ISSN: 2079-5165, eISSN: 2410-7948, https://elibrary.ru/title_about.asp?id=32295; http://std.ifz.ru/
Наука и технологические разработки. 2021. Т. 100, № 1, с.24–45. https://doi.org/10.21455/std2021.1-3
The metadata in English is presented at the end of the article!

УДК 550.34 + 550.343

СЕЙСМИЧНОСТЬ КАК РЕАКЦИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ПЛАНЕТАРНУЮ ВОДОРОДНУЮ ДЕГАЗАЦИЮ (НА ПРИМЕРЕ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА)
Часть 2. О сейсмическом взаимодействии процессов в верхней мантии и литосфере

© 2021 г. И.Л. Гуфельд[1], О.Н. Новоселов[2]

[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
– предложена модель проявления глубокофокусного сейсмического события
– показаны локальные вертикальные структуры дегазации в верхней мантии
– показана связь вертикальных процессов дегазации с сильными сейсмическими событиями
– рассмотрены возможности краткосрочной оценки сейсмической опасности
– показаны примеры точного прогноза эпицентральных зон сильных событий

Аннотация. Обсуждается сейсмический процесс в зоне субдукции в широком диапазоне глубин. Поскольку глубокофокусные события не могут быть связаны с процессами накопления упругой энергии, предложена модель проявления глубокофокусного события. Чувствительность литосферы к проявлениям глубокофокусных событий указывает на водородную дегазацию как единственный механизм связи между ними. Показано быстрое формирование локальных вертикальных структур стока водорода с глубин менее 100 км и инициирование ими сейсмических событий в литосфере. Показана возможность краткосрочной оценки положения реальной эпицентральной зоны будущего сильного сейсмического события.

Ключевые слова: зона субдукции, водородная дегазация, вертикальные структуры дегазации, литосфера, верхняя мантия, глубокофокусное землетрясение

Цитируйте эту статью как: 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

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 или процессы, которые привели к наблюдаемым особенностям строения Земли. В связи с этим интересно сравнение проблем, стоящих в науках о Земле сейчас и более 70 лет назад. В 1947 г. Л. Адамс выделил шесть проблем [*Уеда,* 1980]:
– происхождение горных систем;
– происхождение геосинклиналей (глубоких впадин, заполненных осадками);
– причины вулканических извержений и других магматических процессов;
– причины глубокофокусных землетрясений;
– происхождение магнитного поля Земли;
– температуры, господствующие в недрах Земли.

С. Уеда отмечает, что хотя эти проблемы не были единственными, они имели важное значение для понимания процессов в Земле. Но сейчас, уже в первой четверти XXI в., можно сказать, что ни одна из этих проблем полностью не решена. Обратим внимание на то, что проблема природы глубокофокусных сейсмических событий выделялась более ярко, чем природа коровой сейсмичности, которая в общих чертах, казалось, была понятна.

Несколько позднее на первый план были выдвинуты процессы внутри Земли, ответственные за дрейф континентов. Эти же процессы могут отвечать и за вертикальные движения земной коры. Дискуссия вокруг этих вопросов стимулировала широкие исследования внутреннего строения Земли и вновь привлекла внимание к проблемам планетологии, и прежде всего к проблемам эндогенной активности Земли [*Маракушев,* 1999]. Отметим здесь кометную модель формирования планеты, предполагавшую появление во внутренних оболочках Земли значительного количества газов, из которых нужно выделить водород и гелий, обладающие значительно большей подвижностью и способностью к восходящей диффузии по междоузельному механизму, чем все остальные газы.

Науки о Земле имеют особенности, существенно выделяющие их из классических наук, таких как физика, химия, материаловедение и др. Под классическими науками мы понимаем те, результаты которых можно проверить в прямых экспериментах, и на этих достоверных данных могут строиться теории и модели. В науках же о Земле для прямых экспериментов доступен лишь очень тонкий поверхностный слой коры. Широко известны были, например, данные о строении коры на Кольском полуострове: вместо предполагаемой границы между гранитом и базальтом на глубине около 7 км была обнаружена зона повышенной трещиноватости, насыщенная флюидом и легкими газами – водородом и гелием [Кольская…, 1984, 1998].

О строении Земли и процессах, протекающих в ней, мы судим по измерениям различных полей на поверхности, а также по наблюдениям строения и характера движений поверхностных структур, выявившим, например, блоковое строение литосферы, горизонтальную расслоенность литосферы, весьма медленные движения блоков как единого целого относительно друг друга – реидное течение вещества (подробнее об этом в [*Гуфельд,* 2007]), динамические сейсмические процессы в среде от зоны Мохо до глубин 700 км. Процессы, приводящие к крупномасштабным движениям блоков, которое может отражаться также в поверхностном рельефе, рассматривались в ряде работ [*Летников,* 2000; Вертикальная…, 2002]; они обусловлены физико-химической трансформацией горных пород в зонах взаимодействия верхней мантии и нижней коры, а также в зонах нижней и верхних кор. Такие процессы связаны с гранитизацией и вертикальной аккрецией вещества и сопровождаются увеличением или уменьшением объема в зависимости от типа исходного вещества, т.е. гранита или базальта. Поэтому со временем каждый блок может совершать колебательные движения в вертикальном или субвертикальном направлениях (движения блоков в горизонтальных структурах типа разломов Сан-Андреас или Предкопетдагский здесь не обсуждаются).

Однако в литосфере и верхней мантии, кроме динамических актов, наблюдаются достаточно быстрые вариации параметров литосферы и верхней мантии с периодами годы – десятки лет. Так, были обнаружены вариации времен пробега продольных волн на трассах подземных ядерных взрывов (Невада США) – сейсмическая станция “Боровое”: времена пробега сейсмических волн изменялись с периодами 6–7 и 9–11 лет [*Ан, Люкэ,* 1992; *Адушкин и др.,* 1998, 2001]. И совсем удивительно то, что в глубокофокусной сейсмической активности верхней мантии наблюдаются временные вариации с периодами 7–9 и 12–14 лет [*Поликарпова и др.,* 1995]. Также было показано (с использованием источников упругих волн ядерных взрывов), что, независимо от тектонической активности региона и эпицентральных расстояний, в кинематических и динамических

параметрах сейсмических волн в литосфере содержатся гармонические составляющие с периодами 4–6 лет, а на эпицентральных расстояниях 800–3500 км выделяются ритмы с периодами 2 и 4 года [*Гамбурцева и др.,* 1982].

В верхней мантии были обнаружены структуры, которые не находили объективного понимания. Так, было показано чередование зон с повышенными и пониженными скоростями продольных волн в пределах глубин 80–300 км, причем число таких зон превышает количество границ, на которых возможны фазовые переходы [*Павленкова,* 2001].

Обратим внимание и на картину пространственного распределения плотности сейсмических актов для Камчатки [*Болдырев,* 2002]. Положение активных и менее активных участков устойчиво во времени в период 1962–2000 гг. Анализ этих данных показал, что сильные события происходят в зонах с повышенной активностью слабых событий, которые не способствуют разрядке напряжений. Картина распределения очагов событий указывает на преимущественно вертикальные процессы переноса энергии их активизации.

Были обнаружены вертикальные скопления гипоцентров, названные “сейсмическими гвоздями Вадковского” [*Вадковский,* 2012]. Приводятся данные о формировании таких структур начиная с глубин около 90 км [*Шевченко и др.,* 2011; *Захаров и др.,* 2013]. Эпицентральная проекция “гвоздя” имеет диаметр 5–10 км, а время его формирования – от нескольких дней до месяца. Отмечено, что такие скопления очагов не связаны с элементами разрывных структур и, следовательно, с действием тектонических сил. Полагали, что появление “гвоздей” инициировано поступлением глубинных “флюидов”, однако расшифровки этого термина не делалось.

Представлен большой объем данных о пространственно-временных вариациях *S*-волн в очаговых зонах сильнейших землетрясений [*Копничев, Соколова,* 2003, 2012]. Использовался метод, основанный на анализе характеристик короткопериодной *S*-коды записей местных землетрясений и карьерных взрывов. На частотах около 1 Гц кода сформирована в основном поперечными волнами, отраженными от многочисленных субгоризонтальных границ в верхней мантии и земной коре. Если на огибающей коды выделялись участки резкого затухания амплитуд, то они соответствовали слоям высокого поглощения *S*-волн в соответствующих по глубине зонах. Разработанный метод, обладающий высокой разрешающей способностью по горизонтали, позволял выделять субвертикальные зоны с измененной эффективной добротностью (рассчитанной по затуханию амплитуд волн) шириной в несколько километров (“сейсмические гвозди”)! Было показано существование узких субвертикальных каналов высокого поглощения волн (от нижней коры до глубины около 200 км) в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня и Кавказа. Весьма интересны временные вариации структуры поля поглощения *S*-волн в очаговых зонах. Так, после сильного землетрясения области сильного поглощения смещались довольно быстро по глубине в течение нескольких лет. Было показано, что в течение 25–30 лет после сильных землетрясений Тянь-Шаня резко уменьшается поглощение в верхней мантии и одновременно увеличивается поглощение в нижней коре. Авторы делают вывод, что быстрые (в геологическом масштабе времени) вариации поля поглощения *S*-волн однозначно свидетельствуют о подъеме мантийных “флюидов” в земную кору.

