

УДК 550.34+551.24

В.С. Захаров<sup>1</sup>, А.И. Карпенко<sup>2</sup>, С.П. Завьялов<sup>3</sup>

## ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ «ГВОЗДЕЙ» В РАЗНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ

Выявлены изометричные в плане, почти вертикальные скопления землетрясений (сейсмические «гвозди») в разных районах мира. Вертикальная протяженность сейсмических «гвоздей» составляет от 10 до 90 км, большинство землетрясений в них слабые, время формирования от 10 дней до 2 месяцев. Часть «гвоздей» связана с сильными землетрясениями или с извержениями вулканов. Для многих сейсмических «гвоздей» не выявлена явная связь с разломными зонами и другими тектоническими структурами. Значения показателя Херста ( $H > 0,5$ ) указывают на наличие устойчивой тенденции в последовательности глубины землетрясений, составляющих «гвоздь».

*Ключевые слова:* субвертикальные скопления гипоцентров землетрясений, сейсмические «гвозди», вулканы, разломы, флюиды, показатель Херста.

We detect isometric in the plan almost vertical cluster of earthquakes (seismic “nails”) in various regions of the world. The vertical size of the seismic “nails” is from 10 to 90 km, most of earthquakes are weak, and the formation time is from 10 to 60 days. Some of “nails” are associated with large earthquakes and volcanic eruptions. For a number of seismic “nails” a clear relationship with the fault zones and other tectonic structures isn't revealed. The Hurst exponent values ( $H > 0.5$ ) indicates the persistent behavior in the sequence of the earthquake's depths.

*Key words:* subvertical clusters of earthquake hypocenters, seismic “nails”, volcanoes, faults, fluids, Hurst exponent.

**Введение.** В.Н. Вадковский [Вадковский, 1996, 2012] при исследовании пространственного распределения гипоцентров землетрясений в районе Японских островов по данным каталога JMA за 1983–1990 гг. обнаружил почти вертикальные, изометричные в плане, короткоживущие скопления гипоцентров землетрясений, которые были названы сейсмическими «гвоздями», которые состоят главным образом из очагов слабых землетрясений (с магнитудой 2–3). Протяженность «гвоздя» по вертикали составляет от 10 до 50 км, глубина образования не превосходит 90 км. Эпицентральная проекция «гвоздя» имеет диаметр 5–20 км. Отмечены также субвертикальные зоны концентрации очагов землетрясений и в других районах (Аляска, море Банда).

Цель исследований — выявление и анализ сейсмических «гвоздей» и подобных им скоплений гипоцентров землетрясений в разных районах мира, поиск их связи с сейсмическим процессом и геодинамикой.

**Субвертикальные кластеры очагов землетрясений.** В специальной литературе не много упоминаний о выделении сейсмофокальных структур, подобных сейсмическим «гвоздям». В работе [Paradimitriou et al., 2006] в районе о. Лейфакада (Ионическое море)

выявлено субвертикальное скопление гипоцентров, связанное с землетрясением, произошедшим 29.11.1994 г. ( $M_W=5,1$ ). Время образования «гвоздя» — 3 недели, глубина 0–12 км. Фокальные механизмы согласуются с направлением наблюдаемых косейсмических трещин на поверхности, что, по мнению авторов этой статьи, указывает на связь с разломами. В работе [Wang, Zhao, 2006] рассмотрено распределение афтершоков сильного землетрясения Фукуока, произошедшего 20.03.2005 г. ( $M_{JMA}=7,0$ ). Гипоцентры распределены вдоль разлома не равномерно, а группируются в структуры типа сейсмических «гвоздей». Глубина очагов — до 20 км. Указанные исследователи предполагают значительную роль флюидов в процессе триггерного механизма генерации главного события.

В работе [Padhy et al., 2011] представлены афтершоки землетрясения Ното-Ханто, произошедшего 25.03.2007 г. ( $M_W=6,6$ ) в Японии. Распределение гипоцентров имеет характер «гвоздя» и не связано прямо с разломами, глубина очагов — до 13 км, также сделано предположение о возможной роли флюидов в процессе генерации главного события и вообще сейсмичности.

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

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, студент; e-mail: AlexandroKarpenko@yandex.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, студент; e-mail: zasergey@rambler.ru

В работе [Kilburn, 2003] говорится о «цилиндрических» кластерах гипоцентров, которые приурочены к вулканам и возникновение которых предшествует извержению. Диаметр «цилиндра» — несколько километров, глубина — до 5–7 км, магнитуда составляет 0–2, иногда до 5–6. В [McNutt, 1996] приводятся данные о подобных кластерах в связи с извержением вулкана Св. Елена и др. В качестве механизма предлагается разномасштабный процесс разрушения, объединения трещин. В работе [Yukutake et al., 2010] выявлены структуры типа «гвоздей», приуроченные к вулкану Хаконе. Размер эпицентральной проекции не более 1 км, глубина до 6 км.

В работе [Шевченко и др., 2011] установлено существование столбообразного близвертикального скопления очагов землетрясений в центральной части территории Гармского геодинамического полигона (Таджикистан). Близкие по морфологии и положению в земной коре скопления очагов афтершоков выявлены в связи с Алтайским (2003), Нефтегорским (1996), Култукским (2008), Дагестанским (1970) землетрясениями. При этом, по мнению авторов этой работы, отсутствует связь скоплений с какими-либо элементами тектонической структуры регионов, сделано предположение, что эти структуры связаны с поступлением глубинных флюидов.

