

**Сейсмичность, связанная с процессами дегазации магм на Ключевском вулкане**  
**Иванов В.В.**

**Seismicity associated with magma degassing processes at Klyuchevskoy volcano**

**Ivanov V.V.**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

*e-mail: victorvasilievich53@gmail.com*

Исследована природа вулканических землетрясений IV типа и вулканического дрожания на Ключевском вулкане в 2008-2009 гг.

**Введение**

Сейсмологический метод в настоящее время остается главным, всепогодным, сравнительно недорогим методом мониторинга, прогнозирования извержений вулканов, изучения магматических и вулканических процессов [6]. Однако интерпретация наблюдаемой на вулканах сейсмичности встречает значительные трудности. В отличие от вулканотектонических и длиннопериодных вулканических землетрясений, узкополосные, длиннопериодные сейсмические сигналы, связанные с дегазацией основных, сравнительно маловязких, базальтовых и андезибазальтовых магм, не имеют различимых вступлений объемных Р- и S-волн. Поэтому их местоположение не может быть определено методами классической сейсмологии. Они бывают в форме импульсов (вулканические землетрясения IV типа, серии НЧ землетрясений) и продолжительных сигналов (вулканическое дрожание, ВД). Дрожание подразделяется на «спазматическое» и «непрерывное». ВД и события IV типа отмечаются на Ключевском вулкане значительную часть времени [3, 4], что дает богатый сейсмограммный материал. Однако, несмотря на большое количество проведенных исследований [4], природа этих явлений до сих пор не изучена вследствие отсутствия детальных сведений о сопровождающей их активности в центральном кратере вулкана из-за его огромной высоты (4750 м) и недоступности. В данном сообщении более детально, чем ранее, исследуются режимы сейсмичности и переходы между ними, свойства этих сигналов, впервые проводится их сопоставление с характером активности вулкана по наблюдениям на вершине вулкана.

**Сейсмичность во время вершинного извержения Ключевского вулкана в 2008-2009 гг.**

Анализ сейсмических сигналов ВД и событий IV типа проводился по их огибающим с помощью программы DIMAS [2] с постоянной осреднения, равной 10 с. Согласно [5] (с. 265-266, с. 59), огибающая ( $\rho$ ) узкополосного гауссовского сейсмического сигнала со среднеквадратическим значением ( $\sigma$ ) распределена по закону Релея с матожиданием  $E(\rho) = \sigma\sqrt{\pi}/\sqrt{2} = 1.26\sigma$  и дисперсией  $D(\rho) = \sigma^2(2-\pi/2) = 0.43\sigma^2$ .

В июле 2009 г. на вулкане наблюдалось «полосчатое дрожание», которое дает характерный пример сейсмических режимов и переходов между ними, отражающих изменение режимов дегазации магмы. С 5 по 7 июля отмечены 13 эпизодов дрожания, а в «паузах» между ними – многочисленные события IV типа (рис. 1). Последние были как одиночными, так и состоявшими из двух-трех слившихся событий с общей длительностью около 1 минуты. Эпизоды дрожания продолжались от 1.5 до 13 часов, длительность «пауз» была от 1 до 4 часов. Дрожание начиналось очень резко, без заметных изменений частоты событий IV типа, с фазы *спазматического дрожания*, которое на начальном этапе представляло собой суперпозицию нескольких частично слившихся событий IV типа. С приближением к началу *непрерывного дрожания* частично слившиеся события IV типа все чаще перемежались периодами дрожания. Затем дрожание приобретало непрерывный характер со стабильной во времени огибающей. Эпизоды ВД обычно заканчивались также резко, как и начинались (рис. 1).

