

УДК 550.34+551.24

В.С. Захаров¹О МЕХАНИЗМЕ ГЕНЕРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ «ГВОЗДЕЙ»²

Проанализированы пространственно-временные особенности сейсмических «гвоздей». Некоторые из них связаны с сильными землетрясениями или с извержениями вулканов, для других не выявлена явная приуроченность положения к разломным зонам и прочим тектоническим структурам. В ряде случаев установлен слабовыраженный тренд в последовательности глубины очагов. На основании вычисления показателя Херста выявлена устойчивая тенденция к порядковой последовательности глубины гипоцентров, составляющих «гвоздь», что согласуется с моделями самоорганизации с положительной обратной связью при взаимодействии флюидных потоков и тектонических деформаций, которые используют для объяснения механизма генерации землетрясений. Особенности изменения числа землетрясений в день при формировании сейсмических «гвоздей» хорошо согласуются с динамикой акустической эмиссии при иницировании водой по результатам длительных экспериментов. Наиболее вероятный механизм генерации сейсмических «гвоздей», не связанных с сильными землетрясениями, — активизация сейсмичности под действием флюидов.

Ключевые слова: субвертикальные скопления, гипоцентры землетрясений, сейсмические «гвозди», извержения вулканов, разломы, флюиды, акустическая эмиссия, показатель Херста.

We analyzed the spatial and temporal characteristics of the seismic «nails». Some of the «nails» are associated with large earthquakes or volcanic eruptions. For a number of seismic «nails» a clear relationship with the fault zones and other tectonic structures isn't revealed. In some cases, poorly expressed trends in the sequence of the foci depth are detected. The Hurst exponent values indicate the persistent behavior in the sequence of the earthquake's depths. This result agrees with models of self-organization with a positive feedback loop in the interaction of fluid flow and tectonic deformation to explain the mechanism of earthquakes. Features of change in the number of earthquakes per day in the formation of seismic «nails» are in good agreement with the dynamics of acoustic emission in initiating by water as a result of long experiments. The most likely mechanism for the generation of seismic «nails», not related to large earthquakes is the activation of seismicity by fluids.

Key words: subvertical clusters of earthquake hypocenters, seismic «nails», volcanoes, faults, fluids, acoustic emission, Hurst exponent.

Введение. Субвертикальные, изометричные в плане, короткоживущие сейсмофокальные структуры были обнаружены В.Н. Вадковским [Вадковский, 1996, 2012] при исследовании пространственного распределения гипоцентров землетрясений в районе Японских островов и названы им сейсмическими «гвоздями». Было установлено, что они состоят главным образом из очагов слабых землетрясений с магнитудой (M) 2–3, вертикальный размер «гвоздя» составляет от 10 до 50 км, глубина образования не превосходит 90 км, эпицентральная проекция «гвоздя» имеет диаметр 2–10 км. Верхняя часть «гвоздя» может выходить или не выходить на поверхность земли.

В наших исследованиях, результаты которых изложены в статье [Захаров и др., 2013], при анализе разных каталогов землетрясений выявлены сейсмические «гвозди» в разных районах мира (тихоокеанское побережье Северной Америки, Камчатка, Японские о-ва, о. Сулавеси). Общие особенности всех обнаруженных сейсмических «гвоздей» — их субвертикальная конфигурация и небольшое время формирования (от 10 дней до 2 месяцев). Значительная часть из

рассмотренных сейсмофокальных структур приурочена к зонам субдукции: они расположены в районе вулканической дуги, перед дугой или за ней, а также в районе желоба. На рис. 1 в качестве примера показаны два сейсмических «гвоздя», образовавшихся южнее о. Хонсю в сентябре–ноябре 1990 г. Первый расположен перед желобом Нанкай ($33,2^\circ$ с.ш., $138,6^\circ$ в.д.), глубина очагов 30–80 км. В начале его формирования произошло землетрясение с $M = 6,6$ (глубина 60 км), а затем с $M = 6,0$ (глубина 42 км), остальные события — с $M < 5$. Второй «гвоздь» расположен за вулканической дугой зоны субдукции Изу-Бонин ($33,7^\circ$ с.ш., $139,4^\circ$ в.д.) и состоит из очагов слабых землетрясений.

Установлено, что некоторые из сейсмических «гвоздей» связаны с извержениями вулканов (предшествуют и следуют за ними), а также с гидротермальной деятельностью. Для некоторых «гвоздей» сильное ($M > 5$) землетрясение может выступать инициатором формирования, а некоторые содержат такие землетрясения в своем «теле». Для ряда сейсмических «гвоздей» не выявлена явная приуроченность их по-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, доцент, канд. физ.-мат. н.; e-mail: vszakharov@yandex.ru

² Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №13-05-01033).

