалиям можно найти в Термо-Газо-Динамической (ТГД) модели развития очага землетрясения, разработанной Пономаревым [9]. Согласно этой модели, накопленная упругая энергия приводит к детонирующим процессам в гипоцентре, работающем по принципу “парового котла”, заполняемого гипотетическим “флюидом”, выделяющемся из магмы при сверхкритических РТ. Этот “флюид” взрывается в закрытом объеме, разрушая породы в гипоцентре; при этом наблюдается линейная зависимость между выделяемой землетрясением энергией и объемом гипоцентра. Однако ТГД модель Пономарева не поясняет ни (а) природы гипотетического “флюида”, ни (б) источника энергии, компенсирующего охлаждение среды при адиабатическом расширении парогазовой смеси, ни (в) природы и источника энергии, вызывающего экстраординарные тепловые, электрические и химические аномалии.

1.3 Энергия катастрофических землетрясений и вулканических извержений

Катастрофические землетрясения и извержения вулканов высвобождают чудовищную, точно-сфокусированную энергию. Например, определенная по сейсмическим волнам энергия умеренного (с местной амплитудой $M_L = 6.8$), Ландерского землетрясения в Калифорнии (28.06.1992), равнялась 4.3×10^{16} Дж. [35]. Для сравнения приведем энергию взрыва миллиона тонн (1×10^6 т. или 1 Мт.) тротила (ТНТ): она равняется 4.2×10^{22} эрг, или 4.2×10^{15} Дж. [36], т.е. энергия Ландерского землетрясения эквивалентна энергии взрыва 10-мегатонной водородной бомбы. Местная амплитуда хорошо коррелируется с магнитудой Рихтера [35], а каждый следующий бал в системе Рихтера соответствует увеличению выделяемой энергии приблизительно в 30 раз. Соответственно, выделившаяся меньше чем за минуту энергия Аляскинского землетрясения 1964 г. ($M_L = 9.0$) превысила 4×10^{19} Дж, т.е. была эквивалентна энергии чудовищного взрыва 10000-мегатонной бомбы! Этот пример показывает, что плотность выделяемой при

землетрясениях энергии очень высока; так же высока и скорость распространения трещин, близкая к скорости детонации, или скорости звука в литосфере (3.5 км/сек в случае Аляскинского землетрясения 1964 г. [37]). На самом деле, эта скорость превышает возможный предел скорости распространения трещин, равный половине скорости компрессионной волны [38], т.е. значительно меньшей скорости звука. Кстати, землетрясения могут генерировать скорости значительно большие, чем это отмечено для Аляскинского землетрясения 1964 г. К примеру, В.А. Апродов описывает 400-километровый разрыв, образовавшийся при землетрясении 1957 г. в Гобийском Алтае: “Вот на поверхности земли лежат гранитные валуны. Они, как бритвой, срезаны плоскостью разлома. Отсеченные части валунов смещены со всей горой вниз на пять-шесть метров. Оставшиеся части даже не сдвинуты с места! Я в изумлении смотрел на эти камни. Уже в трех метрах от разрыва не видно никаких следов дробления породы. Какова же была концентрация механической энергии на самом разломе, если гранитные валуны были разрезаны и при этом даже не сдвинуты с места?!” ([39], стр. 92). Для произведения такого эффекта нужны скорости большие, чем скорости взрыва (скорости распространения ударной волны, которые равны скорости звука в среде), нужны скорости, приближающиеся к скорости детонации, которые могут быть на порядок выше скорости звука в несжатой взрывом среде.

При катастрофических извержениях вулканов тоже высвобождаются энергии значительно более мощные, чем при взрывах, произведенных человеком. Из катастрофических вулканических взрывов больше всего свидетельств оставил взрыв вулкана Кракатау (Индонезия) 1883 г. В результате этого взрыва половина гористого острова превратилась в пыль, рассеянную в виде вулканического пепла на площади в 800 000 км², и частично поднятую в стратосферу, на высоту 60-80 км [40]. “На месте двух уничтоженных взрывом гор, около 8 км длинной и 2-5 км шириной, возникла подводная впадина глубиной в 250-270 м. Объем выброшенного взрывом материала равнялся примерно 18 км³; начальные скорости обломков должны были достигать 600-2000 м/сек. Специальное исследование этого взрыва показало, что начальные скорости части обломков превышали 8 км/сек; эти обломки навсегда покинули земное

пространство” [40]. Для сравнения: начальные скорости обломков при взрывах вулканов Сент Хеленс, Безимьянного и Шивелуч равнялись “всего” 280-500 м/сек [40]; что означает это “всего”, вулкан Шивелуч продемонстрировал 12 ноября 1964 г, извергая обломки весом до 3000 т. на расстоянии до 12 км [41]. Приведем еще одно сравнение:

Взрыв самой мощной в истории человечества водородной бомбы (1961 г, 50 Мт, Острова Новая Земля) был слышен на Полярном Урале и на р. Печоре, на расстоянии 700-800 км (Гилат, неопубликованное). Но самый мощный взрыв вулкана Кракатау (1883) был слышен на расстоянии 4653 км [42]. Еще более мощным, по всем характеристикам, было извержение вулкана Тамбора (Индонезия, 1815 г.) [42]; согласно анализу Хедервари [43], оно высвободило $2.88 \times 10^{26} - 1.4 \times 10^{27}$ эрг (или 1.4×10^{20} Дж) суммарной энергии. Ваганов с соавторами [40] оценили объем выброшенных им обломков и пепла в 100-150 км³, а энергию потрясающего по масштабам взрыва в 10^{20} Дж, эквивалентную взрыву 24000 Мт. (24 000000000 т.) ТНТ.

Принятая сегодня геологическая модель вулканического взрыва, сравнивает его с взрывом при вылете “пробки шампанского”. Согласно этой модели самый сильный взрыв должен наблюдаться в начале извержения, когда в результате воздействия какого-либо внешнего фактора (например, сошедшей лавины), внезапно падает литостатическое давление верхней части вулкана, и становится меньше, чем его внутреннее давление. В результате мгновенно увеличивается объем пузырьков водяного пара в магме, накопившейся в магматической камере, и их давление взрывает вершину вулкана. Вулканы не всегда согласны с этой моделью, и поступают по-своему. Чудовищный взрыв вулкана Тамбора (1815 г.) последовал после 7 месяцев извержения, а знаменитый взрыв вулкана Кракатау кульминировал его трехмесячную активность [30].

Сильнейший взрыв далеко не всегда происходит в закрытом объеме, к примеру, Безимьянный извергался вертикально (1956), прежде чем ударил свирепым косо-направленным взрывом. А Филиппинский вулкан Пинетубо кульминировал свое извержение 1991 года 12-15-го июня, чудовищными многократными взрывами, выбрасывающими его раскаленные внутренности на высоту в десятки километров, и только потом дошел до пароксизма, от которого город Манила, удаленный на сотню километров, несколько часов

подряд содрогался в разрушительных землетрясениях. Взрывы Пинетубо произошли из открытой с поверхности магматической камеры, никакое давление водяного пара не могло накопиться под несуществующей уже кровлей, и обычное объяснение аналогией с “пробкой шампанского” (например, [1]) здесь, безусловно, не подходит. По всей видимости, должен существовать какой-то иной, практически неограниченный по мощности источник энергии, часть которой может быть сфокусирована.

2. Предел накопления механической энергии в литосфере

Может ли накопиться в литосфере энергия, достаточная для катастрофически-сильного землетрясения? Мы уже упоминали выше, что упругая энергия не может накапливаться на глубине большей, чем 20 км. Никто не знает точных механических свойств литосферы, но мы можем выбрать крайний случай, взяв вместо растрескавшегося в зоне разлома блока литосферы заведомо более прочный блок конструкционной стали размером 600 км. x 100 км. x 20 км. (примерный размер блока литосферы в котором генерировалось Аляскинское землетрясение 1964 г.). Максимальный уровень количества энергии (МЭ), которая может накопиться в твердом материале, зависит от температуры, скорости деформаций, пластичности и сопротивления материала на излом [44, 45]; он меньше или равняется критической энергии растрескивания (трещинообразования), потому что образование трещин резко уменьшает прочность материала. Критическая плотность энергии деформации – это параметр, включающий и энергию деформации, и сопротивление на излом [45].

Критическая энергия трещинообразования (Q) зависит от критической плотности энергии (W), от максимального объема зоны пластической деформации и от радиуса вершины главной трещины (r), помноженной на ее площадь (S): ($Q = W \times r \times S$). Легко найти в справочнике ASM Handbook [46] уже вычисленные и подтвержденные экспериментально значения сопротивления на излом для этого типа стали, - 2060 МДж/м³. Для блока размером 600 x 100 x 20 км максимальный объем зоны пластичной деформации (r x S) будет: $1.96 \times 10^{-3} \times 72 \times 10^9 = 141 \times 10^6 \text{ м}^3$

Соответствующий максимум аккумулированной упругой энергии (Q = W x r x S) будет: $141 \times 10^6 \text{ м}^3 \times 2.06 \times 10^9 \text{ Дж/м}^3 = 29 \times 10^{16} \text{ Дж}$.

Иными словами, даже если бы Аляскинский блок литосферы был сделан из стали, то всего его запаса эластичной энергии хватил бы максимум на взрыв мощностью в 70 мегатонн, а не 10000 мегатонн, которые высвободились при землетрясении 1964 г. Следовательно, энергия для землетрясения пришла из другого источника.

3. Химия вулканических газов

Проявления скрытой (латентной) химической энергии при землетрясениях и плутонических процессах наблюдались, по крайней мере, со времен “Метаморфоз” Овидия. Сэр Чарльз Лийель написал в своих основополагающих “Принципах Геологии” (1875 г [20]), что основные причины землетрясений и извержений вулканов одни и те же, и связаны с образованием тепла и химическими реакциями в глубинах Земли. Сегодняшняя парадигма предполагает, что энергия магмы и содержащихся в ней газов представляет собой единственный источник энергии плутонических процессов. Тем не менее, сплошь и рядом наблюдения показывают, что количества выброшенных вулканическими извержениями в атмосферу газов и других веществ значительно превышают те их количества, которые могли бы содержаться в извергнувшейся из вулкана лаве и пепле. Например, при извержении Сент Хеленс (США, 1980 г.), количества выброшенных вулканом CO_2 [47], и SO_2 [48] в несколько раз превышали те их количества которые могли бы выделиться из поднявшейся магмы. Результаты анализа изотопов показали, что и эти газы, и фумарольные воды были мантийного происхождения [49]. Анализы проб из фумарол кратера показали, что сера выделялась из магмы в форме H_2S и окислялась до SO_2 при охлаждении в выброшенном столбе дыма. Корреляция нерегулярных выбросов H_2 с зарегистрированной в течение этого же извержения магматической активностью подтверждала магматическое происхождение водорода [50].

При извержении вулканов обычно выделяется весьма значительное количество водяного пара, - например, 15000 т. в день при извержении вулкана Парикутин в Мексике в 1945 г.,- но обычно очень трудно решить, какая часть этой воды выделяется из мантии, и какая часть ее была втянута в вулканический процесс из окружающих вулкан водоносных горизонтов.

Считается, что вулканические пары, выделяющиеся в окрестностях большинства вулканов, представляют собой грунтовые воды, проникающие до глубин в 2-4 км. и подогреваемые там до, примерно, 400° С. Более глубокие и более горячие породы, по-видимому, воду не пропускают. Некоторая неопределенность связана и с вопросами о происхождении вулканических CO_2 , SO_2 и Cl_2 , элементы которых могли быть вынесены как из магмы, так и из контактирующих с магмой горных пород и жидкостей.

