

УДК 551.21 +550.34

РОЙ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ,
ПРЕДВАРЯВШИХ ИЗВЕРЖЕНИЕ КАРЫМСКОГО ВУЛКАНА В 1996 Г.

А.В. Сторчеус

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
683006; e-mail: sav@kscnet.ru*

Введение

Краткосрочный прогноз по сейсмическим данным терминальных извержений вулканов базальтового, андезито-базальтового и андезитового состава до настоящего времени представляет некоторые трудности. В качестве примера можно привести извержение вулкана Авача в 1991 г., которое началось без обычной для латеральных извержений и сильных извержений центрального типа сейсмической подготовки, т.е. без предваряющего извержение роя вулканических землетрясений. В другом случае, перед извержением Карымского вулкана в 1996 г., в течение 1990-1995 гг. произошло 3 роя вулcano-тектонических землетрясений [5]. И с окончанием каждого роя, не закончившегося извержением вулкана, росло сомнение в действенности сейсмического метода при прогнозе извержений центрального типа. Следует упомянуть, что вулкан Карымский имеет близкий к авачинским андезитам состав лав и тип извержений (вулcano-стромболианский).

Такие же трудности возникают при предсказании терминальных извержений Ключевского вулкана, для которого также не разработан сейсмологический метод краткосрочного прогноза извержений центрального типа.

Вулканы Карымский и Ключевской принадлежат к числу самых активных вулканов на Камчатке и на Земле. Авачинский вулкан менее активен, но его расположение вблизи густонаселенного района Камчатки и непредсказуемость начала его извержения могут представлять значительную опасность как для населенных пунктов, так и для туристов и туристических баз, расположенных у его подножия. Поэтому поиск и разработка новых прогностических признаков сейсмологического метода краткосрочного прогноза терминальных извержений в дополнение к уже существующим представляется достаточно актуальной задачей.

Сейсмологический метод, благодаря непрерывной регистрации сейсмических событий и оперативности обработки материала, является наиболее информативным и надежным методом прогноза извержений. Латеральные извержения любых типов действующих вулканов Камчатки – базальтовых и андезитовых, и сильные терминальные извержения вулканов с вязкой магмой, довольно успешно прогнозировались, начиная с 60-х годов, когда была создана сеть сейсмических станций в районе Северной группы вулканов [3]. Прогноз в основном осуществлялся на основании анализа графика условных деформаций для роя вулканических

землетрясений, предваряющих извержение [6]. При этом основной вклад в расчетные характеристики графика приносили высокочастотные вулкано-тектонические землетрясения. Но для слабых терминальных извержений и терминальных извержений вулканов с базальтовым и андезитобазальтовым составом магм разработанный ранее метод краткосрочного прогноза, как упоминалось ранее, оказался не достаточно эффективным. Поэтому в 1995г., после двух роев вулкано-тектонических землетрясений на вулкане Карымский, не закончившихся извержением, было решено отдельно исследовать характеристики роев короткопериодных вулкано-тектонических (ВТ) землетрясений и длиннопериодные (ДП) землетрясения, априори предполагая различную природу их генерации. Критерии разделения вулканических землетрясений на длиннопериодные и высокочастотные подробно приведены в [10].

Исходные данные и их обработка

Для обработки использовались аналоговые сейсмические записи, полученные по телеметрической станции [2] «Карымская» КОМСП ГС РАН с разверткой от 30мм до 120мм в минуту за период с февраля по 30 декабря 1995 г. Сейсмостанция «Карымская» расположена у подножия вулкана Карымский в 1.7 км от кратера вулкана [11], в этот период регистрировала как ВТ (высокочастотные) землетрясения Карымского вулкана (рис. 1, А), так и ДП землетрясения (рис. 1, Б-Е, рис. 2, А-В).