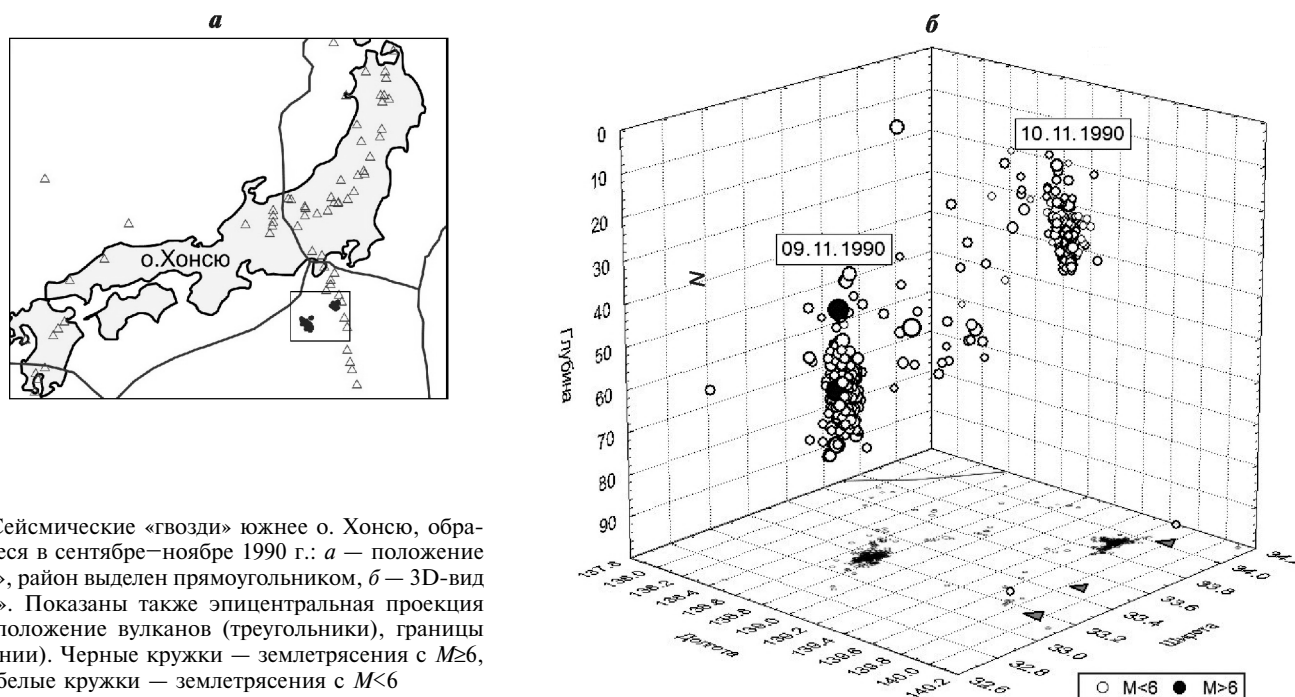


Рис. 1. Сейсмические «гвозди» южнее о. Хонсю, образовавшиеся в сентябре–ноябре 1990 г.: а — положение «гвоздей», район выделен прямоугольником, б — 3D-вид «гвоздей». Показаны также эпицентральная проекция очагов, положение вулканов (треугольники), границы плит (линии). Черные кружки — землетрясения с $M \geq 6$, белые кружки — землетрясения с $M < 6$

ложения к разломным зонам и другим тектоническим структурам. В ряде работ [Вадковский, 1996, 2012; Шевченко и др., 2011; Захаров и др., 2013] высказано предположение, что в этом случае их образование связано с движением флюидов. В статье продолжено изложение результатов исследований [Захаров и др., 2013] по изучению свойств и характеристик этих интересных сейсмофокальных структур.

Цель статьи — анализ пространственно-временных особенностей сейсмических «гвоздей», их связи с тектоникой и геодинамикой для выявления возможных механизмов их генерации.

Материалы и методы исследования. При анализе использованы каталог NEIC PDE (<http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>) за 1973–2011 гг., каталог Японского метеорологического агентства (Japan Meteorological Agency, JMA), каталоги Южно-Калифорнийского (Southern California Earthquake Data Center, SCEDC, <http://www.data.scec.org>) и Северо-Калифорнийского (Northern California Earthquake Data Center, NCEDC, <http://quake.geo.berkeley.edu>) центров за 1967–2010 гг., каталог Камчатского филиала Геофизической службы РАН (<http://data.emsd.iks.ru>) за 1962–2011 гг.

Для исследований большую роль играет точность определения координат землетрясений, поскольку рассматривается тонкая структура сейсмичности. Погрешность определения координат в каталоге PDE и в Камчатском каталоге составляет 5–10 км, в Японском каталоге JMA — <1 км, в калифорнийских каталогах SCEDC и NCEDC — <3 км (в большинстве случаев <1 км). Отметим, что в каталогах используются разные виды магнитуд, поэтому в каждом случае мы указываем ее тип.

Размер очага землетрясения здесь не учитывается, он считается точкой с соответствующими про-

странственными координатами и магнитудой. Это оправдано тем, что, во-первых, в задачи исследований не входило изучение процессов в очаге, а во-вторых, сейсмические «гвозди» состоят главным образом из слабых землетрясений, размер очагов которых незначителен. Так, для землетрясений с $M = 5$ (достаточно редких в структуре «гвоздей») протяженность очага не превосходит 4 км [Касахара, 1985], для более слабых событий она еще меньше и находится в пределах погрешности определения координат.

Для исследования характеристик формирования сейсмических «гвоздей» определялись тренды во временной последовательности глубины очагов, распределение числа событий во времени и показатель Херста [Лукк и др., 1996; Turcotte, 1997]. Значения показателя Херста позволяют отличить временные зависимости, обладающие устойчивой тенденцией (персистентностью) при $H > 0,5$, от тех, которые характеризуются ее отсутствием (антиперсистентностью) при $H < 0,5$.