Тем не менее, мощные выделения газов из вулканов длятся иногда многие годы, в течение которых вулканы “спят”, и подогревают породы вулканического жерла, как, например, кратер Бокка Нуово на вулкане Этна (Сицилия) в 1969-1970 гг. [16]. Группа Г. Тазиева использовала скоростные методы хроматографического анализа газов; среди наиболее удививших их результатов был сравнительно низкий процент водяного пара в эманациях г. Этна: CO_2 составлял примерно 50%, H_2O – менее 40%, опускаясь всего до 3-4% во время коротких выбросов горячего газа [51]. В течение самых спокойных периодов газо-подводящая система вулкана Этна выбрасывает в день примерно 200 т. газа, содержащего гелий мантийного происхождения; мониторинг газовых эманаций южного и восточного предгорьев вулкана показывает преобладание в нем то метана, то углекислого газа [52]; общее количество выделяемого CO_2 составляет 25 Мт/год [53]. До сих пор нет теории, которая могла бы указать на возможные источники агрессивных веществ, таких, как HF, которые не могут быть накоплены в магме в ожидании извержения, так как прореагировали бы с окружающими породами (в лабораториях плавиковая кислота хранится в парафиновых бутылках), но извергаются иногда тысячами тонн. Например, 0.2 миллиона тонн HF были выделены в течение 1919 г. “дымящими каминами” в свежих игнимбритах долины Десяти Тысяч Дымов на Аляске [54].

Согласно данным Мархинина [18, 55], анализ всех составляющих газов при извержении включает анализ газов в образцах жидкой лавы, в образцах застывшей лавы, в образцах свежего пепла и собственно газовых выделений. Все результаты показывают, что главными компонентами газов, в порядке убывания, являются H_2O , H_2 , CH_4 (и другие углеводороды), O_2 , CO , CO_2 , COS , N_2 , NH_3 , Cl , H_2S , SO_2 , SO_3 , S , He , Ar , Xe , борная и мышьяковая кислоты, хлориды и фториды металлов. В свежих, со всей

тщательностью “стерильно отобранных” образцах вулканического пепла вулканов Тятя и Толбачик (Камчатка) были обнаружены десятки химических соединений, которые традиционно относились и относятся к “органическим” (например, аминокислоты) [18].

Состав сухих газов и конденсата паров из образцов жидкой лавы, отобранных во время извержения вулкана Толбачик (1975-1976 гг. Камчатка) оказался довольно неожиданным (Табл. 2), и дает возможность сделать следующие предварительные выводы: (1) Многократная разница

Сухие газы	Минимальные концентрации (объемные %)	Максимальные концентрации (объемные %)	Сухие газы	Минимальные концентрации (объемные %)	Максимальные концентрации (объемные %)
H ₂	0.002 %	25.5 %	CH ₄	10 ⁻⁵ %	0.56 %
O ₂	0.6 %	19.7 %	N ₂	38.6 %	83.4 %
He + Ne	0.02 %	0.17 %	CO ₂	0.2 %	41.0 %
CO	0.0 %	0.6 %	H ₂ S	0.003 %	0.008 %
HF	0.005 %	0.06 %	HCl	0.05 %	0.07 %
SO ₂	0.002 %	0.006 %			
Конденсаты паров из тех же проб, среднее содержание(мг/л) рН = 0.66-0.85					
Анионы и кислоты:		Cl ⁻ - 23.800	F ⁻ - 2560	SO ₄ ⁻² - 220	H ₂ SO ₄ - 1327
Катионы:	NH ₄ ⁺ - 6.2	Na ⁺ - 720	Al ⁺³ - 251	Zn ⁺² - 190	Cu ⁺² - 93
	Ca ⁺² - 68	Fe ⁺² - 37.5	Mg ⁺² - 18.3	Cd ⁺² - 25	K ⁺ - 2.6
	Li ⁺ - 1.5	Pb ⁺² - 1.4	Mn ⁺² - 1.2	Sn ⁺² - 0.05	Ag ⁺ - 0.001

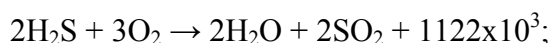
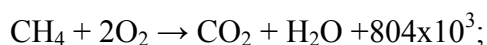
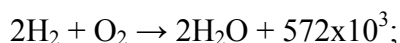
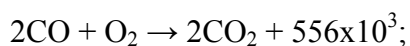
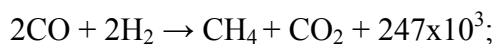
Таблица 2. Состав сухих газов, отделенных от паров воды (~90 % от объема газов) методом конденсации, выделенных из 36 образцов горячей (1.000⁰С ± 65⁰С) жидкой лавы из трещинного извержения вулкана Толбачик 1975-1976 гг. (по данным Мархинина [18, стр.43-44]).

между минимальными и максимальными содержаниями главных газов подтверждает и расширяет вывод Тазиева о сильных изменениях состава извергающихся из вулканов газов также и на газы, содержащиеся в лавах; (2) Конденсаты газов взятых из проб жидкой лавы являются очень кислыми натрий-хлоровыми рассолами, в которых доминируют катионы Al-Zn-Cu (Al, Zn, Cu >>> Ca, Fe, Mg); их состав не зависит от состав лав, содержащих эти газы; (3) Состав газов жидких лав не стабилен и указывает на

возможность экзотермальных химических реакций; выделяющаяся ими тепловая энергия может сохранять лаву в жидком состоянии; (4) И – самое важное – извергающиеся лавы и извергающиеся газы, по крайней мере, часть из них, – пришли из разных мантийных источников.

4. Вулканические газы в роли носителей энергии

Широко известно, что химические реакции между некоторыми газами при определенных условиях начинаются с возгорания и приводят к взрыву в результате протекающей цепной реакции. Активные составные – свободные атомы и радикалы – в течение цепной реакции реагируют и с молекулами первичных газов, формируя и конечные продукты, и новые активные центры. Смесь кислорода и водорода взрывается при водородных концентрациях от 6 до 95% (объемных). В присутствии даже очень небольшой примеси водяных паров взрыв происходит при температуре $\sim 600^{\circ}\text{C}$; вода является катализатором ускоряющим взрывные реакции тысячекратно. Эта и ей подобные реакции, типичные для взрывчатых смесей, выделяют очень значительные количества энергии, например (Дж/моль):



Извержение вулкана Тамбора (1815 г.) выбросило в атмосферу (кроме прочих веществ) около 52×10^6 т. серной кислоты [56], синтез которой из первичных элементов генерировал бы энергию, эквивалентную взрыву 96 мегатонн ТНТ. Синтез 50×10^6 т. воды из смеси кислорода и водорода мог высвободить энергию эквивалентную взрыву 150 мегатонн ТНТ. Согласно [40], анализы газов из свежих лав Камчатских вулканов, выполненных И.И. Глущенко, показывают, что первичные взрывчатые газы, не содержавшие

примесей грунтовых вод или воздуха (H_2 , Cl_2 , CO , OH , F_2 , Br_2 , H_2S , CH_4) составляют от 10 до 70% вулканических газов.

Вулканы практически всегда просыпаются после “тектонического” землетрясения, а их активный период сопровождается “вулканическими” землетрясениями. Эти последние следуют сериями (вулканический тремор): так, в начале извержения вулкана Сент Хеленс (1980) местная сейсмическая сеть зарегистрировала более 2400 землетрясений с магнитудами 2.4-4.0 [57, рис. 3-5]. Сейсмические “подписи” землетрясений явно различны. У “тектонических” землетрясений фазы Р и S импульсивны, частотные характеристики многокомпонентны, глубина мелко-сидящих гипоцентров 0-10 км. Глубина гипоцентров “вулканических” землетрясений ограничена 0-3 км, и приурочена к интерьеру и граничной зоне вулканической камеры с жидкой магмой, где никакого “эластического напряжения” накопится не может; они характеризуются отчетливой Р-фазой, нечитабельными S-фазами и низкими частотами в пределах 1 – 5 герц.

Мак-Нутт [58] собрал данные, которые эмпирически коррелируют амплитуды вулканического тремора и взрывную активность вулкана: они совпадают. По нашему личному опыту, и опыту других наблюдателей, вулканическое извержение звучит, как серия взрывов; земля трясется, как при землетрясении; когда наблюдаешь вблизи – все это похоже на серию взрывов ТНТ, твердый материал и жидкий фонтанируют, как в эпицентрах взрывов, в нос бьют запахи химикалий, как во время артобстрела: так может быть, все эти явления однозначно связаны, и “вулканические” землетрясения – это действительно химические взрывы?

5. Свойства искомого источника энергии

Слабость современной парадигмы, описывающей плутонические процессы, не только в ее постулировании магмы и ее включений в качестве единственного источника энергии. Хитроумные механические модели, призванные объяснить образование жидкой магмы и ее транспортировки без затрат энергии напоминают знаменитые модели “вечного двигателя”, и тоже не работают.

Описывая катастрофическое землетрясение, пробудившее извержение трех Чилийских вулканов, Чарльз Дарвин [21] вывел следующее

закключение: “Исходя из очень интимной взаимозависимости, которая наблюдалась в течении этих событий между землевоздымающими и извергающими силами, мы можем уверенно заявить, что силы, которые медленно, мелкими скачками воздымают континенты, и силы, которые периодически извергают из разверстых жерл вулканические породы, - идентичны.” Спустя полтора столетия, анализируя современные геологические наблюдения, мы пришли к тому же выводу. Попробуем характеризовать эти силы (энергию): (а) практически неисчерпаема и ее усредненный поток квази-постоянен; (б) может быть быстро сконцентрирована и сфокусирована; (в) обладает очень высокой плотностью; (г) может высвободиться со скоростью взрыва или даже детонации и быстро накапливаться в промежутках между сейсмическими толчками и вулканическими взрывами, компенсируя все потери; (д) может быть быстро и с малыми потерями транспортирована на очень большие расстояния; (е) Поставляет в земную кору заряженные энергией газы, а также сконцентрированные редкие и рассеянные элементы для рудообразующих гидротермальных растворов; (ж) Как будет показано ниже, ее поток хорошо коррелируется с эманацией легкого гелия (^3He).

Все процессы, связанные с деформацией и образованием трещин, не отвечают этим условиям еще и потому, что являются необратимыми, требуют длительного периода восстановления и не способны работать короткими циклами выделения и аккумуляции энергии, проявляемыми в фэршоках-афтершоках. Скорость ядерных процессов практически не зависит от температуры и давления среды (в диапазонах земных условий) и не могут реагировать на её изменения выбросом энергии или её поглощением. “Газы, содержащиеся в магме” физически не могут аккумулировать выделяемой при извержении энергии, которая оценивается по наблюдаемым давлениям и скоростям разрушений; их состав и объем не соответствуют объему и химическому разнообразию газов, наблюдаемых при извержении.

Анализ возможной плотности переноса энергии посредством конвекции, теплопроводности, или посредством транспортировки скрытой (латентной) энергии химических соединений, показывает безусловную выгодность последней. К примеру: тепловая энергия образования воды

составляет 285.83 КДж. на моль. Образование 0.5 моля воды (из 1 г. водорода и 8 г. кислорода) высвобождает количество энергии равное удельной теплоте плавления 1 кг. кварца, или достаточное для подогрева того же 1 кг. кварца на 200° С. Этот пример небольшой и легко транспортируемой массы вещества с большой энергоёмкостью особенно важен, потому что гидродинамические потери возрастают пропорционально квадрату массы переносимого материала.

Предлагаемая ниже модель опирается на другой, значительно более мощный источник энергии мантийных газов. В очень многих публикациях [29 и др.] отмечается, что землетрясения и вулканические извержения сопровождаются значительными выделениями мантийного гелия, водорода и других газов. Эта взаимосвязь тектонических процессов с процессами химическими говорит о возможном участии этих газов в генерации энергии. Прямым доказательством этой связи является наблюдаемая многими исследователями уже с 1970-ых годов прекрасная корреляция между потоком мантийного гелия (^3He) и потоком тепла, выносимого гидротермальными растворами из мантии в зонах крупнейших океанических разломов (например [29, стр. 234-235] и многочисленные более поздние статьи, например, [59]).

