

УДК 550.34 + 550.343

СЕЙСМИЧНОСТЬ КАК РЕАКЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ПЛАНЕТАРНУЮ ВОДОРОДНУЮ ДЕГАЗАЦИЮ (НА ПРИМЕРЕ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА)

Часть 3. Самоподдерживающийся фоновый сейсмический процесс, обусловленный триггерными эффектами водородной дегазации

© 2021 г. И.Л. Гуфельд¹, О.Н. Новоселов²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

Автор для переписки: И.Л. Гуфельд, e-mail: igufeld@korolev-net.ru

Главное

- проведен анализ возможной природы триггерных эффектов в фоновой сейсмичности
- показано, что энергия силовых воздействий фоновых упругих полей меньше энергии тепловых флуктуаций и не может быть триггерным фактором
- восходящие потоки легких газов могут управляться слабыми упругими волнами микро-сейсм или слабых сейсмических событий во взаимодействии с лунно-солнечными приливами
- фоновый сейсмический процесс является самоподдерживающимся за счет непрерывной водородной дегазации в широком диапазоне глубин

Аннотация. Обсуждается физика фонового сейсмического процесса. В рамках дегазационной модели сейсмический акт представляется быстрой или медленной подвижкой вдоль элементов среды различного масштаба. Показано, что триггерные эффекты только от силового воздействия упругих волн сейсмических источников не могут самостоятельно активировать сейсмический процесс, так как их энергия существенно меньше энергии тепловых флуктуаций. Необходима дополнительная водородная активация граничных структур, переводящая процесс движения в безбарьерный с чертами сверхпластичности. Непрерывная водородная дегазация с одновременным действием упругих волн слабых источников делает процесс самоподдерживающимся.

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

Цитируйте эту статью как: 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. 2021. Т. 100, № 1. С. 46–64. <https://doi.org/10.21455/std2021.1-4>

Введение

Сейсмический процесс реализуется в предельно энергонасыщенной блоковой среде. В ней происходят весьма медленные тектонические движения, на которые накладываются непрерывные воздействия весьма слабых внешних полей различной природы, при этом элементы блоковой среды обмениваются энергией и массой с окружающей средой и друг с другом. Это было понятно уже в середине 80-х годов прошлого века [Николаевский, 1980, 1982; Садовский, Писаренко, 1991]. Оказывают ли эти слабые поля влияние на сейсмический процесс? В начатых работах по изучению влияния естественных и техногенных слабых полей на режим сейсмичности или связи

слабых полей с этим режимом рассматривалось совпадение землетрясений (без конкретизации точного места и энергий событий) с действием различных конкретных полей – проявлением космических и атмосферных факторов или техногенных актов. Так же, как и при поиске предвестников, искали статистические соотношения связи их рядов.

Такая связь чаще всего действительно наблюдалась. Особенно удивительной оказалась статистическая связь землетрясений с межпланетным магнитным полем; отмечены также сильнейшие события после вспышки сверхновой и после сильнейшей рентгеновской вспышки на Солнце. Данные статистического анализа вплоть до нынешнего времени принимались как объективные; сразу начали говорить о триггерном воздействии внешних факторов на сейсмический процесс, однако физика этого процесса не обсуждалась, физическая суть триггерного эффекта не давалась, и не обсуждалось возможное физическое поле, которое могло бы активировать сам сейсмический процесс.

Триггерные эффекты и триггерные процессы достаточно подробно изучаются в технике, медицине, экономике и других областях знания. Однако смысл этих слов в разных науках может быть различным, как и действующие факторы. В самом общем понимании триггерные эффекты сводятся к реакции объекта на слабое внешнее воздействие (триггерная стимуляция) и существованию триггерной зоны внутри объекта, имеющей самый низкий порог реакции. Однако внешнее воздействие может как носить силовой характер, так и изменять состояние (структуру, строение) объекта в текущих условиях (специфичное действие). К этим определениям необходимо добавить классическое определение из радиотехники, где система может длительное время находиться в одном из устойчивых состояний и переводиться в другое состояние при слабом внешнем воздействии. Такую систему тоже называют триггерной, хотя тип воздействия здесь специфический.

Особенностью же большинства природных или живых объектов является отсутствие у них устойчивых и метастабильных состояний; они перманентно, т.е. непрерывно, поддерживаются в неустойчивом состоянии. К таким системам относится и геологическая среда. Очевидно, что такую среду нельзя отождествлять с лабораторным образцом даже в первом приближении. Смысл триггерного воздействия в геофизике заключается, как полагали, в следующем: слабые внешние воздействия на среду должны изменить объемно-напряженное состояние и снять накапливаемые тектонические напряжения, вызвать разрядку тектонических напряжений за счет слабых событий или крипа, т.е. это силовой тип триггерного воздействия. Однако если принять концепцию силовой “триггерной” разрядки напряжений в геологической среде на основе лабораторных данных [Соболев, 1993] с учетом реологических параметров геологической среды [Николаевский, 1982], то сильных землетрясений в условиях постоянно действующих фоновых полей вообще не должно быть. Наблюдался бы только фоновый сейсмический режим, природу которого также необходимо было объяснить.

Предполагаемые постоянно действующие возможные природные источники таких триггерных воздействий хорошо известны: это упругие волны землетрясений различной силы, скачки атмосферного давления, лунные приливы. Также к подобным источникам воздействий можно отнести упругие волны обычных и ядерных взрывов. Что же касается возможных действий электромагнитных полей различной природы, например, магнитных бурь или МГД-генераторов, то механизм их воздействий с самого начала не находил элементарного понимания, однако может быть интерпретирован в рамках дегазационной модели [Гуфельд, 2019].

Поиск триггерных явлений (эффектов) в геологической среде отличался от поиска таковых в других известных объектах тем, что мы не знали заранее, какой реальный стимулирующий фактор действует на процессы в среде, какие процессы происходят в

ней после воздействий и отражает ли контрольный мониторинг эти процессы. Поэтому в центре исследований и анализа должно было быть обсуждение физики самого сейсмического процесса и физических основ действия различных факторов, инициирующих сейсмический процесс в геологической среде и влияющих на него. Главный вопрос здесь: какие процессы, от самых слабых (фоновых) до сильнейших, поддерживают или активируют непрерывность сейсмичности, и связана ли эта непрерывность сейсмического процесса с триггерными воздействиями, оказывающими силовое действие или вызывающими изменения параметров среды в различных структурах?

Геологическая среда. Особенности объекта мониторинга

Прежде нужно представлять, со средой на какой глубине мы работаем, поскольку от глубины зависят такие параметры среды, как структура, действующие силы, фоновое состояние. Поверхностный слой литосферы не нагружен, расслоен, в нем из-за наличия свободной поверхности в принципе не могут накапливаться напряжения, на него оказывают существенное влияние метеорологические факторы, лунные приливы, микросейсмы; в этом слое также наблюдается активная флюидодинамика. Однако в поверхностном слое находят свое отражение процессы, происходящие в более глубоких слоях, начиная с 5–7 км, где за счет литостатического давления среда переходит в трещиноватое состояние; на этой глубине достигается уже предел упругости. При наличии флюида происходит дополнительное микроразрушение. Более высоких напряжений достичь нельзя, поэтому не может идти речь о накоплении дополнительных напряжений – среда уже находится в почти предельном по упругой энергии напряжении. При медленном и непрерывном реидном течении среды сильные сейсмические акты (события) вообще не могут происходить в этих условиях, однако в реальности они происходят.

При землетрясениях снимается малая часть фоновой (предельной) упругой энергии, максимум десятки бар (критическая деформация для литосферы около 0.0001) [Николаевский, 1980, 1982]. Следовательно, проблемы накопления и разрядки напряжений в среде не существует: среда находится в критическом состоянии [Садовский, Писаренко, 1991]. Большинство сильнейших сейсмических актов происходит на уже существующих границах блоков и плит, и это не разрывы или трещины (трещина представляется пороговым актом), а быстрые подвижки блоков или отдельных относительно друг друга. Аналогичная ситуация наблюдается для сейсмического процесса внутри океанических плит в зонах субдукции и внутри блоковых структур: сейсмический процесс контролируется состоянием межблоковых граничных структур, а не процессами трещинообразования. Сейсмичность океанической коры зоны субдукции и внутривблоковая сейсмичность, кроме того, не разрушают среду, иначе среда превратилась бы в песок [Садовский, Писаренко, 1991].