Безусловно, представленные выше исследования, как и результаты мониторинга среды в поверхностных раздробленных структурах на платформах и в зонах субдукции [*Гуфельд, Новоселов,* 2017, 2020], носят объективный характер, и их также нужно относить к ключевым для обоснования дегазационной модели сейсмичности. Сформулируем их основные результаты:

– чувствительность литосферы к процессам, протекающим в верхней мантии;
– непрерывная изменчивость параметров литосферы в различных масштабах;
– непрерывная слабая сейсмичность;

– преимущественное отсутствие в сейсмических процессах актов разрушения;

– уникальные свойства граничных межблоковых структур, контролирующих плавное движение блоков и плит друг относительно друга;

– быстрые изменения состояния среды верхней мантии, включая сильнейшие глубокофокусные сейсмические события;

– существование короткоживущих вертикальных локальных сейсмических структур.

Все это указывает на реализацию дегазационной модели сейсмичности в системе верхняя мантия – литосфера, основные физические положения которой и методы мониторинга активной геологической среды на основе уравнения эволюции состояния динамической системы (среды) изложены в [*Гуфельд, Новоселов,* 2015, 2016, 2017, 2020]. В связи с изложенным становятся менее удивительными данные о чувствительности поверхностных слоев литосферы к проявлениям динамических глубокофокусных сейсмических событий. Связующим звеном между ними могут быть диффузионные потоки водорода, а учитывая быстроту реакции поверхностных слоев, нужно говорить об эстафетной передаче энергии водородным потоком снизу вверх. Отсюда следует, что среда, т.е. литосфера (твердая фаза) и верхняя мантия, предельно заполнена диффундирующим водородом, а динамические сейсмические явления, называемые глубокофокусными событиями (ГФС), являются частью водородного потока. Однако их проявление требует определенных условий, из которых одним из основных следует считать процесс накопления водорода в кристаллических и аморфных структурах среды (из-за периодичности этих событий), что само по себе не является тривиальным вопросом. Кроме того, приведенные данные указывают на периодические колебания восходящего потока водорода, а также на локальные импульсные всплески активности – “гвозди” Вадковского.

Поэтому к основным задачам исследований относятся понимание процессов подготовки и протекания ГФС и их влияния на поверхностные структуры и тонкая временная пространственно-глубинная структура сейсмических событий, контролирующих фоновую и предкатастрофическую ситуации в литосфере.

О природе глубокофокусных сейсмических событий

Сейчас уже можно говорить о необходимости смены разрывной концепции сейсмического процесса на дегазационную, включая глубины гипоцентров вплоть до 600–700 км. Приведены многочисленные данные, подтверждающие правомерность такого перехода. Однако заметим, что до сих пор принято рассматривать развитие сейсмотектонических ситуаций на различных глубинах исходя из механики разрушения, например, при оценке механизмов очага для коровых и глубокофокусных сейсмических актов. В результате этого получают, что в горизонтах глубокофокусных событий возникают крупномасштабные зоны с растягивающими или сжимающими напряжениями.

Эту ситуацию можно рассмотреть на примере Охотоморского глубокофокусного события 24.05.2013 г. с магнитудой 8.2. “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” [*Чебров и др.,* 2013]. “Распределение афтершоков примерно обрисовывают область, в пределах которой были сняты напряжения” [*Гонтовая и др.,* 2017]. Размеры области “очага” Охотоморского события оцениваются по длине в 300 км, по ширине – 170 км и по диапазону глубин – 425–720 (!) км.

Что означал бы тот факт, что на глубинах очага Охотоморского события возникли напряжения сжатия? Это означало бы, что в зоне очага атомы в структурах сместились бы из своего равновесного положения при существующих *P*-*T*-условиях таким образом,

что расстояния между ними увеличились бы. Абсурдность такой ситуации очевидна. Аналогичная оценка справедлива и для глубоких зон, где в расчетах показываются напряжения растяжения.

Природу глубокофокусных событий (ГФС) чаще всего связывают с полиморфными превращениями. Изменить давление в этой зоне невозможно, а колебания температуры в пределах десятков градусов в принципе возможны только в небольшом диапазоне глубин. В условиях же высоких давлений реален один 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 свойственна фазовым переходам, реализуемым под давлением. В дальнейшем такие аморфизированные структуры будут сохраняться.

Мысли о ГФС как следствии механического разрыва связаны с анализом рассчитанных механизмов очагов, образующих нодальные плоскости. Однако всем очевидно, что разрыв или кажущийся сдвиговый процесс здесь 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 различных атомов, в том числе водорода и гелия, и переползания дислокаций. Поэтому с вертикальными потоками водорода (как атомов внедрения) можно связывать изменения параметров среды, наблюдающиеся в вариациях скоростей сейсмических волн на различных глубинах, в том числе в верхней мантии, или периодичности глубокофокусных сейсмических событий.

Тогда возникают вопросы: каким образом формируются нодальные “плоские” структуры ГФС? Что это – все же деформационный процесс? Если не может работать механика, то какие еще процессы в среде могут рассматриваться? Какие процессы могут вызывать “деформацию” внутри среды, не отражающуюся в окружающей ее зоне? Всё это далеко не странные вопросы.

Связывая ГФС с восходящими потоками водорода, необходимо предположить, что в каких-то структурах происходит накопление водорода, а какие-то другие структуры являются на определенный период барьером для его восходящего потока. Накопление водорода и блокировка его восходящей диффузии могут реализоваться в аморфных структурах, отличающихся изотропностью и меньшей плотностью; в таких структурах растворимость водорода существенно больше, чем в кристаллических.

Дальнейшее обсуждение носит предположительный характер. Аморфные структуры деформируются не дислокационным процессом, а путем перемещения групп атомов в направлении максимального напряжения или менее прочных структур. Мы полагаем, что непрерывная подпитка мантийных структур водородом осуществляется потоками из нижней мантии и ядра. В нижней мантии и выше диффузия водорода осуществляется по междоузельному механизму и поток водорода начинает изменяться с формированием на его пути аморфизированных структур. По наблюдениям, ГФС редко имеют зону афтершоков, т.е. можно говорить о протяженной двухмерной зоне небольшой толщины (ГФС с магнитудой около 7) или о пространственной зоне уникального Охотоморского события. Блокировка диффузии водорода по мере его накопления в аморфизированных структурах может осуществляться за счет перемещения групп атомов в направлении диффузии, что блокирует пути его распространения.

Можно рассматривать еще один механизм накопления водорода в глубоких структурах. При исследовании диффузии водорода в кристаллических структурах мы не смогли однозначно ответить на вопрос, осуществляется ли диффузия водорода в атомарном или же в ионном (протон) состоянии. При протонной диффузии в какие-то отрезки времени возможно формирование пересыщенных водородом структур с концентрацией, существенно превышающей равновесную. Перенасыщенные твердые растворы водорода также представляют собой блокировочные структуры в условиях больших давлений. Для

наблюдателя эта блокировка выглядит как “зацепление”, которое при еще большем увеличении давления водорода в аморфной структуре может “разрушиться” – аналог разрушения механического зацепления. Однако это не механическое разрушение: при таком “механическом разрушении”, т.е. выбросе водорода, естественно, произойдет линейная деформация водородной подрешетки относительно окружающей ее структуры (зоны), которая и сформирует сейсмическую волну.

Судя по тектонической косейсмической ситуации, вытесненного из верхней мантии водорода настолько много, что, например, после Охотоморского основного события, последовательно формируется область так называемого “очага”, где произойдет по тем же причинам серия “афтершоков”. Естественно, что сейсмические события из области “очага” не могут снимать какие-то напряжения. Из этой области водород будет вытеснен в более высокие горизонты верхней мантии и далее эстафетно (последовательно из одного горизонта в вышележащий, из этого горизонта в следующий вышележащий и т.д.) будет вытеснен в литосферу. Эстафетная модель выноса водорода обеспечивает быстроту реакции литосферы после ГФС. Реакция литосферы на поступление новых порций водорода будет проявляться в изменении объема элементов структуры и отражаться на поверхностном рельефе (см., например, [*Шестаков и др.,* 2014]) и в наблюдениях на поверхности так называемых “предвестников”, что было отмечено выше.

Интерес же представляют оценки пространственной динамики локальных зон глубокофокусных “афтершоковых” событий и их связи между собой в рамках уравнения состояния [*Новоселов,* 2010; *Гуфельд, Новоселов,* 2015, 2017, 2020]. Рассматривался период в 18 ч сразу после главного Охотоморского события. Оценки выполнялись пошагово после каждого афтершока (17 событий в этом интервале времени). Оказалось, что по оценке пространственной динамики локальных зон по широте и долготе был получен отрицательный коэффициент распада *K*, означающий, что локальные зоны не взаимодействовали друг с другом, их положение в пространстве контролировалось их же структурой и строением. Динамика этих зон по глубине (“гипоцентры событий”) характеризовалась преимущественно положительным значением коэффициента влияния *K*. (Заметим, что формулировка и смысл коэффициента *K* определяются его знаком и типом действующего параметра, получаемыми при решении одного и того же уравнения эволюции). Это может означать, что “афтершоковые акты” преимущественно связаны с интенсивностью восходящих потоков водорода и особенностями локального строения среды. Размеры предполагаемого “очага” только по глубине настолько велики, что уже только поэтому вопрос о снятии напряжений или их разрядке вообще не стоит. Мы полагаем, что наблюдаемая “афтершоковая последовательность” (формальное определение) не вызвана главным событием, а лишь инициирована его развитием. Заметим, что в течение этих 18 часов практически отсутствовала коровая сейсмичность.

