

УДК 550.34 + 550.343

ПЛАНЕТАРНАЯ ВОДОРОДНАЯ ДЕГАЗАЦИЯ, КОНТРОЛИРУЮЩАЯ САМОПОДДЕРЖИВАЕМЫЙ ТРИГГЕРНЫЙ СЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ГЛУБИН

© 2022 г. И. Л. Гуфельд^{1*}, О. Н. Новоселов²¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия²Московский государственный технический Университет им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

*E-mail: igufeld@korolev-net.ru

На основе новых представлений о геологической среде была обоснована дегазационная модель сейсмического процесса, контролируемая планетарной водородной дегазацией. Предложены модели коровых и глубокофокусных (ГФС) сейсмических актов. Для литосферы – это быстрые подвижки вдоль граничных структур, для ГФС – «взрывной» выброс водорода как атомов внедрения, вызывающий деформацию водородной подрешетки. Движущими силами фонового сейсмического процесса в предельно энергонасыщенной по упругой энергии литосфере являются всплывающие деформационные волны диффузионной природы, активируемые непрерывно восходящими потоками водорода. Реализуется триггерное действие водородных потоков на параметры граничных структур, которые контролируют медленные или быстрые подвижки элементов среды относительно друг друга. Водородная активация граничных структур переводит процесс движения элементов среды относительно друг друга в безбарьерный с чертами сверхпластичности. Проявления сильнейших и мега событий происходит при дополнительной активации водородным потоком граничных структур за счет локальной активизации в верхней мантии «сейсмических гвоздей» Вадковского. Непрерывный восходящий поток водорода обеспечивает сейсмическое взаимодействие процессов в верхней мантии и литосфере и контролирует самоподдерживаемый сейсмический процесс в широком диапазоне глубин.

Ключевые слова: фоновая сейсмичность, водородная дегазация, триггерные эффекты в фоновой сейсмичности, глубокофокусные землетрясения

Для цитирования: Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Планетарная водородная дегазация, контролирующая самоподдерживаемый триггерный сейсмический процесс в широком диапазоне глубин // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14. № 1. С. 118–129. http://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_118.

Введение

Несмотря на стремительное расширение наших знаний о строении планет, многие вопросы в науках о Земле всё ещё остаются дискуссионными. В особенности это касается понимания процессов, ответственных за различные явления, которые наблюдаются в оболочках Земли, прежде всего в литосфере и верхней мантии. Речь идет о сейсмических явлениях. Причем уже в начале 80-х годов прошлого века было понятно, что литосфера глубже 4–5 км находится в трещиноватом и предельном по энергонасыщенности (упругой энергии) состояниях и крупномасштабные и более мелкие разрывы в принципе не могут происходить [Садовский и др., 1987; Садовский, Писаренко, 1991; Николаевский, 1982].

Критическая деформация для элементов предельно энергонасыщенной среды в литосфере весьма мала, около 0.0001, т.е. среда всегда находится на грани срыва или в движении, реализуя непрерывное реидное течение (частью которого являются медленные подвижки – тихие землетрясения) блоковых структур относительно друг друга. К тому же на среду постоянно действуют весьма слабые силовые поля, как следствие приливных деформаций, атмосферной деятельности и упругих полей многочисленных слабых сейсмических событий. Именно поэтому в предельно энергонасыщенной

и трещиноватой литосфере сейсмические акты не могут быть разрывами, а являются быстрыми подвижками (реально разномасштабными) элементов среды относительно друг друга.

Представлены особенности динамики геологической среды: быстрые, несинхронные и разномасштабные изменения параметров литосферы, наблюдающиеся в вариациях структурно чувствительных скоростей сейсмических волн; вариации скоростей сейсмических волн в верхней мантии; разноскоростная по глубине структура верхней мантии, не связанная с возможными фазовыми переходами; сейсмическая активизация поверхностной литосферы, непосредственно предшествующая глубокофокусным событиям; периодичность глубокофокусных сейсмических событий (ГФС); непрерывная слабая сейсмичность в условиях постоянных градиентов температуры и давления (см. в [Гуфельд, 2007; Гуфельд, Новоселов, 2021б; Лукк и др., 1996; Короновский и др., 2019; 2021; Поликарпова и др., 1995]).

Подчеркнем ключевые результаты: разномасштабная динамика параметров среды; быстрая (в пределах суток) перестройка скоростной структуры литосферы и верхней мантии; периоды вариаций скоростей сейсмических волн в верхней мантии и периодичность ГФС близки (6–14 лет); объемные деформации среды в сейсмоактивных и асейсмичных зонах близки, в то время как сейсмичность различается на три порядка; независимо от тектонической активности литосферы в кинематических и динамических параметрах сейсмических волн содержатся гармонические составляющие с периодом 2 и 4 года: в диапазоне глубин 20.....100 км обнаружены быстро возбуждаемые в коротком интервале времени серии вертикальных локализованных сейсмических актов – сейсмических гвоздей Вадковского (полный список литературы в [Адушкин и др., 2001; Сидоров, Кузьмин, 1989; Кузьмин, 2009; 2012; Копничев, Соколова, 2003; Невский, 1994; Гамбурцева и др., 1982; Вадковский 2012]).

Геологическая среда перманентно неустойчива и внутренне активна. Механическая идеология сейсмичности в широком диапазоне глубин для такой среды была неприемлемой.