Однако параметры предельно энергонасыщенной среды испытывают непрерывные вариации, т.е. среда находится в перманентно неустойчивом состоянии [Динамические..., 1994; Лукк и др., 1996]. Наблюдаемые быстрые разномасштабные и несинхронные изменения полей происходят в условиях квазипостоянных градиентов литостатического давления и температуры, в условиях реидного течения. Быстрые (порядка нескольких часов) вариации параметров среды не могут быть связаны с медленными тектоническими движениями, но они отражают слабые вариации объемно-напряженного состояния (ОНС) среды и влияют на вариации скоростей сейсмических волн, являющихся структурно чувствительными параметрами.

Изменения параметров среды зафиксированы в вариациях скоростей сейсмических волн в верхней мантии и литосфере, имеющих определенную периодичность;

была также показана периодичность глубокофокусных событий в интервале 6–12 лет [Гамбурцева и др., 1982; Ан, Люкэ, 1992; Поликарпова и др., 1995; Адушкин и др., 2001]. Была обнаружена быстрая реакция поверхностных слоев литосферы с последующей активизацией глубокофокусных сейсмических событий (ГФС) [Дода и др., 2013; Фирстов, 2014; Пулинец и др., 2015; Фирстов и др., 2015, 2016; Щекотов и др., 2015; Болдина, Копылова, 2017], при этом сами ГФС не могут быть обусловлены представлениями о механическом развитии процесса [Гуфельд, Новоселов, 2021]. Приводились данные, указывающие на активизацию слабой сейсмичности самими землетрясениями, происходящими на значительном расстоянии от зон возбуждения [Николаев, Верещагина, 1991б; Попова и др., 2003, 2007]. Наконец, в работе [Гуфельд, Новоселов, 2021] показаны условия возбуждения сильнейших сейсмических событий вертикальными процессами переноса энергии водородом и упругими волнами слабых сейсмических событий с глубин гипоцентров менее 100 км (образование “сейсмических гвоздей”).

Хотя уже в конце 1980-х годов было показано, что геологическую среду при оценках сейсмической опасности нельзя упрощенно представлять как монотонно нагружаемый или находящийся под нагрузкой монолитный образец, приведенные во многих работах результаты исследований геологической среды и происходящих в ней процессов позволили предложить дегазационную модель сейсмического процесса вместо разрывной модели.

Показано, что водородная дегазация контролирует объемно-напряженное состояние и структурные особенности среды до глубин верхней мантии, т.е. до 600–700 км. Наблюдаемая чувствительность литосферы к проявлениям глубокофокусных событий указывает на механизм связи между ними через водородную дегазацию. Предложены модели коровых и глубокофокусных сейсмических событий, связанных между собой и инициирующих друг друга, при этом данные модели исключают процессы накопления упругих напряжений и разрушения. Сейсмические акты на глубинах выше границы Мохо обусловлены быстрыми подвижками элементов среды относительно друг друга, контролируемыми влиянием водородных потоков на структуру граничных слоев [Гуфельд, Новоселов, 2017], тогда как сейсмические акты ниже границы Мохо связываются с взрывной деформацией водородной подрешетки среды. При этом показано, что локализованные сейсмические акты на глубинах менее 100 км (“сейсмические гвозди”) могут очень быстро осуществить активацию сильнейших событий в литосфере за счет вброса в эти зоны водорода как атома внедрения и действия упругих волн событий в структуре “сейсмического гвоздя” [Гуфельд, Новоселов, 2021].

Имея представления о среде, процессах, протекающих в ней, и природе сейсмических актов, можно перейти к обсуждению эффектов триггерных воздействий. При этом главным вопросом является понимание природных воздействий на сейсмический фоновый режим, инициирующих или поддерживающих фоновый сейсмический процесс. Очевидно, что для влияния на сейсмический процесс действующие поля должны иметь силовую природу или изменять структурные параметры среды. Отслеживать же эти воздействия можно только по режиму сейсмичности.

О критериях прямых силовых воздействий на объекты

Именно малость вводимой в среду энергии и неопределенность в представлениях о процессах взаимодействия действующих полей со средой заставляют задуматься о реальности реакции среды на действие ряда факторов, учитывая, что в существующих до сих пор представлениях сейсмический акт, т.е. трещина, является пороговым событием. В качестве критерия силы воздействия обычно принимается соотношение энергии,

вводимой в объект, с энергией тепловых флуктуаций kT , где k – постоянная Больцмана; T – температура (при нормальных условиях $kT \sim 4 \cdot 10^{-21}$ Дж, при экстремальных температурах эта величина больше). Очевидно, что нельзя сравнивать по действию на среду энергии электромагнитных и волновых сейсмических источников, не рассматривая природу их взаимодействия со средой. В связи с этим представляется уместным сравнить ситуации с триггерным воздействием на образцы и реакцию геологической среды на различные способы воздействий на нее.

Лабораторные эксперименты (см. список литературы в [Гуфельд, 2007]). Образцы нагружались до уровня $\sigma \sim 0.9\sigma_k$, где σ_k – предельное напряжение нагрузки. Контролировались деформация и акустическая эмиссия (АЭ) при действии весьма слабых внешних полей (удары падающих тел, воздушные потоки, вибровоздействия, микросейсмы, электромагнитные поля с плотностью энергии на единицу объема образца $10^{-10} \dots 10^{-13}$ Дж/м³). Для всех способов воздействия наблюдалась скачкообразная деформация. Отмечались запаздывание реакции АЭ относительно моментов воздействий и усиление активности АЭ после окончания воздействий. Если предположить, что разрушающие тепловые флуктуации охватывают объемы в несколько атомов, т.е. $\Delta V \sim 10^{-21}$ см³ [Куксенко, 1983], то энергия воздействия, распределенная на один элементарный объем ΔE , будет лежать в интервале $10^{-27} \dots 10^{-30}$ Дж. Эта величина существенно меньше энергии тепловых флуктуаций.

Однако образцы были доведены до стадии пластического деформирования или близкой, поэтому эффекты слабых воздействий могут объясняться в рамках термофлуктуационной теории [Журков, 1968]. В таких образцах всегда найдутся локальные участки, для которых энергия воздействия $\Delta E \geq (U - \gamma\sigma)$, где U – энергия активации; σ – напряжение; γ – показатель концентрации напряжений. Это триггерный эффект, хотя $\Delta E \ll kT$. Начавшееся локальное микроразрушение вызывает перераспределение полей внутренних напряжений на длине дислокационного стока и поэтому стимулирует, с некоторым запаздыванием, дальнейшее трещинообразование на мезо- и микроуровнях. Такие локальные микроразрушения, сопровождаемые пластической деформацией, не снимают упругой энергии в образце; увеличение концентрации дефектов – микротрещин – приведет лишь к уменьшению времени ожидания макроразрыва. Ситуация в лабораторных экспериментах, таким образом, достаточно очевидна.

Геологическая среда. Естественные и техногенные источники упругих волн. В рассмотрении триггерных явлений в геологической среде мы также должны учитывать предельную энергонасыщенность, однако ситуация здесь принципиально другая. Идеология триггерной реакции среды может быть основана на представлениях, приведенных в [Николаевский, 1980, 1982; Садовский, Писаренко, 1991]. В многочисленных работах было показано, что сейсмическая реакция геологической среды на действие внешних слабых источников не была очевидной и внятной, если мы говорим о триггерном воздействии. Очевидным являлось то, что на среду одновременно и непрерывно действуют различные фоновые природные силы: лунные приливы, микросейсмы, вариации атмосферного давления, упругие волны близких и удаленных землетрясений. В период их действия изучалась также реакция среды на действие отдельных техногенных факторов с упругими источниками энергии – подземных ядерных взрывов (ПЯВ) [Николаев, Верецагина, 1991а; Тарасов, Тарасова, 1995]. Природа сейсмической реакции геологической среды на действие внешних естественных и техногенных источников практически не обсуждалась.