Выявление трендов в последовательности глубины очагов землетрясений. В предыдущих работах [Вадковский, 1996, 2012; Захаров и др., 2013] отмечалось, что анализ временных последовательностей глубины очагов для всех исследованных сейсмофокальных структур не позволяет выделить какие-либо тренды изменения глубины событий с течением времени. Нами проведена более детальная работа по поиску линейных трендов во всех этих последовательностях. Примеры таких оценок для сейсмических «гвоздей», выявленных южнее о. Хонсю и на о. Хоккайдо, представлены на рис. 2.

Результаты показывают, что для большинства последовательностей значения наклона линейной регрессии близки к нулю. Значения коэффициента корреляции при аппроксимации везде значительно

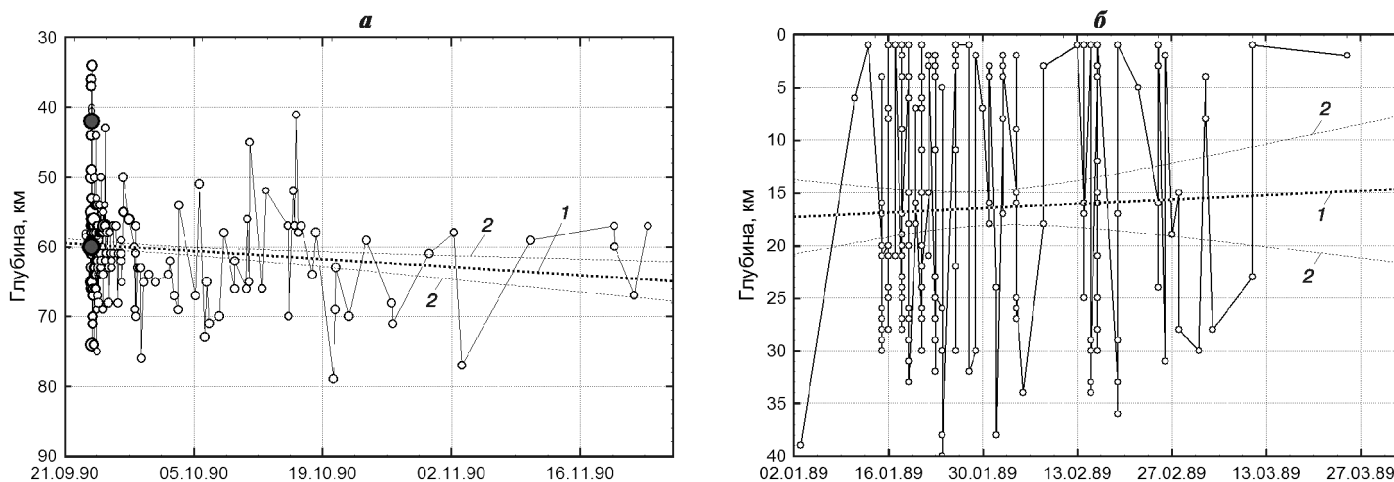


Рис. 2. Временная последовательность значений глубины очагов землетрясений при формировании «гвоздя»: *а* — южнее о. Хонсю (сентябрь–ноябрь 1990), *б* — на о. Хоккайдо (январь–март 1989). Показаны также тренды (1) и 95%-й доверительный интервал (2). Черные кружки — землетрясения с $M \geq 6$, белые кружки — землетрясения с $M < 6$

$< 0,5$ (как правило $0,1–0,2$), а стандартные ошибки полученных значений наклона по абсолютной величине сопоставимы с самими значениями (или даже превосходят их). Это в основном подтверждает сделанный ранее вывод об отсутствии явных трендов. Однако для нескольких сейсмических «гвоздей» значения наклона заметно отличаются от нуля. В частности, «гвозди», образовавшиеся после начала извержений вулканов Коло и Карымский, имеют довольно заметный тренд нарастания глубины событий. Возможно, это связано с процессами, сопровождающими извержения. Интересно, что при этом для «гвоздя», предшествующего извержению вулкана Св. Елена (Каскадия), напротив, слабо выделяется тренд к уменьшению глубины, что, возможно, связано с генерацией сейсмичности при поднятии магмы и реализацией механизма, описанного в статье [Kilburn, 2003].

Отметим, что для большинства «гвоздей» (4 из 6), расположенных в районе вулканических дуг, критерий Стьюдента $t > 2$, что говорит о достоверности выявленных трендов ($p = 0,95$), несмотря на низкие значения коэффициента корреляции. Для двух остальных «гвоздей» $t > 1,6$ и достоверность выделенных трендов $p = 0,9$. Указанное, по мнению автора, свидетельствует о связи этих сейсмических «гвоздей» с вертикальным движением вещества (флюиды, расплав). Однако разнонаправленность выявленных трендов нуждается в объяснении. Достоверны также тренды, выявленные для ряда «гвоздей» в Калифорнии, а также для ряда других, не связанных с извержениями, например для «гвоздей», представленных на рис. 2.

Анализ Херста и выявление устойчивых тенденций.

