

**Дегазация первичного водорода и гелия -
неучитываемый до сих пор источник энергии для эндогенных
процессов Земли: концептуальная система гипотез**

Лев (Арье) ГИЛАТ¹ и Александр ВОЛ²

¹Geological Survey of Israel (Ret.), 6/2 Shoshan Tsahor St. Modi'in 71705 Israel.

levgilat@gmail.com

²Oshadi Drug Administration LTD,

(Авторский перевод с английского статьи: Gilat, A., and Vol, A., 2012. Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. Geoscience Frontiers (2012) 1-11, doi:10.1016/j.gsf.2012.03.009).

Аннотация

Разбираются примеры наиболее мощных выбросов энергии, объясняющие их гипотезы, а также ряд недавно опубликованных данных исследований и иллюстраций, указывающих на химические взрывы как на основной механизм мощнейших землетрясений, на связь сейсмических и вулканических процессов с мантийными “флюидами” и на недостаток энергии для функционирования мантийных плюмов. Предлагается концептуальная система гипотез, объясняющих консервацию энергии аккреции Земли, её квази-стабильное выделение при дегазации и решающая роль энергии дегазации Земли в эндогенных процессах; указываются конкретные механизмы, химические соединения и результаты подсчетов.

Ключевые слова: землетрясения, вулканизм, источник энергии, механизм, водород, гелий, дегазация

Введение

Современным теориям, объясняющим эндогенные процессы Земли, не хватает источника внутренней энергии, которая: (а) практически неисчерпаема; (б) быстро концентрируется; (в) обладает очень высокой плотностью; (г) высвобождается со скоростью взрыва, и быстро накапливается в промежутках между сейсмическими 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. В период аккреции Земли первичные водород и гелий были захвачены 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). При похожих РТ в лабораторных экспериментах были обнаружены твердые растворы Н и Не, а также соединения Не с Н, О, Si и металлами. 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.

После формирования планеты Земля доминируют обратные, экзотермические процессы дегазации водорода и гелия, сопровождаемые выделением энергии, затраченной на их "упаковку" в период аккреции. 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 образование газо-магмовых ("пиромагма") диапиров, или плюмов, которые по мере проплавления сквозь твёрдую мантию собирают и концентрируют редкие и рассеянные элементы, образуя Не-Н, Не-О, Не-S, Не-Si, Не-N, Не-C, Не-Cl, Не-F, Не-металлы и другие соединения. Эти соединения, в свою очередь, распадаются с выделением энергии при продолжении движения к кровле мантии и соответственным уменьшением давления. Практически неограниченным по мощности источником энергии землетрясений является взрывоподобный распад метастабильных соединений гелия и водорода, вызванный сбросом давления в зоне разлома. Повторяющиеся сбросы давлений и взрывы в поднимающихся к поверхности земли гипоцентрах афтершоков сопровождаются эндотермическими реакциями освобождения элементарных Н, О, С, S, Cl, F металлов и т.д. и выделением энергии вследствие серии взрывных реакций синтеза с образованием H_2O , SO_2 , H_2SO_4 , CO_2 , H_2S , HCl , HF и других соединений. Энергия этих реакций достаточна для образования интрузивов. Вулканические извержения генерируются поднимающейся пиромагмой, которая разрушает и плавит породы литосферы под давлением продолжающихся взрывных реакций ("вулканических землетрясений").

Участие гелия в экзотермальных процессах доказывается чёткой корреляцией выделяющегося мантийного изотопа гелия (^3He), с восходящими потоками глубинного тепла. Расчеты приводят к выводу, что примерно половина теплового потока, выделяемого с поверхности Земли, генерируется реакциями с участием водорода и гелия. Эта энергия впятеро превышает суммарную энергию землетрясений и вулканических извержений.

В Интернете находится наша статья, детально излагающая предлагаемую концептуальную систему гипотез [1, см. в Интернете]. В этой статье мы добавили новые данные, но при этом нам пришлось резко сократить изложение вводных глав и самой концепции, поэтому мы вынуждены попросить уважаемого читателя при необходимости обращаться к нашей базисной статье за дополнительной информацией и ссылками на источники.

I. Энергия мощнейших землетрясений и извержений вулканов: проблемы с их объяснениями и гипотетические альтернативные механизмы

Несостоятельность ряда геологических теорий, объясняющих эндогенные процессы Земли, коренится в отсутствии у них подходящих источников энергии, производящей мощнейшие сейсмические и вулканические пароксизмы, и другие эндогенные процессы. Судите сами: энергия всего двух учитываемых сегодня стабильных источников, - распада радиоактивных элементов и гравитационной дифференциации, - может дать только половину выделяемого Землей теплового потока [2] и, по природе своей, не может быть концентрируема и сфокусирована.

Накопившиеся за последние 50-60 лет измерения и подсчеты энергий недавних катастроф делают менее убедительными некоторые привычные теории и опирающиеся на них заключения. К примеру, еще 15 лет т.н. считалось практически аксиомой, что "землетрясения магнитудой $M=9$ и более вообще мало вероятны, поскольку горные породы недостаточно крепки, чтобы накопить требуемые для них напряжения. Они скорее разрушатся при меньших напряжениях, произведя землетрясения меньшей силы" [3]. Тем не менее, согласно новым данным [4], наша Земля неоднократно содрогалась от таких "маловероятных землетрясений": в 1952 г. - Камчатское, $M=9.0$, в 1957 г. -

Аляска, $M=9.1$, в 1960 г. - Чили, $M=9.5$, в 1964 г. - Аляска, $M=9.2$, в 2004 г. - Индонезия, $M=9.2$, 2011 г. - Япония, $M=9.0$. Причина противоречия между базисной публикацией USGS 1994 г. и опубликованными сейчас на сайтах USGS фактами, по-видимому, проста: современная парадигма не может объяснить накопление и сфокусированный выброс чудовищной энергии мощнейших землетрясений. Так, например, в Чили, 1960 г., землетрясение магнитудой 9.5 выплеснуло энергию, эквивалентную энергии взрыва 2670 мегатонн ТНТ [5]. Для сравнения: энергия самой крупной водородной бомбы ("Царь-бомба"), взорванной по приказу Хрущева на Новой Земле, была равна 50 мегатоннам ТНТ. А сколько упругой энергии может накопиться в литосфере?