Однако в истоках этой дискуссии лежали глубочайшие заблуждения, согласно которым слабая сейсмичность как реакция среды на внешнее воздействие вызывает рядку тектонических напряжений (или тектонической энергии). Между тем известно,

что даже при сильнейших землетрясениях снимается лишь малая часть фоновой упругой энергии, обусловленной литостатической нагрузкой выше границы Мохо. Очевидно, что для оказания быстрого или непосредственного влияния на среду энергия воздействий должна быть как минимум порядка тепловой энергии $\Delta E \sim kT$.

Сравним энергии источников и ΔE . Для упругих волн сейсмических событий, например, $M=6.0$ на расстоянии 1500 км (расстояние от полигона ПЯВ до Памиро-Гиндукушской зоны), энергия составляет $\Delta E = 2 \cdot 10^{-38}$ Дж; для приливных деформаций $\Delta E \sim 10^{-26} - 10^{-27}$ Дж; для скачков атмосферного давления величиной 100 мбар $\Delta E \sim 10^{-29}$ Дж. Как видим, энергия источников воздействия существенно меньше тепловой энергии. Что тогда означает “реакция” среды в виде сейсмических актов с энергией $K=6.5-10$ на отдаленную сейсмичность и техногенное воздействие ПЯВ? Заметим, что при анализе воздействий на среду ПЯВ строились кумулятивные графики на длительных отрезках времени, т.е. при существенно разных состояниях среды.

При рассмотрении действия на среду глубокофокусных землетрясений и подземных ядерных взрывов очевидным является ведущий фактор, а именно – упругие волны рассматриваемых источников. Однако это не упрощает понимание возникающих ситуаций; в рамках механических представлений трудно что-либо понять. В целом приводимые упомянутыми выше авторами результаты удивительны; коротко опишем здесь эти результаты.

В работах [Николаев, Верецагина, 1991а,б] показана активизация сейсмичности после ПЯВ и глубокофокусных Памиро-Гиндукушских событий (ПГС) на территории всей Средней Азии и Кавказа, причем максимум активизации происходил в первую десятидневку после ПЯВ и первую пятидневку после ПГС. После ПЯВ сильнее активизировались глубокофокусные события, однако активизация наблюдалась по всей контролируемой глубине. В то же время глубокофокусные события, в свою очередь, влияют на сейсмичность Среднеазиатского региона и Кавказа. ПЯВ могут влиять на сейсмичность непосредственно в ближней зоне источников и опосредованно через инициирующее действие инициированных ими землетрясений. Здесь опять подчеркивается роль упругих сейсмических волн. Заметим, что наличествуют запаздывание активизации сейсмичности после ПЯВ и одновременная активизация событий в широком диапазоне глубин. Учитывая задержку активизации, можно сделать очевидные выводы об отсутствии триггерного эффекта (для порогового сейсмического акта) и стимулирующем действии сейсмических волн на какие-то другие процессы в среде.

При воздействии на среду сейсмическими волнами ПЯВ также наблюдалась активизация среды в зоне Гармского полигона [Тарасов, Тарасова, 1995]. Расстояние от зоны ПЯВ до полигона – около 1400 км. Суммарный удельный поток энергии всех ПЯВ на расстоянии 1000 км оценивался величиной порядка 10^{-5} Дж/м³ [Кедров, Кедров, 2002]. При рассмотрении кумулятивный анализ действия ПЯВ на среду была обнаружена сейсмическая активизация в широком диапазоне глубин, включая глубины верхней мантии, причем отклик слабой сейсмичности был более сильным. Наибольшая реакция среды была в первые 5–10 суток после события; появлялась также активизация сейсмичности через 35–40 сут после взрывов. Такие задержки реакции и активизация сейсмичности в широком диапазоне глубин и на больших расстояниях также вызывают вопросы о природе действия триггерных эффектов.

Однако в работах по оценке влияния ПЯВ и глубокофокусных событий на сейсмический процесс не учитывалось действие мощных техногенных источников в Памиро-Гиндукушской зоне, энергия воздействия которых близка к тепловой энергии $\Delta E \sim kT$. Эта ситуация реализуется в зонах водохранилищ [Сейсмологические..., 1987]. Так, в зоне Нурекской ГЭС изучалось влияние на сейсмический режим двух факторов:

изменения уровня воды и возбуждения в среде вибраций, обусловленных энергией сброшенных вод и контролируемых по уровню микросейсм (площадь анализа $0.3^\circ \times 0.4^\circ$).

Наиболее интересен анализ действия на среду вибраций. С увеличением уровня микросейсм число и энергия сейсмических событий уменьшались, а при максимальном уровне микросейсм события с $K > 11$ не наблюдались. Изменение сейсмического режима наблюдалось при пороговом уровне, соответствующем вводимой в среду энергии 10^{14} Дж/сут; энергия сброшенной воды в максимуме оценивалась величиной 10^{15} Дж/сут. Для этих значений приходящая на один элементарный объем действующая энергия составляет $\Delta E \sim (0.01-4)kT$ для объема среды $1-25 \text{ км}^3$. В зоне водохранилищ за счет сброса воды происходит непрерывная накачка среды сейсмической волновой энергией на уровне 10^9-10^{10} Дж/с, что существенно больше энергии волновых сейсмических воздействий на среду.

Безусловно, наблюдаемая сейсмическая реакция обусловлена изменениями параметров среды, активирующими, скорее всего, “тихие землетрясения”, т.е. медленные подвижки элементов среды относительно друг друга – это реакция среды в ближней зоне мощных источников упругих волн. Однако нельзя исключить, что ситуация в ближней зоне гидроэлектростанций будет оказывать влияние на кинетику дегазации водорода из глубины и поверхностных слоев на больших расстояниях, активируя тем самым сейсмическую реакцию на различных глубинах [Гуфельд, Новоселов, 2021].

О доказательствах инициирования землетрясений слабыми упругими волнами других землетрясений

В приведенных выше работах была показана реакция геологической среды на действие внешних слабых источников упругих полей. Она не была совсем очевидной и внятной, если мы говорим о триггерном воздействии источников с энергией, существенно меньшей тепловой. Чтобы делать объективные выводы о возможной природе действия таких слабых источников, нужно рассматривать детали, на которые ранее не обращали внимание. Прежде всего нужно сказать о том, что в приведенных работах сейсмический акт рассматривали как трещину – разрыв. Разрыв в среде – это пороговое явление, и триггерное воздействие здесь (т.е. в геологической среде с совершенно другими масштабами по сравнению с лабораторным образцом) не работает. Так как мы рассматриваем предельно энергонасыщенную среду, сейсмический акт, как было показано выше, – это быстрая подвижка. Ни на какие крупномасштабные процессы в литосфере слабые силовые естественные и техногенные поля влиять не могут. Однако приведенные наблюдения реальны, и они что-то отражают.

В триггерных исследованиях никогда не задавались вопросом, есть ли какие-то процессы или явления, на которые влияли бы природные слабые поля. В этой связи обратим внимание на особенности возбуждения сейсмического шумового поля (СШП) и его высокочастотной составляющей (ВСШ). В сейсмическом шуме (периоды от 10^{-3} с до десятков секунд) проявляются различные частоты внешних воздействий – штормовых микросейсм, лунно-солнечных приливов, а также солнечно-суточная составляющая. Так, в [Рыкунов и др., 1980а,б, 1982] было обнаружено явление модуляции высокочастотных сейсмических шумов в диапазоне 10–60 Гц. В ряде работ рассматривалось влияние приливов и особенностей вращения Земли на слабую сейсмичность [Рыкунов, Смирнов, 1985а; Горькавый и др., 1994; Авсюк, 1996; Левин, Чирков, 1999; Bucholz, Steacy, 2016; Scholz et al., 2019].