Естественно ставится вопрос, какие процессы делают среду и ее динамику такой, которую мы наблюдаем. Какие процессы в предельно энергонасыщенной литосфере активируют и/или инициируют сильнейшие сейсмические акты, как осуществляется переход от фоновых ситуаций к критическим. Но главной проблемой была природа ГФС, рассмотрение которой на основе механики было абсурдным. Сами ГФС также свидетельствуют о внутренней активности среды в верхней мантии. Причем, понимание природы ГФС представлялось ключом к объективному анализу физики сейсмического процесса в широком диапазоне глубин, включая литосферу и верхнюю мантию, т.к. становились очевидными вертикальные процессы переноса энергии.

Второй ключевой проблемой являлась природа непрерывно поддерживаемой слабой сейсмичности, т.е. быстрых подвижек элементов среды относительно друг друга в условиях постоянных градиентов температуры и давления, т.е. природа фонового сейсмического режима. Учитывая при этом, что нормальное литостатическое давление блокирует подвижки элементов среды уже с глубин более 500–1000 м [Райс Дж., 1982; Стейси, 1972]. Для реализации подвижек необходима определенная структура граничных слоев, обеспечивающая безбарьерное движение элементов среды относительно друг друга. Причем, такая структура граничных слоев должна непрерывно поддерживаться. Подчеркнем, что быстрые подвижки, как и разрывы, являются пороговыми актами, поэтому дополнительная водородная активация граничных слоев среды является триггерным фактором (подробнее об этом ниже).

Водородная планетарная дегазация позволяет с единых позиций объяснить внутреннюю активность литосферы и верхней мантии с их различной сейсмической реакцией на восходящие потоки водорода и физическую модель самоподдерживаемого сейсмического процесса от верхней мантии до литосферы. В представленном докладе приведены результаты исследований ключевых вопросов дегазационной модели сейсмичности. Проблема настолько многогранна, что ее изложение в одной статье возможно только в тезисном виде, поэтому основные ссылки делаются на монографии и ключевые журнальные статьи, где осуществлено подробное изложение результатов и представлены многочисленные иллюстрации [Гуфельд, 2007; Гуфельд, 2019; Гуфельд, Новоселов, 2021б].

Планетарная водородная дегазация и природа глубокофокусной сейсмичности

Сейчас рассматриваются сейсмотектонические ситуации на различных глубинах исходя из механики разрушения. Например, оценок механизмов очага для коровых и глубокофокусных сейсмических актов. В результате этого получают, что в горизонтах ГФС событий возникают крупномасштабные зоны с растягивающими или сжимающими напряжениями. Например, результаты анализа для Охотоморского глубокофокусного события 24.05.2013 г. с магнитудой 8 (по Чеброву с коллегами и Гонтовой с коллегами, см. ссылки в [Гуфельд, Новоселов, 2021б]): «По данным Global CMT событие произошло в условиях преобладания напряжений сжатия. Событие имеет сбросовую дислокацию в очаге. Одна из плоскостей разрыва имеет крутое падение... и по ней произошел сброс....», и «.. Распределение афтершоков примерно обрисовывают область, в пределах которой были сняты напряжения...». «Размеры области «очага» Охотоморского события по длине 300 км, по ширине 170 км и диапазону глубин 425.... 720 (!) км».

Что означало бы, что на глубинах «очага» Охотоморского события возникли напряжения сжатия? Это означает, что в зоне очага атомы в структурах сместились бы из своего равновесного положения при существующих Р–Т условиях таким образом, что расстояния между ними увеличились бы. Абсурдность такой ситуации очевидна. Аналогичная оценка для глубоких зон, где в расчетах показываются напряжения растяжения. В этой зоне также абсурдно упоминание об «очагах» ГФС, представления о которых были сформированы в механических моделях сейсмичности.

Природу ГФС связывали также с полиморфными превращениями. Изменить давление в той или иной зоне невозможно, а колебания температуры в пределах до десятков градусов в принципе возможны в небольшом диапазоне глубин. В условиях высоких давлений реален фазовый переход к более устойчивым состояниям веществ, но с уменьшением объема. Обратному же переходу будет препятствовать высокое давление, за счет которого будет формироваться устойчивая аморфизированная структура. Такая ситуация характерна, как известно, фазовым переходом, реализуемым под давлением. В дальнейшем такие аморфизированные структуры будут сохраняться.

Традиционные представления о глубокофокусной сейсмичности оказываются неприемлемыми. Поэтому для верхней мантии предложена к рассмотрению водородная дегазационная модель. Непрерывная подпитка мантийных структур водородом осуществляется потоками из нижней мантии и ядра. В нижней мантии диффузия водорода может осуществляться по междоузельному механизму и скоростная структура среды слабо меняется с глубиной. Однако поток водорода начинает изменяться с формированием на его пути аморфизированных структур.

Такие структуры могли сформироваться геологически в переходной зоне от нижней мантии к верхней в диапазоне глубин от 700...400 км, где зафиксированы большие перепады и скачки скоростей продольных волн. Напомним, что скорости сейсмических волн являются структурно чувствительным параметром. Интервал Р–Т параметров этой зоны характерен известным фазовым переходом. Структурная стабильность в настоящее геологическое время этих зон не вызывает сомнений. Тогда почему возникают быстро протекающие и повторяющиеся через короткое время глубокофокусные сейсмические акты?