Анализ Херста позволяет выявить некоторые скрытые закономерности временных последовательностей глубины очагов. Значения показателя Херста H определяли для порядковой последовательности глубины гипоцентров, составляющих сейсмические «гвозди». Установлено, что значения H достоверно превышают $0,5$ и находятся в диапазоне $0,57–0,69$.

При этом ошибки определения H не превосходят $0,05$, коэффициент корреляции при линейной регрессии не меньше $0,98$, критерий Стьюдента указывает на высокую достоверность аппроксимации. Как сказано выше, такие значения H означают наличие устойчивой тенденции в этих последовательностях.

Изменение числа землетрясений в день при формировании сейсмических «гвоздей». В ходе исследования выявлено, что характер распределения числа землетрясений в день различается для сейсмических «гвоздей», связанных с извержениями, сильными землетрясениями и не связанных с этими событиями.

На рис. 3, *а* представлено распределение во времени числа событий в день при формировании сейсмического «гвоздя», следующего за сильным Карымским землетрясением 1.01.1996 ($M = 7$). Такая картина типична для «гвоздей», в начале формирования которых происходят сильные события: для «гвоздя» южнее о. Хонсю в 1990 г., следующего за землетрясением ($M = 6,6$) (рис. 3, *б*); для «гвоздя» на о. Кадык в 1999 г. ($M = 6,8$) и в районе Инью (Калифорния) в 1998 г. ($M = 5$). По-видимому, эти «гвозди» представляют собой афтершоковый процесс сильных землетрясений, для них наблюдается степенной спад числа событий, который описывается законом Омори [Kanamori, Brodsky, 2004].

Для сейсмических «гвоздей», в начале формирования которых не было сильного землетрясения, вид распределения числа событий в день во времени другой. На рис. 4, *а* показано изменение числа землетрясений в день в марте–апреле 1983 г. при формировании «гвоздя» на о. Хоккайдо [Вадковский, 2012; Захаров и др., 2013]. Анализ этого распределения не позволяет выделить единый степенной спад числа землетрясений во времени. Аналогичные зависимости наблюдаются для «гвоздя» в 1998 г. в районе кальдеры Лонг Велли (Калифорния) (рис. 4, *б*) и многих других. Обращает на себя внимание наличие промежуточных максимумов в этих распределениях. Возникновение

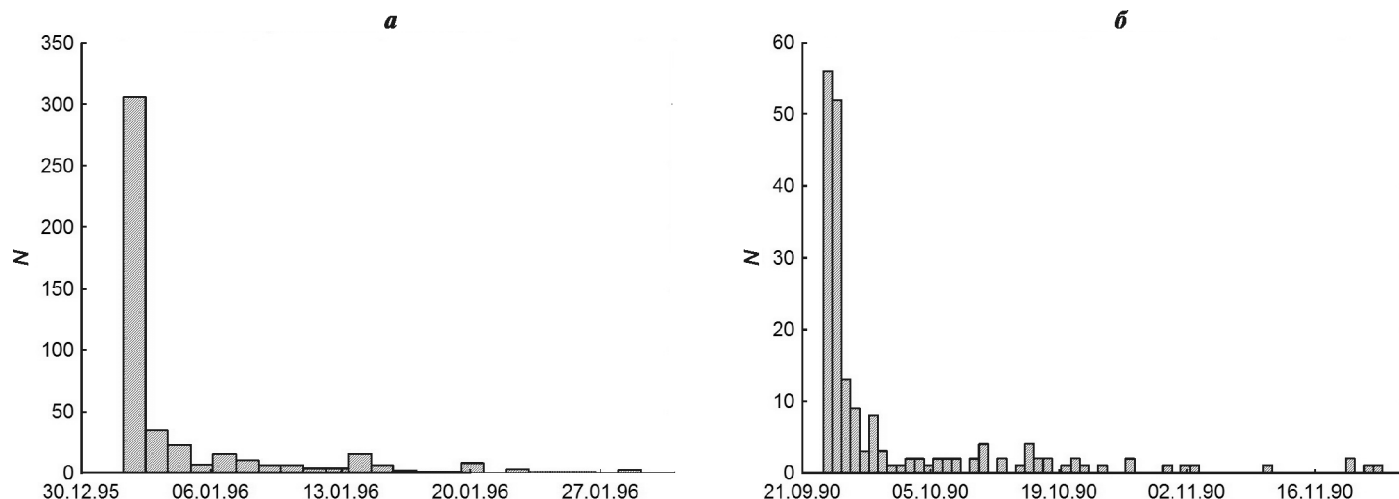


Рис. 3. Изменение во времени числа землетрясений в день при формировании сейсмического «гвоздя», следующего за сильным землетрясением: *а* — в «гвозде», следующем за Крымским землетрясением 01.01.1996 с $M = 7$; *б* — в «гвозде» южнее о. Хонсю в сентябре–ноябре 1990, следующем за землетрясением 24.09.1990 с $M = 6,6$

