

Сильнейшие сейсмические активизации на вулканах Камчатки**Ю. А. Кугаенко***Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Петропавловск-Камчатский, e-mail: ku@emsd.ru*

Приведен обзор сильнейших вспышек малоглубинной сейсмичности, зарегистрированных в вулканических районах Камчатки за годы детальных сейсмологических наблюдений (с 1962 г.). Рассмотрены примеры низкоэнергетических сейсмических активизаций, поднимавших уровень сейсмичности вулканов на *высокий – экстремально высокий* уровни по шкале СОУС'09 – сильнейших активизаций для заданной пространственно-временной области. Предложено рассматривать такие события как *volcanic unrest* – отклонение от обычного, фонового, состояния вулкана, по мировым данным с большой вероятностью предшествующее извержению.

Мелкофокусные землетрясения, происходящие на расстоянии 10–15 км от активных вулканов, проявляющих сейсмическую активность, относятся к вулканотектоническим землетрясениям [3, 17]. Считается, что такие сейсмические события могут отражать процессы, связанные с внедрением и перемещением вулканических расплавов. Сейсмичность, приуроченная к активным вулканам, проявляется на Камчатке в основном в виде роевых последовательностей, то есть отмечается отсутствие основного события, существенно превышающего по энергии другие землетрясения, а скорость сейсмического потока в рое остается практически постоянной.

Высокоэнергетические активизации ($\lg(E, \text{Дж}) > 11.0$)¹

В вулканических районах Камчатки за весь период детальных сейсмологических наблюдений (1961–2018 гг.) было зарегистрировано лишь семь вулканотектонических последовательностей, сильнейшие землетрясения которых имели $K_{\max} > 11.0$ (здесь и далее в статье используется энергетический класс $K=K_S$ по [20]):

- рой 02–11.11.1964 г. ($K_{\max} = 12.3$, $M=5.5$), предварявший катастрофическое извержение вулкана Шивелуч 12.11.1964 г. [4, 18];
- рой 27.06.–05.07.1975 г. ($K_{\max} = 11.3$, $M_{LH}=5$), предварявший Северный прорыв Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. [1];
- Карымский рой 25.01.–23.02.1978 г. ($K_{\max} = 12.7$, $M = 5.4$) произошел во время активной фазы извержения Карымского вулкана 1976–1982 гг. [4, 6, 19];
- Асачинский рой землетрясений 07.03.–08.04.1983 г. ($K_{\max} = 11.8$, $M = 4.6$) под недействующим вулканом Асача – эта роевая последовательность завершилась без вулканической активизации [16];
- произошедшие 01.01.–20.02.1996 г. сейсмические события Карымского сейсмо-вулканического кризиса [21], зачастую называемые роем, но, как показал анализ этой сейсмической активизации [4], являющиеся форшок-афтершоковым процессом Карымского землетрясения 01.01.1996 г. – сильнейшего корового землетрясения, зафиксированного под материковой частью Камчатки за годы детальных сейсмологических наблюдений с $K_S = 14.3$, $M_S = 7.0$, $M_W = 6.3$ [9, 10];
- длительный рой 2009–2010 гг. ($K_{\max} = 11.9$, $M_S = 5.3$), предварявший извержение вулкана Кизимен 2010–2013 гг. [14];

¹ E – суммарная выделившаяся сейсмическая энергия

– Толудская вспышка сейсмичности 28.11.–7.12.2012 г., включающая Толудское землетрясение 30.11.2012 г. с $K_S = 11.3$, $M_L = 4.9$, $M_C = 5.4$, сопровождавшие начало Трещинного Толбачинского извержения [7].

Таким образом, из приведенных активизаций лишь Асачинский рой 1983 г. и Толудская серия землетрясений не сопровождались (или не закончились) извержением.