6. Аккумуляция, трансформация и высвобождение энергии в планете Земля: первичные водород и гелий как наиболее распространенные и наиболее важные хранители и носители энергии

6.1 Содержание водорода и гелия в недрах Земли

При зарождении Солнечной Системы гелий и водород были самыми распространенными элементами космоса, составляя 98-99 % всего вещества. Из изотопов гелия лёгкий изотоп ^3He получается, в основном, при ядерной реакции синтеза (невозможной в земных глубинах при естественных условиях); тяжелый гелий ^4He получается при радиоактивном распаде урана. Соотношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ в газах континентальных почв равно 10^{-7} - 10^{-8} , в атмосферном воздухе 1.4×10^{-6} . Гелий более легкого состава (1.2×10^{-5}) был обнаружен в эманациях из океанических хребтов Гавайских вулканов (4.5×10^{-5}); последнее наводит на мысль о еще более легком составе гелия в земной мантии, приближая его к составу солнечного ветра (4.6×10^{-4}) [60]. Обилие лёгкого гелия в мантии предполагает его первичность (примордиальность), так что главным становится

вопрос о форме хранения и переноса гелия (и первичного водорода) в земном ядре и мантии.

Альтернативная гипотеза производства ^3He атомным реактором в земном ядре была предложена Холленбахом и Херндоном [61, 62]; основанием для этой гипотезы послужили цифровые симуляции и аналогия с природными ядерными реакторами, функционировавшими в течение 10^5 - 10^6 лет в Окло (Габон), 2 миллиарда лет тому назад [63]. С этой гипотезой трудно согласится, во-первых из-за отсутствия в океанических базальтах или где-либо еще над мантией стабильных изотопов – продуктов атомной реакции (например, изотопа ^{10}Be), и во-вторых из-за отсутствия теоретической базы для предположения о наличии в земном ядре воды (без воды в качестве регулятора ядерная реакция быстро заканчивается ядерным взрывом).

Согласно современным моделям формирования Земли, большая часть чудовищной энергии бомбардировки Земли метеоритами разного размера в период ее аккреции превращалась в тепло, расплавившее значительную часть нашей планеты, что, в свою очередь, способствовало гравитационной дифференциации с образованием ядра около 4.5 миллиарда лет тому назад. Аккреционные процессы вызывали, по-видимому, активную потерю планетой газов; многие исследователи считают, базируясь на изотопных исследованиях, что только примерно 5 % первичных газов сохранилось в интерьере планеты. С концом периода аккреции потери газов из мантии продолжают в форме фракциональной дегазации связанной с конвекцией жидкой мантии, верхняя часть которой уже практически дегазирована, а нижняя стала функционировать как практически закрытая система уже спустя 150 миллионов лет после начала аккреции (например, [64]). Двухслойная модель мантии подтверждается низким соотношением $^4\text{He}/^3\text{He}$ в базальтах океанических островов, вплоть до 25000 в Подводной горе Лоихи (Гавайи) [65]. Для сравнения, очень постоянное значение усредненного соотношения $^4\text{He}/^3\text{He}$ около 88000 было многократно замерено в базальтах Срединно-Океанических Хребтов (MORB), в которых первичные газы не сохранились, и заметен приток радиогенного гелия [65]. Базируясь на соотношении в Лоихи, Аллегре с соавторами [66] предложили $^4\text{He}/^3\text{He} = 5200$ в период формирования Земли, близкое к значению 6670,

замеренному в богатых газами метеоритах, но более высокое, чем значение 2500, в солнечном гелии.

Земная атмосфера содержит около 1.2×10^9 молей ^3He ; расчеты по классическим наблюдениям потери гелия в космическое пространство ограничивают его времепребывание в атмосфере одним миллионом лет. Используя три основных приема: уравнения масс-баланса, время дегазации и систематичное использование абсолютных содержаний и изотопного состава всех редких газов, Аллегре с соавторами [66] пришли к выводу, что половина мантии Земли на 99 % дегазирована. Их подсчеты для нижней части мантии показали концентрации гелия ($^3\text{He} = 1.8 \times 10^{-9}$ см³/г и $^4\text{He} = 4.5 \times 10^{-5}$ см³/г) и его количества ($^3\text{He} = 2.1 \times 10^{14}$ моль и $^4\text{He} = 5.3 \times 10^{18}$ моль), за основу принималось соотношение $^4\text{He}/^3\text{He} = 25000$. В той же работе ими был сделан подсчет потока гелия из нижней части мантии в атмосферу (5.5×10^7 мол/год ^4He и 2200 мол/год ^3He); дополнительная часть притока ^4He относится за счет его производства при распаде радиоактивных элементов земной коры. Большинство исследователей в этой области геохимии считает, что тепло приходит в верхнюю мантию снизу, а не изнутри нее [66]. Это дает основание предположить, что в Земле еще остались огромные запасы водорода и гелия подтверждается продолжающимся до сих пор мощным истечением их из недр планеты в космическое пространство. Остается ответить на вопросы об удельной энергии этих газов и о формах их хранения и переноса.

6.2 Активность водорода и гелия и их латентная энергия

И водород, и гелий в течение периодов аккреции и дифференциации Земли были главными элементами космоса, и должны были обладать высокой химической активностью, в соответствии с законом действия масс. Чрезвычайно широкий, базисный принцип Ле-Шателье определяет, что при любом давлении на равновесную систему или смесь в состоянии равновесия, это равновесие сместится в направлении, уменьшающем это давление. Под давлением понимаются изменения в этой смеси температур, давлений или концентраций. Например, увеличение концентраций реагентов усиливает реакцию. Сверхвысокие температуры и давления (РТ), довлеющие в земном

ядре и мантии, способствовали, в соответствии с принципом Ле-Шателье, переходу водорода и гелия в более компактные связанные состояния, т.е. в растворы (твёрдые и жидкие), и химические соединения, то есть эндотермическим реакциям, связанным с поглощением избыточного тепла, с эффективным охлаждением среды.

В соответствии с теоремой Пригожина, описывающей естественное развитие от хаоса к порядку для любого уровня развития материи, эволюция планеты Земля, как открытой термодинамической системы взаимодействующей с окружающей средой, должна протекать с минимальным производством энтропии [68], и производить минимум свободной энергии (Гиббса). Отсюда следует, что процессы накопления и переноса энергии в различной форме должны были сопровождаться минимальными потерями, и, соответственно, минимальным разогревом недр. Предлагаемое здесь эндотермальное образование растворов и соединений гелия и водорода в период аккреции охлаждало планету, предотвращая обратное испарение аккрецированной массы, и аккумулировало энергию. Энергия, затраченная на превращение водорода и гелия в растворы и соединения, будет выделяться обратно при экзотермальном распаде этих соединений и растворов (Глава 7). Эта скрытая (латентная) энергия может быть оценена следующим образом [69]:

Химическая потенциальная энергия (свободная энергия) любого газа в растворе будет:

$$\mu_{\text{H}} = \frac{1}{2} \mu_0 + \frac{RT}{2} \ln \frac{P}{P_0} = \bar{H}_{\text{H}} - T\bar{S}_{\text{H}} \quad (1)$$

Где:

μ_{H} - парциальная свободная энергия газа в растворе, J моль⁻¹;

μ_0 - стандартная свободная энергия газа при давлении P_0 , J моль⁻¹;

P - равновесное давление газа при температуре T , бар;

P_0 - равновесное давление газа при температуре $T=273.15$ K;

H_{H} - парциальная энтальпия газа в растворе, J моль⁻¹;

S_{H} - парциальная энтропия газа в растворе, J моль⁻¹K⁻¹.

T - абсолютная температура, K.

Растворимость газа увеличивается с увеличением давления согласно [70]:

$$c = A \cdot \sqrt{P} \quad (2)$$

Где c – концентрация раствора, моль* L^{-1}

A – константа, моль* $L^{-1} * Pa^{-0.5}$, и P - давление, Pa

Результаты оценки удельной энергии этих газов при РТ-условиях, характерных для различных глубин, выполненные по формуле (1), показаны в Таблице 3.

Глубина (км)	Давление (ГПа)	Температура (К)	Удельная энергия (Дж/моль)	
			Гелий	Водород
0	0	300	12480	8652
10	0.3	500	20800	14420
100	3.4	1800	74880	51912
500	18	2000	83200	57680
1000	40	2500	104000	72100
2000	88	3500	145600	100940
3000	160	5500	228800	158620
4000	238	5800	241280	167272
5000	321	6000	249600	173040
6000	358	6200	257920	178808

Таблица 3. Удельная энергия водорода и гелия в глубинах Земли

Основываясь на данных о содержании водорода в вулканических эманациях, в атмосферном воздухе и его потерях в космическое пространство, Войтов [71] очень осторожно оценил величину водородного потока из земных недр в 6×10^{12} г/год. Условно предполагая, что этот поток приходит с глубины в 1000 км, количество выделяющейся при этом энергии может быть оценено в $2,163 \times 10^{17}$ Дж/год (Табл. 3). Эта цифра приближается, с точностью до одного порядка, к современной оценке суммарной годовой энергии землетрясений (около 10^{17} - 10^{18} Дж/год, [8]). На самом деле, величина потока водорода, по-видимому, выше: оценка Войтова [8] не принимала в расчет громадные запасы газ гидратов (в основном, метан гидратов, например, [72]) и крупные потоки углеводородов из тектонически-активных зон (Войтов, устное сообщение, 2000 г.).

Мы предполагаем, что растворы и соединения водорода и гелия сохраняются и перемещаются в земных глубинах в тех же формах, которые наблюдались в экспериментах при похожих на мантийные сверхвысоких давлениях и температурах (РТ).

6.3. Соединения водорода и гелия в условиях сверхвысоких РТ: Экспериментальные Данные

6.3.1 Твердые растворы водорода и гелия

Эксперименты при сверхвысоких РТ-условиях показали, что большое количество водорода и гелия может храниться в условиях земного ядра в виде растворов и газовых включений (в соответствии с формулой 2). Сферические включения гелия диаметром 1-2 нм были обнаружены при помощи электронной микроскопии в железе и никеле; давление внутри включений составляло около 3.5×10^{10} Па (350 кбар); при таком давлении гелий должен оставаться твёрдым даже при комнатной температуре [73]. Взаимосвязанные включения гелия и водорода образует агрегаты которые сохраняются при их движении благодаря вызванным ими упругим полям.

Энергия связи между водородом и гелием в пузырьках равна 0.7-0.9 эВ/атом [74]. Энергия диффузии водорода с различными дефектами составляет от 0.03 до 0.1 эВ. для атомов внедрения, 0.25-0.31 эВ. для дислокаций, и 0.4-0.5 эВ. для вакансий. Высокие концентрации щелочных и щелочноземельных металлов в мантии увеличивают вероятность их связей с редкими газами и уменьшают скорость их высвобождения.

6.3.2. Соединения гелия

Гелий является благородным газом при атмосферных условиях, но соединения He-H, He-O, He-Si, и He- металлы, устойчивые только при температурах выше 1000 К и давлениях выше 14 Гпа, хорошо известны [75-77]. Структуры типа He-Cl, He-F, He-C и He-N могут быть предсказаны по атомным структурам и составу природных газов, богатых гелием [29]. При распаде соединений гелия и водорода должны выделяться огромные количества энергии (больше чем 2 ккал на г-моль для системы He-H, по грубой оценке по опубликованным источникам [74, 78]), используя стандартные коэффициенты преобразования физических единиц. Более точная прикидка законсервированной энергии была сделана в современных исследованиях эндотермальных формаций твёрдых и жидких растворов лёгкого гелия ^3He . Саундерс с соавторами [79] определили химическую

поляризацию и энергию связи гелия с окружающей материей. Наблюдаемая экспериментально поляризация позволила оценить потенциальный барьер образования раствора (максимум 10 эв), что соответствует 230.5 ккал на г-моль. Это значение близко к значению удельной энергии ионизации водорода 313.4 ккал на г-моль или 13.595 эв, и больше чем энергия формирования воды из гремучего газа (68.3 ккал на г-моль).