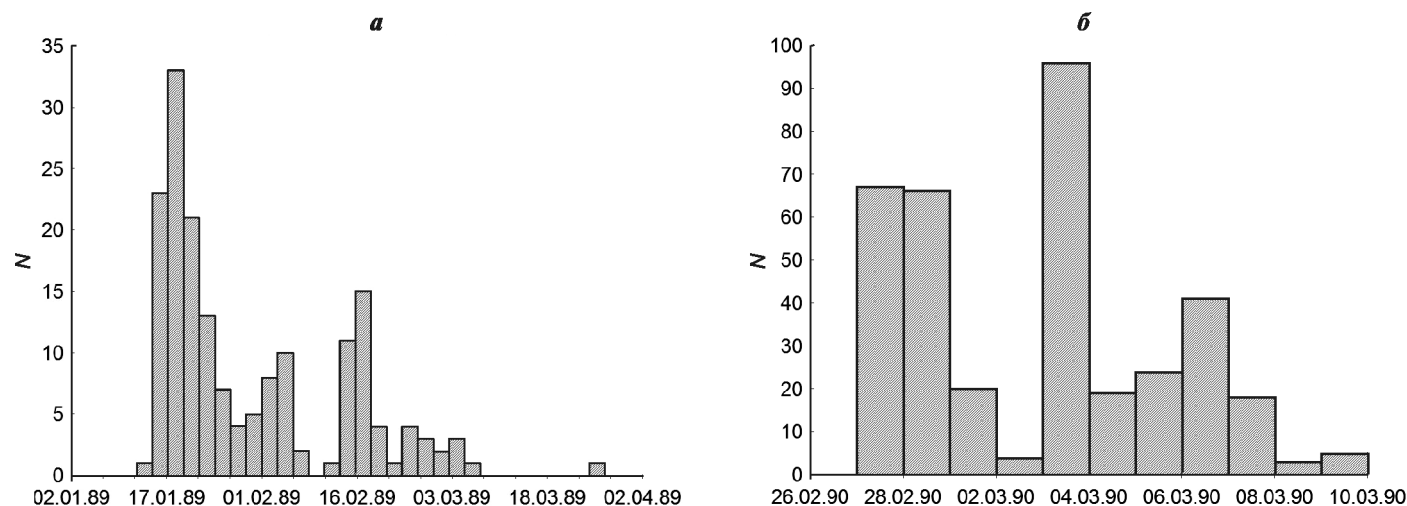


Рис. 4. Изменение во времени числа землетрясений в день при формировании сейсмических «гвоздей», не связанных с сильными землетрясениями: *а* — на о. Хоккайдо в 1989 г., *б* — в районе кальдеры Лонг Велли (Калифорния) в 1990 г.

сейсмических «гвоздей» — процесс затухающий, но, по-видимому, отличающийся от затухания афтершоков сильных землетрясений.

Для сейсмических «гвоздей», связанных с извержением вулкана, распределение числа событий по дням носит нерегулярный характер, однако также можно выделить промежуточный максимум. Пример такой зависимости для «гвоздя», связанного с извержением вулкана Св. Елена в 1980 г., представлен на рис. 5.

Длиннопериодные землетрясения. В сейсмологии и вулканологии установлено, что активную роль в генерации так называемых длиннопериодных (низкочастотных) землетрясений играют флюиды [Горельчик, Сторчеус, 2001]. Длиннопериодный характер событий обычно определяется на основании спектрального анализа сейсмических записей, однако в распоряжении автора таких записей нет. Косвенно его можно также выявить по соотношению магнитуды по объ-

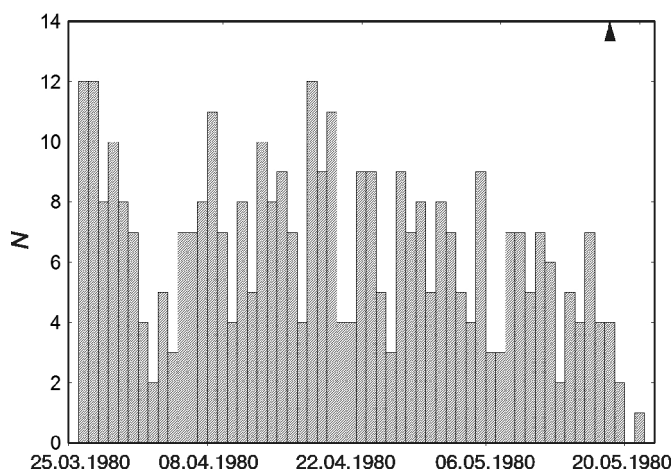


Рис. 5. Изменение числа землетрясений в день при формировании сейсмического «гвоздя», связанного с извержением вулкана Св. Елены в 1980 г. Треугольник — начало катастрофического извержения 18.05.1980 г.

емным волнам m_b и моментной магнитуды M_w . Отношение m_b/M_w характеризует относительный вклад высоко- и низкочастотного сейсмического излучения, так как магнитуда m_b определяется преимущественно по высокочастотным сейсмическим колебаниям, а M_w — по низкочастотной составляющей сейсмического излучения [Канамори, 1983]. Пониженные значения этого отношения свидетельствуют о длиннопериодном характере землетрясений.

К сожалению, только для некоторых из рассмотренных автором землетрясений, принадлежащих к сейсмическим «гвоздям», в каталогах есть данные о разных видах магнитуды. Так, для сейсмического «гвоздя», сформировавшегося в районе Алеутских островов в 2010 г., для одного события отношение $m_b/M_w = 5,2/5,6$, что указывает на его длиннопериодный характер.