**Материалы и методы исследования.** Нами использованы следующие каталоги землетрясений: 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., а также каталог Камчатского филиала Геофизической службы РАН (<http://data.emsd.iks.ru>) за 1962–2011 гг.

Поскольку предмет нашего исследования — тонкая структура сейсмичности, большую роль играет точность определения координат землетрясений. Погрешность определения координат в каталоге PDE и в камчатском каталоге составляет 5–10 км, в японском каталоге (JMA) — меньше 1 км, в калифорнийских каталогах SCEDC и NCEDC — < 3 км (в большинстве случаев < 1 км). Отметим, что поскольку в разных каталогах использованы разные шкалы магнитуды, в каждом случае мы указываем их тип.

Кроме того, при сопоставлении с тектоническими и геологическими структурами использованы границы литосферных плит [Bird, 2003], карты активных разломов Евразии [Trifonov, 2004], карта четвертичных разломов США (Quaternary Fault and Fold Database of the United States, <http://earthquake.usgs.gov/hazards/qfaults/>), карта вулканов мира по данным Глобальной программы вулканизма (Global Volcanism Program, GVP, <http://www.volcano.si.edu/index.cfm>).

Поскольку в наши задачи не входило изучение процессов в очаге землетрясения, то размер очага мы не учитывали и считали его точкой с заданными пространственными координатами и магнитудой. (Учет пространственной протяженности источника, которая зависит от силы землетрясения и механизма очага, оставлен для дальнейших исследований.)

Для обнаружения сейсмических «гвоздей» создано программное обеспечение (ПО), позволяющее осуществлять их поиск по каталогам землетрясений. Алгоритм поиска основан на следующих критериях: малый период формирования кластера (10–90 дней); изометричность в плане и небольшой размер (1–50 км); минимальное число землетрясений в «гвозде» (100–200); вертикальный размер «гвоздя» превосходит горизонтальный не менее чем в 2 раза. Указанное ПО осуществляет предварительный поиск кандидатов в «гвозди», окончательное выделение происходит в ручном режиме.

Для исследования характеристик формирования скоплений землетрясений во времени определяли показатель Херста. Показатель Херста вычисляется в результате анализа соотношения  $R/S$  ( $R/S$ -анализ) [Лукк и др., 1996; Turcotte, 1997], где  $R$  — «размах» временного ряда — разность наибольшего и наименьшего накопленных отклонений от текущего среднего (на данном интервале времени  $\tau$ );  $S$  — стандартное отклонение ряда на том же интервале. Установлено, что для многих природных процессов между отношением  $R/S$  и продолжительностью интервала  $\tau$  устойчиво выполняется степенная зависимость вида

$$R/S \sim \tau^H,$$

где  $H$  — показатель Херста.

Полностью случайный (стохастический) процесс характеризуется значением показателя  $H = 0,5$ . Отличие значений  $H$  от 0,5 происходит в связи с существованием у природных процессов своего рода памяти. При  $H > 0,5$  временные зависимости обладают устойчивой тенденцией, т.е. если приращения были положительными, они будут таковыми и в будущем (персистентность), а при  $H < 0,5$  тенденция сменяется на противоположную, т.е. рост наблюдаемой величины сменяется убыванием и наоборот (антиперсистентность). Анализ проводили с помощью авторского программного обеспечения FraTiS.

**Выявленные сейсмические «гвозди».** В результате анализа нами выявлено несколько структур в разных районах мира, которые по конфигурации можно отнести к типу сейсмических «гвоздей» (рис. 1). Приведем характеристики этих кластеров.

1. Район вулкана Св. Елена (Каскадия), 46,2° с.ш., 122,2° з.д. (рис. 2). Время образования — март–май 1980 г., глубина очагов 0–15 км, положение приурочено к вулканической дуге зоны субдукции. Формирование этого скопления предшествовало катастрофическому извержению вулкана Св. Елена, которое