Наиболее же яркой была работа [Рыкунов, Смирнов, 1985б], где было показано, что СШП не просто коррелирует с действием внешних фоновых полей: характерной особенностью сейсмического шумового отклика среды являются его однонаправленность и

асимметрия. Эти однонаправленность и ассиметрия разномасштабного сейсмического отклика среды, а именно существование всплесков излучения и отсутствие резких и коротких понижений интенсивности, указывают на то, что слабое внешнее воздействие может усилить, но не может ослабить излучение средой сейсмической энергии. Поэтому внешнее деформационное воздействие можно называть триггерным. В связи с этим возник вопрос: могут ли штормовые микросейсмы и лунно-солнечные приливы вызывать и поддерживать наблюдаемый уровень сейсмического шума [Рыкунов, Смирнов, 1985б]? Авторы оценили эти возможности.

Можно было полагать, что затухание штормовых микросейсм обусловлено переизлучением их энергии в виде высокочастотного шума. Отношение потоков высокочастотного шума ($f \approx 30$ Гц) и штормовых микросейсм составляет величину около 0.3. Характерное расстояние затухания сейсмической волны в диапазоне десятков герц равно приблизительно 30 км, т.е. на этом расстоянии микросейсмическая волна теряет 30 % своей энергии; полностью же эта волна затухнет на расстоянии около 100 км. Однако характерное расстояние затухания штормовых микросейсм – около 3000 км. Отсюда следует явное противоречие экспериментальным фактам, т.е. штормовые микросейсмы не могут служить энергетическим источником высокочастотного сейсмического шума.

Допускалось также, что высокочастотный шум возбуждается за счет диссипации энергии приливных деформаций. Но удельная энергия приливных деформаций составляет 10^{-5} Дж/м³, удельная мощность диссипации приливных деформаций – около 10^{-18} Вт/м³, а удельная мощность источников высокочастотного сейсмического шума – 10^{-11} – 10^{-12} Вт/м³. Поэтому приливные деформации также не могут быть источником высокочастотного сейсмического шума.

На основании оценок данных и их анализа авторы [Рыкунов, Смирнов, 1985б] делают весьма важный вывод: так как энергия внешних деформирующих процессов недостаточна для поддержания сейсмического шумового излучения, среда обладает собственным запасом энергии, который обеспечивает непрерывное и разнопериодное сейсмическое шумовое излучение. Среда энергетически насыщена, т.е. находится в неравновесном состоянии. Этот вывод в свое время остался незамеченным, по-видимому, из-за того, что не было общего понимания особенностей геологической среды и процессов, протекающих в ней. Непрерывное шумовое сейсмическое излучение, наблюдаемое в широком диапазоне частот, включая десятки килогерц, указывает на два существенных вывода: 1) мы имеем дело со сложной и связанной структурной системой [Рыкунов, Смирнов, 1985б]; 2) процессы, ответственные за вариабельность параметров в геологической среде от локального до регионального масштаба, обусловлены эндогенной активностью Земли.

Водородная дегазация, отражая разномасштабную эндогенную активность, позволяет говорить о среде с внутренними источниками энергии, контролирующими кинетику процессов взаимодействия восходящих потоков легких газов с твердой фазой литосферы [Гуфельд и др., 1998; Гуфельд, 2007]. Действие внешних сил на ВСШ носит второстепенный характер. Однако долговременное действие приливных деформаций может оказывать влияние на процессы дегазации легких газов из твердых структур, подтверждением чего могут быть эффекты модуляции высокочастотных сейсмических шумов [Рыкунов и др., 1980а].

Источники излучения СШП связаны с декомпрессионными процессами всплывающих газовых пузырей во флюиде [Гуфельд и др., 2008]. СШП фактически управляются восходящими потоками легких газов в широком диапазоне температур, включая нормальные. Это означает, что в геологических условиях конкуренцию термическим флуктуациям может составить реакция самой среды на взаимодействия восходящих

потоков легких газов с ней, не изменяющие при этом степень напряженного состояния, т.е. предельную энергонасыщенность среды, а влияющие на параметры граничных структур, которые контролируют взаимное быстрое или медленное движение блоков (отдельностей) относительно друг друга.

Такая активизация среды при одновременном мониторинге состояния среды в контрольной зоне (зона полигона 70×70 км) и контроле приходящих слабых сейсмических волн от отдаленных источников была показана в работах [Попова и др., 2003, 2007]. Степень напряженного состояния среды оценивалась по параметру $\gamma = E_r/E_v$, который характеризует анизотропные свойства среды (E_v и E_r – энергии обменных волн PS , зарегистрированных соответственно на тангенциальной и радиальной компонентах записи).

Рассматривалось действие на полигон упругих волн от трех сильнейших землетрясений:

1. Первое Суматранское событие 26.12.2004 г., $M=9.0$, удаленность от полигона 6800 км, длительность регистрации поверхностных волн – около 6 ч;
2. Второе Суматранское событие 28.03.2005 г., $M=7.2$, удаленность от полигона 6800 км, длительность регистрации поверхностных волн – 3 ч;
3. Пакистанское событие 08.10.2005 г., $M=6.0$, удаленность от полигона 2700 км, длительность регистрации поверхностных волн – около 75 мин.

После первого Суматранского землетрясения произошла резкая перестройка анизотропных свойств среды, которая усиливалась в течение первых трех суток; увеличивается контрастность повышенных значений параметра γ по полигону. По оценкам, энергия воздействия источника упругих волн лежит в пределах $\Delta E \sim 10^{-25} - 10^{-28}$ Дж в зоне полигона. В последующие два месяца степень анизотропности несколько уменьшилась, затем в период после второго Суматранского события несколько 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 радиусе до 250 км от сети мониторинга зафиксировано усиление местной сейсмической активности с магнитудами более 4. Такие же события также произошли в пределах полигона. Очевидно, что степень напряженного состояния среды не могла измениться, а изменение степени анизотропии могло быть связано с активизацией водородного потока и его влияния на параметры граничных структур различного ранга. Здесь также наблюдается задержка активизации, хотя среда предельно энергонасыщена и всегда находится в поле физических и фоновых полей на грани “срыва”, где, однако, не контролируются “тихие события” в сейсмическом процессе.

Заметим, что активизация сейсмичности не могла быть связана также с прямым триггерным эффектом действия слабых сейсмических волн. Еще раз подчеркнем, что восходящие потоки легких газов могут управляться слабыми упругими волнами микро-сейсм или слабых и отдаленных сейсмических событий во взаимодействии с лунно-солнечными приливами, энергия которых меньше энергии тепловых флуктуаций на 5–6 порядков.

Во всех упомянутых работах представлен [Попова и др., 2003] единственный контролируемый на среде эксперимент, где показано не прямое возбуждение сейсмической активности упругими волнами сейсмических событий.

Триггерные эффекты слабой сейсмичности в литосфере

Еще раз обращаем внимание на выдающийся результат моделирования – это иницирование землетрясений землетрясениями [Николаев, Верецагина, 1991б]. В рамках

дегазационной модели сейсмичности эти идеи дают возможность рассматривать сейсмический процесс и его динамику с реальных позиций. Зададим вопрос: почему непрерывно наблюдается слабая и средняя сейсмичность в виде быстрых подвижек в условиях весьма медленных тектонических движений (деформаций) и квазипостоянных градиентов температуры и давления? Разномасштабность, несинхронность и широта спектра изменений различных параметров среды исключает действие тектонических силовых полей. Кроме этого, действующий фактор должен иметь планетарный характер. Поэтому влияние на поле напряжений подвижных восходящих потоков легких газов представляется основным переменным фактором, определяющим и поддерживающим текущую неустойчивость литосферы вблизи предельного уровня энергонасыщенности. Это было отмечено еще в [Гусев, Гуфельд, 2006].

Сейсмический процесс контролируется дегазацией, а упругие волны отдельных сейсмических актов (совместно с приливными деформациями), в свою очередь, активируют, с некоторой задержкой, вокруг себя ареал событий (медленных или быстрых подвижек), которые уже сами активируют следующие события на большем расстоянии от условно первого события. В этой цепной реакции в литосфере участвуют также “тихие события”, число которых, по-видимому, весьма велико. Инициирование этих сейсмических актов, конечно, контролируется самой средой с учетом степени воздействия упругих волн на окружающее пространство. При этом объемно-напряженное состояние среды не изменяется.