Мысли о ГФС как следствии механического разрыва могли быть связаны с анализом рассчитываемых механизмов сейсмических актов, образующих нодальные плоскости. Однако очевидно, что разрыв или сдвиговый процесс не могут реализоваться из-за чрезвычайно высоких нормальных давлений вышележащей среды. В то же время следует отметить, что в этих условиях существующие граничные структуры между элементами различных фаз проницаемы для диффузии водорода и гелия (коэффициенты диффузии других атомов внедрения на многие порядки меньше), и для переползания дислокаций. Поэтому с восходящими потоками водорода (как атомов внедрения) можно связывать периодичность ГФС и изменения параметров среды, наблюдающиеся в вариациях скоростей сейсмических волн на различных глубинах, в том числе в верхней мантии.

Тогда возникает вопрос. Каким образом формируются нодальные «плоские» структуры ГФС. Что

это, все же деформационный процесс? Какие процессы могут вызывать «деформацию» внутри среды, не отражающейся в окружающей ее зоне? Это не странный вопрос.

Связывая ГФС с восходящими потоками водорода, необходимо предположить, что в структурах происходит накопление водорода, и эти структуры могут на определенный период стать барьером для восходящего потока. Накопление водорода и блокировка его восходящего движения могут реализоваться в аморфных (аморфно-кристаллических) структурах, отличающихся различной степенью изотропности и меньшей плотностью. В аморфных структурах растворимость водорода существенно больше, чем в кристаллических (для сравнимых Р–Т условий).

Заметим, что восходящий поток водорода не является однородным в пространстве. Блокировка движения водорода по мере его накопления в аморфизированных структурах может осуществляться за счет перемещения групп атомов водорода в направлении движения, блокируя его пути. Можно рассматривать еще один механизм накопления водорода в глубоких структурах. При исследовании диффузии водорода в кристаллических структурах не смогли однозначно ответить на вопрос: диффузия водорода осуществляется в атомарном и/или ионном (протон) состоянии. При протонной диффузии в какие-то отрезки времени возможно формирование пересыщенных водородом структур с концентрацией, существенно превышающей равновесную. Пересыщенные твердые растворы водорода будут представлять на определенный период, в условиях больших давлений, блокировочные структуры. Конечно, здесь не может реализоваться полная блокировка потока. Сток водорода будет продолжаться по междоузельному пространству. Однако накопление водорода в междоузельном пространстве может привести к его взрывному выбросу в различных направлениях. При взрывном выбросе водорода в вышележащие слои, естественно, произойдет линейная деформация водородной подрешетки (относительно окружающей ее устойчивой аморфно-кристаллической структуры – зоны), которая и формирует сейсмическую волну. Направление сброса водорода в вышележащие структуры может быть любым, так же как и вычисляемая энергия ГФС, от магнитуд 3....4 до более 8 (Охотоморское событие) [Гуфельд, Новоселов, 2021б].

Возможные «афтершоковые акты» в большей степени связываются с интенсивностью восходящих потоков водорода и особенностями локальных аморфизированных структур, окружающей основное событие среды. Было показано, что «афтершоки» Охотоморского события независимы друг от друга и основного события, возможно, что главное событие только активизировало водородные потоки и послужило их триггером [Гуфельд, Новоселов, 2021б].

В заключении приведем дополнительные аргументы в сторону обоснования взрывного механизма выброса водорода из междоузельных структур. В качестве иллюстрации покажем реакцию структуры монокристалльного кристалла оливина на насыщение его водородом (рис. 1). Возникшие структуры неустойчивы [Гуфельд, Матвеева, 2011]. Кристаллическая структура текстурирована и аморфизирована, однако через 4–6 месяцев структура вновь становится монокристалльной [Гуфельд, 2007]. При насыщении водородом (гелием) возникает газовая пористость с высоким внутренним давлением газа. На рисунке и врезках цифрой 3 обозначены поры с зародившимися микротрещинами, как реакция на высокое внутривещное давление, т.е. это разрядка напряжений. Квадраты на рисунках – отпечатки индентора для измерений микротвердости. От инденторов развиваются линейные, а также круговые трещины, свидетельствующие об объемно-напряженном состоянии образца. Об этом говорит и «кривая» трещина между инденторами 1 и 2.

Особенности трещинообразования на образцах свидетельствуют о процессах релаксации объемно-напряженного состояния. Оценки и наблюдения за динамикой скоростей сейсмических волн в литосфере показывают проявление подобной неустойчивости примерно до границы Мохо [Гуфельд, 2007; Гуфельд, Матвеева, 2011]. Однако условия для релаксации деформации водородной подрешетки в верхней мантии отсутствуют, т.к. из-за высокого давления вышележащей толщи поры и трещины возникать не могут, также как и смещения атомов основных структур из положения равновесия при действующих Р–Т условиях. Пути восходящих потоков водорода и гелия в верхней мантии остаются только междоузельные каналы с поперечными размерами в несколько ангстрем, в которых происходит