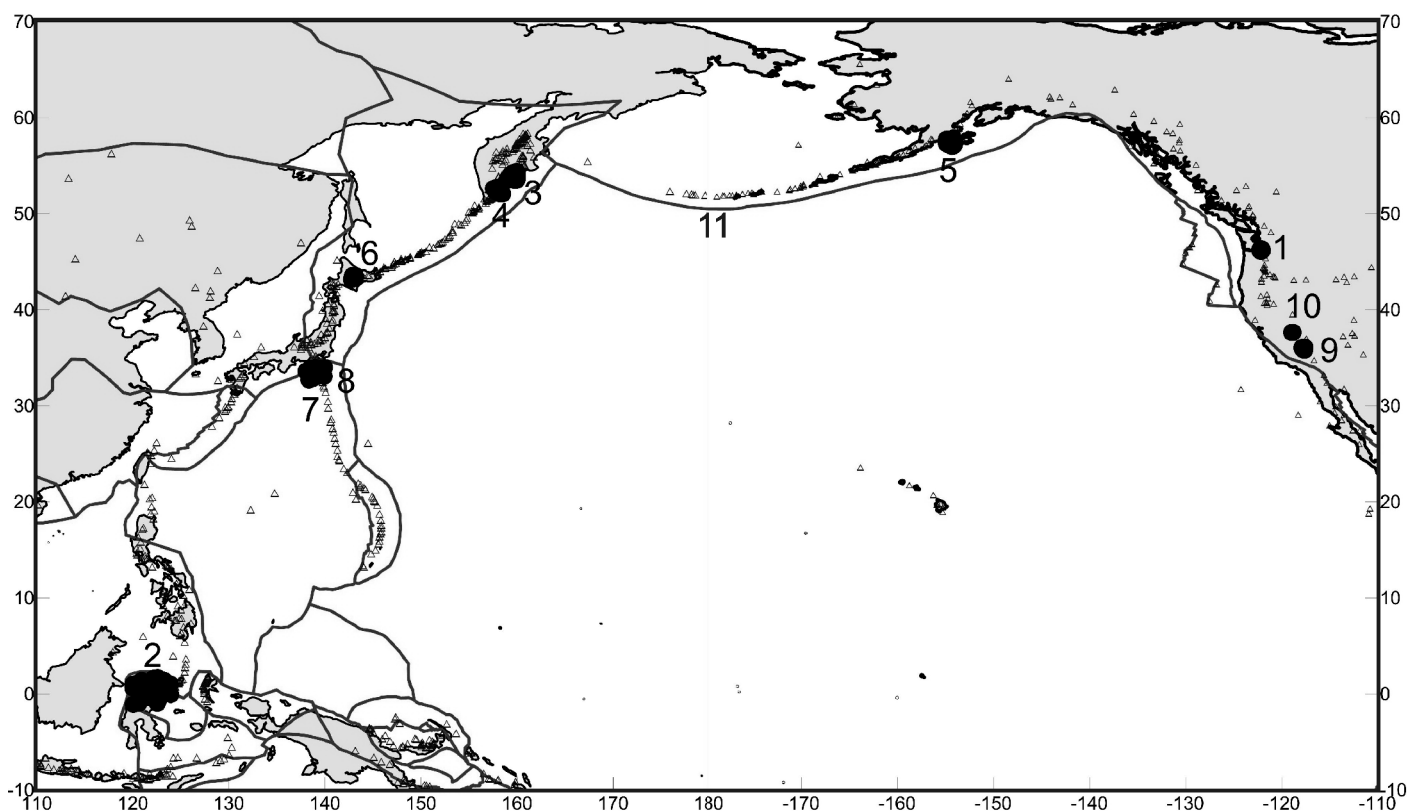


Рис. 1. Сейсмические «гвозди», выявленные в ходе наших исследований: 1–10 — номера «гвоздей» в порядке их описания; линии — границы плит, по [Bird, 2003]; треугольники — вулканы

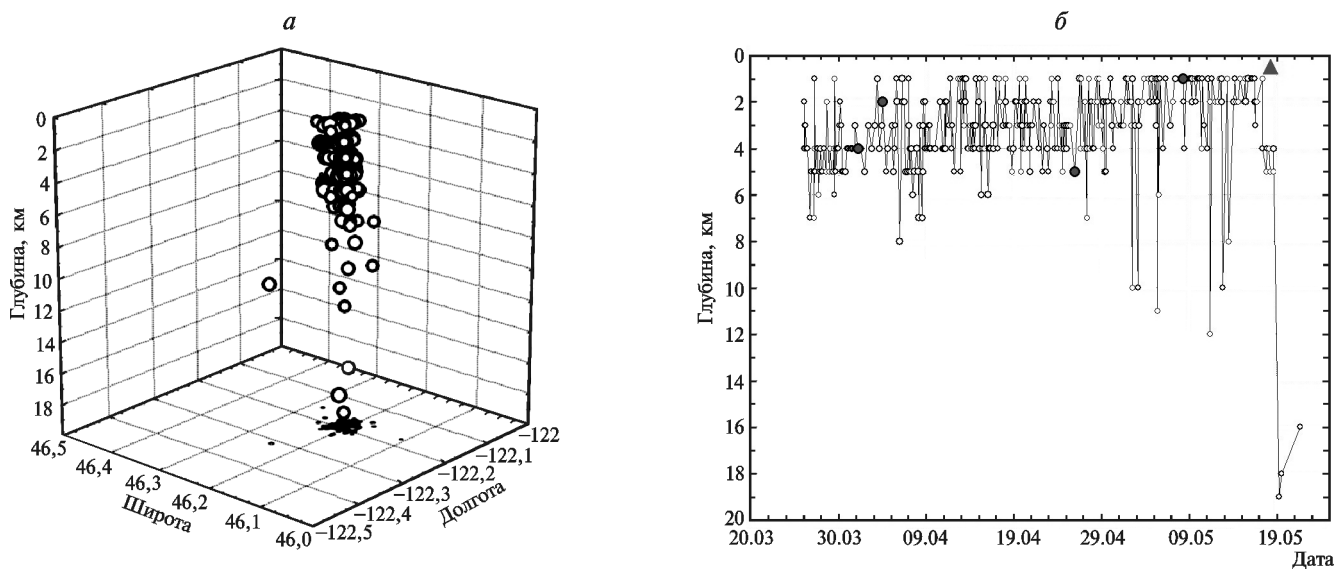


Рис. 2. Сейсмофокальная структура, связанная с извержением вулкана Св. Елена в мае 1980 г.: *a* — 3D-вид «гвоздя», показаны также эпицентральные проекции очагов; *б* — последовательность изменения глубины очагов землетрясений во времени при формировании «гвоздя», треугольник — начало катастрофического извержения 18.05.1980. Черные кружки — землетрясения с  $m_b=5$ , белые кружки — землетрясения с  $m_b<5$

началось 18.05.1980. Четыре события, распределенные достаточно равномерно во времени, имеют  $m_b=5$ .