6.3.3 Соединения водорода

Раствор водорода с содержанием 138.2 см^3 водорода в 100 г. железа увеличивает константу решетки альфа-железа всего с 0.28590 до 0.28612 нм [80]. При растворении водорода в жидком железе и никеле затрачивается соответственно 15.18 ккал на моль и 8600 ккал на моль [81], эти количества резко возрастают с увеличением температур. Увеличение давления только увеличивает стабильность растворов. 1 см^3 Na или K способны поглотить 126-135 см^3 водорода [81]. Бинарная система H_2 - H_2O образует при высоких давлениях новый 1:1 тип газ гидрата, где H_2O и H_2 образуют две взаимно-проникающие решетки, обе с алмазной структурой, устойчивые по крайней мере до давлений в 30 ГПа [78]. Рентгеновский анализ отдельных кристаллов систем H_2 - CH_4 при похожих условиях определил 4 твердых соединения с молярными соотношениями 1:2, 1:1, 2:1 и 4:1 (там же). Вывод автора исследований: существование газ гидратов при высоких давлениях являются объективной реальностью.

Эти данные подтверждают предложенную Гольдом [82] гипотезу о наличии огромных запасов метана на больших глубинах Земли, глубже, чем могут находиться запасы биогенных углеводородов. Эти данные подтверждают также предположение, что, по крайней мере, часть гигантских запасов метана, открытых при бурении океанической коры [83], и метан гидрата в океанических осадках [72], запасы которого (2×10^3 - 4×10^6 миллиардов тонн) намного превышают его запасы в других резервуарах Земли [72], - приходят из мантии. Их открытие имеет огромное значение для развития геохимии, несмотря на то, что коммерческая добыча газ гидратов пока не реальна [84].

7. Индуцированная цепь реакций дегазации водорода и гелия – главный источник энергии внутренних процессов Земли

7.1. Трансформации энергии первичных соединений гелия и водорода в эндогенных процессах

Суть предлагаемой гипотезы заключается в том, что первичные водород и гелий, основные элементы космоса, аккумулировали избыток энергии в период аккреции Земли посредством образования твердых и жидких растворов, химических соединений, кластерных структур и соединений Ван-дер-Ваальса. По окончании процесса аккреции начался, и продолжается до сих пор, процесс высвобождения энергии, дегазация, т.е. цепь индуцированных химических реакций на границах локальных изменений РТ-условий. Эти изменения вызывают экзотермальный распад нестабильных структур и сопряженные вторичные эндотермальные реакции образования других соединений, устойчивых при данных условиях. Ниже описываются базисные этапы высвобождения энергии при дегазации; формы предлагаемых соединений и фазовых превращений основаны на схожести внутриземных условий с такими же условиями в лабораториях, где изучались соединения водорода и гелия (Рис. 2).

7.2 Предполагаемые растворы и пузырьки в твердом ядре

Как показывают экспериментальные данные, гелий и водород могут образовывать в РТ-условиях Fe-Ni твердого земного ядра растворы и, возможно, субрешетку включений микроскопических пузырьков. Связь гелия-водорода и высокая растворимость водорода в металлах приводит к возможности получения высоких и стабильных концентраций обоих элементов в земном ядре; связывающая He-H энергия 0.71 эв соответствует 8232 К, т.е. выше, чем даже температуры предполагаемые в центре Земли; значит, соединения He-H будут стабильны и там. Плотность земного ядра, вычисленная по акустическим данным для атмосферных РТ-условий, примерно на 10% меньше чем 7.860 г на см³ (плотности железа при температуре плавления). Для сравнения, плотность железа, насыщенного растворенным водородом (138.2 см³ водорода на 100 г. железа), ниже плотности железа только на 0.2%, а плотность никеля (8.963 г на см³), при насыщении его водородом вообще не уменьшается. Гипотеза Ларина [7] о первично гибридной

Земле, была встречена скептически из-за сравнительно низкой плотности гидридов железа (6.440 г на см^3) и никеля ($7,040 \text{ г на см}^3$ для NiH_2 и $7,370 \text{ г на см}^3$ для NiH). Гидридов в земном ядре, по-видимому, немного.

7.3 Самоорганизующаяся конвекционная структура в жидком ядре

Обилие He-H в жидком внешнем ядре усиливает конвекцию благодаря меньшей плотности их включений в сравнении с металлами. Различие плотностей и давлений в ядре на границах твердого и жидкого ядра, а также жидкого ядра – мантии, создают условия для образования сконцентрированных струй и потоков всплывающих пузырьков, которые не могут быть распределены равномерно в заведомо гетерогенной среде (гетерогенность химического состава, температур, давлений меняющихся под воздействием приливно-отливных сил). Из-за градиента температур и давлений поднимающиеся пузырьки должны быстро становиться более горячими, чем окружающая среда, и увеличиваться в размерах. При температурах больших, чем температура инверсии водород и гелий не охлаждаются при расширении (эффект Джоуля-Томсона). Движение восходящих потоков газов и осаждение тяжелого Fe-Ni материала к зонам кристаллизации твердого ядра формируют конвекционную структуру.

Мощности энергии гравитационной дифференциации, по преобладающему воззрению, самого мощного из всех известных источников внутренней энергии, только с большой натяжкой хватит на генерацию магнитного поля Земли ($3.6 \times 10^9 - 10^{11}$ ват, [85]). Согласно выводу Аллегре с соавторами [66], запасы легких газов в ближней к земной поверхности половине мантии, уже пришли к концу (см. главу 6.1). Предположим, что весь наблюдаемый сегодня поток примордиального водорода, осторожно оцененного Войтовым в 6×10^{12} г/год, приходит с глубины в 5000 км (~150 км выше границы твердого - жидкого ядра, Рис. 2). Используя результаты вычислений удельной энергии водорода (Таблица 3), мы можем предположить, что при подъеме с 5000 км на 3000 км глубину (близкую к границе ядро – мантия, он выделит энергию, равную:

$$14,420 \text{ Дж/моль} \times 3 \times 10^{12} \text{ мол/год} = 43260 \times 10^{12} = 4.3 \times 10^{16} \text{ Дж/год}$$

Эта энергия вырабатывает мощность (1 год = 3.1557×10^7 сек):

$$4.3 \times 10^{16} \text{ Дж/год} : 3.1557 \times 10^7 \text{ сек} = 1.34 \times 10^9 \text{ ват}$$

Мощность энергии, производимой потоком гелия, незначительна (2×10^4 ват). Тем не менее, энергия поднимающегося в жидком ядре потока водорода – гелия дает существенную добавку к энергии, генерируемой гравитационной дифференциацией, потому что большая ее часть представляет собой механическую энергию конвекции, ее сущность – массоперенос.

7.4 Диापир-скавенжеры, горячие точки и континентальный дрейфт

Концентрированный поток из жидкого ядра в мантию более горячего, чем окружающая его среда, водорода и гелия, будет выплавлять в мантии жидкую магму (газо-флюсовая плавка) и разогревать на контакте породы мантии, производя эффект “фокусировки прогрева”. Смесь газов с жидкой магмой обладает меньшей плотностью, чем окружающая среда (условие неустойчивости Райлей-Тейлора), и поднимается вверх, в соответствии с моделью Байлея [11]. Охлаждение поднимающейся смеси (пироматма) должно быть компенсировано температурным градиентом, что позволит ей оставаться в газо-жидком состоянии.

Естественно, что объем флюсовой плавки будет ограничен количеством поступающих горячих газов и их энергией: увеличение температуры сопровождается увеличением локального давления, что, в свою очередь, повышает удельную температуру плавления, и вызывает локальное затвердевание. Поднимающийся диапир пироматмы должен расплавлять вышележащие породы мантии, вначале с все увеличивающейся, а затем – с квази-постоянной скоростью. Продолжающийся поток заряженного газами горячего расплава автофокусируется на прогретый уже туннель, проплавленный кровлей первичного диапира. Не охлаждающаяся адиабатически смесь водорода и гелия с магмой (пироматма) должна подниматься подобно классическому “аэролифту” воды из скважин. Местные увеличения в выделениях энергии в зонах локальных изменений РТ-условий могут привести к расплавлению мантии в увеличенном масштабе, создавая зоны сейсмической неоднородности.

В соответствии с результатами экспериментов (Глава 6.3), можно предположить, что в локальных областях с избытком энергии часть ее будет аккумулироваться посредством эндотермального формирования растворов и соединений. Эвтектическая плавка вдоль границ структурных элементов

приводит к селективному растворению пород и миграции газов по границам твердой и жидкой фаз, и к выносу веществ из вершин растущих трещин. Гаррис [86] обнаружил свойство расплава магмы собирать и концентрировать (scavenging) в ней фракционирующихся в жидкости несовместимых (incompatible) элементов из Si-Mg-Al-Ca-K-Na мантийных пород, через которые она проплавляется. Учитывая это свойство магмы, а также то, что ^3He почти на четыре порядка более активен в связях с другими элементами (см. Главу 7.7), можно предположить, что поднимающийся пиромогмовый диапир-скавенджер будет собирать и концентрировать рассеянные в мантии элементы типа O, S, C, N, Cl, F, металлы и т.д. При сверхвысоких РТ-условиях мантии эти элементы должны образовывать соединения типа He-H, He-O, He-S, He-C, He-N, He-F, He-металлы и т.д. в первую очередь с ^3He . В виде соединений эти элементы доставляются в концентрированном виде в литосферу; там они станут частью вулканических газов и рудо-формирующих гидротермальных растворов.

На глубинах, где температуры уменьшаются до 800 К и 500 К соответственно (Таблица 3), становятся возможными образование метана и этана (так, как это происходит, по-видимому, на внешних планетах солнечной системы), и также становятся возможными реакции соединений гелия с водой [70]. Некоторые из приведенных выше реакций приводят к образованию элементарных водорода и гелия.

Комбинация эндотермальных (распад газ гидратов, окислов и гидроокислов), и преобладающих экзотермальных реакций (распад соединений гелия и водорода, образование воды, кислот, сероводорода, окислов углерода, азота и серы), позволяет осуществить переброс энергии в гипоцентр землетрясения или в вулканическую камеру. Описанные здесь преимущественно экзотермальные процессы способны вызывать нагрев и плавление магмы в зонах сейсмических скачков, сфокусированный подъем мантийных диапиров (плюмов) по перекрещению глубинных разломов, и образование горячих точек. Перенос энергии может осуществляться также наклонными потоками “пиромогмы”, и газовыми потоками вдоль глубинных разломов по граничным зонам мантийных блоков. Равновесие между давлением потока пиромогмы и сопротивлением среды должно привести к квази-постоянной скорости потока и соответствующим резонансным подвижкам в

астеносфере и верхней мантии, к примеру, раздвигающим литосферные плиты в зоне спрединга.

Основная масса мантии должна взаимодействовать с зоной подвижек путем переноса энергии и массопереноса. Так, в зонах субдукции, обычно характеризующихся аномально высоким тепловым потоком, более холодные плиты будут притягивать поднимающийся поток пиромогмы, обогащенной соединениями водорода и гелия. Высокие температурные градиенты обеспечат гидротермальное перераспределение в электролитах и вторичных потоках тепла, приводя к более эффективному и более быстрому плавлению опускающихся блоков литосферы, и, по-видимому, к их диссимиляции в астеносфере.

Мы не нашли в литературе никаких прямых доказательств регулярного погружения относительно крупных холодных масс материи сквозь твердую мантию, - необходимого условия организованной конвекции. Все типы границ между плитами характеризуются увеличенными потоками тепла, генерирующими суб-вертикальные до суб-горизонтальных зоны низких скоростей (“surge tectonics” [87]). Вулканизм на субдукционных границах плит тоже гораздо проще объясняется не парциальным расплавом, а мощным притоком энергии выносимой водородно-гелиевой пиромогмой с самых низов мантии. По-видимому, через все три базисных типа граничных зон между плитами поступает та же самая глубинная энергия; по-видимому, не случайна и их спокойная трансформация в литосфере из одного типа в другой. Например, с юга на север, субдукционная граница между Южно-Американской и Тихо-Океанической плитой превращается в раздвигающуюся (спрединговую) границу Ист-Пацифик-Райз, затем в трансформенный разлом Сан-Андреас, и снова в субдукционную дальше к северо-западу, у берегов Аляски. Похожее превращение наблюдается в южной части Западно-Тихо-Океанической субдукционной зоны, плавно переходящей в Альпийский трансформенный разлом Южного Острова Новой Зеландии и в зону спрединга еще дальше к югу.