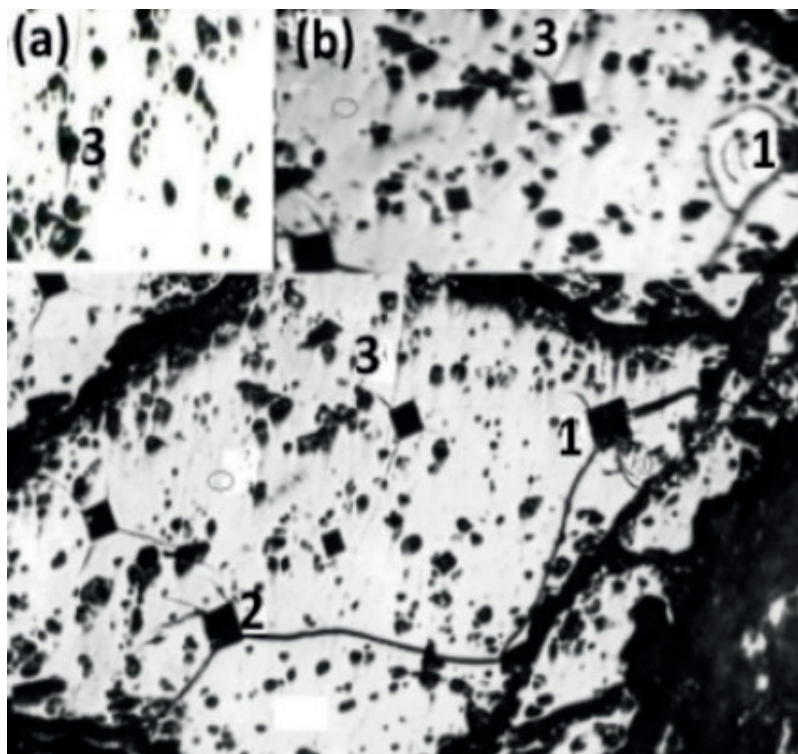


Рис. 1. Пористо-трещиноватая структура оливина после насыщения образца водородом при давлении 1 атм. Врезки (а) – увеличение 600, (b) и основной кадр – увеличение 300. Темные полосы – цепочки микропор. Пояснения в тексте.

блокировка движения водорода с последующим взрывным разномасштабным выбросом водорода в вышележащие слои. Сам глубокофокусный сейсмический акт в междоузельных каналах отражает не диффузионный характер движений водорода, связываемый с градиентом химического потенциала, а скорее с градиентом давления водорода. Принудительный сток водорода в вышележащие горизонты через «решето» с ангстремными ячейками может сопровождаться сейсмическим шумом, который, как нам представляется, выделяют, например, в [Любушин, 2014]. Но аномалии такого шума в различных зонах верхней мантии не могут быть прямо связаны с сильнейшими сейсмическими событиями в литосфере.

Сейсмическое взаимодействие процессов в верхней мантии и литосфере

Многочисленные и многолетние попытки анализировать сейсмический процесс в рамках механики и физики разрушения монолитных образцов не позволяли понять фоновые сеймотектонические ситуации и выделять предкатастрофические. Однако эти исследования привели к обоснованию новых представлений о природе сейсмического процесса и предложениям по адекватным методам мониторинга и анализа ситуаций. Предложен пошаговый метод выделения в пространстве быстрых локальных динамических процессов, что позволяло следить за развитием фоновых и критических ситуаций во времени в широком диапазоне глубин, от верхней мантии до поверхности [Гуфельд, Новоселов, 2017; 2020; 2021б].

С учетом непрерывности сейсмического процесса и его быстрой изменчивости в пространстве в отдельные периоды времени, было предложено представлять положение событий в пространстве следующим образом: по оси ординат откладываются широта (или долгота и глубина гипоцентра), а по оси абсцисс – последовательность самих событий со своим индивидуальным временем. Эта процедура позволяет наглядно видеть реальную тонкую пространственно-временную картину глубинной динамики сейсмичности от верхней мантии до поверхности. При таком построении было выделено два режима сейсмического процесса в зонах субдукции. В одном из них сейсмические события были

распределены длительное время по всей площади региона (магнитуда не более 7), это фоновый режим. Второй – сейсмические события сосредоточены по глубине в коротком интервале времени в одной локальной зоне региона, в период которого происходили мега- или сильнейшие события в верхней мантии и литосфере. Локализация событий была названа локальным сейсмическим узлом (ЛСУ). Фактически ЛСУ это гвоздь Вадковского в горизонтальной проекции. В такой ситуации произошли, например, такие события как Кроноцкое в 1997 г., Симуширские в 2007 и 2008 гг., Охотоморское в 2013 г., Тохоку в 2011 г. и др. [Гуфельд, Новоселов, 2017; 2020; 2021б]. Иллюстрация приведена на рис. 2.