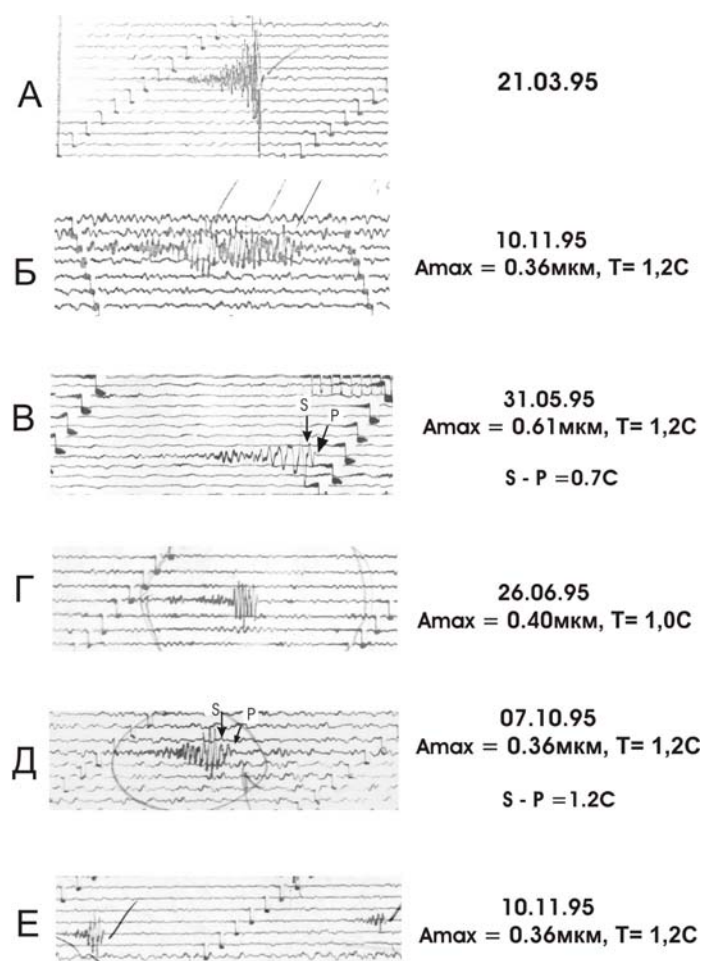


Рис. 1. Образцы записей вулканических землетрясений вулкана Карымского в 1995 г.: фрагмент А – вулканно-тектоническое землетрясение; фрагменты Б-Е – сильные длиннопериодные землетрясения.

Обработка землетрясений производилась обычно по одному из горизонтальных каналов E – W или N – S, так как на видимую запись для контроля состояния вулкана в период неактивной фазы, как правило, выводились данные одного из горизонтальных каналов. Увеличение каналов – 10000.

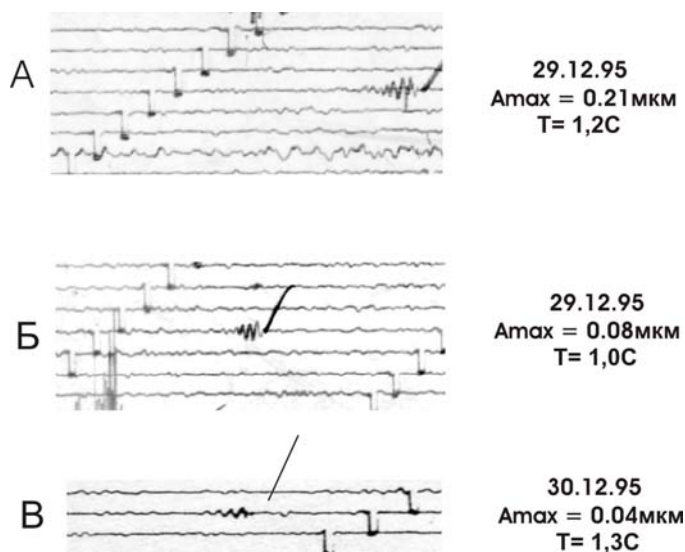


Рис. 2. Образцы записей (А-В) слабых длиннопериодных землетрясений вулкана Карымского в 1995 г.