Медленно мигрирующая зона кристаллизации твердого ядра Земли изменяет распределение газового потока между основными пиромогмовыми путепроводами, влияя и на магнитное поле Земли, и на динамику движения плит; с другой стороны, сравнительная стабильность основных мантийных блоков приводит и к

сравнительной стабильности взаимоотношений между литосферными плитами и зонами циркуляций.

7.5 Зона землетрясений: декомпрессия в зоне разлома детонирует цепь взрывных реакций

Большинство землетрясений и извержений вулканов наблюдаются на границах плит, в рифтовых зонах и в зонах трансформенных разломах (Рис. 1), при максимальной глубине гипоцентров землетрясений и камер узко-направленных взрывов, производших кимберлитовые трубки, около 700 км. Мы предполагаем, что выше этого уровня (Рис. 2) мантийное вещество ведет себя как хрупкое твёрдое, и в тоже время как вязкая жидкость, в зависимости от типа и скорости прилагаемой нагрузки (как соль или асфальт). Согласно предлагаемой здесь гипотезе, подготовка катаклизма включает следующие процессы:

1. Декомпрессия разломной зоны под действием внешних факторов (таких, как образование трещин вследствие усталости материала под воздействием приливно-отливных волн) вызывает, в соответствии с принципом Ле-Шателье, взрывной распад соединений водорода и гелия (слабое землетрясение).
2. Н и Не – единственные газы, не охлаждающиеся при расширении; тепло, произведенное взрывом компенсирует понижение температуры в результате адиабатического расширения других газов и паров, растворенных в магме. Вторгаясь в горные породы, они эффективно ослабляют их микроструктуру [88]. Находящиеся под высоким давлением мантийные пары и газы, образовавшиеся при первичных взрывных реакциях, расширяют и ослабляют все доступные разломы, снижая статическое сцепление и трение [28, 89].
3. Если возрастающее в потенциальной камере гипоцентра давление не достаточно велико, для того чтобы вызвать дальнейшее разрушение породы, равновесие давлений будет восстановлено, и процесс распада соединений водорода-гелия приостановится. Автоматическая стабилизация горячей камеры может быть осуществлена посредством эндотермальной формации углеводородов, окислов азота, сероводорода и т.д.

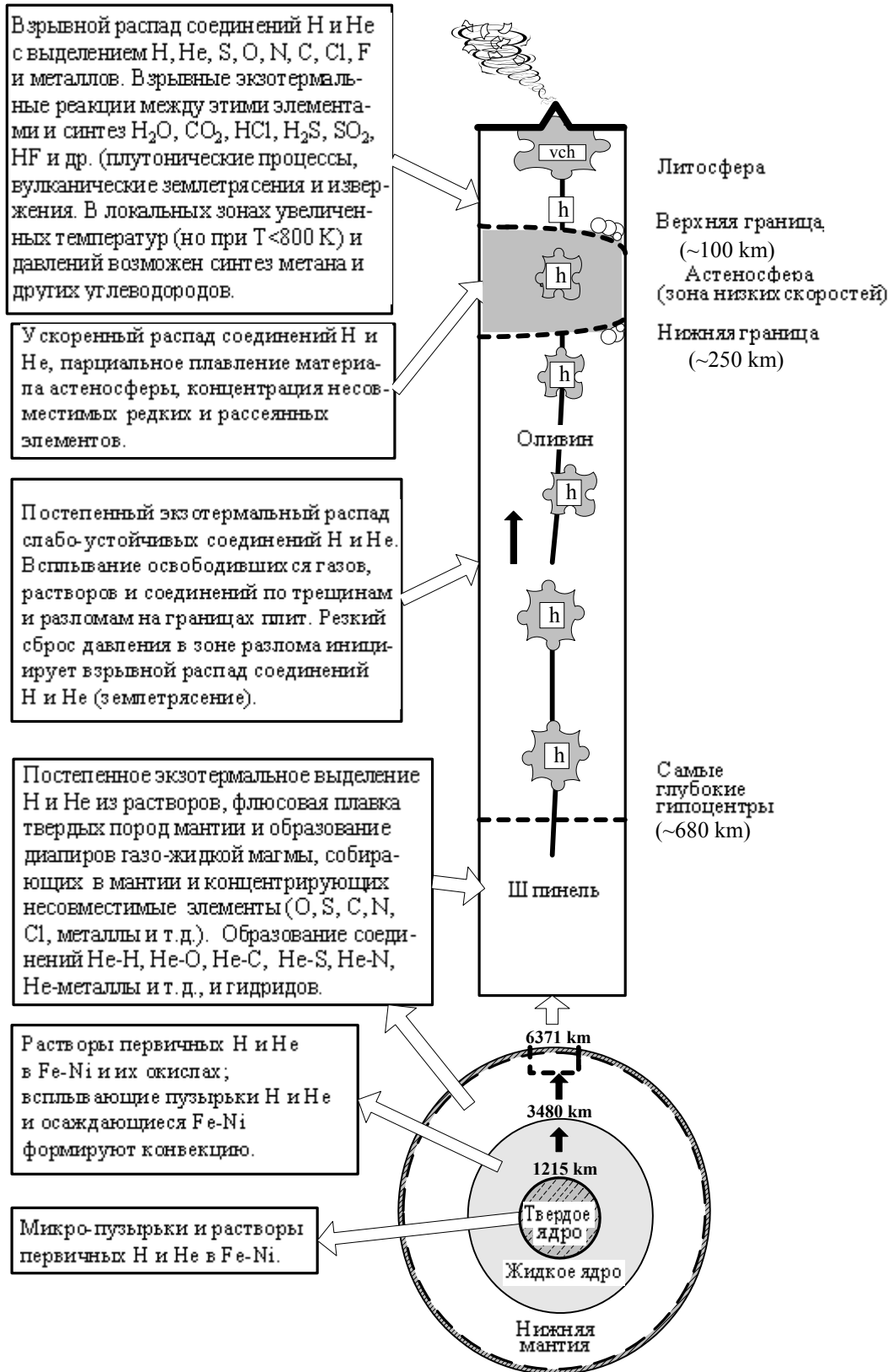


Рисунок 2. Дегазация водорода и гелия из земных глубин, - предлагаемые формы и превращения фаз. h- гипоцентр землетрясения, vch- вулканическая камера. Вулканическое извержение рассматривается здесь как особый тип землетрясения, при котором поднимающиеся гипоцентры (афтершксов) достигают земной поверхности.

4. Если взрывы соединений H и He разрушают первичный гипоцентр приведя к дальнейшему падению давления, следующие серии взрывов будут происходить по мере поступления новых порций взрывчатки (соединений H и He). Новые гипоцентры будут смещаться в сторону уменьшения давлений (подниматься к земной поверхности), генерируя главный толчок (толчки) и афтершоки. Высокотемпературные ($>100^0$ C) рассолы из глубинных водоносных горизонтов будут выталкиваться сквозь трещины, и, попадая в точку резкого сброса давлений (верхние 300 м. разреза земной коры), мгновенно превращаться в пар с соответствующим увеличением объема в 1700 раз. Возникающий гидротермальный (фреатический) взрыв с соответствующими диапазонами изменения давлений от высоких до вакуума, вызывает спонтанные самовозгорания горючих газов, производя по крайней мере часть многочисленных пожаров, сопровождающих землетрясения [90, 91]. Землетрясение, вызванное химическим взрывом, в отличие от землетрясения, вызванного механическими подвижками, вполне способно генерировать все характерные физико-химические аномалии, описанные в Главе 1.2.3. Предлагаемая здесь модель может объяснить и некоторые процессы, вызванные человеческой активностью: например, атомный взрыв, вызывающий трещины и частичную декомпрессию в литосфере, может вызвать распад находящихся там соединений водорода и гелия, и произвести серию афтершоков, в т.ч. взрывов, энергия которых может превысить энергию детонировавшего их начального ядерного взрыва [92]. Взрывной механизм природного землетрясения вполне объясняет общее сходство сейсмограмм землетрясений и подземных ядерных взрывов.

7.6. Плутоническая активность и вулканические извержения; цепные реакции с фазовым переходом - быстрейший из всех возможных процессов переноса и высвобождения энергии

Мы предполагаем, что O, H, S, C, Cl, F, металлы и другие элементы, высвободившиеся в результате экзотермального распада их соединений с водородом и гелием, примут участие в серии экзотермальных реакций синтеза, образуя воду, соли и типичные вулканические газы и пары кислот, включая очень агрессивные (HF, H₂SO₄). Как уже упоминалось выше (Глава 4), эти

реакции выделяют очень значительное количество энергии, и вполне возможны и в камерах гипоцентров землетрясений, и в вулканических камерах.

Образование интрузии можно представить следующим образом: если горные породы земной коры не будут разбиты начальными взрывами, то сконцентрированный магмо-газовый поток из ослабленного гипоцентра землетрясения может подниматься как диапир, способствовать парциальному плавлению пород астеносферы, и вторгаться в пластичную верхнюю мантию и хрупкую земную кору. Проникновение горячих газов по трещинам ослабляет и разогревает породы, мобилизуя и концентрируя легкоплавкие компоненты. Соединения гелия устойчивы только при температурах выше 1000 К и давлениях выше чем 14 ГПа, т.е. в литосфере они не устойчивы. В случае их долговременного медленного распада освобожденная ими энергия и выделяющиеся газы будут переплавлять и видоизменять вмещающие породы (к примеру, процесс гранитизации) и создавать резервуары жидкой магмы, где начнутся процессы гравитационной дифференциации, фракционирования и обогащения контактных пород редкими и рассеянными элементами. Экзотермальные реакции высвобождающихся в результате распада соединений водорода и гелия элементов - друг с другом и с окружающими породами - будут сохранять магму в жидком состоянии. Результатом реакций будет образование типичных вулканических химикалий (HCl, HF, H₂SO₄, SO₂, CO₂, H₂O, Na-Cl, K-Cl и Mg-Cl – рассолов, метана и более тяжелых углеводородов). Пары и газы проникают в массивы нерасплавленных, в т.ч. осадочных пород [93], создавая вторичные минерализации и участвуя в создании месторождений углеводородов с типичными для этих месторождений сверхвысокими давлениями.

Метан, водород и мантийный гелий, обнаруживаются в больших количествах в вулканических выбросах и в многочисленных горячих источниках гидротермальных растворов средне-океанических хребтов; для них характерны отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$, превышающие атмосферное в 8.4 раза, и $\text{CH}_4/^3\text{He} = 2.6 \times 10^6$, подтверждающие абиогенное происхождение метана в этих источниках (например, [94]).

Извержение вулкана можно представить себе как результат декомпрессии в зоне разлома, которая вызовет серию афтершоков, гипоцентры которых будут приближаться к земной поверхности. Магматические расплавы и смешивающиеся с ними независимые газовые потоки, образуют магмо-газовую

смесь и поток типа аэролифта, т.е. вертикально поднимающуюся колонну пенящейся пиромогмы, магмы, или чисто газовый поток. Бесчисленные детонирующие взрывы экзотермальных реакций (“вулканические землетрясения” и “вулканический тремор”), производят ударные волны, выбросы насыщенных латентной энергией газов, и тепловую энергию, расплавляющую старую лаву и окружающие породы, формируя вулканическую камеру с жидкой магмой. При продолжающемся поступлении Н- и Не-соединений из мантии нарастающее давление накопившихся в результате взрывов паров и газов приведет к вулканическому извержению, сбросу давления и увеличенному выбросу пиромогмы и газов. В этом случае все процессы становятся видимыми и химикалии узнаваемыми, в отличие от “тектонического” землетрясения, - так наземный взрыв атомной бомбы отличается по своей наглядности от ее подземного взрыва.

В особых случаях, когда гипоцентр находится на многосоткилометровой глубине на скрещении главных разломов, выбросы газо-магмовой смеси могут быстро достигнуть земной коры и земной поверхности, резко сбрасывая давление и открывая раскаленной пенящейся пиромогме прямой туннель в атмосферу. В результате декомпрессии пиромогма будет продолжать выбрасываться сериями взрывов распада соединений водорода-гелия и дополняющих их взрывных реакций синтеза.