Поскольку точные механические свойства литосферы неизвестны, мы взяли для своих расчетов вместо разломанного в зоне подвижек блока литосферы заведомо более прочный материал, блок конструкционной стали толщиной 20 км и размером 600 км x 100 км (примерный размер блока литосферы, в котором генерировалось Аляскинское землетрясение 1964 г.). Результат подсчета максимального количества механической энергии, которая может быть накоплена в блоке стали вышеуказанного объема, получился 29×10^{16} Дж, что эквивалентно взрыву 70 мегатонн ТНТ, почти в 40 раз меньше, чем выделилось при Чилийском землетрясении 1960 г. [1]. Толщину блока мы ограничились 20-ю км потому, что на большей глубине из-за увеличивающейся с глубиной температуры горные породы становятся пластичными [6], и никаких напряжений накапливать не могут; поэтому теория накопления напряжений в земной коре не может дать объяснения землетрясениям с более глубоким гипоцентром. И по этой же причине нам кажутся неубедительными доводы [7], согласно которым Чилийское землетрясение 1960 г. явилось разрядкой механического напряжения между погружающейся плитой Назка и Южно-Американским Континентом, посредством разорвавшегося (rupture) со скоростью 3.5 км/сек сегмента Перуанско-Чилийского Желоба длиной в 800 км, с гипоцентром на глубине 33 км. Невозможно представить себе где-либо там блок литосферы объемом в 40 раз больший, чем взятый нами блок стали, и с прочностью, равной прочности стали; для Чилийского или другого мощного землетрясения необходим альтернативный источник энергии.

Визуализации Чилийских землетрясений 1960-го и 2010-го гг. (рис. 1), скорее иллюстрируют не ”разрядку при срыве накопившихся механических напряжений”, а взрывы, потому что при разрядке механических напряжений разлома вся энергия должна была бы уйти на производство сейсмических волн, на развитие трещин вдоль разлома и на нагрев очага. На визуализациях же виден выброс гигантских по своей ширине и протяженности языков энергии, особенно землетрясения 1960-го г., почти не изменяющегося по плотности на первых тысячах километров своего пути. При единичных взрывах поток энергии должен уменьшаться пропорционально квадрату расстояния; выбросы же энергии, визуализированные на рис. 2, могут быть произведены только распределенными зарядами или множественными объемными взрывами, при которых топливо или взрывчатка выделяются и детонируют последовательно вдоль питающих коллекторов или трещин, способствуя их распространению.

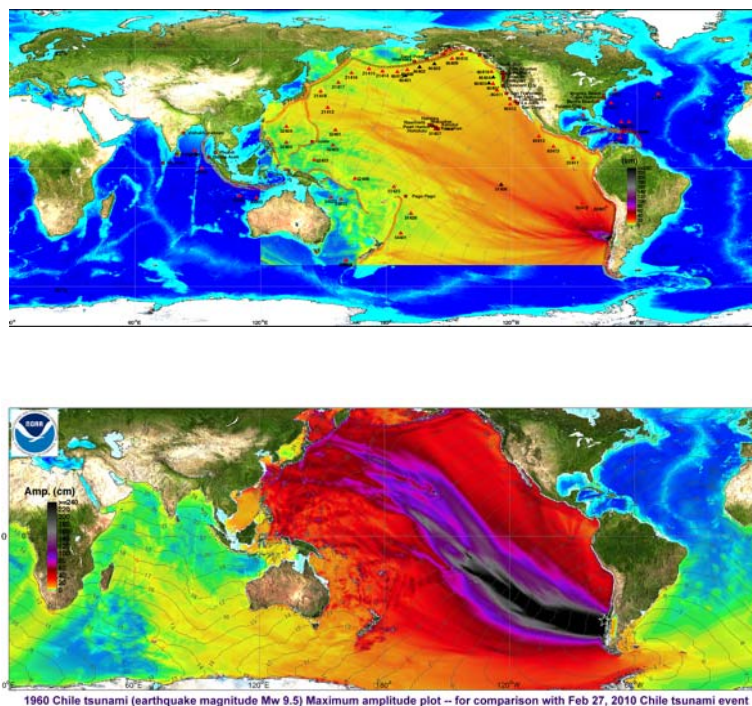


Рис. 1. Гигантские языки энергии, выброшенной Чилийским землетрясением 27.02.2010 г., магнитудой 8.8, (наверху) и 22.05.1960 г., магнитудой 9.5 (внизу), протянувшиеся через весь Тихий Океан, практически перпендикулярно Чилийско-Перуанскому Желобу, причем (в 1960 г.) практически без потери интенсивности на дистанции в три-четыре тысячи километров (The National Oceanic and Atmospheric Administration (**NOAA**) visualization).