2. Район вулкана Коло (залив Томини, о. Сулавеси),  $0,3^\circ$  с.ш.,  $121,8^\circ$  в.д. (рис. 3). Время образования — июль 1983 г., глубина очагов 20–90 км. «Гвоздь» окружен границей плит со сложной конфигурацией и состоящей из разных участков (конвергентных, ди-

вергентных и трансформных). Положение приурочено к вулканической дуге зоны субдукции. Формирование «гвоздя» практически точно совпало с извержением вулкана Коло (Уна-Уна), которое началось 18.07.1983. Подчеркнем, что, несмотря на вероятную приуроченность образования «гвоздя» к извержению, очаги землетрясений лежат глубоко. Отмечено много событий,

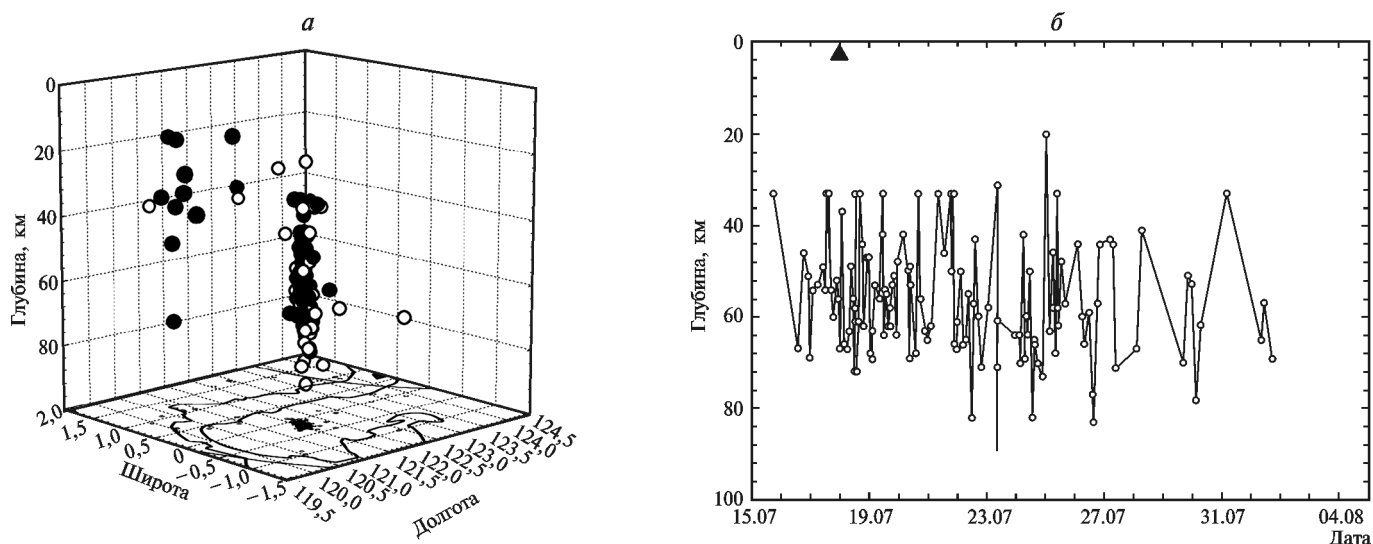


Рис. 3. Сейсмофокальная структура, связанная с извержением вулкана Коло, залив Томини, о. Сулавеси в 1983 г.: *а* — 3D-вид «гвоздя», показаны также эпицентральные проекции очагов, положение вулканов (треугольники), контуры береговой линии (черные линии); *б* — последовательность изменения глубины очагов землетрясений при формировании «гвоздя», треугольником показано начало извержения 18.07.1983. Черные кружки — землетрясения с  $m_b \geq 5$ , белые кружки — землетрясения с  $m_b < 5$