Обработка данных заключалась в следующем:

1. Измерялись максимальная амплитуда A_{max} сигнала и его максимальный период T .
2. При возможности определялась разность времен прихода Р и S волн – $S - P$. ДП землетрясения зачастую имели максимальную амплитуду, не превышающую десятых долей микрона. Так как вертикальный канал на видимой записи отсутствовал, а вступление волны Р на горизонтальных каналах редко достаточно четко прописывалось на лентах, определить $S - P$ удавалось лишь в некоторых случаях (рис. 1, В, Д).
3. Измерялась длительность видимой записи ДП землетрясений.
4. Определялось количество ДП и ВТ землетрясений в сутки. По этим данным впоследствии был построен график развития роя ДП землетрясений (рис. 3).

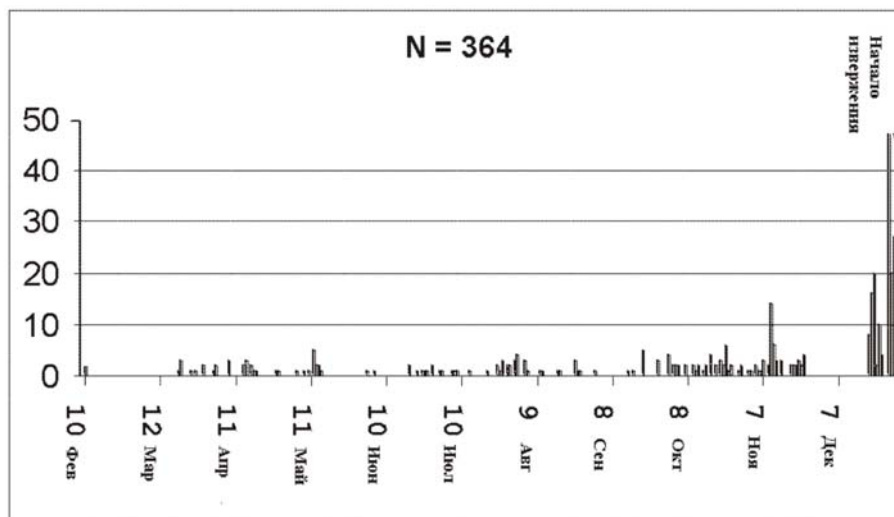


Рис. 3. Количество длиннопериодных землетрясений в сутки вулкана Карымского в 1995 г.

Характерные особенности длиннопериодных землетрясений.

При обработке записей ДП землетрясений были выявлены следующие характерные для них особенности:

1. ДП землетрясения представляют собой короткий сигнал, как правило, длительностью 15-20 секунд (рис. 1, 2).
2. По форме записи отдельные наиболее сильные ДП землетрясения зачастую отличаются друг от друга (рис. 1, Б - Е). Это могут быть как несколько цугов волн, следующих друг за другом с примерно равным интервалом (рис. 1,Б), так и отдельный цуг волн с резким вступлением волны S (рис. 1, В,Г) или с постепенным нарастанием ее амплитуды (рис. 1,Б,Д,Е). Более слабые (рис. 2, А-В) ДП землетрясения имеют примерно одинаковую форму записи (огибающую сейсмического сигнала) – несколько колебаний с затухающей амплитудой (рис. 2, А-В).
3. Длительность записи ДП землетрясений примерно равна длительности слабых и средних ($A_{max} < 10$ мкм) высокочастотных ВТ землетрясений (рис. 1,А).
4. По форме записи ДП землетрясения схожи с сейсмическими сигналами, возбуждаемыми импульсным источником. Подобные сигналы регистрировались при генерации сейсмических волн от отдельных искусственных импульсов (механических ударов) в пластичных средах [1].
5. ДП землетрясения имеют большой период колебаний при малой амплитуде – до 1,2 С (рис. 1, Б – Е, рис. 2, А - В). Это подтверждается и графиками спектральной плотности (рис. 4). Графики спектральной плотности был построены с помощью программы *Statistica*, разработанный фирмой *StatSoft Inc., USA* . В то же время для ВТ землетрясений с амплитудой, иногда в десятки раз превышающей A_{max} ДП землетрясений, период колебаний обычно составлял 0.2-0.3 С (рис. 1,А).