При катастрофическом по энергии Охотоморском ГФС реализуются проявления процессов дегазации, не фиксируемые прямо после более слабых ГФС. Эти наблюдения подтверждают сделанные ранее выводы о предельном заполнении твердой фазы среды водородом, чем объясняется ее перманентная неустойчивость на различных глубинах, и эстафетном механизме передачи энергии снизу к поверхности. Таким образом, понимание природы глубокофокусных сейсмических событий и концепция эстафетной модели передачи энергии в верхней мантии являются ключевыми в разработке и прогнозе литосферных событий и сейсмического режима, в особенности в зонах субдукции. Именно на таких событиях могут быть получены данные, указывающие на активизацию коровой сейсмичности непосредственно до ГФС, влияющую, в свою очередь, на развитие самого ГФС.

Можно также полагать, что удастся наблюдать активизацию сейсмичности в зоне от границы Мохо до глубин около 200 км, не связанную непосредственно с ГФС, но влияющую на коровую сейсмичность. Для этих задач необходимо было разработать

специальный метод для анализа развития пространственно-глубинного режима сейсмичности [*Гуфельд, Новоселов,* 2016, 2017].

О сейсмическом взаимодействии процессов в верхней мантии и литосфере

Реально мы еще не осознаем, насколько много водорода содержится в твердой фазе литосферы и верхней мантии и насколько сильно его влияние на непрерывную изменчивость параметров литосферы и ее поверхностных слоев. Начиная от границы Мохо горизонтально расслоенная и флюидно-пористая литосфера становится барьером, способствующим накоплению водорода, который, в свою очередь, вызывает труднопредсказуемые вариации различных параметров среды в ее поверхностных слоях. Здесь очевидно, что механика в сейсмической активности не играет существенной роли. В связи с этим пространственно-глубинный фактор анализа сейсмичности становится основным. Роль же “гвоздей” Вадковского приобретает особую значимость в понимании сейсмического процесса. Периоды, в которые происходят сильнейшие сейсмические события, отличаются особенностями пространственно-глубинной структуры этого процесса.

С учётом непрерывности сейсмического процесса и его быстрой изменчивости в пространстве в отдельные периоды времени, было предложено представлять более наглядно положение событий в пространстве: по оси ординат откладывается широта (долгота), а по оси абсцисс – последовательность самих событий со своим индивидуальным временем, т.е. реализуется пошаговый способ визуализации процесса. Такой способ отображения событий позволяет наглядно увидеть реальную пространственно-временную картину глубинной динамики сейсмичности и выделить особенности сейсмического режима, охватывающего основную часть времени весь регион (фоновая ситуация), а незначительную часть времени – формирующего локальные сейсмические узлы (ЛСУ) с размерами в плане в несколько долей градуса. Здесь можно сделать вывод, что в период фонового режима восходящие потоки водорода не испытывают значительных колебаний и равномерно распределены в пространстве, а в короткие периоды формирования ЛСУ происходит локализованный вброс водорода в литосферу, реакция которой на это может проявиться в активизации медленных или быстрых движений элементов среды друг относительно друга. ЛСУ (на них было обращено внимание ранее [*Гуфельд, Новоселов,* 2014, 2016, 2017]) проявлялись в период всех рассмотренных сильных сейсмических событий в зонах субдукции, в том числе Кроноцкого, Симуширских, Тохоку, Чилийских. ЛСУ фактически можно отождествить с “гвоздями” Вадковского.

ЛСУ – “гвозди” Вадковского в период Охотоморского ГФС

2012 год был достаточно спокойным для Камчатского региона; в этот период не проявлялись пространственно-глубинные структуры типа “гвоздей” Вадковского. Совершенно другим стал 2013 год (рис. 1), когда были обнаружены четыре локализованные структуры ЛСУ, последняя из которых непосредственно предшествовала Охотоморскому глубокофокусному событию. Рис. 1 представлен без выделения глубин событий, т.е. совокупно для всех глубин гипоцентров событий, регистрируемых в этот год; такая интегральная структура скрывает детализацию развивающихся во времени процессов по глубине (заметим, что и ниже все рисунки будут представлены только в координатах широта–время из-за ограничения на объем материала).

Детальная пространственно-временная структура сейсмического процесса в 2013 г. с разбивкой по глубинам представлена на рис. 2. Анализ рис. 2 показывает не только локальное развитие процессов от глубины к поверхности по последовательности событий, но и активизацию более глубоких слоев после активизации вышележащих.

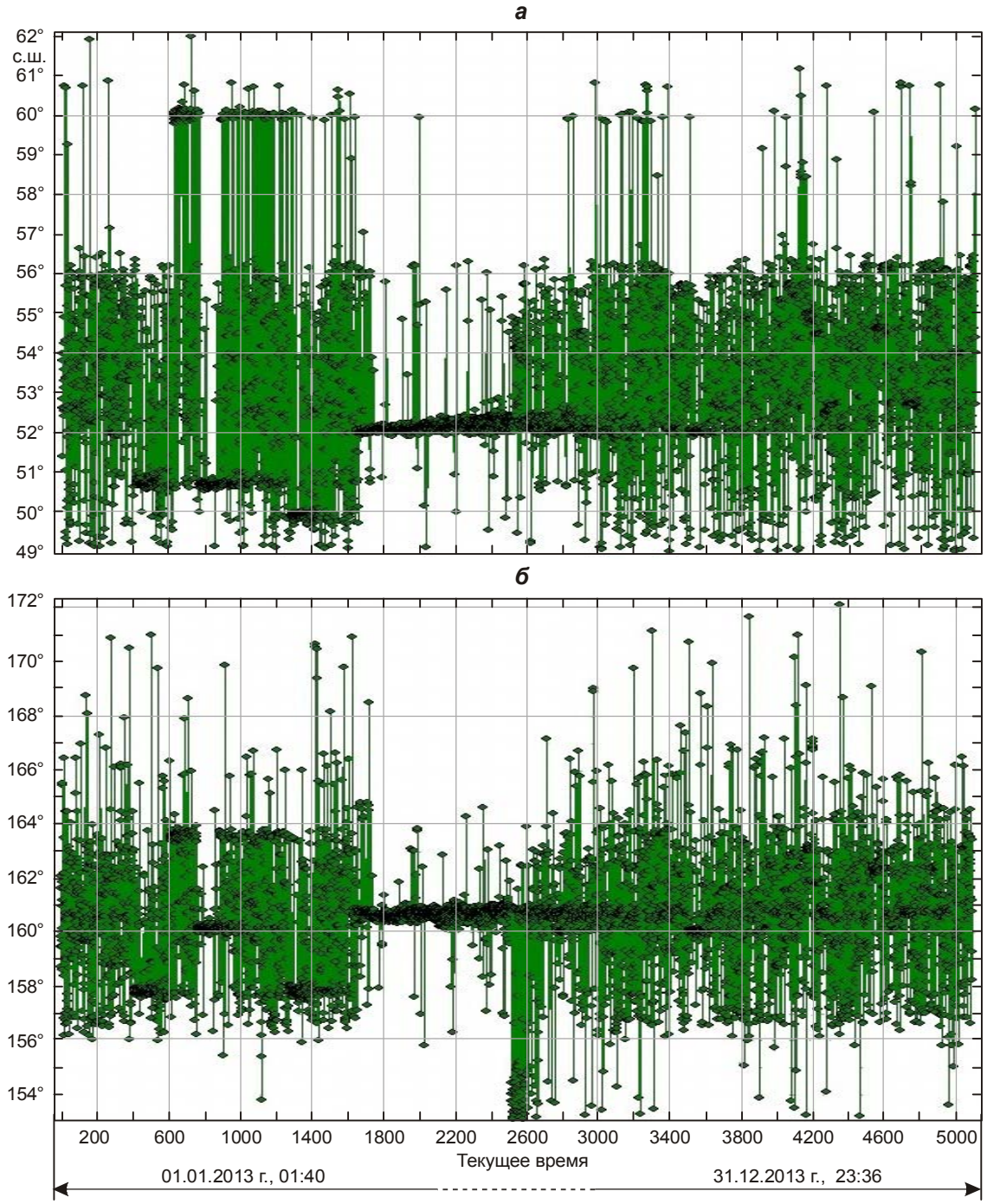

Рис. 1. Пространственно-временное распределение сейсмичности Камчатского региона в координатах широта–время (*а*) и долгота–время (*б*) для всех глубин гипоцентров 2013 г. Каждая точка – событие со своим реальным текущим временем в указанный период 2013 г.

Рассмотрим ситуацию с начала 2013 г. ЛСУ, формирующийся на 50.8° с.ш., проявился на глубинах от 65 до 37 км. Наибольшая продолжительность была реализована на глубинах 50–37 км в феврале (рис. 2, *2*, *3*); этот узел был размытым и продолжался в марте на больших глубинах (рис. 2, *6*). Обращает на себя внимание то, что данный узел, а лучше говорить “гвоздь”, не опустился в кору, т.е. выбросы водорода в период сейсмических актов ограничились зоной Мохо (барьерный эффект [*Гуфельд, Матвеева,* 2011]) и, скорее всего, перераспределялись в ней. Продолжительность этого периода составила менее двух месяцев.