Целый ряд дополнительных процессов способствует расширению туннелей магмо-проводов и магматических камер:

(а) Превращение химикалий в пары и газы с падением давления и, соответственно, резкое увеличение их подвижности;

(б) Превращение квази-стабильного потока пиромогмы в принципиально нестабильный пузырящийся, кавитирующий и пульсирующий поток, расход которого будет скачкообразно и многократно меняться даже при сохранении той же самой геометрии туннеля и разницы давлений. Близкой аналогией этому процессу будет высокоскоростной пульсирующий поток перегретой воды и пара, движущийся сквозь систему охлаждающих труб атомного реактора. При общем высоком давлении поток образует также и локальные зоны низкого давления (сравнительный вакуум в результате эффекта эжекции, описываемый уравнением Бернулли), производя гидродинамическую кавитацию, вскипание и соответствующие ударные волны. В природе этот процесс должен быть еще

более эффективен, потому что любая природная среда значительно менее однородна и чиста, чем искусственно приготовленные охлаждающие жидкости.

(в) Так как температуры мантийных пород близки к своим температурам плавления (Глава 1); то гидродинамическая кавитация и продолжающиеся взрывные реакции распада и синтеза могут вызвать тиксотропные изменения пластичных пород (резкое уменьшение вязкости жидкости в результате критических деформаций). Твердые стенки трещин превратятся в жидкость, увеличивая пропускную способность и объем потока пиромогмы.

С помощью этих процессов насыщенные энергией газы и пиромогма могут эффективнее пробиваться сквозь пластичные породы мантии, и сквозь хрупкие – литосферы. Перегретые воды нижних водоносных горизонтов будут выдавливаться к поверхности и взрывоподобно превращаться в пар в зоне атмосферного давления. Описанный здесь сопровождаемый взрывами магмо-паро-газовый поток (регистрируемый как “вулканический тремор”) работает еще и как насос, подкачивающий и подгоняющий поднимающуюся взрывчатую смесь. В итоге получается быстродействующий и эффективный механизм, способный генерировать трубки взрыва и диатремы.

Опираясь на вышесказанное, можно предположить, что различия между типами и масштабами землетрясений и вулканических извержений зависят, в основном, от количества поступающих соединений водорода и гелия (т.е. от продолжительности подготовки катаклизма), глубины и местоположения начальных взрывов, местной прочности литосферы и проводимости разломной зоны. Физические свойства вытекающей лавы должны зависеть в первую очередь от количества и состава обладающих латентной химической энергией газов, которые ее насыщают.

7.7 Гелий-3, уникальный измеритель мощности истекающего из глубин теплового потока

Подводные гидротермальные источники, выбрасывающие воду с температурой близкой к температуре ее кипения ($350^0 - 400^0$ С в зависимости от определяемого глубиной давления), стабильно пополняют океанические воды громадной массой железа, марганца, кремния, лития, рубидия и др. элементов; в районах источников отлагаются сульфидные руды Кипрского типа, содержащие огромные запасы цинка, меди, кобальта, свинца, кадмия, серебра и золота. В

соответствии с доминирующей сегодня теорией [95], выбросы в океан или поглощение из океана большей части солей и примесей осуществляется холодными водами, циркулирующими в базальтовых хребтах и реагирующими с горячими базальтами в зонах спрединга. И данные изотопного анализа, и значения соотношения ^3He к тепловому потоку, показывают, что значительное обогащение гидротермальных растворов, к примеру, углекислым газом, идет за счет мантии ($\delta^{13}\text{C} = -6\text{‰}$). Содержание ^{18}O в гидротермальных растворах равно $+1.6\text{‰}$, что соответствует его значению в базальтах офиолитов; содержание растворенного стронция соответствует его содержанию в базальтах (0.703), компенсируя его принос реками (>712) до средне-океанического уровня 0.709 [95]. Вполне вероятно, что и большинство остальных элементов, поступающих в океан с кипящими гидротермальными растворами, выщелачивается океаническими водами из базальтов мантийного происхождения, и приносится непосредственно ювенильными водами мантийных диапиров, собирающих и выносящих их из мантии. В соответствии с нашими представлениями (Глава 7.4), и плавление магмы, и ее подъем в магмо-газовом диапире,- процессы физико-химические, в которых доминирующую роль играет удельная энергия первичных водорода и гелия, а гелий-3 является их индикатором. Как уже отмечалось в Главе 4, многие исследователи обнаруживают удивительную корреляцию между концентрациями мантийного гелия и истекающими тепловыми потоками (например [29], стр. 234-235). В 1990-ых корреляция ^3He с потоком глубинного тепла уже стала привычным стандартным средством для количественной оценки геотермального потока из средне-океанических хребтов зоны спрединга, но до сих пор никто не предложил никакого механизма для объяснения этой корреляции.

Масса ^3He , ядро которого состоит из нейтрона и двух протонов, меньше массы ^4He , который содержит дополнительный нейтрон. Вследствие меньшей массы скорость движения атомов ^3He в жидкой фазе вблизи абсолютного нуля тоже выше, чем ^4He . Атом ^3He , сброшенный при очень низкой температуре на поверхность ^4He , движется по ней, демонстрируя некоторые удивительные квантовые свойства, включающие формирование двумерной поверхностной фазы с дискретным набором уровней энергии и мгновенным перемещением с одного уровня энергии на другой [96]. Магнитные свойства ^3He определяются магнитным моментом ядра. Магнитный момент ядра не зависит от РТ-условий в

отличие от магнитных свойств ферромагнитных металлов и минералов, которые являются функцией кристаллической структуры и меняются скачком при температуре Кюри. ^3He имеет суммарный ядерный спин $\frac{1}{2}$ (ядерный спин ^4He равен 0) и магнитен, иными словами, ^3He , в отличие от ^4He , является фермионом. Соотношение – магнитный момент, ядерный спин – масса для ^3He больше, чем ^4He . Именно это фундаментальное отличие определяет его высокую поверхностную активность и способность формирования двумерной фазы, количество материала в которой всегда пропорционально площади поверхности, а также способность взаимодействовать с любыми электрическими и магнитными полями при любых РТ-условиях земных недр.

Химические реакции и распад кристаллоидов сопровождаются термогальваническими, термоэлектрическими и пьезоэлектрическими процессами и соответствующими им магнитными полями. Интенсивность этих полей усиливается на поверхностях границ фаз, и на границах электромагнитных разделов. Благодаря своей очень высокой поверхностной активности, ^3He выталкивается из пор и трещин, образующихся при экзотермальных реакциях, и функционирует наподобие трансформатора в электроизмерительных приборах. Его коэффициентом трансформации будет отношение потока ^3He к общему количеству реагентов (^4He , H и элементы, высвобожденные из мантии всплывающим диапиром магмы), помноженное на удельные энергии физико-химических реакций и превращений, описанных выше в главах 3, 6, и 7.2-7.6.

Суммарный тепловой поток, произведенный всеми этими реакциями и превращениями, может быть оценен при помощи информации, приведенной Жан-Баптисте с соавторами ([59], таблица 2), следующим образом:

Значения отношений ^3He к потоку тепла в гидротермальных источниках океанических рифтов варьируют от 4.3 до 47.0 (10^{-18} мол/Дж); т.е. самое низкое значение 4.3 соответствует 2.326×10^{17} Дж/мол ^3He . Помножив его на 2.200 мол/год (количество ^3He , выделяющегося из нижней мантии по оценке Аллегре с соавторами [66]), мы получаем 5.12×10^{20} Дж/год, что равняется половине современного теплового потока с поверхности Земли (см. гл. 1.1), и впятеро превышает суммарную энергию, высвобождающуюся при землетрясениях и извержениях вулканов. По нашему мнению, этот результат является прямым

доказательством участия гелия в теплообразующих процессах Земли, и косвенным доказательством предлагаемой нами здесь гипотезы.

8. Выводы и возможные пути исследований

Мы думаем, что вышеописанная консервация энергии в период аккреции Земли путем эндотермального образования твердых растворов и соединений водорода и гелия, и ее высвобождение через посредство сопровождающих дегазацию экзотермальных реакций, являются главным источником энергии эндогенных процессов. Энергия дегазации, в отличие от энергии, выделяемой традиционно дискутируемыми источниками (Гл. 1), способна генерировать конвекцию в жидком ядре Земли и расплавлять мантию. Она поднимается с диапирами магмы, и легко переносима по главным разломам; быстро концентрируется и высвобождается с очень высокими скоростями, производя все известные нами геофизические и геохимические аномалии, связанные с землетрясениями. Предлагаемая здесь цепь реакций поставляет насыщенные энергией мантийные газы в литосферу. Эти газы плавят материал астеносферы и верхней мантии, взрывами и плавкой образуют проходы для магмы и магматические камеры, пробиваются через хрупкие породы и поставляют энергию интрузивным процессам и вулканическим извержениям со всеми их проявлениями. Мы рассматриваем “тектоническое” землетрясение, - как взрыв, который иногда сопровождается подвижками по разлому. Вулканическое извержение рассматривается как особый тип землетрясений, при которых гипоцентр выходит на земную поверхность, а “вулканические” землетрясения не сопровождают, а генерируют извержение.

Предлагаемая здесь модель подтверждается следующими неопровержимыми фактами: (1) продолжающейся миллиарды лет дегазацией водорода и гелия; (2) очень высокой энергоемкостью соединений водорода и гелия, некоторые из которых уже изучены в лабораториях при сверхвысоких РТ-условиях, похожих на условия земных недр; (3) хорошей корреляцией между интенсивностью глубинных тепловых потоков и сопутствующим их выделением мантийного гелия. Модель основана на базисных законах физикохимии и на основных геологических теориях, включающих аккреционное образование нашей планеты, тектонику плит и тектонику зон высокой флюидной проводимости.

Мы уверены, что самый мощный из имеющихся в природе механизмов для складирования энергии не мог остаться ею не использованным.

Эта модель может помочь найти решения для практически всех нерешенных проблем, связанных с нехваткой подходящего источника энергии для основных эндогенных процессов Земли (Глава 1). Одновременно она дает ключ для объяснения синтеза неорганических углеводородов (в основном, метана), образующихся параллельно с интрузивными и эффузивными процессами при взаимных реакциях элементарных продуктов распада соединений водорода и гелия. Высвобождение (законсервированной в соединениях водорода и гелия) первичной энергии аккреции посредством серии экзотермальных (в основном) реакций и фазовых превращений является наиболее быстрым и эффективным из всех процессов переноса энергии. Генерируемый дегазацией и радиоактивным распадом в течении почти четырех с половиной миллиардов лет энергетический поток Земли медленно уменьшается, это уменьшение компенсируется увеличением солнечного излучения (приблизительно на две трети), и в результате температуры поверхности Земли на протяжении сотен миллионов лет поддерживаются в пределах, подходящих для сохранения жизни.

Вследствие универсальности физико-химических законов и доминантности водорода и гелия в космосе, описанные здесь процессы должны быть тоже универсальными, работающими на любой планете солнечной системы и где угодно. К примеру, водородно-гелиевая дегазация может объяснить асимметричность вулканических процессов и сейсмической активности на луне: и те, и другие развивались там только на обращенной к Земле стороне, достигая максимума в максимумы–минимумы лунных приливов-отливов [8]. На противоположной, дальней стороне луны отсутствуют и сейсмическая активность, и лавовые бассейны (“моря”), и вулканы, и прямолинейные обрывы по разломам, возможно, потому, что вызванные притяжением Земли лунные приливы-отливы, вызывающие “лунотрясения” и вызывавшие три-четыре миллиарда лет тому назад извержения лунных вулканов, чувствуются только на близкой к Земле стороне. Прекращение лунного вулканизма, и сравнительно низкая энергичность “лунотрясений” (2×10^{13} эрг/год по сравнению с $10^{24} - 10^{25}$ эрг/год для энергичности землетрясений) [8], могут быть объяснены малой мощностью дегазации водорода-гелия на Луне, где и первоначальные запасы их были меньше, и дегазация происходила на несколько порядков быстрее, чем на

Земле.