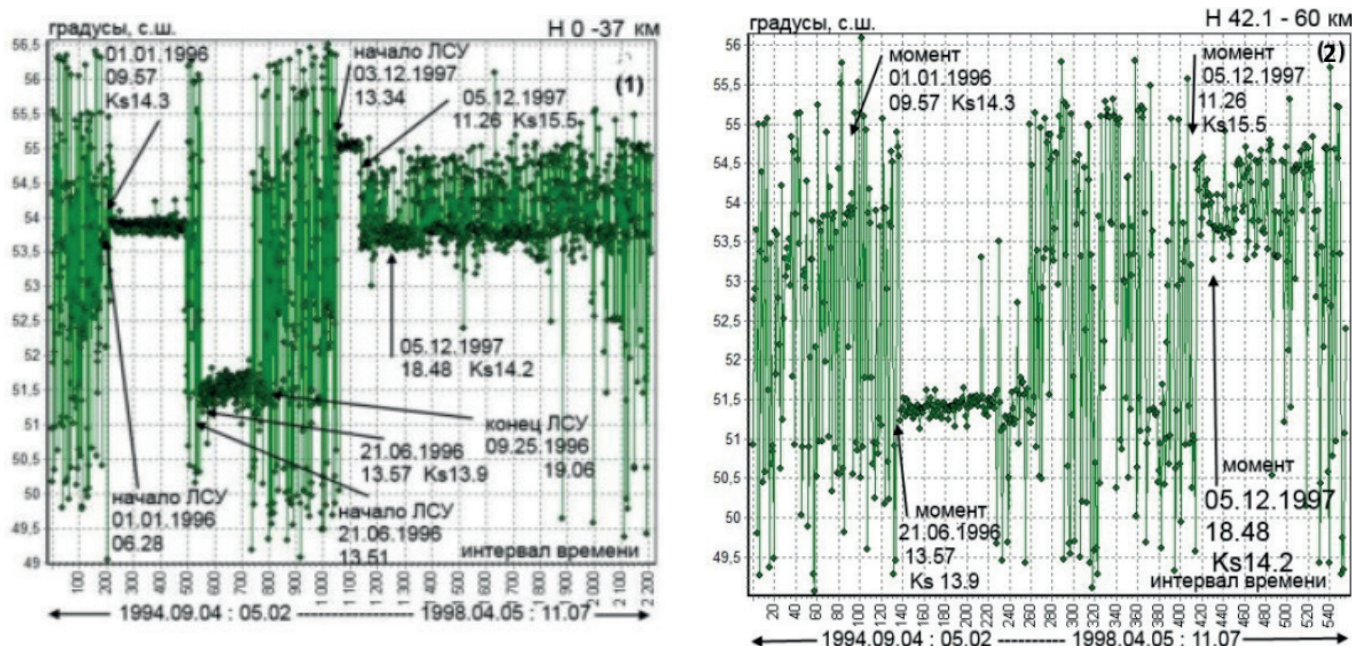


Рис. 2. Пространственно-временная и пространственно-глубинная структура сейсмичности в период 1994–1998 гг. Камчатка. Глубины: (1) – 0–37 км, (2) – 42.1–60 км. Кроноцкое событие 05.12.1997 г.

Наиболее информативным такой метод может быть для понимания развития ситуаций в региональных зонах, например, Камчатки и Курильских островов, Японии, Чилийской зоны. Причем наблюдения на сильнейших коровых и ГФС событий типа Охотоморского и Кроноцкого дали дополнительную информацию о природе пространственно-временного и пространственно-глубинного развития сейсмического процесса [Гуфельд, Новоселов, 2017; 2020; 2021б].

Сейсмический процесс в верхней мантии инициируется восходящими потоками водорода и реакцией среды на его движение. Фоновый процесс нам пока трудно контролировать в верхней мантии, однако в период экстремальных ГФС событий наблюдается такая реакция среды, которая позволяет обсуждать особенности и механизмы протекающих процессов взаимодействия восходящих потоков водорода со средой. Так, в течение первых месяцев после Охотоморского события наблюдалась реакция литосферы в изменении рельефа поверхности. Подробно об этом в [Гуфельд, Новоселов, 2021б]. Это могло быть связано с выбросом в приповерхностные слои значительного количества водорода, приводящем к соответствующим изменениям объема элементов среды. Быстрая реакция поверхностной литосферы подтверждает эстафетный механизм движения водорода как атома внедрения из глубинных слоев (последовательно из одного горизонта в вышележащий, из этого горизонта в следующий вышележащий и т.д.), характерный для верхней мантии и литосферы. Это указывает также на то, что реально вся среда предельно насыщена (заполнена) водородом, чем объясняется ее перманентная неустойчивость на различных глубинах [Гуфельд, Новоселов, 2020; 2021а; 2021б].

ГФС мегасобытия происходят значительно реже, чем сильнейшие события в литосфере. Сейсмичность ниже границы Мохо также довольно редкая и это самостоятельные акты, обусловленные

разномасштабным и неравномерным восходящим потоком водорода и особенностями структурного состояния среды. В верхней мантии крайне редко возникают серии вертикальных локализованных сейсмических актов, формирующие так называемые сейсмические гвозди Вадковского (или локальные сейсмические узлы). Однако, если сейсмические гвозди Вадковского опускаются в литосферу, то в литосфере происходили сильнейшие сейсмические события. Можно говорить об инициировании или триггерном воздействии сейсмических гвоздей Вадковского на сейсмическую активизацию среды литосферы. Заметим, что в этих ситуациях гвозди Вадковского контролировали координаты эпицентральных зон. Подробно об этом и соответствующие примеры возбуждения сильнейших и мега-событий приведены в [Гуфельд, Новоселов, 2021б].

Восходящие потоки водорода, взаимодействуя с твердой фазой литосферы, при котором изменяются параметры кристаллических структур и соответственно происходят обратимые изменения объемов элементов среды, вызывают непрерывные и разномасштабные вариации объемно-напряженного состояния (ОНС) среды [Гуфельд, Новоселов, 2017; 2020]. На это указывают непрерывные вариации структурно-чувствительных скоростей сейсмических волн в литосфере. Колебательный режим ОНС отражает режим бегущих деформационных волн диффузионной природы, следующих непрерывно друг за другом. Всплывающие деформационные волны индуцируют непрерывную сейсмичность, являющуюся следствием нарушения аккомодации элементов среды относительно друг друга, а не процессов трещинообразования. Нарушение аккомодации проявляется в виде быстрых (сейсмический акт) или медленных (тихие землетрясения) подвижек вдоль подготовленных граничных структур. Водородная активация граничных структур переводит процесс движение элементов среды относительно друг друга в безбарьерный с чертами сверхпластичности [Гуфельд, Новоселов, 2015]. Это фоновый сейсмический процесс в литосфере, поддерживаемый непрерывной водородной дегазацией из верхней мантии. Поэтому в предельно энергонасыщенной литосфере в принципе на сейсмичность не может влиять триггерное (силовое) воздействие упругих волн сейсмических источников или искусственных систем, так как их энергия существенно меньше энергии тепловых флуктуаций [Гуфельд, Новоселов, 2017; 2020; 2021б].