Наиболее интересна ситуация с ЛСУ, сформированная на 52°–52.5° с.ш. Этот “гвоздь” существует во всех диапазонах глубин вплоть до 70 км, однако наблюдались определенные особенности. В диапазоне глубин 50–0 км начало ЛСУ зафиксировано 18 мая 2013 г. (рис. 2, *1–3*); на глубинах 65–55 км ЛСУ появился раньше, уже 16 мая (рис. 2, *4*), и был наиболее продолжительным по времени – вплоть до середины июля 2013 г.

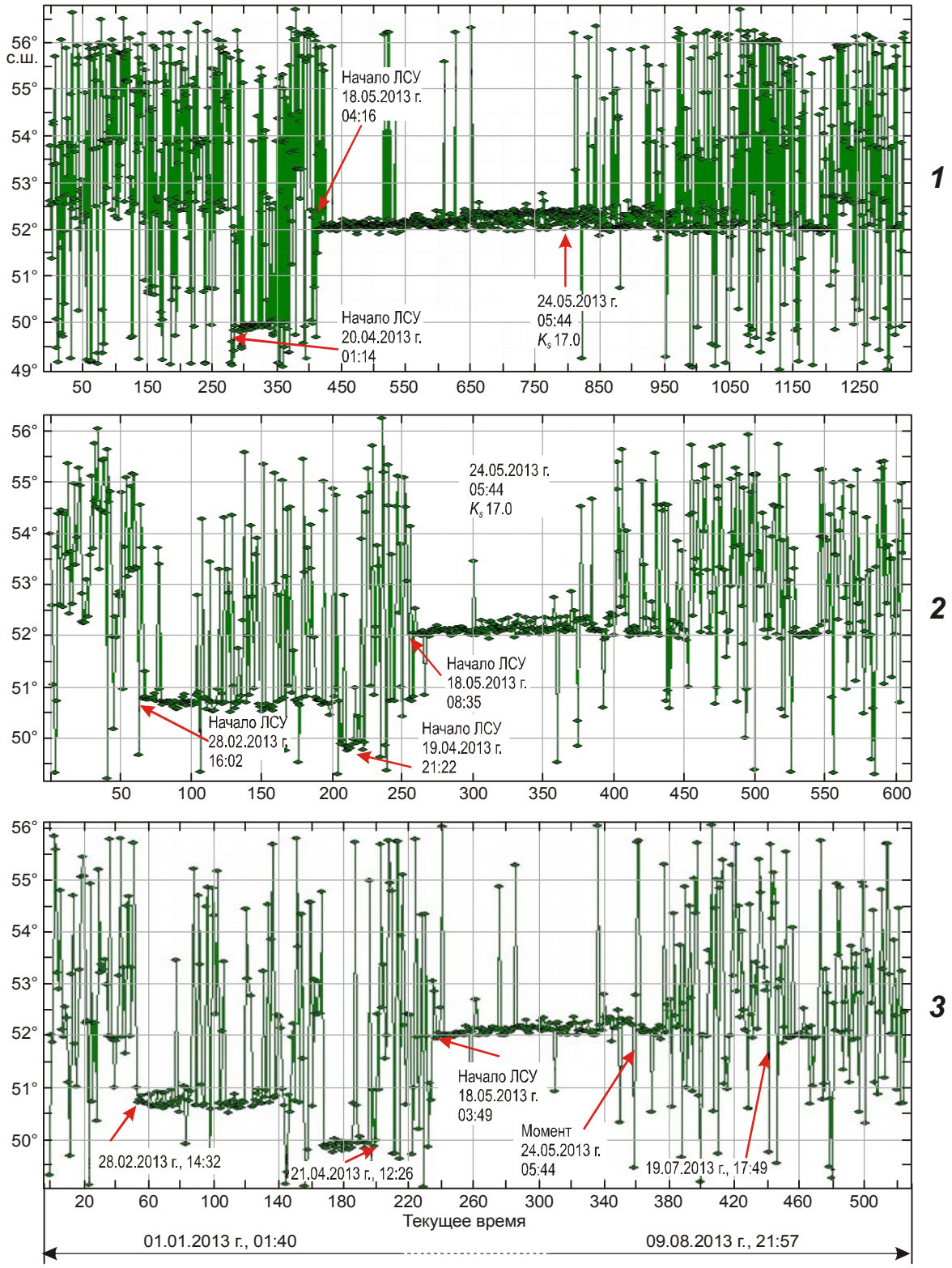

Рис. 2.

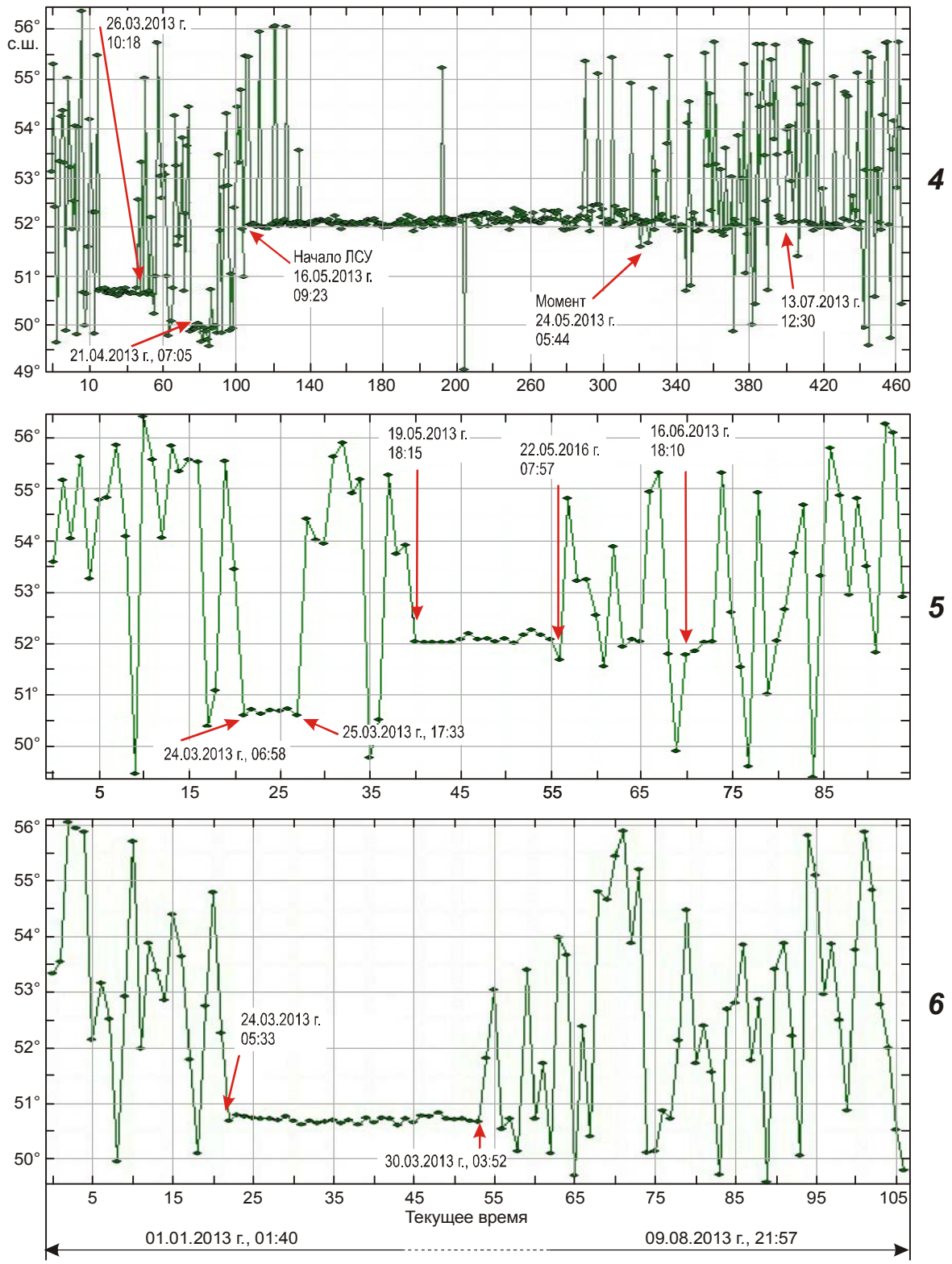

Рис. 2. Пространственно-временная картина появления структур ЛСУ с различными глубинами гипоцентра *H* и сейсмических актов со своим текущим временем в 2013 г. Координаты: широта–время

1 – *H*=0–37 км; *2* – *H*=37–42 км; *3* – *H*=42–50 км; *4* – *H*=55–65 км; *5* – *H*=65–70 км; *6* – *H*=90–100 км. Выборка для событий с K_S≥6.5. Для глубин, больших 100 км, структуры ЛСУ не наблюдались. Здесь и далее положение структур ЛСУ в пространстве представлено только по широте; пример пространственной локализации ЛСУ также и по долготе представлен на рис. 1

На глубинах 70–65 км в этом интервале широт проявился короткий ЛСУ в период 19.05–22.05.2013 г. (рис. 2, *5*). Общей особенностью данного ЛСУ являлось то, что его развитие по глубине активировалось практически одновременно, причем положение этой вертикальной структуры сохранялось длительное время на глубинах до 65 км.