Механическая разрядка напряжения вдоль разлома не может объяснить и генерацию фронта цунами перпендикулярно разлому; такую волну цунами (длинной в сотни километров!) может создать распределенный объемный взрыв, вытеснив порядка половины объёма волны. Скорости распространения трещин, генерированных землетрясением (3.5 км/сек [7]), тоже близки к скорости детонации или скорости упругих волн и на порядки превышают критическую скорость распространения хрупких трещин, не превышающую 20 м/сек для металлов и порядка 300 м/сек для воды.

Никакие подвижки вдоль Чилийско-Перуанского желоба не могут объяснить точно замеренные в 2010 г. GPS сдвиги средней части Южно-Американского Континента к западу (Рис. 2). Зато их могли произвести взрывы землетрясения и последовавших ему афтершоков, работавших как гигантский вибратор при стабильном давлении с востока на запад, производимом океанической корой западной Атлантики.

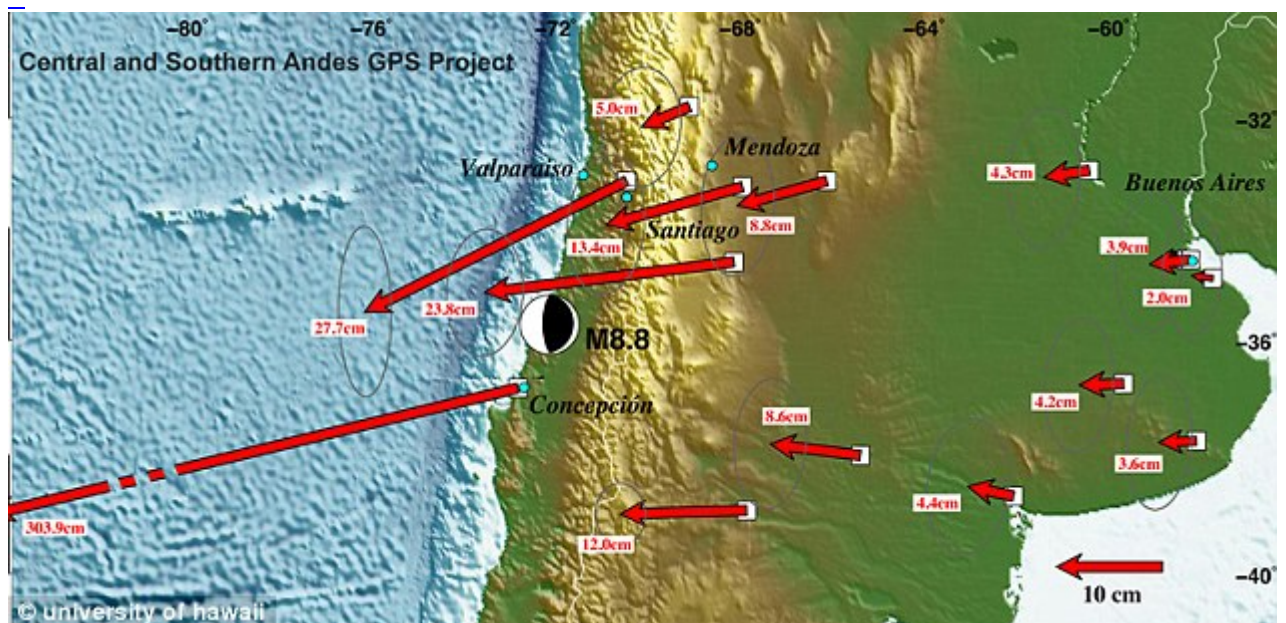


Рис. 2 Смещение (в сантиметрах) опорных точек, окружающих эпицентр Чилийского землетрясения 2010 г. (Концепсион сдвинулся на 303.9 см). Графика создана в рамках проекта the Central and Southern Andes GPS Project [8].

О взрывной природе землетрясения свидетельствует и практическая неразличимость сейсмических "подписей" землетрясения и подземного ядерного взрыва [9, стр. 114-118]. И ещё одно доказательство: оказывается,

породы в очаге тектонического землетрясения пульверизируются до частиц нано-метровых размеров [10]. Необходимым условием пульверизации (распыла) с формированием микрочастиц является подвод очень большого количества тепловой и механической энергии, достаточной для расплавления и распыления породы. Температура плавления самой тугоплавкой составляющей породы 1450-1500⁰ С; распыл требует сохранения ее в жидком состоянии, что облегчается возможностью образования относительно легкоплавких эвтектик (около 600⁰ С в случае образования эвтектики, например, Са – Si – Mg). Собственно распыл требует подвода механической энергии, достаточной для компенсации работы образования громадной поверхности наночастиц, порядка 100-300 м²/г распыленной породы. Энергия, затрачиваемая на образование наночастиц, растет с уменьшением их размера и увеличением поверхности от 8±0.5 кДж./моль (180 нм) до 8.2±0.4 кДж./моль для цеолитов [11]. Такой подвод энергии возможен при выделении большого объема газа (взрыв); взрывная волна создаёт также и необходимые для пульверизации очень высокие перепады давлений газов. Механическая разрядка (срыв по разлому) таких условий создать не может.