Внутренняя активность геологической среды, контролирующая самоподдерживаемость сейсмического процесса

Показана реализация триггерного действия водородных потоков на параметры граничных структур, которые контролируют медленные (фоновый режим) или быстрые подвижки элементов среды относительно друг друга (слабые события – в фоновом режиме). Дополнительная водородная активация литосферы при воздействии «гвоздями Вадковского» переводит граничные структуры локальной зоны в предкритическое состояние, связанное, как полагаем, также с изменением масштабов и частотой следования деформационных волн, которые могут создать условия для крупномасштабной мега-подвижки.

На основе полученных сейчас данных можно говорить о триггерной активации сильнейших и мегаземлетрясений. Однако «гвозди Вадковского», активируемые в верхней мантии, это самопроизвольные и случайные в пространстве и во времени события. Их природа обусловлена внутренней активностью верхней мантии. Причем у нас нет оснований полагать, что на внутреннюю активность верхней мантии могут влиять внешние факторы. Ситуация в литосфере иная. Среда разрушена, в ней осуществляются движения элементов среды, отмечено влияние водорода на параметры граничных структур, присутствуют флюиды. Могут ли слабые природные внешние поля оказывать влияние на динамику ряда процессов в среде, связанных с водородной дегазацией [Гуфельд, Новоселов, 2021а]?

В этой связи обратим внимание на особенности возбуждения сейсмического шумового поля (СШП) и его высокочастотной составляющей (ВСШ). В сейсмическом шуме (периоды от 10^{-3} до десятков секунд) проявляются различные частоты внешних воздействий – штормовых микросейсм, лунно-

солнечных приливов, а также солнечно-суточная составляющая. Активизация источников СШП коррелирует с действием внешних фоновых полей, в то же время внешнее воздействие усиливает отклик СШП, но не ослабляет его, поэтому внешнее воздействие можно назвать триггерным. Очевидным было то, что штормовые микросейсмы и лунно-солнечные приливы не могли вызывать и поддерживать непрерывный уровень СШП, поэтому среда должна обладать собственным запасом внутренней энергии, который обеспечивает непрерывное сейсмическое шумовое излучение [Рыкунов, Смирнов, 1985а,б]. Очевидно, что речь не может идти о стационарной упругой энергии литостатического нагружения. Наиболее вероятно, что источники излучения СШП связаны с декомпрессионными процессами всплывающих газовых пузырей во флюиде. Наблюдения в скважинах подтверждают это [Гуфельд и др., 2008].

Сейсмические шумовые поля так же, как и вариации ОНС, фактически управляются восходящими потоками легких газов, протекающими в широком диапазоне температур, включая нормальные. Из этого следует, что восходящие потоки легких газов могут управляться слабыми упругими волнами микросейсм или слабыми и отдаленными сейсмическими событиями во взаимодействии с лунно-солнечными приливами, энергия которых меньше энергии тепловых флуктуаций, т.е. с уровнем $(10^{-5}...10^{-6})$ от энергии тепловых флуктуаций $kT = 4 \cdot 10^{-21}$ Дж [Гуфельд, 2019].

Могут ли слабые упругие волны (землетрясений) с энергией ниже энергии тепловых флуктуаций инициировать активизацию слабой сейсмичности и какие условия для этого требуются? Причем, силовое воздействие в предельно энергонасыщенной среде исключено. О чем может идти речь? В [Попова и др., 2007] исследовали степень напряженного состояния среды по параметру $\gamma = E_r/E_v$, который характеризует анизотропные свойства среды (E_v и E_r – энергии характеризуют анизотропные свойства по параметрам обменных волн, регистрируемых на радиальных и тангенциальных компонентах сейсмических записей).

Рассматривалось действие на полигон (зона Кавказских Минеральных вод) упругих волн при сильнейших землетрясениях: 1. Первое Суматранское событие, 26.12. 2004 г., – M9.0, удаленность от полигона 6800 км, длительность регистрации поверхностных волн – около 6 часов. 2. Второе Суматранское событие – 28.03. 2005 г., M7.2, удаленность от полигона 6800 км, длительность регистрации поверхностных волн – 3 часа. 3. Пакистанское событие – 08.10.2005, M6.0, удаленность от полигона 2700 км, длительность регистрации поверхностных волн около 75 минут. После первого Суматранского землетрясения произошла резкая перестройка анизотропных свойств среды, которая усиливалась в течение первых трех суток, также увеличилась контрастность повышенных значений параметра γ по участкам полигона.

По оценкам энергия воздействия источника упругих волн в зоне полигона существенно ниже энергии тепловых флуктуаций kT . В последующие два месяца степень анизотропности несколько уменьшилась; в период после второго Суматранского события немного увеличилась и далее слабо менялась, включая период Пакистанского события, т.е. упругие волны этих событий не оказывали влияние на состояние среды полигона. В этот период в зоне полигона в радиусе до 250 км от сети мониторинга зафиксировано усиление местной сейсмической активности, в том числе с магнитудами более 4. Отмечена задержка сейсмической активизации.

Очевидно, степень напряженного состояния среды не могла измениться, а изменение степени анизотропии могло быть связано с влиянием упругих волн на структурные параметры границ различного ранга, что привело, в условиях предельной энергонасыщенности, к быстрым подвижкам – сейсмическим актам. Заметим, что «тихие события» в сейсмическом процессе мы не контролируем.