Глубокофокусное Охотоморское событие произошло в период ЛСУ 24.05.2013 г. (момент показан на рис. 2, *1–4*) и не вызвало каких-либо мгновенных изменений в динамике ЛСУ. В период существования всех ЛСУ произошёл ряд сильных сейсмических событий: 1) 28.02.2013 г., 14:04, K_S=15.2; 2) 01.03.2013 г., 13:20, K_S=15.1; 3) 04.03.2013 г., 20:56, K_S=13.6; 4) 24.03.2013 г., 04:18, K_S=14.0; 5) 19.04.2013 г., 18:44, K_S=13.7; 6) 20.04.2013 г., 13:12, K_S=14.6; 7) 19.05.2013 г., 18:44, K_S=13.7; 8) 21.05.2013 г., 03:08, K_S=13.9; 9) 21.05.2013 г., 05:43, K_S=14.4. При этом последние три события произошли в период ЛСУ в коровом слое, непосредственно предшествующий Охотоморскому ГФС (значения магнитуды могут быть рассчитаны по известной формуле С.А. Федотова: $M=(K_S–4.6)/1.5$). Обратим внимание на то, что в последние несколько суток до глубокофокусного события наблюдались аномалии, связанные с активизацией поверхностного слоя [*Дода и др.,* 2013; *Пулинец и др.,* 2015; *Щекотов и др.,* 2015а,б]. Это могло быть связано с усилением дегазации поверхностного слоя, т.е. происходила в определенной мере разгрузка поверхностной среды. Судя по скорости формирования ЛСУ в течение нескольких суток, с такой же скоростью можно было ожидать и разгрузки среды от водорода на глубинах до 100 км, причем разгрузка происходила на значительно большей территории, чем Камчатский регион, что впоследствии и было показано [*Шестаков и др.,* 2014]. Мы полагаем, что уникальные условия для разгрузки литосферы от водорода, возникшие в 2013 г., позволили реализоваться глубокофокусному событию с классом K_S=17.0. Заметим, что менее выраженные поверхностные условия разгрузки среды сопровождали более слабые события, например событие с K_S=15.3 на глубине 520 км, происшедшее 13.10.2018 г.

Для ЛСУ на 52.2°–52.5° с.ш. в период 19.05–24.05.2013 г. была проведена оценка параметров взаимодействия между зонами локальных сейсмических актов в диапазонах глубин 0–37 и 37.1–42 км [*Гуфельд, Новоселов,* 2020]. В рамках уравнения состояния для этих глубин были получены отрицательные значения коэффициента *K* в диапазоне от –0.2 до –1.0, т.е. активизация сейсмических актов происходила за счет локализованных вертикальных процессов переноса энергии – путём водородной дегазации, при которой отсутствовало взаимодействие между локальными зонами. В диапазоне глубин 37–42 км, т.е. в пределах зоны Мохо, контрольный параметр *K* варьировался в диапазоне от –1.0 до +1.0; это означает, что процессы взаимодействия были крайне неустойчивыми. Такие ситуации требуют дополнительных исследований.

ЛСУ – “гвозди” Вадковского в период Кроноцких событий

Рассмотрим сейсмическую ситуацию в период 1994–1998 годы. В этот короткий период произошло четыре сильных сейсмических события, включая Кроноцкие: 1) 01.01.1996 г., K_S=14.3 (*M*=6.4), *H* (глубина гипоцентра) – поверхность; 2) 21.06.1996 г., K_S=13.9 (*M*=6.2), *H*=2 км; 3) 05.12.1997 г., 11:26, K_S=15.5 (*M*=7.0), *H*=10 км; 4) 05.12.2013 г., 18:48, K_S=14.2 (*M*=6.2), *H*=24 км. В отличие от более ранних работ, где отсутствовало разделение по глубинам гипоцентров, представим пространственно-временную ситуацию отдельно для глубин 0–37 км, 37.1–42 км, 42.1–60 км и 61–80 км для одного и того же временного периода (рис. 3). Такое разделение по глубинам позволит более детально рассматривать развитие пространственно-глубинных процессов и показать роль водородной дегазации в текущем и будущем времени.

На что нужно обратить внимание? Удивительно то, что начала всех ЛСУ на разных глубинах совпадают с точностью до одного-двух текущих слабых событий – это период в

несколько часов. Очевидно, структуры ЛСУ по глубине не индуцировались друг другом, а, по-видимому, существовали значительно раньше, но не наблюдались явно в значимых сейсмических актах. ЛСУ на глубинах более 60 км в этот период не наблюдались; события с $K_S \leq 15$ проявлялись в самом начале цикла ЛСУ (события 01.01.1996 г. и 21.06.1996 г.). Данная ситуация характерна для большинства событий из каталога камчатских землетрясений, однако эти ЛСУ начинались с очень слабых событий, как и первое Кроноцкое событие, т.е. слабые события нельзя было относить к форшоковым (по определению). Период времени между началом ЛСУ и первым Кроноцким событием составил около 50 ч; через несколько часов произошло второе Кроноцкое событие. Особенностью ситуации было то, что координаты ЛСУ и обоих Кроноцких событий различались, например, широты

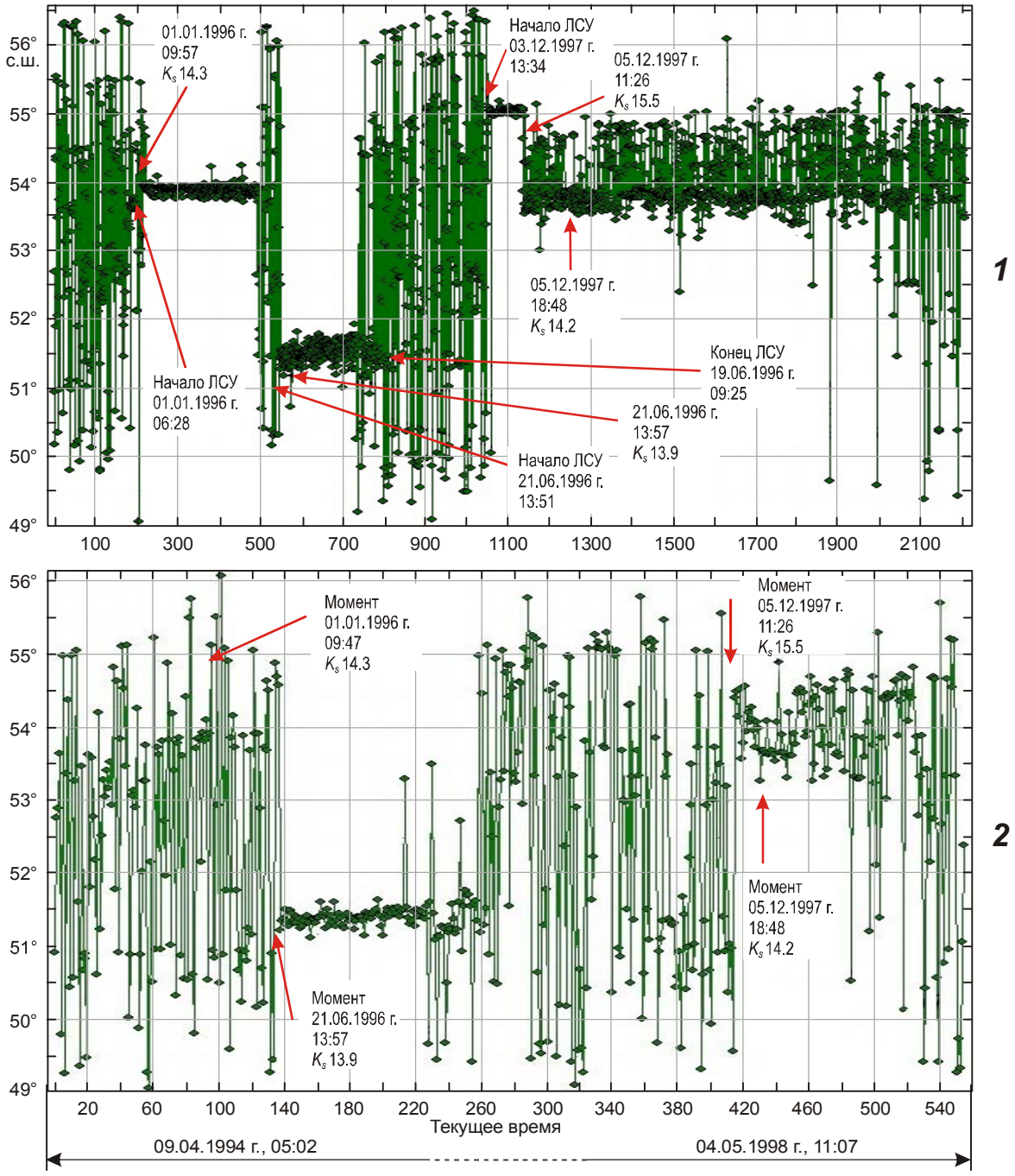

Рис. 3.