Результаты исследований и их обсуждение. В работе [Вадковский, 2012] на основе анализа марковских свойств последовательностей глубин очагов в «гвозде» сделан вывод, что формирование «гвоздя» происходит сразу во всем интервале глубины и не наблюдается предпочтительного направления его роста вверх или вниз. Детальный анализ, проведенный автором, позволяет уточнить эти выводы. Выявлены слабые, но достаточно достоверные тренды во многих рассмотренных последовательностях. Результаты определения параметра Херста указывают на наличие устойчивой тенденции (персистентности) в порядковой последовательности глубины гипоцентров, составляющих «гвоздь». Эта последовательность не случайна, он обладает определенной степенью детерминизма и своего рода памятью.

Память процесса проявляется в том, что текущее состояние обусловлено величинами управляющих переменных (характеристик) не только в текущий момент времени, но и в предыдущие моменты. Наличие памяти в природных процессах (эффект Херста) объясняется наличием степенной релаксации. Память возникает, когда реакция системы на внешнее воздействие не мгновенна, а имеет вид переходного процесса, растянутого во времени. В этом случае происходит интегрирование (накапливание) воздействия, являющегося причиной изменений [Лукк и др., 1996].

Выявленные особенности формирования сейсмических «гвоздей» могут помочь в поиске механизмов их генерации. В работах [Вадковский, 1996, 2012; Шевченко и др., 2011; Захаров и др., 2013] показано, что указанные особенности (геометрия и скорость формирования) проявления сейсмических «гвоздей» позволяют высказать предположение о возможной роли флюидов в процессе их образования. В этом случае эффект памяти может быть вызван релаксацией вязкой жидкости в пористой среде, которая характерна для большинства задач нестационарной и нелинейной фильтрации. В качестве альтернативного объяснения рассматривалась релаксация накопленных напряжений на разломах в виде серии слабых земле-

трясений. При этом поверхностные проявления этих разломов могут отсутствовать, особенно если учесть небольшую магнитуду большинства землетрясений, составляющих сейсмические «гвозди».

Представляется, что нет необходимости противопоставлять эти механизмы. Современные представления о роли флюидов в генерации землетрясений позволяют рассматривать их как единый механизм. В работе [Киссин, 2009] описан механизм самоорганизации с положительной обратной связью при взаимодействии флюидных потоков и тектонических деформаций для объяснения механизма генерации землетрясений. Предлагается следующая модель: под воздействием флюидов снижается прочность пород (прежде всего сдвиговая). Это происходит как за счет механических, так и физико-химических эффектов. В последнем случае важнейшую роль играет эффект Ребиндера — адсорбционное снижение прочности [Ребиндер, Щукин, 1972]. Вследствие понижения прочности активизируются тектонические подвижки, что в свою очередь способствует дополнительному экстрагированию флюидов. В результате подвижек выделяется тепло и повышается температура, что приводит к еще большему усилению метаморфической дегидратации пород. Выделение воды и повышение флюидного давления сопровождаются снижением эффективного напряжения, что создает условия для дальнейшего развития сдвиговых деформаций. При этом отмечается, что описанные процессы возможны и в изначально сухих породах, если по P – T -условиям выделение воды при реакциях дегидратации может происходить непосредственно в зоне сдвига.

Таким образом, согласно работе [Киссин, 2009], тесные связи тектонических процессов и флюидных потоков определяются механизмом самоорганизации, который реализуется за счет «взаимного возбуждения»: флюидные потоки активизируют тектонические процессы, а последние приводят к усилению миграции флюидов, причем инициирующим может быть каждый из этих факторов. При этом «...зарождение субвертикального элемента флюидной системы обусловлено наличием ослабленной зоны, которая образовалась под действием растягивающих или сдвиговых напряжений и деформаций. Такая ослабленная зона <...> может служить каналом восходящей миграции глубинных флюидов и областью развития подвижек» [Киссин, 2009, с. 95].

При этом важно отметить, что взаимодействие флюидных потоков и тектонического деформирования носит выраженный нелинейный характер, причем нелинейность определяется прежде всего именно воздействием флюидов. Для нелинейных систем характерна сильная зависимость поведения от параметров системы (например, от P – T -условий). Если параметры среды в нелинейных системах достигают некоторых критических значений, могут происходить очень быстрые изменения и перестройки в системе. Нелинейная положительная обратная связь приводит к самоуско-

рящемся лавинообразному развитию процесса [Пригожин, Стенгерс, 1986]. Подобное сверхбыстрое нарастание процессов в течение ограниченного промежутка времени в открытых нелинейных структурах получило название режима с обострением [Князева, Курдюмов, 2002]. В настоящее время такой подход применяется для объяснения быстрых тектонических явлений, в частности землетрясений. Особенно это касается землетрясений, вызванных так называемым триггерным (спусковым) механизмом. Подобный же механизм, по мнению автора, может реализовываться при генерации сейсмических «гвоздей» — поступление флюида в ослабленную зону при достижении его концентрации или давления критических значений может спровоцировать землетрясение или быстрый каскад землетрясений «гвоздевой» конфигурации.

В статье [Гуфельд, 2012] высказано близкое по смыслу предположение об инициировании кажущихся «глубокофокусных разрывов» и быстрой «гвоздевой» сейсмичности потоками водорода: «... наиболее активное взаимодействие со средой может быть связано с восходящими потоками водорода и уже подготовленными особенностями структуры». Предполагается, что выше границы Мохо зона «гвоздя» находится на начальной стадии образования будущей

разрывной структуры за счет взаимодействия среды с локализованным восходящим потоком водорода.