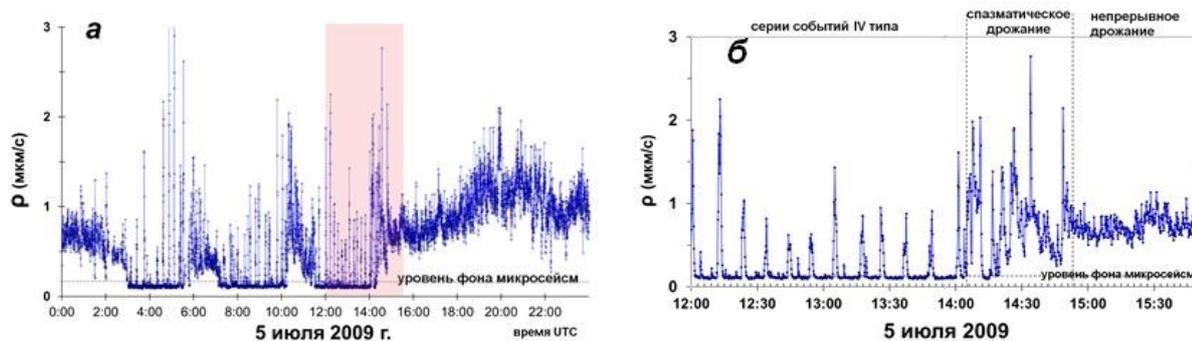


Рис. 1. Изменение во времени огибающей ( $\rho$ ) сейсмического сигнала на с/ст. «Цирк» ( $\Delta=9$  км) 5 июля 2009 г., канал В-3: а) за все сутки; б) на интервале времени, изображенном на (а) заливкой. Время UTC. Постоянная времени осреднения равна 10 с.

Во время эпизодов дрожания средняя, по длительным (20-минутным) интервалам, сейсмическая мощность на 1-2.5 порядка превышала такую в «паузах», состоящих из сравнительно кратковременных событий IV типа (график здесь не приводится). Причем высокая средняя мощность была характерна как для непрерывной, так и для спазматической фаз эпизода ВД. Важно отметить, что огибающие в максимальных фазах событий IV типа или спазматического дрожания ( $\rho_{max}$ ) намного превышали величины огибающих непрерывного дрожания ( $\rho$ ).

Частота встречаемости событий IV типа быстро уменьшается с увеличением их размера ( $\rho_{max}$ ), где  $\rho_{max}$  – огибающая в максимальной фазе события (рис. 2а). Крутизна кумулятивного графика в двойном логарифмическом масштабе нелинейна, она монотонно нарастает с увеличением размера ( $\rho_{max}$ ). С приближением  $\rho_{max}$  к 4 мкм/с наблюдается резкий спад графика;  $\rho_{max}=4.2$  мкм/с является предельным показателем размера землетрясения IV типа для данной сейсмостанции. Это принципиально отличается от медленно спадающего степенного распределения с «тяжелыми хвостами» землетрясений сдвигового типа, которое изображается в двойных логарифмических координатах в виде прямой линии.