Ретроспективный анализ роя ДП событий показал, что первое ДП землетрясение в 1995 г. произошло 10-го февраля 1995 г. Следующее подобное землетрясение было отмечено 19 марта. Затем количество ДП землетрясений продолжало возрастать (рис. 3) и в начале апреля 1995 г. был сделан первый прогноз готовящегося извержения Карымского вулкана. Так как нам не были известны закономерности развития роев ДП землетрясений и подобная попытка прогноза терминальных извержения по рою ДП землетрясений была сделана впервые в практике отечественной вулканической сейсмологии, поэтому прогноз продлевался нами дважды в течение полугода. Развитие роя землетрясений (рис. 3) способствовало принятию такого решения, так как количество ДП землетрясений в сутки продолжало постепенно нарастать. На графике отсутствуют данные с конца ноября по 19-ое декабря 1995г., так как станция «Карымская» в этот период не работала; и с 31-го декабря 1995 г., когда после сильного землетрясения в Кроноцком заливе ($M=6.9$), каналы сейсмостанции были заглублены в

100 раз. Поэтому окончание роя ДП землетрясений (последние сутки перед началом извержения в ночь с 1-го на 2-ое января 1996 г.) проследить не удалось. Но в целом на графике видно увеличение количества ДП землетрясений по мере приближения извержения вулкана Карымского.

В зарубежной литературе описание закономерностей развития роя ДП землетрясений было сделано лишь в 1996 г с целью прогноза извержения вулкана Пинатубо в 1991 году уже в постэруптивный период (ретроспективный анализ). [9, 12, 13]. При этом основное внимание при анализе ДП событий с прогностической целью уделялось глубоким ДП землетрясениям (28-35км). Как справедливо заметил автор работы [13] Вайт, «глубокие ДП землетрясения могли происходить и на других вулканах в последние десятилетия, но они не были идентифицированы».

В 1995 г. на вулкане Карымский глубокие ДП землетрясения не были зарегистрированы и мы исследовали мелкофокусные ДП землетрясения.

Обсуждение результатов обработки и возможный механизм генерации длиннопериодных землетрясений

Первая задача, которая возникла при обработке ДП землетрясений – это определить местоположение их гипоцентров. Так как по одной станции это сделать разработанным в сейсмологии способом невозможно, нами был использован метод сравнения S-P ДП землетрясений с ранее исследованными эксплозивными землетрясениями и с S-P вулканотектонических землетрясений, происходящих в постройке вулкана.

Ранее в 1978 году [7], в период очередной эксплозивной активности Карымского вулкана, проводились сейсмологические исследования эксплозивных землетрясений и слабой сейсмичности вулкана с использованием сети телеуправляемых сейсморазведочных станций «Тайга». По данным кусочно-непрерывного профиля, начинающегося от кратера вулкана и заканчивающегося в 3.5 км от кратера, были построены годографы для P, S и R волн эксплозивных землетрясений и определены скорости этих волн на различных расстояниях от кратера вулкана. По годографу нами было вычислено значение S-P для такого же расстояния, на котором расположена современная телеметрическая станция «Карымская». По этим данным было определено, что гипоцентры регистрируемых в 1995 г. ДП землетрясений могут лежать в пределах вулканической постройки. Следует отметить, что по мере приближения момента начала извержения, значение S-P ДП землетрясений увеличилось с 0.7 С в мае 1995 г. (рис. 1, В) до 1.2 С в октябре 1995 г. (рис. 1, Д) и приблизилось к S-P для эксплозивных землетрясений 1978 г. [7]. Кроме того, S – P ВТ землетрясений, гипоцентры которых, как правило, обычно расположены в вулканической постройке, примерно соответствуют значениям S-P ДП землетрясений (рис. 1, Д).