Близка к приведенным выше флюидометаморфическая модель сейсмотектогенеза, предложенная М.В. Родкиным [Родкин, 2006]. Согласно этой модели, превращения в литосфере, которые сопровождаются снижением прочности, происходят при каталитическом воздействии глубинного водного флюида, при этом важную роль играет метастабильное состояние флюида, распределенного по границам зерен.

Представляется, что такие модели хорошо объясняют особенности сейсмических «гвоздей» как во времени, так и в пространстве.

Приведенные выше соображения о роли флюидов подкреплены и результатами лабораторных экспериментов. В работах [Соболев и др., 2010; Соболев, Пономарев, 2011] рассмотрена динамика акустической эмиссии при инициировании водой по результатам длительных экспериментов. Вливания небольшого (<0,1% от объема модели) количества воды приводили к активизации акустической эмиссии, которая происходила с задержкой во времени. По мнению авторов указанных работ, инициирование акустической эмиссии связано с локальным снижением прочности (вероятно, из-за эффекта Ребиндера) и увеличением

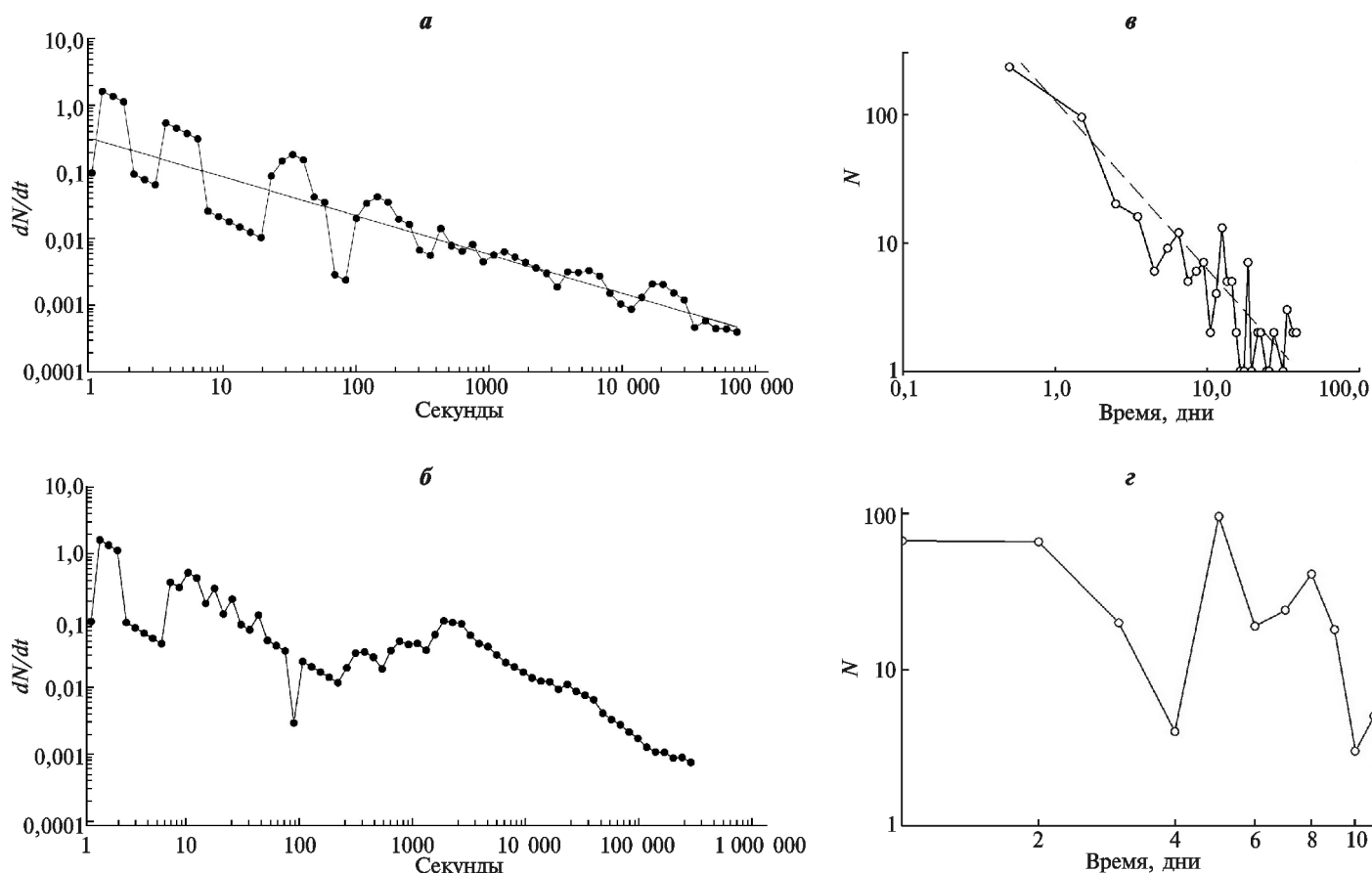


Рис. 6. Сопоставление результатов экспериментов по акустической эмиссии и развитию сейсмических «гвоздей» во времени. Слева — изменение числа акустических импульсов dN/dt в секунду в опыте с инициированием: *а* — реакция на механическую подгрузку; *б* — на вливание воды, по [Соболев и др., 2010]; справа — изменение числа землетрясений в день при формировании сейсмического «гвоздя»: *в* — следующего за сильным Карымским землетрясением, *г* — в районе кальдеры Лонг Велли (Калифорния) в 1990 г. Линии — закон Омори