В заключение этого параграфа необходимо обсудить вопрос об объективности оценки влияния упругих волн ПЯВ на активизацию сейсмической активности. Если речь идет об активизации сейсмической активности упругими волнами от сейсмических источников, то этот вопрос связан с расстоянием от сейсмического источника до зоны мониторинга и энергией волны, способной к активизации водородной дегазации. Эксперименты О.Г. Поповой с коллегами [Попова и др., 2003, 2007] позволяют сделать тестовые энергетические оценки процессов воздействия слабых упругих волн на сейсмический процесс. Эти тесты интересно использовать также для оценки реальности воздействий на сейсмический процесс ПЯВ и сильных глубокофокусных землетрясений. В указанных работах показано, что энергия упругих волн в зоне мониторинга весьма мала и не может иметь триггерного действия.

Для оценки энергетического критерия активации в геологической среде различных процессов сейсмическими волнами М.А. Садовский ввел параметр, названный приведенным расстоянием: $L=R/E_c^{1/3}$, где E_c – сейсмическая энергия источника; R – расстояние от источника до зоны мониторинга [Гохберг и др., 1987]. Если мы знаем значение параметра L для различных зон или сред, то можем оценить дальноедействие влияния источников упругих волн на различные процессы. Покажем, что дают эти оценки.

Первое Суматранское событие: параметр $L=5.5$ м/Дж^{1/3}. Второе Суматранское событие и Пакистанское событие не изменяют параметры среды в зоне Кавминводского региона; заметим, что продолжительность возбужденного состояния этой зоны после первого Суматранского события составила более 6 мес.

Если по этим данным оценивать дальноедействие источников ПЯВ, то получим следующие значения. Для магнитуды источника $M=5.0$ дальноедействие будет $R=60$ км, а для источника с $M=6.0$ – $R=250$ км. Поэтому нельзя было ожидать от ПЯВ реакции среды в Памиро-Тяньшаньской зоне, расстояние до которой было около 1500 км. Такая же процедура оценок была выполнена при исследованиях чувствительности среды к возбуждению электромагнитного излучения в поверхностных слоях коры при прохождении упругих волн от взрывных источников. Эти исследования проводили на различных грунтах: массив известняка, песчаный грунт, скальные породы различной степени

разрушенности. Оказалось, что для этих пород возбуждение ЭМИ происходило в интервале значений $L=4-8$ м/Дж^{1/3} [Гуфельд и др., 2003].

Мы привели оценочные расчеты (такие расчеты хорошо работали и в других областях), показывающие предельные границы воздействия на среду слабых упругих волн сейсмических источников, действия которых не являются триггерными. Эти волны не могут оказывать влияние на изменение напряженного состояния среды, однако запускают активизацию водородного потока, влияющего на параметры граничных структур, в результате чего активизируются быстрые (сейсмические события) и медленные (“тихие землетрясения”) подвижки в поле уже действующих сил.

Приведем оценки дальнего действия для упругих волн от сейсмических источников. Для различных магнитуд событий предельные расстояния при $L=5.5$ м/Дж^{1/3}: $M=2.0 - R=2$ км, $M=3.0 - 6$ км, $M=4.0 - 20$ км, $M=5.0 - 60$ км, $M=6.0 - 250$ км, $M=7.0 - 1200$ км, $M=8.0 - 2500$ км. Здесь нужно также учитывать, что реакция среды на прохождение упругих волн будет в значительной мере зависеть от ее свойств и параметров (структура, насыщенность водородом и другие факторы).

Таким образом идея “инициирования землетрясений землетрясениями” получает подтверждение в геологической среде, причем речь идет о возбуждении фоновых сейсмических событий с магнитудой менее 5 и преимущественно фоновых “тихих землетрясений” в широком диапазоне расстояний от источников. Это значимый вывод для анализа сейсмического процесса. Фоновый сейсмический режим можно рассматривать как самоподдерживаемый процесс, движущей силой которого является водородная дегазация.

Более детально о фоновом режиме мы можем говорить на примере океанической плиты в зоне субдукции, которая сохраняет конструкционную целостность при непрерывных “сейсмических событиях” в ней, не являющихся трещинами. Непрерывный колебательный режим движений в среде, обусловленный взаимодействием восходящих потоков водорода с твердой фазой среды, отражает возбуждение разномасштабных бегущих деформационных волн диффузионной природы и шумовой, несинхронный характер колебаний большого числа элементов среды независимо друг от друга [Гуфельд, Новоселов, 2015, 2016, 2017, 2021]). В такой среде говорить о признаках возможных сильных сейсмических событий можно только при редких процессах синхронизации колебательных движений многих элементов среды. Сильнейшие сейсмические события активизируются по другому алгоритму [Гуфельд, Новоселов, 2017, 2021; Гуфельд, 2019]. Однако и здесь первичным процессом, по-видимому, являются упругие волны “сейсмических гвоздей”, или “гвоздей Вадковского”, формирующиеся в верхней мантии и проникающие в литосферу. Естественно, что эти акты сопровождаются дополнительны вбросом водорода в литосферу [Гуфельд, Новоселов, 2021].

Заключение

Многочисленными работами (см. списки литературы в [Гуфельд, Новоселов, 2017, 2020, 2021; Гуфельд, 2019]) показана правомерность и необходимость смены разрывной идеологии сейсмического процесса на дегазационную, включая глубины гипоцентров от поверхности и до 600–700 км. Ключевое положение разрывной идеологии о необходимости накопления упругой энергии в литосфере до критического уровня не получило подтверждения.

Эти исследования показали, что литосфера предельно энергонасыщена и перманентно неустойчива за счет литостатического давления и процессов взаимодействия водородной дегазации со средой. Одним из основных доказательств переноса водородным потоком энергии снизу является перманентная неустойчивость литосферы,

проявляющаяся в непрерывных вариациях структурно чувствительных скоростей сейсмических волн. Наблюдения локальных сейсмических узлов (ЛСУ) – “гвоздей” Вадковского – на глубинах менее 100 км являются прямым указанием на перенос энергии водородом снизу и вероятную активизацию сильнейшей сейсмичности в литосфере, хотя ее уровень может быть различным [Гуфельд, Новоселов, 2021].

Другим ключевым вопросом, требующим объяснение, была природа глубокофокусных сейсмических событий. Заметим, что до сих пор было принято рассматривать развитие сейсмотектонических ситуаций на различных глубинах исходя из механики разрушения. Неприемлемость механических подходов для понимания природы ГФС была показана уже на основе физических представлений о невозможности разрывных процессов и обратимых фазовых переходов в условиях высоких давлений. Природа глубокофокусной сейсмичности связывается со “взрывным” выбросом водорода как атома внедрения из кристаллических структур [Гуфельд, Новоселов, 2021].

Коллегами с Камчатки также были обнаружены быстрая реакция геофизических полей (см. ссылки в [Гуфельд, Новоселов, 2020, 2021]) и сейсмическая активизация поверхностных слоев непосредственно перед ГФС. Эти наблюдения подтверждают сделанные ранее выводы о предельном заполнении твердой фазы среды водородом, чем объясняется ее перманентная неустойчивость на различных глубинах, и быстрым эстафетным механизмом передачи энергии водородом снизу к поверхности. Еще один ключевой результат: показано не только локальное развитие дегазационных процессов из глубины к поверхности по последовательности сейсмических актов, но и активизация более глубоких слоев после активизации вышележащих. Дополнительным примером этого стали наблюдения активизации Охотоморского глубокофокусного события после предварительной разгрузки среды в литосфере [Гуфельд, Новоселов, 2021].

Накопленные за пятьдесят лет, а также за самые последние годы, данные о строении геологической среды и процессах в ней, данные о взаимосвязи глубокофокусных событий с коровыми и наблюдения кратковременных особых состояний среды и сейсмического режима показывают, что непрерывная динамика геологической среды обусловлена прохождением восходящих потоков водорода. Сейчас мы уже понимаем, за счет каких процессов геологическая среда перманентно неустойчива и какие процессы связывают глубокофокусные сейсмические акты с литосферной сейсмичностью.