В дополнение этим доводам отметим что, длительность записи ВТ землетрясений и сильных и слабых ДП примерно была одинаковой. Это также свидетельствовало о том, что их записи не являются кодой волн далеких землетрясений.

Сомнительным представляется также то, что ДП землетрясения связаны с подготовкой разрыва тектонического землетрясения ($M = 6.9$), происшедшего в этом районе накануне извержения вулкана, так как форшоки тектонических землетрясений имеют сдвиговый механизм и соответствующее соотношение амплитуды и периода колебаний.

Исходя из изложенных выше фактов и рассуждений, был сделан вывод о том, что регистрируемые ДП землетрясения происходят в вулканической постройке Карымского.

Возможный механизм генерации длиннопериодных землетрясений. Для предположений о возможной природе ДП землетрясений были сделаны оценки размеров их очагов - r . Как известно, угловая частота очагового спектра в объемных волнах связана с характерным размером очага. У Брюна (Brune) [8] эта связь выражена формулой:

$$r = 2.34V_S / 2\pi f_0 , \quad (1)$$

где: V_S - скорость поперечных волн; $V_S \approx 2.3 - 2.5$ км/с [7] и

f_0 – частота колебаний S – волн; $f_0 \approx 0.75 - 0.8$ Гц.

Таким образом, мы получим, что размеры очагов ДП землетрясений в случае, если бы они имели сдвиговый механизм, $r = 1.0-1.2$ км. Но в этом случае трудно объяснить, как может в небольшом объеме среды, ограниченном вулканической постройкой, появиться сотни трещин длиной 1-2 километра в течение сравнительно короткого интервала времени. Следовательно, эти землетрясения имеют другой механизм, отличный от ВТ землетрясений сдвигового типа. И период их сейсмических волн в меньшей степени связан с размерами источника и в большей мере зависит от временной функции источника (времени формирования сигнала в источнике).

Другой довод в пользу того, что условия генерации рассматриваемых нами ДП землетрясений и ВТ землетрясений различны – форма их спектров. Как известно, ВТ землетрясения имеют более широкий спектральный состав [4], чем ДП землетрясения (рис. 4). Рассмотрим возможные причины генерации ДП землетрясений, предполагая с учетом вышеназванных их отличительных особенностей, импульсную природу их источника. Из всех рассматриваемых в литературе причин, способных привести к импульсам давления в магме, мы выбрали наиболее вероятные: 1 – гидроудар в магме в результате возникновения трещины раскола и 2 – спонтанное вскипание метастабильной жидкости [4]. Не исключено, что оба эти механизма генерации ДП землетрясений имели место на вулкане Карымском, но обсуждение доводов за и против каждого из этих механизмов выходит за пределы этой статьи. Важный вы-

вод из этих предположений – то, что любой из предложенных механизмов генерации ДП землетрясений связан с присутствием в верхней части вулканической постройки жидкого магматического расплава и с перемещением его вверх по мере приближения к моменту извержения, что является признаком готовящегося извержения.