напряжений возле метастабильных трещин, что не противоречит триггерному механизму. Большие импульсы возникали между слабыми событиями, что имеет аналогию с роями землетрясений. Отмечено, что характер нарастания и затухания акустической эмиссии во времени существенно различается при разных условиях эксперимента — после ступенчатой механической подгрузки и при иницировании вливанием воды. В первом случае происходит степенное затухание числа событий во времени по закону Омори (рис. 6, а). Во втором — интенсивность акустической эмиссии проходит через ярко выраженный максимум» (рис. 6, б).

Заключение. Сопоставим результаты этих экспериментов с результатами исследования временных закономерностей формирования сейсмических «гвоздей», полученных автором. Выше показано, что для «гвоздей», следующих за сильными землетрясениями, происходит уменьшение числа событий по степенному закону. На рис. 6, в эта зависимость для «гвоздя», следующего за Крымским землетрясением 1996 г., показана в двойном логарифмическом масштабе. Видно, что она хорошо соответствует закону Омори и результатам экспериментов по изучению акустической эмиссии без добавления воды (рис. 6, а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вадковский В.Н. Природа и механизм сейсмических «гвоздей» // Тез. докл. «Ломоносовские чтения — 1996». М., 1996. С. 63–64.

Вадковский В.Н. Субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений — сейсмические «гвозди» // Вестн. ОНЗ РАН. 2012. Т. 4 (NZ1001. doi:10.2205/2012NZ000110).

Горельчик В.И., Сторчеус А.В. Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 373–379.

Гуфельд И.Л. Геологические следствия аморфизации структуры литосферы и верхней мантии, вызванные водородной дегазацией // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3, № 4. С. 417–435 (doi:10.5800/GT-2012-3-4-0083).

Захаров В.С., Карпенко А.И., Завьялов С.П. Особенности сейсмических «гвоздей» в различных геодинамических обстановках // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2013. № 1. С. 11–18.

Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2009. 328 с.

Казахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.

Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики. Режимы с обострением, самоорганизация, темпомыры. СПб.: Алетей, 2002. 418 с.

Лукк А.А., Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.

Пригожин И.Р., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986. 432 с.

В то же время для «гвоздей», не сопровождающихся в начале формирования сильными землетрясениями, число событий в день имеет довольно заметный максимум. На рис. 6, г показана подобная зависимость для «гвоздя» в районе кальдеры Лонг Велли в 1990 г. в двойном логарифмическом масштабе. Похожие распределения числа событий в единицу времени (в день) выявлены для многих сейсмических «гвоздей». Сходство этих зависимостей с результатами экспериментов по акустической эмиссии с вливанием воды свидетельствует в пользу «флюидного» механизма генерации сейсмических «гвоздей».

Таким образом, наиболее вероятный механизм генерации сейсмических «гвоздей», не связанных с сильными землетрясениями, — активизация сейсмичности под действием флюидов.

Автор благодарен Мировому центру данных по физике твердой Земли за предоставление Калифорнийского и Японского каталогов. Также автор искренне признателен Н.А. Сергеевой, М.Г. Ломизе, Н.В. Короновскому, Д.А. Симонову, М.В. Родкину, В.Б. Смирнову за обсуждения, сделанные замечания и помощь в работе.

Ребиндер П.А., Шукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физ. наук. 1972. Т. 108, вып. 1. С. 3–42.

Родкин М.В. Флюидометаморфогенная модель сейсмостектогенеза // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 181–200.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Динамика разрушения моделей геологической среды при триггерном влиянии жидкости // Физика Земли. 2011. № 10. С. 48–63.

Соболев Г.А., Пономарев А.В., Майбук Ю.Я. и др. Динамика акустической эмиссии при иницировании водой // Физика Земли. 2010. № 2. С. 50–67.

Шевченко В.И., Арефьев С.С., Лукк А.А. Близвертикальные скопления очагов землетрясений, не связанные с тектонической структурой земной коры // Физика Земли. 2011. № 4. С. 16–38.

Kanamori H. Magnitude scale and quantification of earthquakes // Tectonophys. 1983. Vol. 93. P. 185–199.

Kanamori H., Brodsky E.E. The physics of earthquakes // Rep. Prog. Phys. 2004. Vol. 67. P. 1429–1496.

Kilburn C.R.J. Multiscale fracturing as a key to forecasting volcanic eruptions // J. Volc. and Geothermal Res. 2003. Vol. 125. P. 271–289.

Padhy S., Mishra O.P., Zhao D., Wei W. Crustal heterogeneity in the 2007 Noto-Hanto earthquake area and its geodynamical implications // Tectonophys. 2011. Vol. 509. P. 55–68 (doi:10.1016/j.tecto.2011.06.002).

Turcotte D.L. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Second edition. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. 398 p.

Поступила в редакцию
11.03.2013