Предлагаемые здесь гипотезы могут быть проверены дальнейшими исследованиями. К примеру: в 70-х гг. прошлого века предполагалось, что расчеты направлений первоначальных подвижек по сейсмограммам будут простым и надежным методом для выделения подземных ядерных взрывов на фоне землетрясений, произведенных разрывом горных пластов в результате высвобождения энергии упругой отдачи. Оказалось, что и те, и другие имеют на сейсмограммах очень похожие подписи [67]. Эта похожесть весьма подозрительная: может быть, оба явления вызваны подземными взрывами, - кумулятивным, длящимся до минуты при сильном землетрясении, или единичным, сконцентрированным в несколько миллисекунд при ядерном взрыве? Если это так, то следует поискать и зарегистрировать для сравнения четкий случай чисто механического упругого срыва (“упругой отдачи”). И, может быть, сейсмограммы, регистрирующие шок землетрясения на миллисекундной шкале, позволят прояснить этот вопрос.

Мы предполагаем, что если верно, что “любое маленькое землетрясение... может перерасти в мощное” [97], то верно и то, что чудовищная энергия должна быть каким-то образом сконцентрирована в определенной точке, в какой-то форме, в какой-то среде, и каким-то образом детонирована. Возникает вопрос, проявляет ли себя каким-то образом эта планетных масштабов концентрация энергии до чудовищного взрыва? Нарастание давления в гипоцентре землетрясения можно было бы, теоретически, зарегистрировать при помощи мониторинга изменений скорости пробега продольных и поперечных сейсмических волн по активному разлому в районах подозрительного ослабления сейсмического шума?

Согласно предлагаемой здесь гипотезе, серию заканчивающихся на небольшой глубине афтершоков можно сравнить с несостоявшимся извержением вулкана, и в их эпицентре могут быть обнаружены типично вулканические химикалии, прорвавшиеся через перекрывающие пласты к поверхности. Попытки обнаружения CO, CO₂, SO₂, HCl и замеры температур выделяющихся газов могут быть проведены на расстоянии, при помощи аппаратуры, применяемой сейчас для мониторинга вулканических газов [98], в кратчайшие сроки после землетрясения. Бурение может выявить типично-

вулканические минералы, образовавшиеся во вмещающих породах мелкосидящего гипоцентра при их реакциях с агрессивными газами.

Температурный баланс и стехиометрию вулканических процессов и землетрясений можно изучать в поисках вклада латентной энергии химических реакций. Температура, генерируемая при “парциальном плавлении” мантии и ее подъеме должна снижаться в соответствии с затратой тепла на подогрев вмещающих пород; температурный режим и возможные термальные аномалии можно изучать используя скважины, пробуренные на периферии действующих вулканов. Решение проблемы краткосрочных прогнозов землетрясений и вулканических извержений может стать более реальным в результате комплексного мониторинга изменений геофизических полей синхронно с развитием характерных геохимических процессов в гипоцентре или вулканической камере. Подобные исследования были проведены с блестящим успехом группой вулканологов геологической службы США во время извержения вулкана Пинатубо в 1991 г.

Изложенное здесь исследование было начато нами (геологом и физико-химиком) лет десять тому назад, с более скромной целью: попытаться понять физикохимию и источник энергии землетрясений. Проблема сконцентрировалась на дегазации Земли (роль гелия и водорода) и на взрывных процессах. Постепенно пришло понимание, что мощнейший источник физико-химической энергии дегазации водорода-гелия – универсален, и влияет на все эндогенные процессы Земли, помогая нам заполнить многочисленные пробелы в теориях, связанных с геодинамикой и эволюцией Земли.

Нам очень помогли советы и рекомендации Э. Мазора (Институт Вайцмана, Реховот, Израиль), И. Гуфельда (Института Физики Земли, Москва, Россия), А. Городницкого (Институт Океанологии им. Ширшова, Москва, Россия), К. Мура (Геолого-Геохимическое Моделирование и Разведка, Блумингтон, ИН США), Дж. М. Херндона (Трансдейн Корп., Сан-Диего, КА США), Т. Литтла (Веллингтон, Университет им. Королевы Виктории, Новая Зеландия), С. Ротоло (Палермский Университет, Сицилия), и многих других.

Список литературы

- [1] Monroe, J. S. and Wicander, R., 1992. *Physical Geology, Exploring the Earth*, West Publishing Co., St. Paul, MN, 639 p.
- [2] Turcotte, D. I., and Shubert, G., 2002. *Geodynamics, Second Edition*, Cambridge Univ. Press, 456 pp.
- [3] Francis, P., 1993. *Volcanoes. A Planetary Perspective*. Oxford University Press Inc. New York, 443 pp.
- [4] Brown, G. C., and Mussett, A. E., 1981. *The Inaccessible Earth*. London, George Allen & Unwin, 270 pp.
- [5] Vol, A., and Gilat, A., 2000. Decomposition of helium and hydrogen compounds fuelling volcanic eruptions and earthquakes. *The First Stephan Mueller Conf. of the European Geophys. Soc. (EGS), the Dead Sea*, p. 56.
- [6] Gilat A., and Vol, A., 2003. Primordial hydrogen-helium as a suggested energy source of earthquakes. *Proc. of the XV-th Int. School of Marine Geology, Moscow, Inst. of Oceanology, Vol. II*, pp. 231-233.
- [7] Larin, V. N., 1993. *Hydridic Earth: the new geology of our primordially hydrogen-rich planet*. Polar Publishing, Calgary, Alberta, Canada. 228 pp.
- [8] Taylor, S. R., 1975. *Lunar Science: A Post-Apollo View*. Pergamon Press Inc., 372 p.
- [9] Ponomarev, A. S., 1990. Thermal gas-dynamical model of crustal earthquakes. *Izvestiya USSR Acad. of Sc., Physics of the Solid Earth*, 26, 888-900.
- [10] Williams, H., and McBirney, A. R., 1979. *Volcanology*. Freeman Cooper & Co, San Francisco, USA, 397 pp.
- [11] Bailey, D. K., 1974. Melting in the deep crust, in: H. Sorensen, ed., *The Alkaline Rocks*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 436-442.
- [12] Lay, T., Williams, Q., and Garnero, E. J., 1998. The core-mantle boundary layer and deep Earth dynamics. *Nature*, Vol. 392, p. 461-468.
- [13] Von Engel, O. D. and Caster, K. E., 1952. *Geology*, McGraw-Hill Book Co, Inc. New York, Toronto, London, 350 p.
- [14] Gorelchik, V. I., Shirokov, V. A., Firstov, P. P. and Chubarova, O. S., 1997. Shiveluch volcano: seismicity, deep structure and forecasting eruptions (Kamchatka). *J. Volcanology and Geothermal Res.*, 78, 121-132.
- [15] Jaggard, T. A., 1947. Origin and development of craters, *The Geol. Society of Am. Memoir* 21, 508 p.
- [16] Tazieff, H., 1980. *The Smell of Sulfur*. Moscow, Misl, 222 pp. (In Russian).
- [17] Tazieff, H., 1987. *On the Volcanoes Soufriere, Erebus and Etna*. Moscow, Mir, 264 pp. (In Russian)
- [18] Markhinin, E. K., 1980. *Volcanoes and Life*. Moscow, Misl, 200 pp. (In Russian)
- [19] Reid, H. P., 1910. *The California earthquake of April 18, 1906; the mechanics of the earthquake*. Washington (D. C.): Carnegie Institute., 1910.
- [20] Lyell, Sir Charles, Bart. M.A. F.R.S., 1875. *Principles of Geology or the Modern Changes of the Earth and Its Inhabitants, considered as Illustrative of Geology*, XII-

- edition, in 2 volumes. London, John Murrey, Albemarle St. Vol. 1, 655 pp. (Victoria University Library, Wellington, N.Z.).
- [21] Darwin, Charles, 1842-46. (Read March 7th, 1838). On the Connexion of certain Volcanic Phenomena in South America; and on the Formation of Mountain Chains and Volcanos, as the Effect of the same Power by which Continents are elevated. Transactions of the Geological Society 5, Chapter XLII, p. 601-631. (Victoria University Library, Wellington, N.Z.).
- [22] Smellie, J. L., 1994. Volcanism associated with extension at consuming plate margins, in: J. L. Smellie, (Ed.) Volcanism associated with Extension at Consuming Plate Margins, Geol. Soc. Spec. Publ. No. XX, London, P.1.
- [23] Rhoads, J. L., 2001. Basic explanation of creep processes. Dept. of Nuclear Engineering, Univ. of Ca., Berkeley, Rep. NE-161.
- [24] Sadovsky, M. A., Bolhovitinov, L. G., and Pisarenko, V. F., 1987. Deformation of Geophysical Medium and Seismic Process. Moscow, Nauka, 100 pp.
- [25] Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1954. Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, 2nd ed. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- [26] Gazli earthquakes of 1976: Geological and Geophysical Nature of Hypocenters, Ed.: S.A.Fedorov, Nauka, Moscow, 1984.
- [27] Rikitake, T., 1975. Earthquake precursors. Bull. Seismol. Soc. Am., 65, p. 1133-1162.
- [28] Soter, S., 1999. Macroscopic seismic anomalies and submarine pockmarks in the Corinth-Patras rift, Greece. Tectonophysics 308, 275-290.
- [29] Ozima, M., and Podosek, F. A., 1983. Noble Gas Geochemistry, Cambridge Univ. [29] Rittmann, A., 1962. Volcanoes and their Activity, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 305 p.
- [30] Rittmann, A., 1962. Volcanoes and their Activity, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 305 p.
- [31] Salman, A. G. and Tronin, A. A., 1990. Variations in the flux of the Earth's infrared emission in seismically active regions of Central Asia. Izvestiya USSR Acad. of Sc., Physics of the Solid Earth, 26, 586-588.
- [32] Hasiotis, T., Papatheodorou, Kastanos, G. N. and Ferentinos, G., 1996. A pockmark bed in the Patras Gulf (Greece) and its activation during the 4/7/93 seismic event. Mar. Geol. 130, 333-344.
- [33] Gufeld, I. L., 1992. Radio-Wave Precursors of Earthquakes. J. Earthquake Prediction Res. 1, 59-70.
- [34] Wood, R. M., 1994, Earthquakes, strain-cycling and the mobilization of fluids. In: Parnell, J., (Ed.) Geofluids: Origin, Migration and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins. Geol. Soc. of London Spec. Publ. 78, p.
- [35] Kanamori, H., Mori, J., Hauksson, E., Heaton, T. H., Hutton, L. H. and Jones, L. M., 1993. Determination of earthquake energy release and M_L using terrascopes. Bull. Seism. Soc. Am., 83, (2), 330-346.
- [36] Dickey, D. D., 1968. Fault displacement as a result of underground nuclear explosions, in: E. B. Eckel (Ed.), Nevada Test Site. Geol. Soc. of Am. Memoir 110, pp. 219-232.
- [37] Kanamori, H., 1970. The Alaska earthquake of 1964: Radiation of long-period surface waves and source mechanism, J. Geophys. Res., 75, 5027-5040.
- [38] Slepyan, L. I., 1993. Principle of maximum energy dissipation rate in crack dynamics. J. Mech. Phys. Solids, 41 (6), 1019-1033.