Проведенные исследования показывают, что краткосрочное предупреждение о сейсмической опасности может иметь определенные перспективы, с учетом того, что в рамках дегазационной модели выделяется пространственное положение вероятной эпицентральной зоны вероятного сильнейшего события [Гуфельд, Новоселов, 2021]. Следует также учесть, что, кроме сейсмических “гвоздей”, основанием для такого заключения могут быть контролируемые режимы синхронизированных колебаний многих элементов среды зоны субдукции, а также данные теплового спутникового мониторинга. Проблема точности таких оценок на основе данных комплексного мониторинга требует новых исследований.

Финансирование

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: Научный мир, 1996. 188 с.
- 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 Академии наук. 2001. Т. 381, № 6. С.822–824.
- Ан В.А., Люкэ Е.И. Циклические изменения параметров сейсмической волны P на трассе Невада–Боровое // Физика Земли. 1992. № 4. С.20–31.
- Болдина С.В., Копылова Г.Н. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w=7.2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 4. С.863–880. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>
- 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 // Доклады АН СССР. 1982. Т. 266, № 6. С.1349–1353.
- Горькавый Н.Н., Трапезников Ю.А., Фридман А.М. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли // Доклады Академии наук. 1994. Т. 338, № 4. С.525–527.
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Козырева О.В., Никифорова Н.Н., Рожной А.А., Соловьева М.С., Федотов А.Я. Электромагнитное излучение горной среды в условиях взрывного нагружения // Докл. АН СССР. 1987. Т. 295, № 2. С.321–325.
- Гусев Г.А., Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс в предельно энергонасыщенной геологической среде и прогноз землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С.71–78.
- Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
- Гуфельд И.Л. Сейсмическая опасность: предотвратить или предупредить. М.: Сам Полиграфист, 2019. 98 с.
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Безбарьерный сейсмический процесс в зоне субдукции и принципы его мониторинга // Доклады Академии наук. 2015. Т. 464, № 6. С.716–721. <https://doi.org/10.7868/S0869565215300180>
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Диагностирование предкатастрофических состояний среды зоны субдукции, предшествующих сильнейшим и мегасейсмическим событиям // Доклады Академии наук. 2016. Т. 468, № 6. С.694–698. <https://doi.org/10.7868/S0869565216180183>
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Мониторинг состояния среды зоны субдукции. Возможности краткосрочной оценки сейсмической опасности // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 3. Вып. 34. С.77–89.
- Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Сейсмичность как реакция геологической среды на планетарную водородную дегазацию (на примере Камчатского региона). Часть 1: Принципы мониторинга активной геологической среды. Противоречия разрывной и дегазационной моделей сейсмического процесса // Наука и технологические разработки. 2020. Т. 99, № 3. С.15–39. <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 2. О сейсмическом взаимодействии процессов в верхней мантии и литосфере // Наука и технологические разработки. 2021. Т. 100, № 1. С.24–45. <https://doi.org/10.21455/std2021.1-3>
- Гуфельд И.Л., Гусев Г.А., Матвеева М.И. Метастабильность литосферы как проявление восходящей диффузии легких газов // Доклады Академии наук. 1998. Т. 362, № 5. С.677–680.
- Гуфельд И.Л., Рожной А.А., Соловьева М.С. О радиоизлучении поверхностных слоев земной коры, обусловленном сейсмотектоническим процессом // Моделирование геофизических процессов / Ред. А.Я. Сидорин. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С.47–55.
- Гуфельд И.Л., Гаврилов В.А., Корольков А.В., Новоселов О.Н. Эндогенная активность Земли и декомпрессионная модель сейсмического шума // Доклады Академии наук. 2008. Т. 423, № 6. С.811–814.
- Динамические процессы в геофизической среде / Ред. А.В. Николаев. М.: Наука, 1994. 255 с.

- Дода Л.Н., Натяганов В.Л., Степанов И.В. Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений // Доклады Академии наук. 2013. Т. 453, № 5. С.551–557. <https://doi.org/10.7868/S0869565213350144>
- Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. 1968. № 3. С.46–54.
- Кедров О.К., Кедров Э.О. О влиянии подземных ядерных взрывов на региональную сейсмичность // Физика Земли. 2002. № 3. С.21–34.
- Куксенко В.С. Кинетические аспекты процесса разрушения и физические основы его прогнозирования. Прогноз землетрясений. № 4. Душанбе: Дониш, 1983. С.8–20.
- Левин Б.В., Чирков Е.Б. Особенности широтного распределения сейсмичности и вращение Земли // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С.65–69.
- Лукк А.А., Децерецкий А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.
- Николаев А.В., Верецагина Г.М. Об инициировании землетрясений подземными ядерными взрывами // Докл. АН СССР. 1991а. Т. 319, № 2. С.333–337.
- Николаев А.В., Верецагина Г.М. Об инициировании землетрясений землетрясениями // Докл. АН СССР. 1991б. Т. 318, № 2. С.320–324.
- Николаевский В.Н. Дилатансия и теория очага землетрясений // Успехи механики. 1980. Т. 3, № 1. С.70–101.
- Николаевский В.Н. Земная кора, дилатансия и землетрясения // Райс Дж. 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., Коновалов Ю.Ф., Кухмазов С.У., Минина Н.А., Аверьянова А.С. Особенности геодинамики среды в сейсмоопасном районе Минераловодского выступа // Разведка и охрана недр. 2003. № 2. С. 16–20.
- 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. Тверь: ГЕРС, 2007. С.200–204.
- Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 4. С.540–558. <https://doi.org/10.7868/S0016794015040136>
- 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.
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Лунно-солнечные приливные периодичности в линиях спектров временных вариаций высокочастотных микросейсм // Докл. АН СССР. 1980а. Т. 252, № 3. С. 577–579.
- Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Анализ спектров огибающей высокочастотных микросейсм после Аляскинского и Мексиканского землетрясений в марте 1979 г. // Докл. АН СССР. 1980б. Т. 252, № 4. С.836–838.
- Рыкунов Л.Н., Старовойт Ю.О., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Связь штормовых микросейсм с высокочастотными сейсмическими шумами // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982. № 2. С.88–91.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 95 с.
- Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана / Ред. М.А. Садовский. Душанбе: Дониш, 1987. 120 с.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние ядерных взрывов на сейсмический режим // Доклады Академии наук. 1995. Т. 343, № 1. С.543–546.

- Фирстов П.П. Возможности прогнозов сильных землетрясений по данным радонового мониторинга на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 1. Вып. 23. С.232–245.
- Фирстов П.П., Макаров Е.О., Макчимов А.П., Черняев И.И. Отражение геодинамической обстановки северо-западного обрамления Тихого океана в динамике подпочвенного радона и в газовом составе теплоносителя Мутновской ГеоЭС // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С.43–49.
- Фирстов П.П., Копылова Г.Н., Саломатин А.В., Серафимова Ю.К. О прогнозировании сильного землетрясения в районе полуострова Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 4. Вып. 32. С.106–114.
- Щекотов А.Ю., Чебров В.Н., Берсенёва Н.Ю., Смирнов А.А. Опыт краткосрочного прогноза камчатских землетрясений по электромагнитным предвестникам и оперативной информации о локальной сейсмичности // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Тр. Пятой научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 27 сентября – 3 октября 2015 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2015. С.316–320.
- Bucholz M., Steacy S. Tidal stress triggering of earthquakes in Southern California // Geophys. J. Int. 2016. Vol. 205, iss. 2. P. 681–693. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw045>
- Scholz C.H., Tan Y.J., Albino F. The mechanism of tidal triggering of earthquakes at mid-ocean ridges // Nat. Commun. 2019. V. 10, article 2526. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10605-2>

Сведения об авторах

ГУФЕЛЬД Иосиф Липович – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: igufeld@korolev-net.ru

НОВОСЕЛОВ Олег Николаевич – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Россия, 105005, Москва, ул. Бауманская 2-я, д. 5/1. E-mail: onn-aan@yandex.ru

METADATA IN ENGLISH

About the journal

NAUKA I TEKHNOLOGICHESKIE RAZRABOTKI (SCIENCE AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS), ISSN: 2079-5165, eISSN: 2410-7948, DOI: 10.21455/std; https://elibrary.ru/title_about.asp?id=32295; <http://std.ifz.ru/>. The journal was founded in 1992.