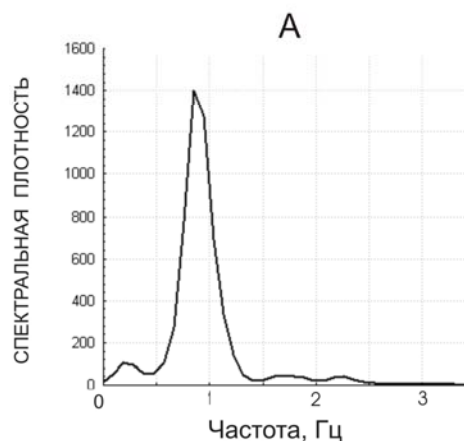
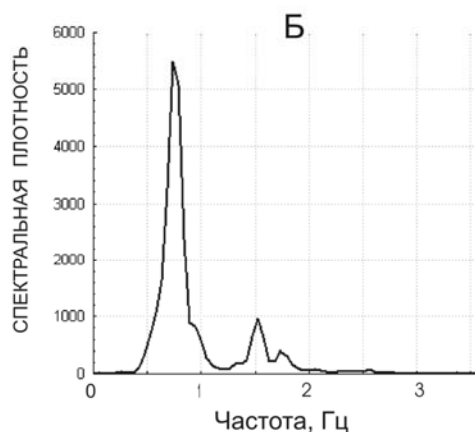


Рис. 4. Спектры длиннопериодных землетрясений: А – 07.10.95 (рис. 1,Д); Б – 31.05.95 (рис. 1,В).



Выводы

Вышеперечисленные особенности исследованных ДП сейсмических сигналов, происходящих в течение 1995г., позволяют отнести их к ДП землетрясениям вулкана Карымского.

График ежесуточного количества ДП землетрясений показал, что эта характеристика может быть использована в качестве дополнительного прогностического признака терминальных извержений.

В заключение автор благодарит В.В. Иванова за помощь и внимание к работе и выражает свою признательность В.А. Широкову за полезные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Ю.И., Щербо М.Н. Пластические волны сдвига в грунте // Физика Земли. 1965. № 10. С. 63-71.

2. Гаврилов В.А., Воропаев В.Ф., Головщикова И.А. и др. Комплекс радиотелеметрической аппаратуры ТЕСИ-2 // Сейсмические приборы. 1987. № 19. С. 5-17.
3. Горельчик В.И., К истории развития сейсмологических исследований на вулканах Камчатки. // В сб.: Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2001 г. С. 341-351.
4. Горельчик В.И., Сторчеус А.В. Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом. // В сб.: Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск- Камчатский. 2001. С. 373-379.
5. Иванов В.В. Новый цикл активности вулкана Карымского (1983- 2006 гг.) и сейсмологические предвестники пароксизмальных событий в Карымском районе 1-2 января 1996 г. (настоящий сборник).
6. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы (1949-1963 гг.). М.: Наука, 1966. С. 119.
7. Фарберов А.И., Сторчеус А.В., Прибылов Е.С. Исследование слабой сейсмичности вулкана Карымский в 1978 г. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С. 78-89.
8. Brune J . Tectonic stress and spectra of seismic waves from earthquakes// J. Geophys. Res. 1970. Vol. 75. P. 4997-5009.
9. Chouet, B.A. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting // Nature. 1996. V. 380. P. 309-316.
10. Lahr J.C., Chouet B.A., Stephens C.D., Power J.A., and Page R.A. Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: Implications for the magmatic system of the 1989-1990 eruptions at Redoubdt Volcano, Alaska // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1994. V. 62. P. 137-151.
11. Jonson J.B., Lees J.M., Gordeev E.I. Degassing Explosions at Karymsky Volcano, Kamchatka // Geophysical Research Letters. 1998. Vol. 25. N. 21. P. 3999-4002.
12. Ramos E.G., Laguerta E.P., and Hamburger M.W. Seismicity and magmatic resurgence at Mount Pinatubo in 1992 // Newhall, Christopher G. and Punongbayan, Raymundo S. Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines, Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City and University of Washington Press, Seattle and London, 1996. P. 387-406.
13. White R.A. Precursory Deep Long – Period Earthquakes at Mount Pinatubo Spatio-Temporal Link to a Basalt Trigger // Newhall, Christopher G. and Punongbayan, Raymundo S. Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines, Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City and University of Washington Press, Seattle and London, 1996. P. 407-427.