- [39] Aprodov, V.A., 1963. The Earth's breezing (volcanoes and earthquakes). Gosizdat Geographical Literature, Moscow, 112 pp. (in Russian).
- [40] Vaganov, V.I., Ivankin, P.F., Kropotkin, P.N., Truhalev, A.I., Semenenko, N.P., Zimbal, S.N., Tatarinzev, V.I., Gluhovsky, M.Z., and Bulgakov, E.A., 1985. Explosive Ring-Structures of Shields and Platforms, Moscow, Nedra, 200 p. (in Russian).
- [41] Gorshkov, G. S. and Dubik, Y. M., 1970. Gigantic directed blast at Shiveluch Volcano (Kamchatka). *Bull. Volcanol.*, 34; 1, 261-288.
- [42] Simkin, T. and Fiske, S., 1983. Krakatau 1883, the volcanic eruption and its effects. Smithsonian Institution Press, Washington, D.C., 464 p.
- [43] Hedervari, P., 1963. *Bull. Volcanol.* 25, pp. 373
- [44] Nissley, D. M., 1995. Thermomechanical fatigue life prediction in gas turbine superalloys: a fracture mechanics approach. *AIAA J.*, 33 (6), 1114-1120.
- [45] Ivanova, V. S., 1998. Synergetics: Strength and Fracture of Metallic Materials. Balogh International Inc., Cambridge International Science Publishing (UK), 218 p.
- [46] ASM Handbook, 1997. Vol.19: Fatigue and Fracture; S. R. Lampman (ed.), ASM Intl., 1057 pp.
- [47] Harris, D. M., Sato, M., Casadevall, T. J., Rose, JR. W. I. AND Bornhorst, T. J., 1981. Emissionrates of CO₂ from plume measurements, in: P. W. Lipman, D. R. Mullineaux, (Eds.), The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, Prof. Paper 1250, US Geol. Surv., Washington, DC., pp. 201-208.
- [48] Casadevall, T. J., et al., 1981. SO₂ emission rates at Mount St. Helens from March 29 through December 1980, in: P. W. Lipman, D. R. Mullineaux (Eds.), The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, Prof. Paper 1250, US Geol. Surv., Washington, DC., pp. 193-200.
- [49] Evans, W. C., Banks, N. G. and White, L. D., 1981. Analyses of gas samples from the summit crater, in: P. W. Lipman, D. R. Mullineaux, (Eds.), The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, Prof. Paper 1250, US Geol. Surv., Washington, DC., pp. 227-332.
- [50] Sato, M. and McGee, K. A., 1981. Continuous monitoring of hydrogen on the south flank of Mount St. Helens, in: P. W. Lipman, D. R. Mullineaux, (Eds.), The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, Prof. Paper 1250, US Geol. Surv., Washington, DC., pp. 209-219.
- [51] Tazieff, H., 1970. New investigations on eruptive gases. *Bull. Volcan.*, 34, p. 1-18.
- [52] Caracausi, A., Favara, R., Giamanco, S., Italiano, F., Paonita, A., Pecoraino, G., Rizzo, A., and Nuccio, P.M., 2003. Mount Etna: Geochemical signals of magma ascent and unusually extensive plumbing system. *Geophys. Res. Lett.*, V. 30, No. 2, 1057, pp. 29-1 – 29-4.
- [53] Allard, P., Carbonelle, J., Dajlevic, D., Le Bronec, J., Morel, P., Maurenas, J. M., Robe, M. C., Faivre-Pierret, R., Sabroux, J. C., and Zettwoog, P., 1991. Eruptive and diffusive emissions of carbone dioxide from the Etna volcano, *Nature*, 351, 387-391.
- [54] Zies, E. G., 1938. The concentration of the less familiar elements through igneous and related activity. *Amer. J. Sci.*, 35-A, 385-40
- [55] Fedotov, S. A., and Markhinin, E. K., 1983. The great Tolbachik fissure eruption, geological and geophysical data 1975-1976. Cambridge University Press, Cambridge, England.

- [56] Devine, J. D., Sigurdsson, H., Davis, A. N. and Self, S., 1984. Estimates of sulfur and chlorine yield to the atmosphere from volcanic eruptions and potential climatic effects, *J. Geophys. Res. B.* 89, 6309-6325.
- [57] Endo, E. T., Malone, S. D., Noson, L. L. and Weaver, C. S., 1981. Locations, magnitudes, and statistics of the March 20-May 18 earthquake sequence, in: P. W. Lipman, D. R. Mullineaux, (Eds.), *The 1980 eruptions of Mount St. Helens*, Washington, Prof. Paper 1250, US Geol. Surv., Washington, DC., pp. 93-108.
- [58] McNutt, S. R., 1994. Volcanic tremor amplitude correlated with Volcanic Explosivity Index and its potential use in determining ash hazards to aviation. *Acta Volcanologica* 5, p. 193-196.
- [59] Jean-Baptiste, P., Bougault, H., Vangriesheim, A., Charlou, J. L., Radford-Knoery, J., Fouquet, Y., Needham, D. and German, C., 1998. Mantle ^3He in hydrothermal vents and plume of the Lucky Strike site (MAR 37 $^{\circ}$ 17'N) and associated geothermal heat flux. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 157, p. 69-77.
- [60] Honda, M., and McDougall, I., 1998, Primordial helium and neon in the Earth – a speculation on early degassing: *Geophysical Research Letters*, v. 25, No 11, p. 1951-1954.
- [61] Hollenbach, D.F. and Herndon, J.M., 2001. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA (PNAS)* 98, pp. 11085
- [62] Herndon, J.M., 2003. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA (PNAS)* 100, pp.3047
- [63] Gauthier-Lafaye, F., Holliger, P., Blanc, P.L., 1996. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, pp. 4831
- [64] Tolstikhin, I. N., and Marty, B., 1998. The evolution of terrestrial volatiles: a view from helium, neon, argon and nitrogen isotope modeling. *Chem. Geol.*, 147, 27-52.
- [65] Moreira, M., and Allegre, C. J., 1998. Helium-neon systematics and the structure of the mantle. *Chemical Geology*, 147, 53-59.
- [66] Allegre, C. J., Staudacher, T., and Sandra, P., 1986/87. Rare gas systematics: formation of the atmosphere, evolution and structure of the Earth's mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 81, 127-150.
- [67] Eiby, G. A., 1989. *Earthquakes*. 2nd ed., Heinemann Reed, Octopus Publ. Group (NZ) Ltd, Auckland, 166 pp.
- [68] Honig, J. M., 1999. *Thermodynamics* 2nd ed. Academic Press, San Diego, California, USA, 608 p.
- [69] Lide, D. R. and Kehiaian H. V., 1994. *CRC Handbook of Thermophysical and Thermochemical Data*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 518 p.
- [70] Landau, L. D. and Lifschitz, E. M., 1980. *Statistical Physics*, Vol. 5 of the *Course of Theoretical Physics*, Part 1, 3rd ed., Oxford, England: Pergamon Press.
- [71] Voytov, G. I., 1986. Chemistry and scale of the recent flow of natural gases through different geo-structural zones of the Earth: *Journal of the Mendeleev's All-Union Chemical Society*, V. XXXI, No. 5, p. 533-540.
- [72] Kvenvolden, K. A., 1988. Methane hydrate – a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chem. Geol.* 71, p. 41-51.
- [73] Abramov, E. and Eliezer, D. (1990) Synergistic effects of helium and hydrogen isotopes in FCC metals, in: N. R. Moody, A. W. Thompson (eds.), *Hydrogen effects on material behavior TMS Symp. Proc.*, Wyoming, pp. 169-177.

- [74] Kleinekathoefer, U., Tang, K. T., Toennies, J. P. and Yiu, C. L., 1996. Potentials for some rare gas and alkali-helium systems calculated from the surface integral method. *Chem. Phys. Lett.*, 249 (3,4), 257-263.
- [75] Aver'anov, A. S. and Khait, Yu. G., 1995. Lifetimes of metastable $X3_1$ - and a1D states of the HeO_2^+ ion. *Opt. Spectrosk.*, 79, 595-600 (in Russian).
- [76] Rhee, I., F.M. Gasparini, and D. Bishop, 1989: "Finite-size Scaling of the Superfluid Density of He^4 Confined between Silicon Wafers, *Phys. Rev Lett.*, 63, p. 410.
- [77] Nuccio, P.M., and Paonita, A., 2000. Investigation of the noble gas solubility in H_2O and CO_2 bearing silicate liquids at moderate pressure II: the extended ionic porosity (EIP) model, *Earth and Planetary Science Letters* Volume: 183, Issue: 3-4, pp.499-512.
- [78] Vos, W. L., Finger, L. W., Hemley, R. J. and Mao, H. K., 1996. Pressure dependence of hydrogen bonding in a novel H_2O-H_2 clathrate. *Chem. Phys. Lett.*, 257, 524-530.
- [79] Saunders, M. Jimenez-Vazquez, H. A. Cross, R. J. Mroczkowski, S. Freedberg D. I. and Anet, F. A. L., 1994. Probing the interior of fullerenes by 3He NMR spectroscopy of endohedral $^3He@C_{60}$ and $^3He@C_{70}$. *Nature*, 367, 256-258.
- [80] Vol, A. E., 1962. Structure and properties of the binary metal systems. Vol. 2, Fizmathizdat, Moscow, pp. 263-269 (in Russian).
- [81] Samsonov G. V., (Ed.), 1976. Properties of Elements. Vols. 1, 2., Metallurgia, Moscow, (in Russian).
- [82] Gold, T., 1979. Terrestrial sources of carbon and earthquake outgassing. *J. of Petrol. Geol.*, 1, p. 3-19.
- [83] Evans, W. C., 1996. A gold mine of methane. *Nature*, Vol. 381, p. 114-115.
- [84] Collet, T, S., 2002. Energy resource potential of natural gas hydrates. *AAPG Bulletin*, v. 86, No. 11, p. 1971-1992.
- [85] Loper, D. E., 1978. Some thermal consequences of a gravitationally powered dynamo. *J. geophys. Res.*, 83, 5961-5970.
- [86] Harris, P. G., 1957. Zone refining and the origin of potassic basalts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 12, 195-208.
- [87] Meyerhoff, A. A., Taner, I., Morris, A. E., Martin, B. D., Agocs, W. B., and Meyerhoff, H. A., 1992. Surge Tectonics: a new hypothesis of Earth dynamics. In: S. Chatterjee, and N. Hotton III, eds. *New Concepts in Global Tectonics*. Texas Tech. Univ. Press, Lubbock, 450 pp.
- [88] Gufeld, I. L., Gusev, G. A., Lyutikov R. A. and Matveeva, M. I., 1999. Seismic process as phase instability of the lithosphere, in: M. Hayakawa (Ed.), *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, TERRA PUB, Tokyo, pp. 885-895.
- [89] Kennedy, B. M., Kharaka, Y. K., Evans, W. C., Ellwood, A., DePaolo, D. J., Thordson, J., Ambats, G. and Mariner, R. H., 1997. Mantle Fluids in the San Andreas Fault System, California. *Science* 278, 1278-1281.
- [90] Gilat, A. and Dvorachek, M., 1998. Hydrothermal-explosion produced breccia: an indicator for possible epithermal gold deposits in Israel. *Proc. of the XIV-th Conf. of the Isr. Min. Sc. And Engin. Ass.*, Beer-Sheva, pp. E27-E36.
- [91] Gilat, A., and Vol, A., 2000. Sodom and Gomorrah: a case of earthquake-effected hydrothermal explosion? *Isr. Geol. Soc. Ann. Meet.*, Abstr., p. 49.

- [92] Adushkin V. V. and Spivak, A. A., 1996. Characterization of the aftershock emission caused by underground nuclear explosions. *J. Earthquake Prediction Res.* 5, 443-469.
- [93] Shakhnovsky, I. M., 2001. Genesis of the oil-hydrocarbons. Moscow, GEOS, 2001, 72 pp. (In Russian)
- [94] Jean-Baptiste, P., Charlou, J. L., Stievenard, M., Donval, J. P., Bougault, H., and Mevel, C., 1991. Helium and methane measurements in hydrothermal fluids from the mid-Atlantic ridge: the Snake Pit at 23°N, *Earth and Planet. Sci. Lett.* 106, p. 17-28.
- [95] Edmond, J. M., Von Damm, K. I., McDuff, R. E., and Measures, C. I., 1982. Chemistry of hot springs on the East Pacific Rise and their effluent dispersal, *Nature*, Vol. 297, p. 187-191.
- [96] Hallock, R. B., 1998. The magic of helium-3 in two, or nearly two, dimensions. *Am. Inst. of Physics, Physics Today*, June 1998, p. 30-36.
- [97] Geller, R. J., Jackson, D. D., Kagan, Y. Y. and Mulargia, F., 1997. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275, 1616-1617.
- [98] Mori-Toshiya and Notsu-Kenji, 1997. Remote CO, COS, CO₂, SO₂, HCl detection and temperature estimation of volcanic gas. *Geophys. Res. Lett.*, 24; 16: 2047-2050.