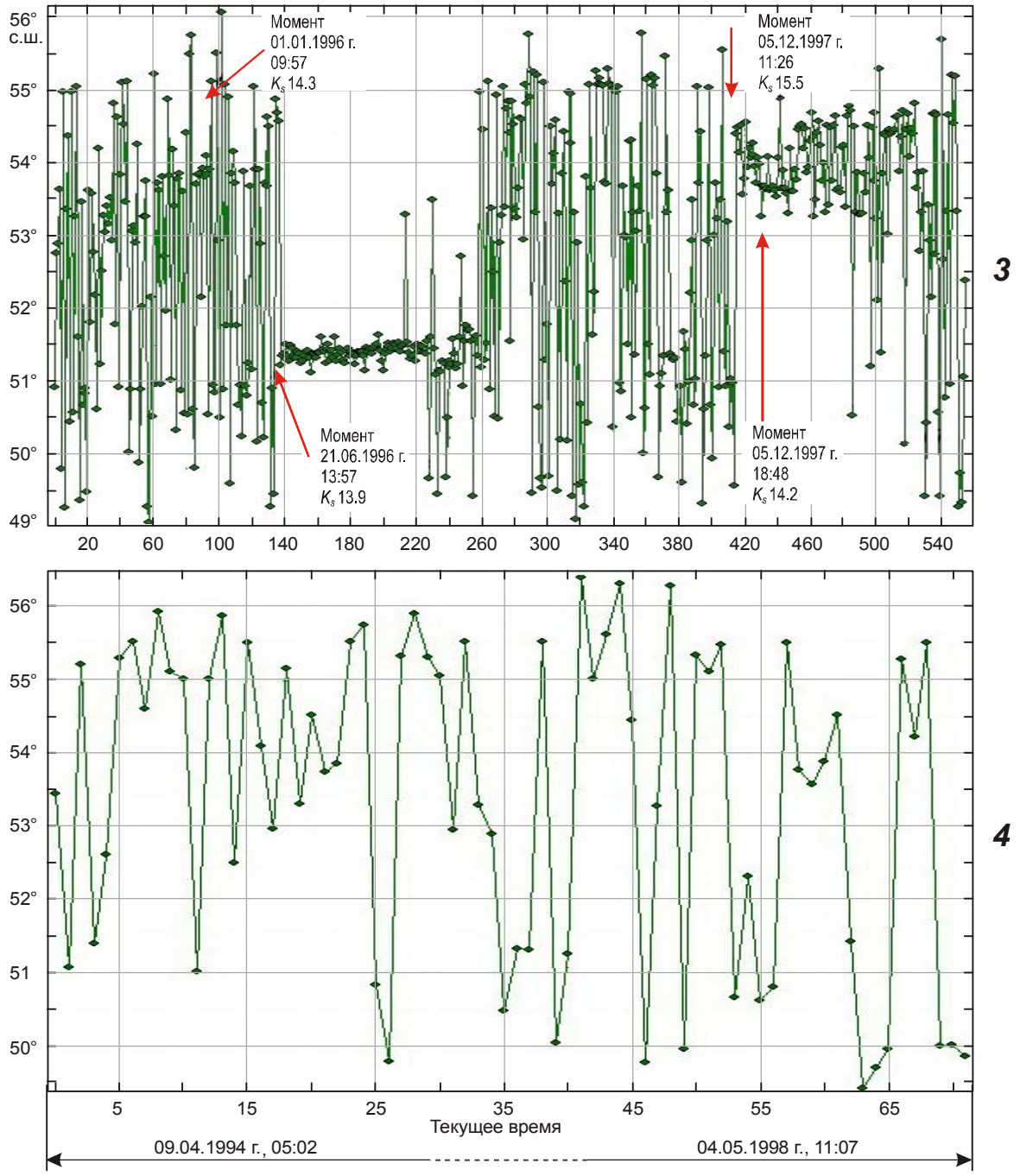

Рис. 3. Пространственно-глубинное распределение сейсмичности и структур ЛСУ с отметками текущего времени в координатах широта–время, временной интервал – 1994–1998 гг. Глубины гипоцентров: *1* – 0–37 км, *2* – 37.1–42 км, *3* – 42.1–60 км, *4* – 61–80 км

составляли соответственно 55.1°, 54.64° и 53.6° с.ш. При этом в коровом слое ЛСУ, появившийся в течение второго Кроноцкого события, прослеживается до конца декабря 1997 г. (см. рис. 3); его проявление заметно также по ЛСУ в более глубинных слоях. Заметим также, что наблюдаемое в режиме ЛСУ число последующих событий (афтершоков) по оценкам больше, чем возможное число событий, рассчитываемых в рамках концентрационного критерия, т.е. это не реакция среды на предполагаемый сброс накопленных напряжений, вызвавших сильнейшее событие (см., например, [*Соболев,* 1993]).

Мы полагаем, что основную роль в формировании сейсмических “гвоздей” играют процессы водородной дегазации, включая “взрывные” сейсмические акты в диапазоне

глубин примерно до 40–50 км [*Гуфельд,* 2007], и формирование деформационных волн диффузионной природы. Фактически вертикальная зона ЛСУ – зона сейсмических “гвоздей” – является каналом активного выноса водорода в поверхностные слои литосферы, большего, чем в фоновые периоды. В условиях значительной расслоенности литосферы вероятно горизонтальное перераспределение водородного потока на большем пространстве. Однако основная структура, которая перераспределяет вертикальные потоки водорода – это, по-видимому, граница Мохо, точнее, лучше говорить “слой Мохо”. Данный слой имеет определенную толщину и на показанных примерах является составной частью канала ЛСУ или сейсмического “гвоздя”. Это интересный результат.

В заключение этого раздела приведем фрагмент пространственно-глубинной структуры в период сильнейшего сейсмического события 2015 г. в Чили (рис. 4). Ярко выраженный ЛСУ – сейсмический “гвоздь”. На рис. 4, *б* обращает на себя внимание дополнительный ЛСУ перед основным событием. Предварительное развитие ЛСУ с близкими координатами наблюдалось также перед событием 01.01.1996 г. (на рис. 3 не отражено) и перед рядом других событий в Камчатском регионе. Это также указывает на высокую скорость изменения сейсмотектонических ситуаций.

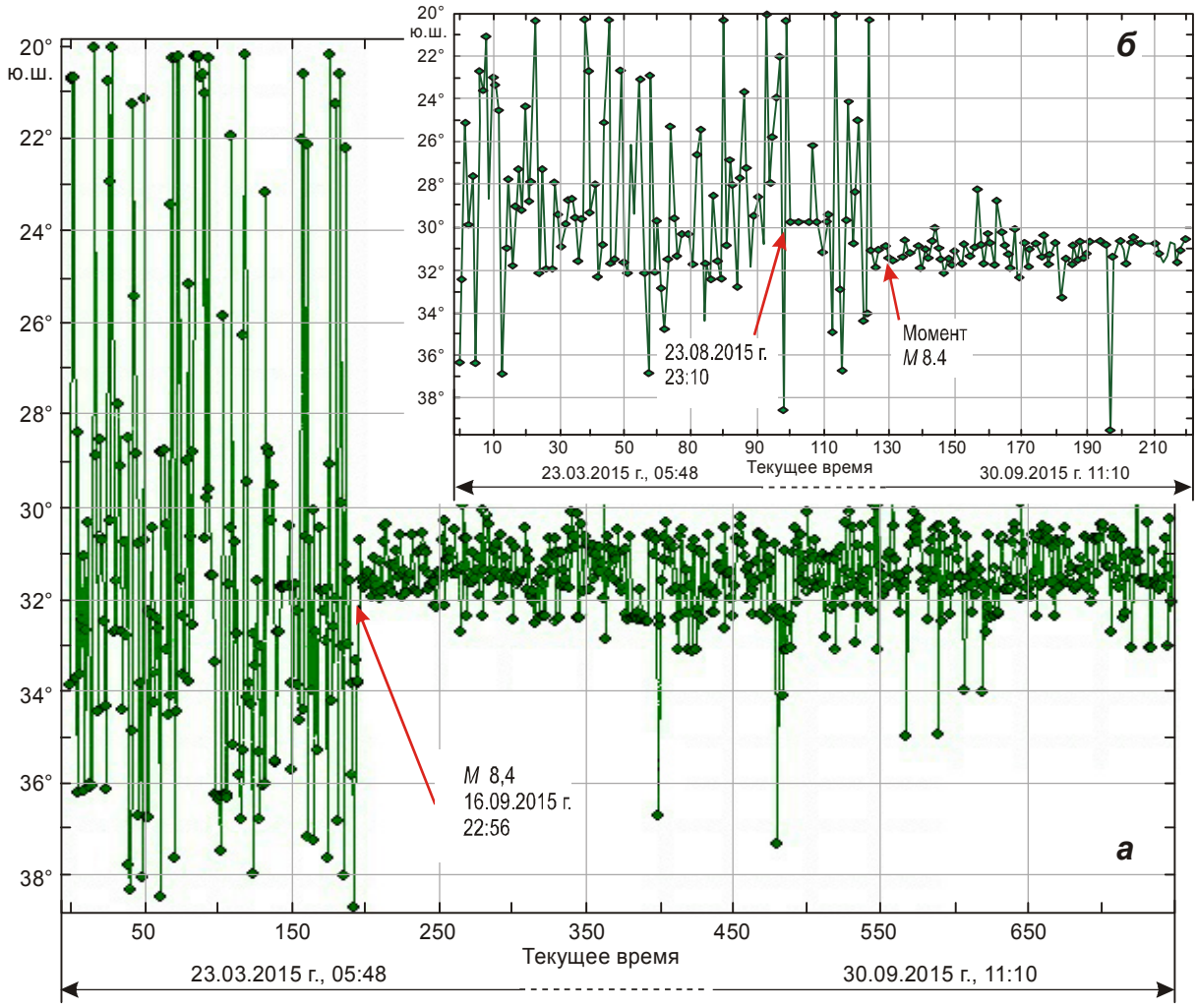

Рис. 4. Сейсмический режим в период события 2015 г. в Чили (*M*=8.4, *H*=11 км) в координатах широта–время: *а* – *H*=5–35 км; врезка *б* – *H*=45–60 км. Ярко выраженная ЛСУ – сейсмический “гвоздь”

Обсуждение и заключение

Внимание к проблемам сейсмической опасности подвержено определенной цикличности, связанной с катастрофическими явлениями в густонаселенных странах. Если говорить о катастрофических событиях за последние 20–30 лет, то для некоторых из них были только долгосрочные оценки ситуации, однако долгосрочные и среднесрочные оценки сейсмической опасности были слишком неопределенны и физически не обоснованы. Более того, было показано, что не существуют так называемых “предвестников” сейсмических актов; реальные аномалии различных полей в поверхностных слоях отражали реакцию среды на региональную дегазацию. Кроме этого, стало понятно, что ключевое положение разрывной идеологии о необходимости накопления упругой энергии до критического уровня не имеет обоснования. Литосфера предельно энергонасыщенна и перманентно неустойчива за счет литостатического давления и процессов взаимодействия водородной дегазации со средой [*Гуфельд, Новоселов,* 2021].