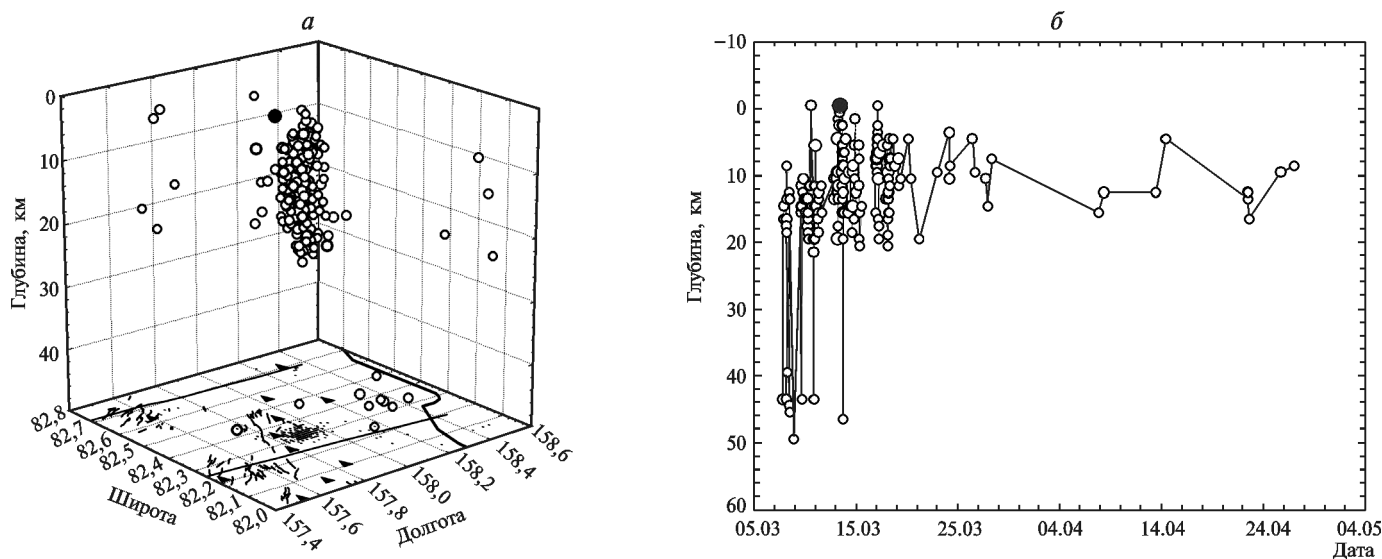


Рис. 4. Сейсмический «гвоздь» в Южной Камчатке, образовавшийся в марте 1983 г.: *а* — 3D-вид «гвоздя», показаны также эпицентральные проекции очагов, положение вулканов (треугольники), контуры береговой линии (черные линии) и активные разломы; *б* — последовательность изменения глубины очагов землетрясений при формировании «гвоздя». Черные кружки — землетрясение с  $M_L = 5,3$ , белые кружки — землетрясения с  $M_L < 5$

распределенных достаточно равномерно во времени, которые имеют магнитуду  $m_b \geq 5$ .

3. Район вулкана Карымский (Камчатка),  $53,9^\circ$  с.ш.,  $159,4^\circ$  в.д. Время образования — январь 1996 г., глубина очагов 0–60 км, положение приурочено к вулканической дуге Камчатской зоны субдукции. Это скопление — очаги афтершоков сильного Карымского землетрясения 1.01.1996 ( $M_L = 6,4$ ,  $M_S = 7$ ), а также, возможно, с последующих извержений вулканов Карымский и Академии Наук. Во время формирования «гвоздя» произошло много событий с  $M_L \geq 5$ .

4. Южная Камчатка,  $52,3^\circ$  с.ш.,  $157,9^\circ$  в.д. (рис. 4). Время образования — март 1983 г., глубина очагов

0–20 км, положение приурочено к вулканической дуге Камчатской зоны субдукции. Явная связь эпицентральной проекции «гвоздя» с разломами не прослеживается. Рядом находятся недействующие вулканы. Во время формирования «гвоздя» произошло землетрясение с  $M_L = 5,3$ , которое отвечает примерно середине временного интервала его формирования, однако оно расположено несколько в стороне от основного тела «гвоздя». До этого события землетрясения происходили в диапазоне глубины 0–10 км, а после него очаги лежат во всем диапазоне 0–20 км.

Субвертикальные сейсмофокальные скопления удалось выделить также в районе, где произошло

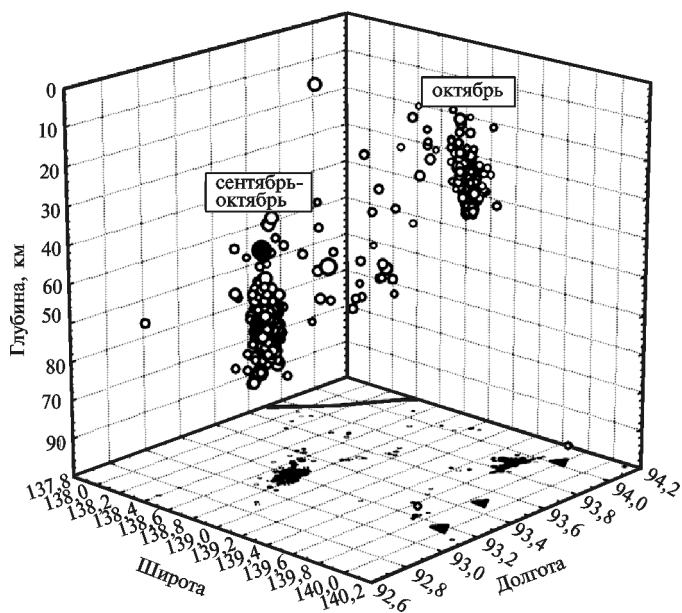


Рис. 5. Сейсмические «гвозди» южнее о. Хонсю, образовавшиеся в сентябре–октябре 1990 г. Показаны также эпицентральные проекции очагов, положение вулканов (треугольники), границы плит (серые линии). Черные кружки — землетрясения с  $M_{JMA} \geq 6$ , белые кружки — землетрясения с  $M_{JMA} < 6$

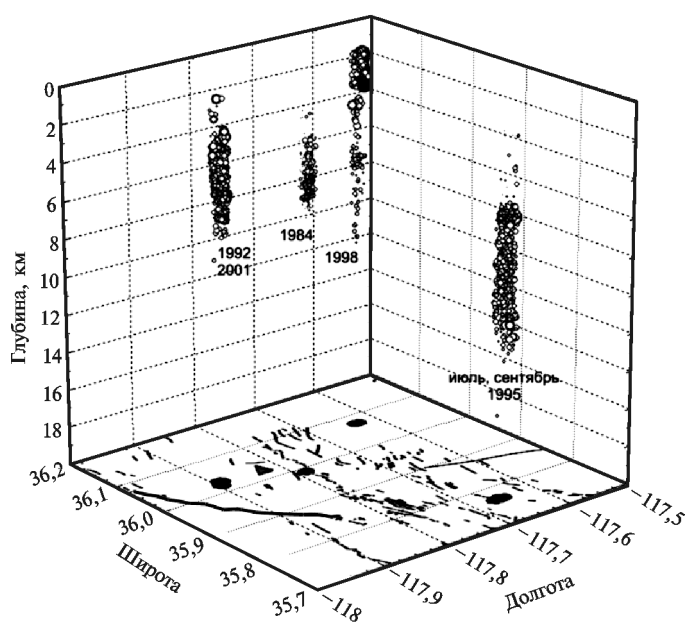


Рис. 6. Сейсмические «гвозди» в районе Инью (Калифорния), образовавшиеся в 1984, 1992, 1995, 1998, 2001 гг. Показаны также эпицентральные проекции очагов, положение вулканов (треугольники) и четвертичные разломы (серые линии). Черные кружки — землетрясения с  $M_L = 5$ , белые кружки — землетрясения с  $M_L < 5$