Современная парадигма затрудняется с объяснением многочисленных геофизических и геохимических аномалий, предваряющих и сопутствующих землетрясениям, и их источников энергии. Среди аномалий: 1) мощные выбросы газов перед и во время землетрясений [12, 13]; 2) аномально высокое инфракрасное излучение, т.е. выделение тепла, предваряющее также мелко-фокусные землетрясения [14, 15]; 3) предваряющие землетрясения радио- и акустические- шумы [16]; 4) рассеянное свечение и шаровые молнии [12]; 5) уменьшение глубины (“всплывание”) гипоцентров афтершоковых землетрясений [17]; 6) вполне замеряемые “вспухания” земли, предваряющие землетрясения [17]; 7) связанные с землетрясениями циклы напряжений и изменения режимов подземных вод [18]. Частичное объяснение указанным аномалиям можно найти в Термо-Газо-Динамической (ТГД) модели развития очага землетрясения, разработанной А.С.Пономаревым [17]. Согласно этой модели, накопленная упругая энергия приводит к детонирующим процессам в гипоцентре, работающем по принципу “парового котла”, заполняемого гипотетическим “флюидом”, выделяющимся 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. Фактически, модель очага землетрясения А.С.Пономарёва напоминает вулканическую камеру. Однако ТГД модель А.С.Пономарева не поясняет природы гипотетического “флюида”. Ю.Ф.Копничев и И.Н.Соколова [19] обнаружили кольцевые структуры слабой сейсмичности, образующиеся перед сильными землетрясениями; изучение короткопериодных поперечных волн в районах этих кольцевых структур привело их к выводу, что мантийные “флюиды”, которые поднимаются в земную кору и концентрируются там, имеют прямое отношение к подготовке сильного землетрясения. И.Л.Гуфельд [20] интерпретирует “флюиды” как смесь водорода и гелия, вызывающую в процессе подготовки землетрясения разрушение структуры горных пород. И.Н.Соколова [21] собрала данные, показывающие регулярное уменьшение содержания мантийного изотопа гелия (параметр $R = {}^3\text{He}/{}^4\text{He}$) в подземных водах по мере увеличения расстояния от эпицентров сильных землетрясений и крупных разломных зон.

До того, как Х.П.Рид [22] предложил свою широко известную 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 [23,24]. Землетрясения предваряют и сопровождают вулканические извержения, но далеко не каждое землетрясение кульминирует извержением вулкана. Гипоцентры так называемых “вулканических” землетрясений происходят 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. С.Р. Мак-Нутт [25] 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, то все это похоже на серию взрывов ТНТ; твердый материал и жидкий выбрасываются как в эпицентрах взрывов; запахи химикалий бьют в нос, как во время артобстрела. Так, может быть, “вулканические” землетрясения – это действительно химические взрывы?

Катастрофические взрывы при вулканических извержениях до сих пор объясняются вулканологами давлением и гигантскими выбросами принесённого

магмой и скопившегося в вулканической камере пара. Такого рода взрывы должны были бы быть сильнейшими в начале извержения, при разрушении “крыши” камеры. Между тем, гигантский взрыв вулкана Тамбора в 1815 г. с кинетической энергией в 10^{20} Дж [26], эквивалентный взрыву 24 миллиардов тон ТНТ, развил давления в десятки гига-паскалей (невероятные для парового взрыва) и произошел спустя 7 месяцев после начала вулканической активности общей продолжительностью в 15 месяцев. Чудовищный взрыв вулкана Кракатау 27 августа 1883 г., после трех месяцев слабой взрывной активности, выбросил 18 км^3 пород и был услышан на расстоянии 4653 км- на острове Родригез. Специальное исследование этого взрыва показало, что начальные скорости части обломков превышали 8 км/сек [26]. Такая скорость невероятна для паровых взрывов. Образовавшиеся при этом обломки пород навсегда покинули земное пространство. Никакие гипотезы не могут объяснить подобные катаклизмы взрывом накопившегося в магме пара, нужна другая взрывчатка.

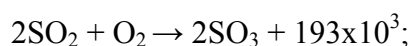
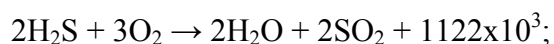
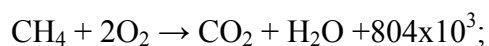
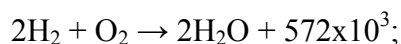
II. Вулканические газы в роли носителей энергии

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 [см. в 1]. С.А. Федотов подсчитал тепловую мощность эруптивной колонны Северного прорыва Толбачинского трещинного извержения 6.7.1975-10.12.1976 гг. в которой в течение 72 дней было равномерно выброшено примерно $0,68 \text{ км}^3$ мелкой пироклаستيки; она равнялась $3,52 \cdot 10^{10} \text{ кал/с} = 1,47 \cdot 10^5 \text{ МВт} = 147,000 \text{ МВт}$. (мощность всех электростанций СССР в 1976 г. равнялась 228,000 МВт.) [27, стр. 230-231].

Мощные выделения газов из вулканов делятся иногда годами, в течение которых вулканы “спят” и подогревают породы вулканического жерла, как, например, кратер Бокка Нуово на вулкане Этна (Сицилия) в 1969-1970 гг. [28]. Группа Г. Тазиева использовала скоростные методы хроматографического анализа газов: в эманациях горы Этна CO_2 составлял примерно 50%, H_2O –

менее 40%, опускаясь всего до 3-4% во время коротких выбросов горячего газа [29]. Даже 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 [32].

Широко известно, что химические реакции между некоторыми газами при определенных условиях приводят к взрыву в результате протекающей химической цепной реакции. Активные составные – свободные атомы и радикалы – в течение цепной реакции реагируют и с молекулами первичных газов и с конечными продуктами, формируя 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. Энергия, выделяемая реакциями взрывчатых смесей, очень значительна, например (Дж/моль):



Извержение вулкана Тамбора (1815 г.) выбросило в атмосферу (кроме прочих веществ) около 52×10^6 т серной кислоты [33], 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 В.И.Ваганову и др. [26], анализы газов из свежих лав Камчатских вулканов, выполненные 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. Более детальная подборка материалов о землетрясениях, вулканических извержениях, объемах и химии вулканических газов опубликована нами [1].