Эксперименты О. Г. Поповой с коллегами позволяют сделать сейсмологические энергетические оценки процессов воздействия, которые являются в определенном смысле тестовыми. Для оценки энергетического критерия активации в геологической среде различных процессов сейсмическими волнами М. А. Садовский ввел параметр, названный приведенным расстоянием $L = R/Ec^{1/3}$, где E – сейсмическая энергия источника, R – расстояние от источника до зоны мониторинга [Гуфельд, 2019]. Значение параметра L для геологической среды определяется экспериментально. Поэтому мы можем

оценить дальное действие источников упругих волн. Покажем, что дают эти оценки. Для первого Суматранского события: параметр $L = 5.5 \text{ м/Дж}^{1/3}$ (другие события не оказывали влияния в зоне мониторинга). Весьма близкие значения параметра $L = 4\text{--}5 \text{ м/Дж}^{1/3}$ получены также на трассах в разрушенных скальных грунтах [Гуфельд, 2019; Гуфельд, Новоселов, 2021a]. Полученные значения L являются наиболее приемлемыми для оценок дального действия источников упругих волн. Предельные оценочные расстояния действия сейсмических источников с различными магнитудами будут следующие: $M2.0 - R = 2 \text{ км}$, $M3.0 - R = 6 \text{ км}$, $M4.0 - R = 20 \text{ км}$, $M4.0 - R = 20 \text{ км}$, $M5.0 - R = 60 \text{ км}$, $M6.0 - R = 250 \text{ км}$, $M7.0 - R = 1200 \text{ км}$. Конечно, реакция среды на прохождение упругих волн от сейсмических источников в значительной мере будет зависеть от параметров среды (структура, насыщенность водородом).

Таким образом, идея А. В. Николаева об инициировании землетрясений землетрясениями получает подтверждение в предельно энергонасыщенной геологической среде [Николаев, Верещагина, 1991]. Однако эти идеи нужно рассматривать более широко. Речь идет о самоподдерживаемом возбуждении фоновой сейсмичности и тихих землетрясений в широком диапазоне расстояний, движущей силой которого в предельно энергонасыщенной среде являются водородная дегазация и действие упругих волн сейсмических актов на структурные параметры окружающей среды.

Заключение

На основе новых представлений о геологической среде была обоснована дегазационная модель сейсмического процесса, контролируемая планетарной водородной дегазацией. Предложены модели коровых сейсмических актов и ГФС. Для литосферы – это быстрые подвижки вдоль граничных структур, для ГФС – «взрывной» выброс водорода как атомов внедрения, вызывающий деформацию водородной подрешетки. Движущими силами фонового сейсмического процесса в предельно энергонасыщенной по упругой энергии литосфере являются всплывающие деформационные волны диффузионной природы, активируемые непрерывно восходящими потоками водорода, обеспечивая тем самым самоподдерживаемость сейсмического процесса. Реализуется триггерное действие водородных потоков на параметры граничных структур (естественно с определенной задержкой во времени), которые контролируют медленные или быстрые подвижки элементов среды относительно друг друга (слабые события – в фоновом режиме).

Подчеркнем, и это доказано, что триггерные эффекты в предельно энергонасыщенной среде только за счет силового воздействия упругих волн сейсмических источников не могут самостоятельно активизировать сейсмический процесс, так как их энергия существенно меньше энергии тепловых флуктуаций. В то же время восходящие потоки легких газов могут управляться слабыми упругими волнами микросейсм или слабыми сейсмическими событиями во взаимодействии с лунно-солнечными приливами, что оказывает влияние на динамику порогового фонового сейсмического режима вдоль граничных структур. Непрерывный восходящий поток водорода обеспечивает сейсмическое взаимодействие процессов в верхней мантии и литосфере и контролирует самоподдерживаемый сейсмический процесс в широком диапазоне глубин.

Финансирование

Работа выполнена в рамках госзадания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Благодарности

Авторы искренне признательны Оргкомитету 6-й Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах», представивших доклад на Пленарном заседании. Отдельная благодарность анонимным рецензентам, взявшим на себя труд рецензировать достаточно сложную рукопись.