SEISMICITY AS A REACTION OF THE GEOLOGICAL MEDIUM TO PLANETARY HYDROGEN DEGASSING (ON THE EXAMPLE OF THE KAMCHATKA REGION) Part 3. Self-sustained background seismic process due to the trigger effects of hydrogen degassing on the medium

I.L. Gufeld¹, O.N. Novoselov²

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

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Corresponding author: I.L. Gufeld, e-mail: igufeld@korolev-net.ru

Highlights

- The analysis of the possible nature of trigger effects in background seismicity is carried out
- It is shown that the energy of force effects by background elastic fields is less than the energy thermal fluctuations and can not be a trigger factor

- Ascending flows of light gases can be controlled by elastic waves of microseisms or weak seismic events in interaction with lunar-solar tides
- The background seismic process is self-sustaining due to continuous hydrogen degassing in a wide range of depths

Abstract. The physics of the wave seismic process is discussed. In the framework of the degassing model, a seismic act is represented by fast or slow movements along the elements of the medium of different scales. It is shown that trigger effects only due to the force action of elastic waves of seismic sources cannot independently activate the seismic process, since their energy is significantly less than the energy of thermal fluctuations. Additional hydrogen activation of the boundary structures is necessary, which translates the process of movement into a barrier-free one with superplasticity features. Continuous hydrogen degassing with the simultaneous action of elastic waves of weak sources translates the process to self-sustaining.

Keywords: background seismicity, hydrogen degassing, trigger effects in background seismicity

Cite this article as: Gufeld I.L., Novoselov O.N. Seismicity as a reaction of the geological medium to planetary hydrogen degassing (on the example of the Kamchatka region). Part 3. Self-sustained background seismic process due to the trigger effects of hydrogen degassing on the medium, *Nauka i Tekhnologicheskie Razrabotki* (Science and Technological Developments), 2021, vol. 100, no. 1, pp. 46–64 [in Russian]. <https://doi.org/10.21455/std2021.1-4>

Funding

This work was carried out within the framework of the State Task of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences and Bauman Moscow State Technical University.

Ethics declarations

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- Adushkin, V.V., An, V.A., Kaazik, P.B., Ovchinnikov, V.M., Dynamic processes within the Earth's internal geospheres: Evidence from the seismic wave travel time data, *Dokl. Earth Sci.*, 2001, vol. 381A, pp. 1119–1121.
- An, V.A., Lyuke, E.I., Cyclic changes of the parameters of the seismic wave P on the Nevada-Borovoe highway, *Fizika Zemli* (Physics of the Earth), 1992, no. 4, pp. 20–31. [in Russian].
- Avsyuk, Yu.N., *Prilivnye sily i prirodnye protsessy* (Tidal forces and natural processes), Moscow, Nauchnyi mir, 1996, 188 p. [in Russian].
- Bucholz, M., Steacy, S. Tidal stress triggering of earthquakes in Southern California, *Geophys. J. Int.* 2016, vol. 205, iss. 2, pp. 681–693. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw045>
- Boldina, S.V., Kopylova, G.N., Effects of the Zhupanov earthquake on January 30, 2016, $M_w=7.2$, in changes of the water level in wells SW-5 and E-1, Kamchatka, *Geodynamics & Tectonophysics*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 863–880. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>
- Doda, L.N., Ntyaganov, V.L., Stepanov, I.V., An empirical scheme of short-term earthquake prediction, *Dokl. Earth Sci.*, 2013, vol. 453, no. 2, pp. 1257–1263. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1312009X>
- Dinamicheskie processy v geofizicheskoy srede* (Dynamic processes in the geophysical environment), ed. A.V. Nikolaev, Moscow, Nauka, 1994, 255 p. [in Russian].
- Firstov, P.P., Possibilities of forecasting strong earthquakes based on radon monitoring data at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic polygon, *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* (KRAUNTS Herald. Earth sciences), 2014, no. 1, iss. 23, pp. 232–245. [in Russian].
- Firstov, P.P., Makarov, E.O., Makchimov, A.P., Chernev, I.I., The geodynamic setting in the North-west circumference of the Pacific Ocean: effects on the dynamics of subsurface radon and on the

- gas composition of the heat carrier at the Mutnovskii geoelectric power station, *J. Volcanol. Seismol.*, 2015, vol. 9, no. 5, pp. 326–332. <https://doi.org/10.1134/S0742046315050048>
- Firstov, P.P., Kopylova, G.N., Solomatin, A.V., Serafimova, Yu.K., On the prediction of a strong earthquake in the Kamchatka Peninsula, *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* (KRAUNTS Herald. Earth sciences), 2016, no. 4, iss. 32, pp. 106–114. [in Russian].
- Gokhberg, M.B., Gufeld, I.L., Kozyreva, O.V., Nikiforova, N.N., Rozhnoy, A.A., Solovyova, M.S., Fedotov, A.Ya., Electromagnetic radiation of the mining medium under explosive loading, *Dokl. AN SSSR* (Reports of the USSR Academy of Sciences), 1987, vol. 295, no. 2, pp. 321–325. [in Russian].
- Gorkavy, N.N., Trapeznikov, Yu.A., Fridman, A.M., On the global component of the seismic process and its connection with the observed features of the Earth's rotation, *Doklady Akademii nauk* (Reports of the Russian Academy of Sciences), 1994, vol. 338, no. 4, pp. 525–527. [in Russian].
- Gufeld, I.L., *Seismicheskij process. Fiziko-himicheskie aspekty* (Seismic process. Physical and chemical aspects), Korolev, TsNIIMash, 2007, 160 p. [in Russian].
- Gufeld, I.L., *Seismicheskaya opasnost': predotvratit' ili predupredit'* (Seismic danger: prevent or warn), Moscow, Sam Poligrafist, 2019, 98 p. [in Russian].
- Gufeld, I.L., Novoselov, O.N., Nonbarrier Seismic Process in the Subduction Zone and Principles of its Monitoring, *Dokl. Earth Sci.*, 2015, vol. 464, iss. 2, pp. 1083–1088. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15100190>
- Gufeld, I.L., Novoselov, O.N., Diagnosing the precatastrophic state of the environment in a subduction zone prior to very strong mega-seismic events, *Dokl. Earth Sci.*, 2016, vol. 468, iss. 2, pp. 636–640. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16060180>
- Gufeld, I.L., Novoselov, O.N., The monitoring of media state in the subduction zone. Possibilities for short-term seismic hazard estimation, *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* (KRAUNTS Herald. Earth sciences), 2017, iss. 34, no. 2, pp. 77–89. [in Russian].
- Gufeld, I.L., Novoselov, O.N., Seismicity as a reaction of the geological medium to planetary hydrogen degassing (on the example of the Kamchatka region). Part 1. Principles of monitoring the active geological medium. Contradictions between the discontinuous model of the seismic process and the degassing model, *Nauka i Tekhnologicheskie Razrabotki* (Science and Technological Developments), 2020, vol. 99, no. 3, pp. 15–39. [in Russian.]. <https://doi.org/10.21455/std2020.3-3>
- Gufeld, I.L., Novoselov, O.N., Seismicity as a reaction of the geological medium to planetary hydrogen degassing (on the example of the Kamchatka region). Part 2. On the seismic interaction of processes in the upper mantle and lithosphere, *Nauka i Tekhnologicheskie Razrabotki* (Science and Technological Developments), 2021, vol. 100, no. 1, pp. 24–45. [in Russian.]. <https://doi.org/10.21455/std2021.1-3>
- Gufeld, I.L., Gusev, G.A., Matveeva, M.I., Metastability of the lithosphere as a manifestation of ascending diffusion of light gases, *Doklady Akademii nauk* (Reports of the Russian Academy of Sciences), 1998, vol. 362, no. 5, pp. 677–680. [in Russian].
- Gufeld, I.L., Rozhnoy, A.A., Solovyova, M.S., On radio emission of the surface layers of the Earth's crust caused by a seismotectonic process, in: *Modelirovanie geofizicheskikh protsessov: Sbornik statei* (Modeling of geophysical processes. Collection of articles), ed. by A.Ya. Sidorin, Moscow, OIFZ RAN, 2003, pp. 47–55. [in Russian].
- Gufeld, I.L., Gavrilov, V.A., Korolkov, A.V., Novoselov, O.N., Endogenous activity of the Earth and decompression model of seismic noise, *Dokl. Earth Sci.*, 2008, vol. 423, iss. 2, pp. 1510–1513. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08090420>
- Gusev, G.A., Gufeld, I.L., Seismic process in extremely energy-saturated geological medium and earthquake prediction, *Vulkanologiya i seismologiya* (Volcanology and Seismology), 2006, no. 6, pp. 71–78. [in Russian].
- Kedrov, O.K., Kedrov, E.O., The influence of underground nuclear explosions on regional seismicity, *Izvestiya, Physics of the solid Earth*, 2002, vol. 38, no. 3, pp. 194–206.
- Kuksenko, V.S., Kinetic aspects of the destruction process and the physical basis of its prediction, in: *Prognoz zemletryasenii* (Earthquake forecast), no. 4, Dushanbe, Donish, 1983, pp. 8–20.
- Levin, B.V., Chirkov, E.B., Features of the latitudinal distribution of seismicity and the rotation of the Earth, *Vulkanologiya i seismologiya* (Volcanology and Seismology), 1999, no. 6, pp. 65–69. [in Russian].