III. Неадекватность источника энергии теории мантийных плюмов

В выводах ряда исследований последних лет сильные землетрясения и геодинамика высоко-сейсмичных регионов связываются уже больше не с подвижками по конкретным разломам, а с мантийными плюмами [34]. Замедление движения Африканского континента и ускорение движения Индийской плиты, влияющее на столкновение Индии с Азией и, соответственно, на зарождение зон с высокой сейсмической и вулканической активностью, объясняются изменением активности мантийного плюма Реюнион [35]. Вместе с тем, существующие до сих пор объяснения образования и развития плюмов и проплавления ими мантии мощностью в 3,000 км без затрат энергии, за счет предполагаемой разницы температур в 300 - 400 градусов между жидким ядром и мантией (5) выглядят также нереально, как "вечный двигатель": большая разница между удельной теплоёмкостью магмы (0.3 кал/градус) и теплоёмкостью ее плавления (65 – 100 кал/градус при атмосферном давлении) требует для плавления магмы такое же количество энергии, как и ее подогрев на 300^0 С. Но даже если допустить возможность такого процесса, то из-за его "геологической длительности" следовало бы предположить, например, в термодинамической системе зоны субдукции, установление локального термодинамического равновесия, из которого эта система самостоятельно выйти не может (принцип общего начала термодинамики). Остается совершенно непонятным, - из какого источника появляются там вдруг планетарного масштаба выбросы чудовищной энергии землетрясений и извержений вулканов. Попытки привлечь к объяснению наблюдаемого в зонах субдукции мощного теплового потока вторжение в мантию холодных плит океанической коры противоречит второму началу

термодинамики: "нельзя передать тепло от менее нагретых тел к более нагретым".

IV. Свойства искомого источника энергии

Попробуем показать недостающий для объяснения эндогенных процессов Земли источник, энергия которого: 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 и вулканическими взрывами; д) может быстро и с малыми потерями переноситься на очень большие расстояния; е) поставляет в земную кору заряженные энергией газы, а также сконцентрированные редкие и рассеянные элементы для рудообразующих гидротермальных растворов; ж) ее поток хорошо коррелируется с эманацией легкого гелия (${}^3\text{He}$).

Все процессы, связанные с деформацией и образованием трещин, не отвечают этим условиям еще и потому, что требуют длительного периода восстановления запасов энергии. Скорость ядерных процессов практически постоянна, не зависит от температуры и давления среды (в диапазонах земных условий) и не может реагировать на изменения условий выбросом энергии или её поглощением. Анализ возможной плотности переноса энергии посредством конвекции, теплопроводности, или же посредством транспортировки скрытой (латентной) энергии химических соединений, показывает безусловную выгоду последней. "Газы, содержащиеся в магме" физически не могли бы 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.

Предлагаемая ниже концептуальная система гипотез опирается на другой, значительно более мощный источник энергии мантийных газов. В очень многих публикациях [13, доп. ссылки см. в 1] 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, [13, стр. 234-235] и многочисленные более поздние статьи, например, [36]).

V. Первичные водород и гелий – основной источник внутренней энергии Земли: аккумуляция, трансформация и высвобождение энергии в планете Земля

В период аккреции Земли (4.2 – 4.5 млрд. лет.), первичные водород и гелий, основные элементы космоса, были захвачены и складированы в земном ядре и мантии в виде твердых и жидких растворов и химических соединений, устойчивых только в условиях сверхвысоких температур и давлений (РТ). Эндотермические (поглощающие тепло) реакции образования этих растворов и соединений обеспечили эффективное охлаждение планеты, причем конечные продукты этих реакций обладают большей компактностью, чем исходные. После формирования планеты начали преобладать экзотермальные процессы дегазации водорода и гелия, сопровождаемые выделением энергии, затраченной на их образование (удельная энергия, см. таблицу).

Выделение мантийного водорода и гелия, сопровождающее концентрированные потоки тепловой энергии Земли, указывает на высокое содержание этих газов в её ядре и мантии. Гелий является благородным газом при атмосферных условиях, но соединения He-H, He-O, He-Si, и He- металлы, устойчивые только при температурах выше 1000^0 K и давлениях выше 14 ГПа, хорошо известны [37-39]. Структуры типа He-Cl, He-F, He-C и He-N могут быть предсказаны по атомным структурам и составу природных газов, богатых гелием [13]. 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 [40, 41]), 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 . Например, М.Саундерс с соавторами [42] 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 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 или 2.96 эВ, 1 ккал на г-моль = 0.04336 эВ).

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 [43]. При растворении водорода в жидком железе и никеле затрачивается соответственно 15.18 ккал на моль и 8600 ккал на моль [44], 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 [44]. 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 [41]. 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 [41]. Вывод автора этих исследований: существование газ гидратов при высоких давлениях являются объективной реальностью. Эти данные подтверждают предложенную Т.Гольдом [45] гипотезу о наличии огромных запасов метана на больших глубинах Земли, глубже, чем могут находиться запасы биогенных углеводородов, по крайней мере часть гигантских запасов метана, открытых при бурении океанической коры [46], и метан гидрата в океанических осадках [47], запасы которого (2×10^3 - 4×10^6 миллиардов тонн) намного превышают его запасы в других резервуарах Земли [47]. Приходят они из мантии.