Олюторское землетрясение 21.04.2006 ( $M_S=7,7$ ), но несколько в стороне от очага главного события. Однако эти кластеры состоят из совсем небольшого числа гипоцентров, поэтому их принадлежность к сейсмическим «гвоздям» требует дальнейшего изучения.

5. О-в Кадьяк (Аляска),  $57,3^\circ$  с.ш.,  $154,3^\circ$  з.д. Время образования — декабрь 1999 г., повторная активизация произошла в июле 2000 г., глубина очагов 0–70 км. «Гвоздь» расположен в аккреционной призме Алеутской зоны субдукции перед вулканической дугой. В начале первой активизации произошло землетрясение с  $m_b=6,8$  (глубина 66 км), а затем с  $m_b=6,5$  (глубина 40 км), в начале второй — с  $m_b=6,3$  (глубина 43 км). Таким образом, формирование этого «гвоздя», по всей видимости, связано с указанными сильными землетрясениями.

6. О-в Хоккайдо,  $43,5^\circ$  с.ш.,  $143,0^\circ$  в.д. Время образования — январь–март 1989 г., глубина очагов 0–40 км, положение приурочено к вулканической дуге зоны субдукции, рядом есть недействующие вулканы. Эпицентры явно не связаны с разломами. Тело «гвоздя» состоит из слабых землетрясений с  $M_{JMA} < 5$  [Вадковский, 2012].

7. Южнее о-ва Хонсю (перед желобом Нанкай),  $33,2^\circ$  с.ш.,  $138,6^\circ$  в.д. (рис. 5). Время образования — сентябрь–октябрь 1990 г., глубина очагов 30–80 км. Эпицентральное поле расположено в районе подводной горы. В начале формирования произошло землетрясение с  $M_{JMA}=6,6$  (глубина 60 км), а затем с  $M_{JMA}=6,0$  (глубина 42 км), остальные события — с  $M_{JMA} < 5$ . Этот кластер — проявление афтершокового процесса указанного сильного землетрясения.

8. Южнее о-ва Хонсю (за вулканической дугой зоны субдукции Изу-Бонин),  $33,7^\circ$  с.ш.,  $139,4^\circ$  в.д., (рис. 5). Время образования — октябрь 1990 г., глубина очагов 0–35 км. «Гвоздь» состоит из слабых землетрясений с  $M_{JMA} \leq 4,2$ .

Сопоставление с тектонической схемой Японии [Sagiya et al., 2000] указывает на возможную связь последних двух сейсмофокальных структур с разломами.

9. В районе Инью (Калифорния),  $35,7^\circ$ – $36,2^\circ$  с.ш.,  $117,5^\circ$ – $118^\circ$  з.д. (рис. 6) обнаружено 4 сейсмических «гвоздя» с небольшой глубиной очагов и горизонтальными размерами не более 2 км: август 1984 г., глубина очагов 0–7 км; февраль 1992 г., повторная активизация в июле 2001 г., глубина очагов 0–9 км; июль 1995 г., повторная активизация в сентябре, глубина очагов 0–16 км, все землетрясения в этих «гвоздях» слабые; март 1998 г., глубина очагов 0–11 км, образование «гвоздя» последовало за землетрясением с  $M_L=5$ , это был его афтершоковый процесс. В этом районе выделяется ряд разломов, однако приуроченность «гвоздей» к ним не очевидна.

10. Кальдера Лонг Велли (Калифорния),  $37,6^\circ$ – $37,8^\circ$  с.ш.,  $118,8^\circ$ – $119^\circ$  з.д. Здесь выявлены четыре сейсмических «гвоздя» с глубиной очагов 0–10 км, по которым в 1984, 1990, 1991, 1996–1998 гг. проходили повторные активизации. Все землетрясения слабые, максимальная магнитуда  $M_L=4,8$ . Эти скопления находятся внутри кальдеры и связаны, вероятно, с гидротермальной деятельностью. В то же время в кальдере есть ряд разломов, так что вопрос о генезисе остается открытым.