Следует отметить также, что один из сильнейших камчатских малоглубинных роев – Щапинский рой землетрясений 1963 г. ($K_{max} = 11.9$, $M = 6.0$), протянувшийся от грабена реки Щапина и вулкана Кизимен к северной части Кроноцкого полуострова, – по [4, 5] относится к одной из наиболее выраженных зон коровых тектонических землетрясений Камчатки, не связывается с деятельностью вулкана Кизимен и рассматривается как результат локальной тектонической активности.

Резюмируя приведенные данные, можно оценить достоверность высокоэнергетической сейсмической активизации как предвестника потенциального извержения: для Камчатки это ~60–70%. (Достоверность предвестника: отношение числа предвестниковых активизаций к общему числу зарегистрированных активизаций).

Примеры низкоэнергетических активизаций ($\lg(E, \text{Дж}) < 9$)

Опыт сейсмологических наблюдений за вулканами Камчатки показывает, что низкоэнергетические активизации (НЭА) также являются информативными для прогноза извержений. Для оценки значимости таких усилений сейсмичности предлагается использовать методику статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 [11], которая позволяет формализовать такие понятия как "сейсмический фон" и "аномалии" для рассматриваемого вулкана.

Ярким примером НЭА являются рои сейсмических событий, предвещающие извержения вулкана Безымянного (энергетический класс землетрясений K_S в основном меньше 8,8). Однако даже эти слабые сейсмические события выводят уровень сейсмичности вулкана на *высокий – экстремально высокий* уровень, значительно отличающийся от фоновых значений. Для этого вулкана разработана методика вероятностного прогноза извержений [12].

Продолжительная НЭА ($K_S=4-6$) была выявлена перед Трещинным Толбачинским извержением 2012–2013 гг. [13]. Она длилась не менее 4 месяцев и развивалась синхронно с деформационной аномалией, выявленной по GPS данным [8]. Последние три недели до извержения сейсмичность пребывала на *экстремально высоком* уровне, а среднесуточные (2000–2011 гг.) скорости потока сейсмических событий и сейсмической энергии были превышены в ~40 раз при сохранении преобладающих классов землетрясений в диапазоне $K_S = 4-6$.

НЭА перед извержением вулкана Камбального в марте 2017 г. была короткой и длилась лишь около двух суток, в течение которых было зарегистрировано ~70 землетрясений $K_S \leq 8,6$ [15]. Но учитывая, что ранее землетрясения из этой области регистрировались крайне редко, можно оценить уровень сейсмичности НЭА как *высокий – экстремально высокий*.

В октябре 2017 г. – феврале 2018 г. в районе вулканического массива Удина наблюдается НЭА, уникальная для этой пары (Большая и Малая Удина) недействующих вулканов. Уровень сейсмичности соответствовал *высокому – экстремально высокому* уровню [2]. НЭА включает более 250 землетрясений, максимальный $K_S=7,0$. По состоянию на начало марта 2018 г. активизация длится более 5 месяцев и все еще не окончилась.

В приведенных примерах НЭА можно рассматривать как сильнейшие сейсмические активизации для заданной пространственно-временной области (за время детальных сейсмологических наблюдений).

Заключение

Малоглубинная сейсмическая активизация, зарегистрированная в районе вулкана и имеющая *высокий – экстремально высокий* уровень сейсмичности, должна рассматриваться как *volcanic unrest* (отклонение от обычного, фоновое, поведения вулкана [22, 23]). По данным [23] 64% различных зафиксированных на вулканах аномалий (*volcanic unrest*), заканчиваются извержениями, что близко к приведенной оценке достоверности извержений при высокоэнергетических сейсмических активизациях на вулканах Камчатки.