Непрерывный процесс дегазации Земли обеспечивается транспортом водорода и гелия из ядра к поверхности. В нашей базисной статье [1, гл. 7.1-7.6] описываются стадия за стадией для различных РТ-условий (рис. 3): эманация H и He из твердого ядра; их всплытие в виде самоорганизующихся конвективных потоков в жидком ядре; флюсовая плавка твердой мантии и образование самофокусирующихся газо-магмовых (“пиромагма”) восходящих потоков (диапиров или плюмов). Структура этих потоков, проходящих через

всю толщу мантии, включает разжиженные газонасыщенные слои на границе потока; и жидкую центральную его часть, где происходит конвективный перенос водорода и гелия и их соединений. Плюмы проплавливают твердую мантию за счет тепловой энергии выделяющейся в реакциях их химической трансформации или метаморфических превращений при постепенном уменьшении глубины и давления. Параллельно образующаяся трещиноватость в окружающем плюм материале мантии обеспечивает поступление в поток химически активных соединений из мантии; в плюмах собираются и концентрируются редкие и рассеянные элементы, образуются He-H, He-O, He-S, He-Si, He-N, He-C, He-Cl, He-F, He-металлы и другие соединения.

Таблица. Удельная энергия водорода и гелия в глубинах Земли [1].

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

Повторяющиеся сбросы давлений и взрывы в поднимающихся к поверхности Земли гипоцентрах вызывают: а) дробление пород и образование взрывных полостей; б) быстрое выделение энергии вследствие распада соединений гелия и водорода, в) высвобождение элементарных H, O, C, S, Cl, F, металлов и т.д., г) выделение энергии вследствие серии экзотермальных, взрывоподобных реакций синтеза с образованием H₂O, SO₂, H₂SO₄, CO₂, H₂S, HCl, HF и др. соединений. На глубинах менее 700 км понизившиеся температуры и давления делают термодинамически возможными высокие (взрывные) скорости

освобождения энергии и самоорганизацию фронтов ударных волн, дополнительно ускоряющих химические реакции.

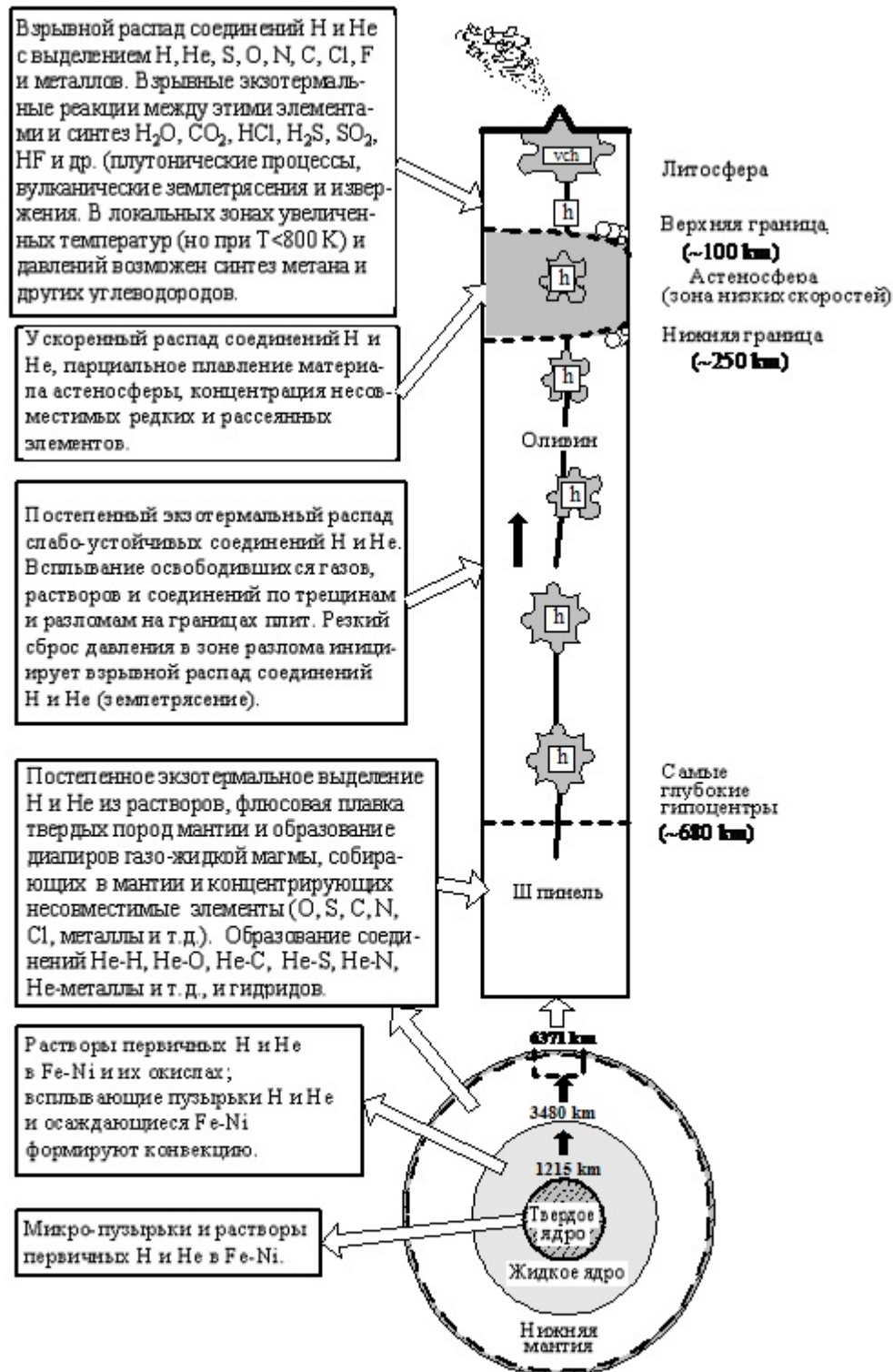


Рисунок 3. Дегазация водорода и гелия из земных глубин, предлагаемые формы и превращения фаз. h – гипоцентр землетрясения; vch – вулканическая камера. Вулканическое извержение рассматривается здесь как особый тип землетрясения, при котором поднимающиеся гипоцентры (афтершоков) достигают земной поверхности.