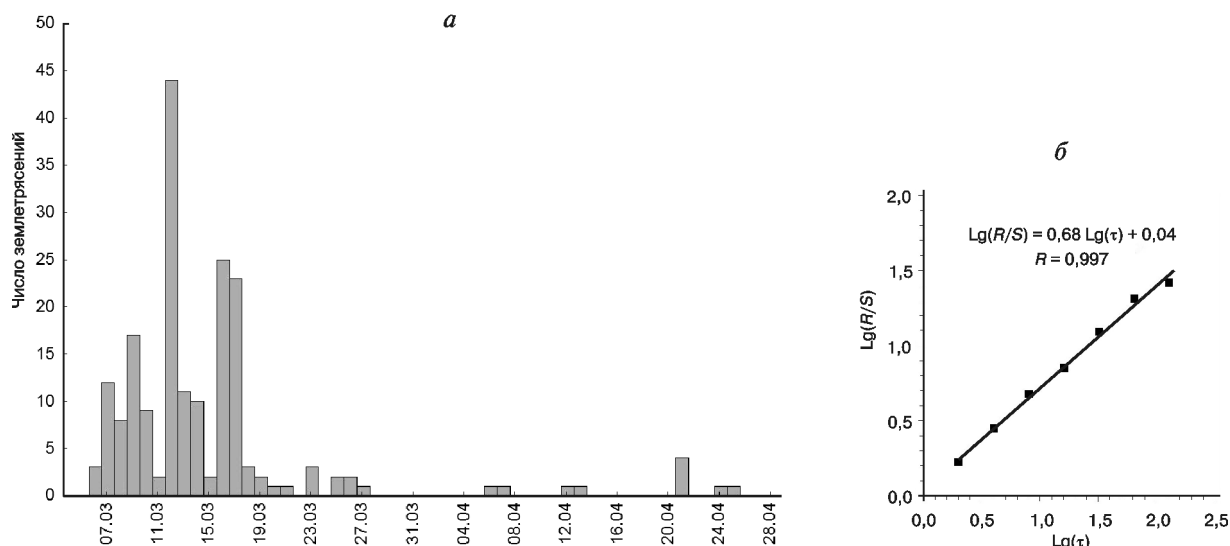


Рис. 7. Особенности формирования во времени сейсмического «гвоздя» на Южной Камчатке, 1983 г.: *a* — изменение числа землетрясений при формировании «гвоздя»; *б* — определение показателя Херста для порядковой последовательности значений глубины гипоцентров, составляющих «гвоздь»,  $H=0,68$

**Особенности формирования сейсмического «гвоздя» во времени.** Главное и общее свойство всех обнаруженных сейсмических «гвоздей» — небольшое время их формирования (от 10 дней до 2 месяцев). Установлено, что для некоторых «гвоздей» инициатором формирования может выступать сильное (с  $M>5$ ) землетрясение и/или извержение вулкана. В других случаях относительно сильные землетрясения происходят не в начале, а в ходе формирования «гвоздя» и, по всей видимости, представляют собой этап развития сейсмофокальной «структуры». При этом около половины рассмотренных субвертикальных очаговых структур состоит только из слабых землетрясений.

На рис. 7, *a* показано изменение числа землетрясений в день ( $N$ ) в марте—апреле 1983 г. при формировании «гвоздя» на Южной Камчатке, представленного на рис. 4. Анализ этого распределения не позволяет выделить экспоненциальное уменьшение числа землетрясений со временем. Формирование сейсмических «гвоздей» — процесс затухающий, но, по-видимому, отличающийся от затухания афтершоков сильных землетрясений.

В результате анализа временных последовательностей изменения глубины очагов  $Z(t)$  для всех исследованных сейсмофокальных структур не выделены какие-либо тренды событий во времени. Однако анализ с помощью показателя Херста позволяет выявить некоторые скрытые закономерности. На рис. 7, *б* представлен пример определения показателя Херста ( $H$ ) для порядковой последовательности глубины гипоцентров, составляющих описанный выше «гвоздь» в Южной Камчатке в 1983 г.; рассчитанное значение  $H$  составило 0,68.

Подобный анализ проведен для всех рассмотренных сейсмических «гвоздей». Установлено, что значения  $H$  для аналогичных последовательностей

также достоверно превышают 0,5 и находятся в диапазоне 0,57–0,69, причем ошибки определения  $H$  не превосходят 0,05, коэффициент корреляции линейной регрессии не меньше 0,98, все результаты представлены в таблице. Как указано выше, это означает наличие устойчивой тенденции в рассмотренных последовательностях.

**Результаты и их обсуждение.** В результате наших исследований при анализе мирового (NEIC PDE), японского (JMA), калифорнийских (SCEDC, NCEDC) и камчатского каталогов землетрясений выявлены изометричные в плане и ориентированные почти вертикально скопления землетрясений (сейсмические «гвозди») в разных районах мира (тихоокеанское побережье Северной Америки, Камчатка, Японские о-ва, о. Сулавеси). Вертикальная протяженность «гвоздей» составляет от 10 до 50 км (иногда до 90 км), большинство землетрясений в них слабые, их магнитуда не превышает 4,5–5. Общее для всех обнаруженных сейсмических «гвоздей» — небольшое время формирования (от 10 дней до 2 месяцев).

Установлено, что некоторые из таких сейсмофокальных структур связаны с извержениями вулканов (предшествуют и следуют за ними), а также с гидротермальной деятельностью. Для некоторых «гвоздей» сильное землетрясение ( $M>5$ ) может выступать инициатором их формирования, другие «гвозди» содержат такие землетрясения в своем «теле». Для ряда сейсмических «гвоздей» не выявлена явная приуроченность их положения к разломным зонам и другим тектоническим структурам. Возможно, в этом случае их образование связано с движением флюидов.