Таким образом, резюмируя приведенные выше данные, выдвигаются следующие предложения, имеющие практическое значение для оценки вулканической опасности на Камчатке:

1. при обнаружении НЭА оперативно должен быть проведен расчет уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 (для вулканов Ключевской группы мониторинг уровня сейсмичности уже обеспечен [2]);
2. повышение уровня сейсмичности до *высокого – экстремально высокого* уровня должно рассматриваться как *volcanic unrest*, с большой вероятностью (по мировым данным) предшествующий извержению;
3. для оценки вероятности извержения необходимо привлечение дополнительной информации: результатов ретроспективного анализа сейсмичности вулкана, учет данных других видов наблюдений и пр.;
4. сообщение о НЭА с оценкой вероятности извержения должно быть оформлено и передано в заинтересованные ответственные структуры;
5. целесообразно перевести обнаружение и детальное изучение НЭА из разряда исключительно инициативных научных изысканий в регламентные работы соответствующей службы, что подразумевает повышение степени ответственности за принимаемые решения.

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. 637 с.
2. Воропаев П.В., Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Мониторинг Ключевской группы вулканов с использованием СОУС'09 (Статистической Оценки Уровня Сейсмичности) // Вулканизм и связанные с ним процессы. XXI ежегодная научная конференция, посвященная дню вулканолога. Материалы конференции. Петропавловск-Камчатский, 29-30 марта 2018 г. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2018.
3. Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И. и др. Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 28-38.
4. Гордеев Е.И., Дроздин Д.В., Касахара М. и др. Сейсмические явления, связанные с извержениями вулканов в Карымском вулканическом центре в 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 28-48.
5. Гордеев Е.И., Кугаенко Ю.А., Чебров В.Н. Сейсмичность Кроноцкого полуострова // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 68-78.
6. Зобин В.М., Фирстов П.П., Иванова Е.И. Рой землетрясений в районе вулкана Карымский в январе-феврале 1978 года // Вулканология и сейсмология. 1983. № 5. С. 64-73.
7. Кугаенко Ю.А., Павлов В.М., Иванова Е.И. и др. Толудская вспышка сейсмичности и землетрясение 30.11.2012 г. ($M_c=5,4$, $M_w=4,8$), сопровождавшие начало Толбачинского извержения 2012-2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 33-48.
8. Кугаенко Ю.А., Титков Н.Н., Салтыков В.А., Воропаев П.В. Анализ подготовки Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. в параметрах сейсмичности и деформаций земной коры по данным системы комплексного мониторинга активности вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 40-58.
9. Левина В.И., Иванова Е.И., Гордеев Е.И. и др. Карымское землетрясение 1 января 1996 года ($M_S=7,0$) // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. М.: ГС РАН, 2002. С. 129-137.

10. Павлов В.М. Расчет синтетических сейсмограмм в слоисто-однородной изотропной упругой среде // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 191-195.
11. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53-59.
12. Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. № 3. С. 45-59
13. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В. Об аномалии сейсмического режима, предвалявшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. 2012. № 2. Вып. 20. С.16-19.
14. Сеньюков С.Л., И.Н. Нуждина, С.Я. Дрозина и др. Сейсмичность вулкана Кизимен // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 140–144.
15. Сеньюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрозина С.Я. и др. Сейсмичность в районах вулканов Камбальный, Желтовский, Ксудач, Крашенинникова и Большой Семячик в 2009–2017 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 1–7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 73-77.
16. Токарев П.И. Асачинский рой землетрясений и его природа (Камчатка, март-апрель 1983 года) // Вулканология и сейсмология. 1984. № 3. С. 3-13.
17. Токарев П.И. Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
18. Токарев П.И. Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 года и его предвестники // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1967. № 9. С. 11-22.
19. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим Карымского вулкана в 1965-1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 3-13.
20. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
21. Федотов С.А. Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 3-37.
22. Diefenbach A., Guffanti M., Ewert J. Chronology and references of volcanic eruptions and selected unrest in the United States, 1980–2008. Open-File Report 2009–1118. U.S. Geological Survey. 2009. 85 p.
23. Phillipson G., Sobradelo R., Gottsmann J. Global volcanic unrest in the 21st century: An analysis of the first decade // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 264. P. 183–196.