Список литературы

- Адушкин В.В., Ан В.А., Каазик П.Б., Овчинников В.М. О динамических процессах во внутренних геосферах Земли по временам пробега сейсмических волн // Доклады РАН. 2001. Т. 381, № 6. С. 822–824.
- Вадковский В.Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений – сейсмические гвозди // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. NZ1001. <https://doi.org/10.2205/2012NZ000110>.
- Гамбурцева Н.Г., Люкэ Е.И., Орешин С.И., Пасечник И.П., Рубинштейн Х.Д. Периодические вариации динамических параметров сейсмических волн при просвечивании литосферы мощными взрывами // ДАН СССР. 1982. Т. 266, № 6. С. 1349–1353.
- Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев : ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Гуфельд И.Л., Гаврилов В.А., Корольков А.В., Новоселов О.Н. Эндогенная активность Земли и декомпрессионная модель сейсмического шума // Доклады РАН. 2008. Т. 423. № 6. С. 811–814.
- Гуфельд И.Л., Матвеева М.И. Барьерный эффект дегазации и деструкция земной коры // Доклады РАН. 2011. Т. 438. № 2. С. 253–258.
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Безбарьерный сейсмический процесс в зоне субдукции и принципы его мониторинга // Доклады РАН. 2015. Т. 464. № 6. С. 716–721.
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Мониторинг состояния среды зоны субдукции. Возможности краткосрочной оценки сейсмической опасности // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. Вып. 34, № 2. С. 77–89.
- Гуфельд И.Л. Сейсмическая опасность. Предотвратить или предупредить. М. : ИЗД. ООО САМ Полиграфист. 2019. 98 с.
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Сейсмичность как реакция геологической среды на планетарную водородную дегазацию (на примере Камчатского региона). Часть 1. Противоречия разрывной модели сейсмического процесса и дегазационной. Принципы мониторинга активной геологической среды // Наука и технологические разработки. 2020. Т. 99, № 3. С. 19–45. <https://doi.org/10.21455/std2020.3-3>.
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Сейсмичность как реакция геологической среды на планетарную водородную дегазацию (на примере Камчатского региона). Часть 3. Самоподдерживающийся фоновый сейсмический процесс, обусловленный триггерными эффектами водородной дегазации // Наука и технологические разработки. 2021а. Т. 100. № 1. С. 46–64. <https://doi.org/10.21455/std2021.1-4>.
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Сейсмичность как реакция геологической среды на планетарную водородную дегазацию. На примере Камчатского региона. Монография. М. : Издательство ООО Самполиграфист. 2021б. 72 с.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня // Физика Земли. 2003. № 7. С. 25–34.
- Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А. Краткосрочный прогноз землетрясений: реальность, научная перспектива или проект-фантом? // Вестник Московского Университета. № 4. Геология. 2019. № 3. С. 3–12.
- Короновский Н.В., Захаров В.С., Наймарк А.А. Непредсказуемость сильных землетрясений: новое понимание проблемы и ее решение // Вестник Московского Университета. № 4. Геология. 2021. № 3. С. 17–25.
- Кузьмин Ю.О. Тектонофизика и современная геодинамика // Физика Земли. 2009. № 11. С. 44–60.
- Кузьмин Ю.О. Деформационные автоволны в разломных зонах // Физика Земли. 2012. № 1. С. 3–20.
- Лукк А.А., Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М. : ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.
- Любушин А.А. Прогностические свойства случайных флуктуаций геофизических характеристик // Междисциплинарный научный и прикладной журнал Биосфера. 2014. Т. 5. № 4. С. 319–338.
- Невский М.В. Сверхдлиннопериодные волны деформаций на границах литосферных плит // Динамические процессы в геофизической среде. М. : Наука, 1994. С. 40–54.

Николаев А.В., Верецагина Г.М. Об инициировании землетрясений землетрясениями // Докл. АН СССР. 1991. Т. 318, № 2. С. 320–324.

Николаевский В.Н. Земная кора, дилатансия и землетрясения // Дж. Райс. Механика очага землетрясения. М. : Мир, 1982. С. 133–215.

Поликарпова Л.А., Белавина Ю.Ф., Малиновский А.А., Поликарпов А.М. Временные закономерности распределения глубинных землетрясений земного шара за период 1963–1979 гг. // Физика Земли. 1995. № 2. С. 28–39.

Попова О.Г., Серый А.В., Коновалов Ю.Ф., Недядько В.В. Влияние катастрофических землетрясений на напряженное состояние среды удаленных территорий: Сборник трудов Восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. 2007. С. 200–204.

Райс Дж. Механика очага землетрясения. М. : Мир, 1982. 217 с.

Рыкунов А.Л., Смирнов В.Б. Вариации сейсмичности под действием лунно-солнечных и приливных деформаций // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985а. № 1. С. 97–103.

Рыкунов А.Л., Смирнов В.Б. Общие особенности сейсмической эмиссии на различных временных масштабах // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985б. № 6. С. 83–87.

Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М. : Наука, 1987. 100 с.

Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М. : Наука, 1991. 95 с.

Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О. Пространственно-временные характеристики современной динамики геофизической среды сейсмоактивных и асейсмичных областей // Дискретные свойства геофизической среды. М. : Наука. 1989. С. 33–46.

Стейси Ф. Физика Земли. М. : Мир. 1972. 342 с.

PLANETARY HYDROGEN DEGASSING, CONTROLLING A SELF-SUSTAINED TRIGGER SEISMIC PROCESS IN A WIDE RANGE OF DEPTHS

I. L. Gufeld^{1*}, O. N. Novoselov²

¹*Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

*E-mail: igufeld@korolev-net.ru

On the basis of new ideas about the geological environment, a degassing model of the seismic process controlled by planetary hydrogen degassing was substantiated. Models of crustal seismic acts and DfSE are proposed. For the lithosphere, these are rapid movements along the boundary structures, for the deep-focus seismic events (DfSE) - an «explosive» release of hydrogen as embedding atoms, causing deformation of the hydrogen sublattice. The driving forces of the wave seismic process in the lithosphere, which is extremely energy-saturated in elastic energy, are the floating deformation waves of a diffusive nature, activated by continuously ascending hydrogen flows, providing a self-sustaining seismic process. The trigger action of hydrogen fluxes on the parameters of boundary structures is realized, which control slow (background mode) or fast movements of the elements of the medium relative to each other (weak events - in the background mode). Hydrogen activation of boundary structures translates the process of movement of the elements of the medium relative to each other into a barrier-free process with features of superplasticity. Manifestations of the strongest and mega events occur with additional activation of boundary structures by hydrogen flow due to local activation in the upper mantle of Vadkovsky's «seismic nails». The continuous upward flow of hydrogen ensures the seismic interaction of processes in the upper mantle and lithosphere and controls the self-sustained seismic process in a wide range of depths.

Keywords: background seismicity, hydrogen degassing, trigger effects in background seismicity, deep-focus earthquake.