В таблице сведены результаты исследования всех рассмотренных нами сейсмофокальных структур, приведены положение и время формирования сейсмических «гвоздей», их количественные харак-

Результаты исследования сейсмических «гвоздей»

Место	Формирование	$M_{\max}$	Глубина	Показатель Херста, $H$	Дополнительные данные	Тектоническое положение
<i>Связаны с извержениями вулканов</i>						
Вулкан Св. Елена	03–05.1980	5,0	0–15	0,63	До извержения	Вулканическая дуга
Вулкан Коло (Сулавеси)	07.1983	5,8	20–90	0,57	После извержения	Вулканическая дуга
<i>Следуют за сильными землетрясениями</i>						
Вулкан Карымский	01.1996	6,4	0–60	0,64	После извержения	Вулканическая дуга
о. Кадьяк	12.1999, 07.2000	6,8	0–70	0,63		Перед вулканической дугой
о. Хонсю	09–10.1990	6,6	30–80	0,62	Разломы	Перед желобом
Иньо	03.1998	5,0	0–11	0,67		
<i>Содержат сильные землетрясения</i>						
Южная Камчатка	03.1983	5,3	0–20	0,68		Вулканическая дуга
<i>Не связаны с сильными землетрясениями</i>						
о. Хоккайдо	01–03.1989	4,4	0–40	0,69		Вулканическая дуга
о. Хонсю	10.1990	4,2	0–35	0,69	Разломы	За вулканической дугой
Иньо	08.1984	2,5	0–7	0,58	Разломы	
	02.1992	4,0	0–9	0,69		
	07.1995	3,5	0–16	0,60		
	09.1995	4,0	0–16	0,62		
	07.2001	3,9	0–9	0,67		
Лонг Велли	1984, 1990, 1991, 1996–1998	4,8	0–10		Гидротермальная деятельность	

теристики: диапазон глубины очагов, максимальные значения магнитуды ( $M_{\max}$ ), значения показателя Херста ( $H$ ). «Гвозди» сгруппированы по выявленной приуроченности к извержениям вулканов и сильным землетрясениям, а также приведены дополнительные сведения об их тектоническом положении.

**Заключение.** 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, предпочтительное направление его роста — вверх или вниз — не выявлено. Наша работа позволяет уточнить эти выводы. Тренды в указанных последовательностях также не выявлены, но результаты определения значений параметра Херста указывают на наличие устойчивой тенденции (персистентности) в порядковой последовательности глубины гипоцентров, составляющих «гвоздь». Эта последовательность не случайна, а обладает 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 (эффекта Херста) объясняется медленной релаксацией. «Память» возникает, когда реакция системы на внешнее воздействие не мгновенна, а имеет вид переходного процесса, растянутого во времени [Лукк и др., 1996].

Выявленная особенность может помочь в поиске механизмов образования сейсмических «гвоздей». В работах [Вадковский, 1996, 2012; Шевченко и др., 2011] указано, что особенности проявления сейсмических «гвоздей» (геометрия и скорость формирования) 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, что характерно для большинства задач нестационарной и нелинейной фильтрации. Альтернативным объяснением может быть релаксация накопленных напряжений на разломе (разломах) в виде серии слабых землетрясений. При этом поверхностные проявления этих разломов могут отсутствовать, особенно если учесть небольшую магнитуду большинства землетрясений, составляющих сейсмические «гвозди».

Авторы надеются, что дальнейший детальный анализ данных из точных каталогов, таких как JMA и калифорнийский, позволит получить дополнительную информацию о свойствах и природе сейсмических «гвоздей».

Авторы благодарят Мировой центр данных о физике твердой Земли за предоставление калифорнийского и японского каталогов. Также авторы искренне признательны Н.А. Сергеевой, М.Г. Ломизе, Н.В. Короновскому, Д.А. Симонову за обсуждения и замечания при выполнении работы.

## 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.
- 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.
- 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.
- Bird P.* An updated digital model of plate boundaries // *Geochem., Geophys., Geosyst.* 2003. Vol. 4. N 3. doi:10.1029/2001GC000252.
- Kilburn C.R.J.* Multiscale fracturing as a key to forecasting volcanic eruptions // *J. Volc. and Geothermal Res.* 2003. Vol. 125. P. 271–289. doi:10.1016/S0377-0273(03)00117-3.
- McNutt S.R.* Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: a review of the state-of-the-art and case histories // *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards.* Berlin: Springer, 1996. P. 99–146.
- 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.
- Papadimitriou P., Kaviris G., Makropoulos K.* The  $M_w=6,3$  2003 Lefkada earthquake (Greece) and induced stress transfer changes // *Tectonophys.* 2006. Vol. 423. P. 73–82. doi:10.1016/j.tecto.2006.03.003.
- Sagiya T., Miyazaki S., Tada T.* Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan // *PAGEOPH.* 2000. Vol. 157. P. 2303–2322.
- Trifonov V.G.* Active faults in Eurasia: general remarks // *Tectonophys.* 2004. Vol. 380. N 3–4. P. 123–130. doi:10.1016/j.tecto.2003.09.017.
- Turcotte D.L.* *Fractals and Chaos in geology and geophysics.* Second ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. 398 p.
- Wang Z., Zhao D.* Seismic evidence for the influence of fluids on the 2005 west off Fukuoka prefecture earthquake in southwest Japan // *Phys. Earth Planet. Int.* 2006. Vol. 155. P. 313–324. doi:10.1016/j.pepi.2006.01.006.
- Yukutake Y., Tanada T., Honda R. et al.* Fine fracture structures in the geothermal region of Hakone volcano, revealed by well-resolved earthquake hypocenters and focal mechanisms // *Tectonophys.* 2010. Vol. 489. P. 104–118. doi:10.1016/j.tecto.2010.04.012.

Поступила в редакцию  
25.05.2012