Практически неисчерпаемым по мощности источником энергии землетрясений является мгновенный взрывоподобный распад соединений гелия и водорода, вызванный сбросом давления в зоне разлома. По-видимому, одной из главных причин “оживления” разломов являются лунные приливы-отливы. Хорошая корреляция между ними и землетрясениями (и извержениями вулканов) отмечалась целым рядом исследователей в многочисленных публикациях.

Энергия этих реакций достаточна для образования интрузивных тел. Вулканические извержения генерируются поднимающейся пиромогмой, которая разрушает и плавит породы верхней мантии и земной коры под давлением продолжающихся взрывных реакций (“вулканических землетрясений”). Наш анализ результатов измерений других авторов и наши расчеты [1, гл. 7.7] 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.

Выводы и возможные пути исследований

Мы полагаем, что вышеописанная консервация энергии в период аккреции Земли путем эндотермического 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, 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 нам 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 в магматические камеры, пробиваются через хрупкие породы и поставляет энергию интрузивным процессам к вулканическим извержениям со всеми их проявлениями. Мы рассматриваем “тектоническое” землетрясение как взрыв, который часто 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 концепция симметрична: с одной стороны консервация энергии аккреции, с другой стороны ее выделение посредством дегазации планеты. Мы уверены в том, что лежащий в ее основе механизм, самый мощный из имеющихся в природе механизмов для складирования энергии, не мог остаться неиспользованным. Она 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 им выделением мантийного гелия. Составляющие ее гипотезы основаны на базисных законах физикохимии и на основных геологических теориях, включающих аккреционное образование планеты Земля, тектонику плит и тектонику зон высокой флюидной проводимости.

Эта концепция может помочь найти решения для практически всех нерешенных проблем, связанных с нехваткой подходящего источника энергии для основных эндогенных процессов Земли. Одновременно она дает ключ объяснению 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.

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 [48].

Прекращение лунного вулканизма, и сравнительно низкая энергичность “луноотрясений” (2×10^{13} эрг/год по сравнению с $10^{24} - 10^{25}$ эрг/год для энергичности землетрясений) [48], 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 [9 стр. 114-118]. Эта похожесть весьма подозрительна: по-видимому, оба явления вызваны подземными взрывами, - кумулятивным, длящимся до минуты или даже больше при сильном землетрясении, или единичным, сконцентрированным в несколько миллисекунд при ядерном взрыве. Сейсмограммы, регистрирующие шок землетрясения на миллисекундной шкале, позволят прояснить вопрос о механизме землетрясений.

Если верно предположение, что “любое маленькое землетрясение... может перерасти в мощное” [49], то верно и то, что чудовищная энергия должна каким-то образом сконцентрироваться в определенном месте, в определенной форме, и при определенных условиях быть детонирована. Возникает главный вопрос, каким образом эта планетных масштабов концентрация энергии проявляет себя до чудовищного взрыва? Вторжением миллионов тонн “мантийных флюидов” в земную кору и вызванным им поглощением S-волн [19]? Геомагнитными аномалиями, улавливаемыми сверхчувствительной системой SuperGrad [50]? Еще каким-то образом? Мы надеемся, что предлагаемая здесь концепция сможет помочь и в поисках кратковременных предвестников землетрясений.

Заключение

Излагаемые в настоящей статье результаты исследований начаты нами (геологом и химиком) 15 лет 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 и гелия – универсален и влияет на все эндогенные процессы Земли, помогая нам заполнить многочисленные пробелы в теориях, связанных с геодинамикой и эволюцией планеты.

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), и мы им очень благодарны.

Литература

- [1] Gilat, A. and Vol., A., 2005. Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes. HAIT Journal of Science and Engineering B, Vol. 2, Issues 1-2, pp. 125-167 (<http://magniel.com/jse/B/vol0201B/p126.html>)
- [2] Francis, P., 1993. Volcanoes. A Planetary Perspective. Oxford University Press Inc. New York, 443 pp.
- [3] Simkin, T., Unger, J.D., Tilling, R.I., Vogt, P. R., and Spall, H., 1994. This dynamic planet, world map of volcanoes, earthquakes, impact craters and plate tectonics; explanatory notes. US Geological Survey in cooperation with Smithsonian Institution.
- [4] Largest Earthquakes in the World Since 1900. (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/10_largest_world.php)
- [5] Richter magnitude scale – Wikipedia, the free encyclopedia, Examples table, p. 7. (http://en.wikipedia.org/wiki/Richter_magnitude_scale)
- [6] Rhoads, J. L., 2001. Basic explanation of creep processes. Dept. of Nuclear Engineering, Univ. of Ca., Berkeley, Rep. NE-161.
- [7] Kanamori, H. and Cipar, J.J., 1974. Focal Process of the Great Chilean Earthquake of May 22, 1960. Physics of the Earth and Planetary Interiors. Amsterdam.
- [8] Central and Southern Andes GPS Project. http://i.dailymail.co.il/i/pix/2010/03/09/article-1256597-08ADDCB000005DC-185_634x307_popup.jpg