- Lukk, A.A., Descherevsky, A.V., Sidorin, A.Ya., Sidorin, I.A., *Variacii geofizicheskikh polej kak proyavlenie determinirovannogo haosa vo fraktal'noj srede* (Variations of geophysical fields as a manifestation of deterministic chaos in a fractal environment), Moscow, OIFZ RAS, 1996, 210 p. [in Russian].
- Nikolaev, A.V., Vereshchagina, G.M., On the initiation of earthquakes by underground nuclear explosions, *Dokl. AN SSSR* (Reports of the USSR Academy of Sciences), 1991a, vol. 319, no. 2, pp. 333–337. [in Russian].
- Nikolaev, A.V., Vereshchagina, G.M., On the initiation of earthquakes by earthquakes, *Dokl. AN SSSR* (Reports of the USSR Academy of Sciences), 1991b, vol. 318, no. 2, pp. 320–324. [in Russian].
- Nikolaevsky, V.N., Dilatancy and theory of the earthquake source, *Uspekhi mekhaniki* (Progress in mechanics), 1980, vol. 3, no. 1, pp. 70–101. [in Russian].
- Nikolaevsky, V.N., The Earth's crust, dilatancy, and earthquakes, in: *The mechanics of earthquake rupture*. J. Rice, ed., Amsterdam, 1980.
- Polikarpova, L.A., Belavina, Yu.F., Malinovsky, A.A., Polikarpov, A.M., Time regularities of distribution of deep earthquakes of the terrestrial globe for the period 1963–1979, *Fizika Zemli* (Physics of the Earth), 1995, no. 2, pp. 28–39. [in Russian].
- Popova, O.G., Konovalov, Yu.F., Kukhmazov, S.U., Minina, N.A., Averyanova, A.S., Features of geodynamics of the medium in the earthquake-prone area of the Mineralovodsk salient, *Razvedka i okhrana nedr* (Prospect and protection of mineral resources), 2003, no. 2, pp. 16–20. [in Russian].
- Popova, O.G., Seriy, A.V., Konovalov, Yu.F., Nedyadko, V.V., Influence of catastrophic earthquakes on the stress state of the environment of remote territories, in: *Sbornik trudov Vos'mykh geofizicheskikh chtenii im. V.V. Fedynskogo* (Collection of works of the Eighth Geophysical Readings named after V.V. Fedynsky), Tver, GERS, 2007, pp. 200–204. [in Russian].
- Pulinets, S.A., Uzunov, D.P., Karelin, A.V., Davydenko, D.V., Physical bases of the generation of short-term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere system, *Geomagn. Aeron.*, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 521–538. <https://doi.org/10.1134/S0016793215040131>
- Rykunov, A.L., Smirnov, V.B., Variations of seismicity under the influence of lunar-solar and tidal deformations, *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli* (Izv. of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth), 1985a, no. 1, pp. 97–103. [in Russian].
- Rykunov, A.L., Smirnov, V.B., General features of seismic emission on various time scales, *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli* (Izv. of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth), 1985b, no. 6, pp. 83–87. [in Russian].
- Rykunov, L.N., Khavroshkin, O.B., Tsyplakov, V.V., Lunar-solar tidal periodicities in the lines of time variation spectra of high-frequency microseisms, *Dokl. AN SSSR* (Reports of the USSR Academy of Sciences), 1980a, vol. 252, no. 3, pp. 577–579. [in Russian].
- Rykunov, L.N., Khavroshkin, O.B., Tsyplakov, V.V., Analysis of envelope spectra of high-frequency microseisms after the Alaskan and Mexican earthquakes in March 1979, *Dokl. AN SSSR* (Reports of the USSR Academy of Sciences), 1980b, vol. 252, no. 4, pp. 836–838. [in Russian].
- Rykunov, L.N., Starovoit, Yu.O., Khavroshkin, O.B., Tsyplakov, V.V., Connection of storm microseisms with high-frequency seismic noise, *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli* (Izv. of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth), 1982, no. 2, pp. 88–91. [in Russian].
- Sadovsky, M.A., Pisarenko, V.F., *Seismicheskij process v blokovoj srede* (Seismic process in a block environment), Moscow, Nauka, 1991, 95 p. [in Russian].
- Scholz, C.H., Tan, Y.J., Albino, F., The mechanism of tidal triggering of earthquakes at mid-ocean ridges, *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, article 2526. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10605-2>
- Seismologicheskie issledovaniya v raionakh stroitel'stva krupnykh vodokhranilishch Tadjikistana* (Seismological studies in the areas of construction of large reservoirs in Tajikistan), ed. by M.A. Sadovsky, Dushanbe, Donish, 1987, 120 p. [in Russian].
- Shchekotov, A.Yu., Chebrov, V.N., Berseneva, N.Yu., Smirnov, A.A., Experience of short-term forecasting of Kamchatka earthquakes based on electromagnetic precursors and immediate information on local seismicity, in: *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii: Tr. Pyatoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii, Petropavlovsk-Kamchatskii*,

- 27 sentyabrya – 3 oktyabrya 2015 g. (Problems of multidisciplinary geophysical monitoring of the Russian Far East: Proceedings of the Fifth scientific and technical conference. Petropavlovsk-Kamchatsky, September 27 – October 3, 2015), Obninsk, 2015, pp. 316–320. [in Russian].
- Sobolev, G.A., *Osnovy prognoza zemletryasenij* (Fundamentals of earthquake forecasting), Moscow, Nauka, 1993, 313 p. [in Russian].
- Tarasov, N.T., Tarasova, N.V., Influence of nuclear explosions on the seismic regime, *Doklady Akademii nauk* (Reports of the Russian Academy of Sciences), 1995, vol. 343, no. 1, pp. 543–546. [in Russian].
- Zhurkov, S.N., Kinetic concept of the strength of solids, *Vestnik AN SSSR* (Bulletin of the USSR Academy of Sciences), 1968, no. 3, pp. 46–54. [in Russian].

About the authors

GUFELD Iosif Lipovich – Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya ul. 10, bld. 1. E-mail: igufeld@korolev-net.ru

NOVOSELOV Oleg Nikolaevich – Bauman Moscow State Technical University. Russia, 105005, Moscow, ul. Baumanskaya 2-ya, 5/1. E-mail: onn-aan@yandex.ru