Все понимают, что обеспечение безопасности может быть достигнуто краткосрочным предупреждением в конкретной эпицентральной зоне. Но для этого необходим мониторинг, контролирующий реально протекающие в среде процессы. Дегазационная модель сейсмического процесса позволяет анализировать временное развитие пространственно-глубинных процессов, включая процессы в верхней мантии. Реальную ситуацию позволяют понять сильнейшие события, такие как Охотоморское событие 24 мая 2013 г., и детальные сейсмические исследования в фоновом режиме сейсмического процесса. Это обеспечивается разработанной методикой пошагового анализа сейсмических ситуаций и адекватной оценкой динамики среды с использованием уравнения эволюции [*Гуфельд, Новоселов,* 2015, 2016, 2017, 2020]. Наблюдения ЛСУ – “гвоздей” Вадковского – на глубинах менее 100 км представляют собой прямое указание на перенос энергии водородом снизу и вероятную активизацию сейсмичности в литосфере, уровень которой может быть различным.

Мы видим, что условия для сильнейших событий в литосфере инициируются локальной активизацией дегазации и формированием сейсмического “гвоздя” – ЛСУ. В такие периоды и происходили сильнейшие сейсмические события. В период ЛСУ состояние среды нужно относить к предкатастрофическим или катастрофическим, хотя в этот период могут произойти и более слабые события (примером может служить ЛСУ, возникший непосредственно перед Охотоморским ГФС). Периоды с ЛСУ необходимо относить к сейсмически опасным, т.е. это время тревог, с учётом того, что сейсмический процесс нельзя относить к детерминированным.

Очевидно, что эта кратковременная активизация носит локальный характер, а среда пространственно постоянно испытывает воздействие восходящих потоков водорода, в связи с чем в среде постоянно происходят быстрые или медленные процессы аккомодации её элементов друг относительно друга. Подчеркнем, что случайная по месту активизация сейсмических “гвоздей”, т.е. дополнительное воздействие на среду (находящуюся в предельном по энергонасыщенности состоянии), может служить триггером сильных быстрых движений с инкубационным периодом или без него. Сейсмические “гвозди” вызывают реальное изменение состояния граничных структур, т.е. оказывают дополнительное воздействие на среду, чего нельзя сказать о влиянии на среду магнитных бурь и МГД-генераторов. Инкубационный период – это период тревоги, однако магнитуду ожидаемого события мы оценивать не можем: пока наш опыт очень ограничен.

Так, для события 01.01.1996 г. инкубационный период составил всего несколько часов, для Кроноцкого события – около 2 сут, для события Тохоку – около 50 ч, для первого Симуширского события – около 30 сут, а для событий на Камчатке 21.06.1996 г. и Чилийского события 2015 г. с M=8.4 заметного (составлявшего хотя бы несколько часов) инкубационного периода вообще не было (рис. 4). Положительным моментом здесь является то, что мы можем точно указать положение эпицентральной зоны. Также перед некоторыми коровыми событиями наблюдалась активизация коротких сейсмических “гвоздей” глубже границы Мохо, что тоже может служить признаком опасности.

Существует и еще одна проблема. По данным Камчатского каталога сейсмические “гвозди” с очень коротким временем жизни и небольшими размерами по глубине возникают в верхней мантии довольно часто, тогда как протяженные сейсмические “гвозди” – ЛСУ, проникающие в литосферу, редки. Именно последние структуры несут наибольшую опасность. Однако их возникновение в пространстве и во времени случайно, поэтому для краткосрочной реакции остается очень мало времени или его вообще нет.

Время “ожидания” (но не “подготовки” – этот термин нужно исключить из оценок ситуаций) опасных сейсмических событий для конкретной зоны Камчатского региона (как и для других регионов) может составлять многие десятки лет, поэтому более целесообразна такая организация прогностического центра, в которой на первом плане будет пространственно-глубинный сейсмический мониторинг (наиболее технологичный вид длительного мониторинга), включающий контроль среды структурно чувствительными скоростями сейсмических волн с одновременной пошаговой оценкой динамического состояния среды [Гуфельд, Новоселов, 2020]. Использование ограниченного числа станций на поверхности для локального мониторинга геофизических и гидрогеодинамических параметров, которые не показывают результаты применительно к оценке краткосрочной сейсмической опасности, представляется целесообразным сохранить для получения сигнальной информации об активизации процессов дегазации.

Принципиально предложенные здесь подходы могут быть использованы также в оценках ситуаций в разломно-блоковых структурах платформ, однако масштаб этих зон требует других тектонофизических критериев.

Итогом почти 50-летних исследований физики землетрясений может быть достигнутое осознание того, что землетрясение и вообще сейсмический процесс необходимо рассматривать в рамках реальной геологической среды с учетом процессов, протекающих в ней, а не на основе физики и механики разрушения образцов породы или исследований землетрясений “на столе”. Оценки сейсмической опасности становятся физически понимаемыми. В этом и заключается заслуга коллективов многих геофизических и геологических институтов и их специалистов различного профиля.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания 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

Адушкин В.В., Ан В.А., Гамбурцева Н.Г., Дараган С.Н., Люкэ Е.И., Овчинников В.Н. Сейсмический мониторинг литосферы при помощи ядерных взрывов. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 2. М.: Научный мир, 1998. С.145–150.

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.

Болдырев С.А. Отражение структуры и свойств литосферы в сейсмическом поле Камчатского региона // Физика Земли. 2002. № 6. С.5–28.

Вадковский В.Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений – сейсмические гвозди // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. NZ1001. https://doi.org/10.2205/2012NZ000110

Вертикальная аккреция земной коры: факторы и механизмы / Под ред. М.Г. Леонова. М.: Наука, 2002. 461 с.

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 // Докл. АН СССР. 1982. Т. 266, № 6. С.1349–1353.

Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В., Назарова З.А. О возможной природе глубокофокусного Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 года // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. Вып. 33, № 1. С.46–57.

Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.

Гуфельд И.Л., Матвеева М.И. Барьерный эффект дегазации и деструкция земной коры // Доклады Академии наук. Т. 438, № 2. С.253–257.

Гуфельд И.Л., Новоселов О.Н. Сейсмический процесс в зоне субдукции. Мониторинг фонового режима. М.: МГУЛ, 2014. 100 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. Вып. 34, № 2. С.77–89.

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

Дода Л.Н., Натяганов В.Л., Степанов И.В. Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений // Докл. РАН. 2013. Т. 453, № 5. С.551–557. https://doi.org/10.7868/ S0869565213350144

Захаров В.С., Карпенко В.И., Завьялов С.П. Особенности сейсмических гвоздей в разных геодинамических обстановках // Вестник МГУ. Сер. 4: Геология. 2013. № 1. С.11–18.

Кольская сверхглубокая: Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины / Ред. Е.А. Козловский. М.: Недра, 1984. 490 с.

Кольская сверхглубокая: Научные результаты и опыт исследования / Отв. ред. В.П. Орлов, Н.П. Лаверов. М.: МФ “ТЕХНОНЕФТЕГАЗ”, 1998. 260 с. ISBN: 5-93157-001-2

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.35–47.

Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных поперечных волн в литосфере Восточного Тянь-Шаня и их связь с сейсмичностью // Докл. РАН. 2012. Т. 442, № 6. С.821–824.

Летников Ф.А. Флюидный режим эндогенных процессов в континентальной литосфере и проблемы металлогении // Проблемы глобальной геодинамики: Материалы теорет. семинара ОГГГТН РАН, 1998–1999 гг. М.: ГЕОС, 2000. С.204–224.

Маракушев А.А. Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности. М.: Наука, 1999. 252 с.

Новоселов О.Н. Идентификация и анализ динамических систем. М.: МГУЛ, 2010. 424 с.

Павленкова Н.И. Структура земной коры и верхней мантии и механизм движения глубинного вещества // Вестник ОГГГГН РАН. 2001. № 4 (19). 18 с.

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.

Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера, инициируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 4. С.540–558. https://doi.org/10.7868/S0016794015040136

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.

Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А., Кравченко Н.М., Матвеенко Е.А., Раевская А.А., Салтыков В.А., Чебров Д.В., Ландер А.В. Глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой M_W=8.3 – сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. Вып. 21, № 1. С.17–24.

Уеда С. Новый взгляд на Землю. М.: Мир, 1980. 214 с.

Шевченко В.И., Арефьев С.С., Лукк А.А. Близвертикальные скопления очагов землетрясений, не связанных с тектонической структурой земной коры // Физика Земли. 2011. № 4. С.16–38. https://doi.org/10.1134/S0002333711040028

Шестаков Н.В., Ohzono M., Takahashi H., Герасименко М.Д., Быков В.Г., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Титков Н.Н., Сероветников С.С., Василенко Н.Ф. Моделирование косейсмических движений земной коры, инициированных глубокофокусным Охотоморским землетрясением 24.05.2013 г., M_W=8.3 // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457, № 4. С.471–476. https://doi.org/10.7868/S086956521422023X

Щекотов А.Ю., Чебров В.Н., Берсенёва Н.Ю. Электромагнитные предвестники Олюторского и Охотоморского землетрясений // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Тр. Пятой научно-технической конференции, Петропавловск-Камчатский, 27 сентября – 3 октября 2015 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2015а. С.311–315.

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, 2015б. С.316–320.

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 2. On the seismic interaction of processes in the upper mantle and lithosphere

I.L. Gufeld[1], O.N. Novoselov[2]

[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

– A model for the manifestation of a deep-focus seismic event is proposed
– Local vertical degassing structures in the upper mantle are shown
– The connection of vertical degassing processes with strong seismic events is shown
– Possibilities of short-term seismic hazard estimate are considered
– Examples of accurate prediction of epicentral zones of strong events are shown

Abstract. The seismic process in the subduction zone in a wide range of depths is discussed. Deep-focus events cannot be associated with elastic energy accumulation processes. A model for the manifestation of a deep-focus event is proposed. The sensitivity of the lithosphere to the manifestations of deep-focus events indicates the only mechanism of communication between them. This is hydrogen degassing. The rapid formation of local vertical structures of hydrogen flow up from depths of less than 100 km and their initiation of earthquakes in the lithosphere is shown. The possibility of short-term estimation of the position of the real epicenter zone of a future strong earthquake is shown.

Keywords: subduction zone, hydrogen degassing, vertical degassing structures, lithosphere, upper mantle, deep-focus earthquake

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 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

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., Gamburtseva, N.G., Daragan, S.N., Lyuke, E.I., Ovchinnikov, V.N., *Sejsmicheskij monitoring litosfery pri pomoshchi yadernyh vzryvov. Atlas vremennyh variacij prirodnyh, antropogennyh i social'nyh processov* (Seismic monitoring of the lithosphere using nuclear explosions. Atlas of time variations of natural, anthropogenic and social processes), Moscow, Nauchny Mir, 1998, vol. 2, pp. 145–150. [in Russian].

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 traveltime 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].

Boldyrev, S.A., The effect of the lithospheric structure and properties on the seismic field of the Kamchatka region, *Izvestiya, Physics of the solid Earth,* 2002, no. 6, pp. 447–468.

Chebrov, V.N., Kugaenko, Yu.A., Vikulina, S.A., Kravchenko, N.M., Matveenko, E.A., Raevskaya, A.A., Saltykov, V.A., Chebrov, D.V., Lander, A.V., The Deep Okhotsk Sea Earthquake of 24.05.2013 with a magnitude M_W = 8.3 is the strongest seismic event off the shore of Kamchatka during the period of detailed seismological observations, *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* (KRAUNTS Herald. Earth sciences), 2013, iss. 21, no. 1, pp. 17–24. [in Russian].

Doda, L.N., Natyaganov, 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

Gamburtseva, N.G., Lyuke, E.I., Oreshin, S.I., Pasechnik, I.P., Rubinstein, H.D., Periodic variations of dynamic parameters of seismic waves during translucent of the lithosphere by powerful explosions, *Dokl. AN SSSR* (Reports of the USSR Academy of Sciences), 1982, vol. 266, no. 6, pp. 1349–1353. [in Russian].

Gontovaya, L.I., Gordienko, V.V., Nazarova, Z.A., Possible nature of the May 24, 2013 deep-focus earthquake in the Sea of Okhotsk, *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle* (KRAUNTS Herald. Earth sciences), 2017, iss. 33, no. 1, pp. 46–57. [in Russian].

Gufeld, I.L., *Sejsmicheskij process. Fiziko-himicheskie aspekty* (Seismic process. Physical and chemical aspects), Korolev, TsNIIMash, 2007, 160 p. [in Russian].

Gufeld, I.L., Matveeva, M.I., Barrier effect of degassing and destruction of the Earth's crust, *Dokl. Earth Sci.,* 2011, vol. 438, iss. 1, pp. 677–680. https://doi.org/10.1134/S1028334X11050199

Gufeld, I.L., Novoselov, O.N., *Sejsmicheskij process v zone subdukcii. Monitoring fonovogo rezhima* (Seismic process in the subduction zone. Monitoring of the background mode), Moscow, MGUL, 2014, 100 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

Kol'skaya sverhglubokaya: Issledovaniye glubinnogo stroyeniya kontinental'noy kory s pomo-shch'yu bureniya Kol'skoy sverkhglubokoy skvazhiny (Kola Superdeep: Study of the Deep Structure of the Continental Crust by Drilling the Kola Superdeep Borehole), ed. E.A. Kozlovsky, Moscow, Nedra, 1984, 490 p. [in Russian].

Kol'skaya sverkhglubokaya: Nauchnyye rezul'taty i opyt issledovaniya (Kola Superdeep: Scientific Results and Research Experience), eds. V.P. Orlov, N.P. Laverov, Moscow, MF "TECHNONEFTEGAZ", 1998, 260 p. [in Russian]. ISBN: 5-93157-001-2

Kopnichev, Yu.F., Sokolova, I.N., Heterogeneities of the shear wave attenuation field in the litoshphere of East Tien Shan and their relationship with seismicity, *Dokl. Earth Sci.*, 2012, vol. 442, iss. 2, pp. 292–295. https://doi.org/10.1134/S1028334X12020249

Kopnichev, Yu.F., Sokolova, I.N., Spatio-temporal variations of the *S*-wave attenuation field in the source zones of large earthquakes in Tien Shan, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth,* 2003, vol. 39, iss. 7, pp. 568–579.

Letnikov, F.A., The Fluid Regime of Endogenous Processes in the Continental Lithosphere and Problems of Metallogeny, *in: Problemy global'noj geodinamiki* (Problems of Global Geodynamics), Moscow, GEOS, 2000, pp. 204–224. [in Russian].

Marakushev, A.A., *Proiskhozhdenie Zemli i priroda ee endogennoj aktivnosti* (The Origin of the Earth and the nature of its endogenous activity), Moscow, Nauka, 1999, 252 p. [in Russian].

Novoselov, O.N., *Identifikaciya i analiz dinamicheskih sistem* (Identification and analysis of dynamic systems), Moscow, MGUL, 2010, 424 p. [in Russian].

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].

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

Shchekotov, A.Yu., Chebrov, V.N., Berseneva, N.Yu., Electromagnetic precursors of the Olyutorsky and Okhotomorsky earthquakes, *in: Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii: Tr. Pyatoi nauchno-tekhnicheskoi 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, 2015a, pp. 311–315. [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-tekhnicheskoi 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, 2015b, pp. 316–320. [in Russian].

Shestakov, N.V., Ohzono, M., Takahashi, H., Gerasimenko, M.D., Bykov, V.G., Gordeev, E.I., Chebrov, V.N., Titkov, N.N., Serbenkov, S.S., Vasilenko, N.F., Modeling of coseismic crustal movements initiated by the May 24, 2013, $M_W = 8.3$ Okhotsk deep focus earthquake, *Dokl. Earth Sci.*, 2014, vol. 457, iss. 2, pp. 976–981. https://doi.org/10.1134/S1028334X1408008X

Shevchenko, V.I., Aref'ev, S.S., Lukk, A.A., Subvertical clusters of earthquake hypocenters unrelated to the tectonic structure of the Earth's crust, *Izvestiya, Physics of the solid Earth*, 2011, vol. 47, no. 4, art. 276. https://doi.org/10.1134/S1069351311030050

Sobolev, G.A., *Osnovy prognoza zemletryasenij* (Fundamentals of earthquake forecasting), Moscow, Nauka, 1993, 313 p. [in Russian].

Uyeda, S., *The new view of the Earth*, W.H. Freeman & Co., 1978. 217 p.

Vadkovsky, V.N., Subvertical clusters of earthquake hypocenters – seismic nails, *Vestnik ONZ RAN* (ONZ RAS Herald), 2012, vol. 4, NZ1001. [in Russian]. https://doi.org/10.2205/2012NZ000110

Vertikal'naya akkreciya zemnoj kory: faktory i mekhanizmy (Vertical Accretion of the Earth's Crust: Factors and Mechanisms), Ed. by M.G. Leonov, Moscow, Nauka, 2002, 461 p. [in Russian].

Zakharov, V.S., Karpenko, V.I., Zavyalov, S.P., Seismic nails in various geodynamic conditions, *Moscow Univ. Geol. Bull.,* 2013, vol. 68, iss. 1, pp. 10–16. https://doi.org/10.3103/S0145875213010080

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