- [9] Eiby, G.A., 1989. Earthquakes. Heinemann Reed, a Division of Octopus Publ. Group (NZ) Ltd., Auckland, 166 p.
- [10] Wilson, B., Dewers, T., Reches, Z. and Brune, J., 2005. Particle size and energetics of gouge from earthquake rupture zones. *Nature*, Vol. 434, pp. 749-752.
- [11] Navrotsky, A., 2003. Energetics of nanoparticle oxides: interplay between surface energy and polymorphism. *Geochem. Trans.*, 4(6), pp. 34-37 The Royal Soc. of Chemistry and the Div. of Geochem. Am. Chem. Soc.
- [12] Soter, S., 1999. Macroscopic seismic anomalies and submarine pockmarks in the Corinth-Patras rift, Greece. *Tectonophysics* 308, 275-290.
- [13] Ozima, M., and Podosek, F. A., 1983. Noble Gas Geochemistry, Cambridge Univ.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Gufeld, I. L., 1992. Radio-Wave Precursors of Earthquakes. *J. Earthquake Prediction Res.* 1, 59-70.
- [17] Ponomarev, A. S., 1990. Thermal gas-dynamical model of crustal earthquakes. *Izvestiya USSR Acad. of Sc., Physics of the Solid Earth*, 26, 888-900.
- [18] 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.
- [19] Kopnichev, Yu. F. and Sokolova, I.N., 2010. On Correlation of the Seismicity Characteristics and Absorption Field of S-waves in the areas of ring structures formed before strong earthquakes. *Volcanology and Seismology № 6*, 2010, pp. 34-51 (in Russian).
- [20] Gufeld I.L., 2007. The seismic process, physical and chemical aspects. Korolev, M.R.:TSNIIMash, 160 p. (in Russian)
- [21] Sokolova I.N., 2010. Space-time variations of S-waves attenuation field in earth crust and upper mantle of Central and Southern Asia. Resume of dissertation, Almaty. (in Russian).

- [22] Reid, H. P., 1910. The California earthquake of April 18, 1906; the mechanics of the earthquake. Washington (D. C.): Carnegie Institute., 1910.
- [23] 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 Murray, Albemarle St. Vol. 1, 655 pp. (Victoria University Library, Wellington, N.Z.).
- [24] 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.).
- [25] 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.
- [26] 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).
- [27] Fedotov, S.A., 2006. Magmatic Feeding Systems and Mechanism of Volcano Eruptions. Moscow, Nauka, 455 p.
- [28] Tazieff, H., 1980. The Smell of Sulfur. Moscow, Misl, 222 pp. (In Russian).
- [29] Tazieff, H., 1970. New investigations on eruptive gases. *Bull. Volcan.*, 34, pp. 1-18.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Zies, E. G., 1938. The concentration of the less familiar elements through igneous and related activity. *Amer. J. Sci.*, 35-A, 385-40

- [33] 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.
- [34] Nusipov, E.N., Osanov, A.B., and Shatsilov, V.I., 2005. Velocity Model of the High Asia lithosphere in terms of geotraverse system. *NNC RK Bulletin Issue 2(22)*, Almaty, pp. 109-121.
(www.nnc.kz/fileadmin/nnc/downloads/bulletin/2005/NNC_RK_Bulletin_2_2_2005.pdf)
- [35] Cande, S.C., and Stegman, D.R., 2011. Indian and African plate motions driven by the push force of the Reunion plume head. *Nature* **475**, pp. 47-52.
- [36] 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.
- [37] Aver'anov, A. S. and Khait, Yu. G., 1995. Lifetimes of metastable X $_{31}$ - and a1D states of the HeO $_2^+$ ion. *Opt. Spectrosk.*, 79, 595-600 (in Russian).
- [38] 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.
- [39] Nuccio, P.M., and Paonita, A., 2000. Investigation of the noble gas solubility in H $_2$ O 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.
- [40] Kleinekathoefter, 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.
- [41] Vos, W. L., Finger, L. W., Hemley, R. J. and Mao, H. K., 1996. Pressure dependence of hydrogen bonding in a novel H $_2$ O-H $_2$ clathrate. *Chem. Phys. Lett.*, 257, 524-530.
- [42] 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 $^3\text{He}@C_{60}$ and $^3\text{He}@C_{70}$. *Nature*, **367**, 256-258.

- [43] Vol, A. E., 1962. Structure and properties of the binary metal systems. Vol. 2, Fizmathizdat, Moscow, pp. 263-269 (in Russian).
- [44] Samsonov G. V., (Ed.), 1976. Properties of Elements. Vols. 1, 2., Metallurgia, Moscow, (in Russian).
- [45] Gold, T., 1979. Terrestrial sources of carbon and earthquake outgassing. *J. of Petrol. Geol.*, 1, p. 3-19.
- [46] Evans, W. C., 1996. A gold mine of methane. *Nature*, Vol. 381, p. 114-115.
- [47] Kvenvolden, K. A., 1988. Methane hydrate – a major reservoir of carbon in the shallow geosphere? *Chem. Geol.* 71, p. 41-51.
- [48] Taylor, S. R., 1975. *Lunar Science: A Post-Apollo View*. Pergamon Press Inc., 372 p.
- [49] Geller, R. J., Jackson, D. D., Kagan, Y. Y. and Mulargia, F., 1997. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 275, 1616-1617.
- [50] Bass, M., 2010. Investigation of geodynamic phenomena at high-resolution magnetic measurements. M.Sc. Thesis, Tel Aviv University. Geological Survey of Israel Report GSI/09/2010, 66 p.