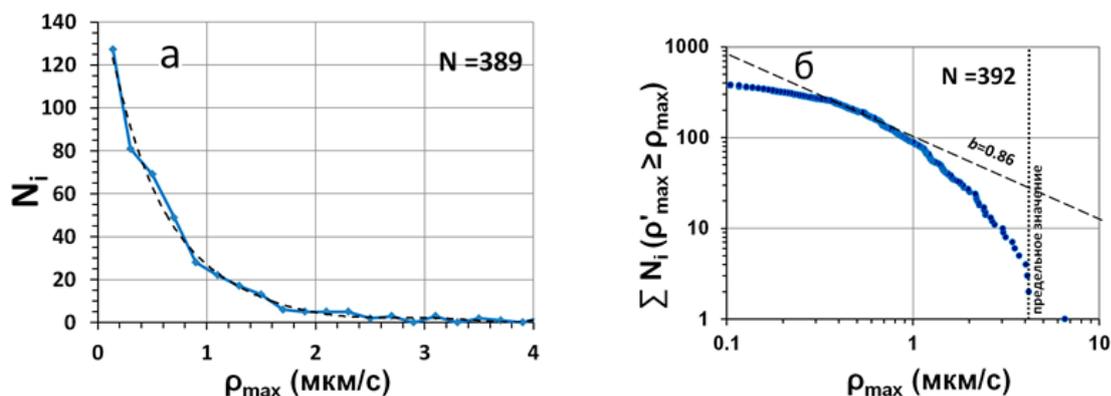


Рис. 2. Распределение вероятностей огибающих в максимальных фазах ( $\rho_{max}$ ) землетрясений IV типа на с/ст. «Цирк» ( $\Delta=9$  км) с 5 по 7 июля 2009 г., канал В-3: а) частоты ( $N_i$ ) в интервалах  $\rho_{max}$ , равных 0.2 мкм/с; б) график дополнительной кумулятивной функции. Пунктирной линией на (б) схематично показан график повторяемости тектонических землетрясений Камчатки со средним тангенсом угла наклона, равным 0.86 (по отношению к  $(A/T)_{max}$ ).

Распределение вероятностей огибающей непрерывного ВД анализировалось в течение 10 января 2009 г., когда его уровень сохранялся примерно постоянным и очень высоким. По видеоданным Ю.В. Демянчука, в это время отмечено фонтанирование лавы в вершинном кратере Ключевского вулкана. Распределение вполне согласуется с распределением вероятностей огибающей узкополосного гауссовского случайного процесса [5, с. 265-266], которое подчиняется закону Релея, чрезвычайно быстро

спадающего с отклонением от среднего значения (рис. 3). Нормальный характер распределения дрожания подобного типа был показан в работе [1].

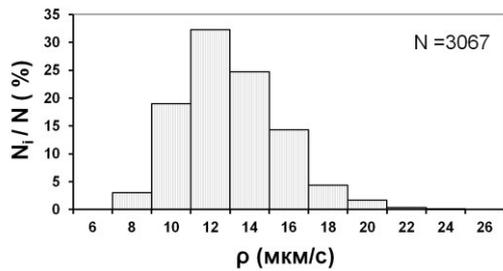


Рис. 3. Плотность вероятностей огибающей непрерывного вулканического дрожания вулкана Ключевской 10 января 2009 г. С/ст. «Цирк» ( $\Delta=9$  км), канал В-3.

### Сопоставление сейсмичности и вулканической активности по наблюдениям с кромки вершинного кратера вулкана Ключевской 29 июля 2008 г.

29 июля 2008 г. на вулкане отмечались события IV типа и серии НЧ землетрясений, которые происходили на фоне слабого вулканического дрожания (рис. 4). В это время на вершине вулкана был глубокий кратер с максимальным диаметром около 400 м (по приближенной оценке Д.В. Мельникова) (рис. 5). Внутри располагался шлаковый конус с диаметром основания около 45 м, у подножия которого на дно кратера вытекал лавовый поток. На вершине шлакового конуса имелся кратер диаметром около 6 м, в котором было жерло с поперечником около 2 м. Исходя из угла естественного откоса, принятого равным 33 градуса, глубину кратера можно было оценить в 130 м. Размеры объектов были определены по фотографиям из их сравнения с диаметрами внешнего кратера и основания шлакового конуса.

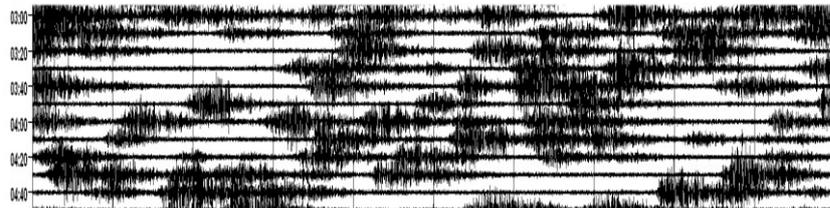


Рис. 4. Сейсмограмма станции «Цирк» ( $\Delta=9$  км) 29 июля 2008 г., канал В-3. Время UTC.



Рис. 5. Панорама вершины Ключевского вулкана 29 июля 2008 г. с 03:30 до 04:30 UTC. Предоставлено Ю.А. Щегловым (г. Комсомольск-на-Амуре).

Видеооператоры из г. Комсомольск-на-Амуре свидетельствуют, что звуки извержения были слышны еще 23 июля 2008 г. на расстоянии 15 км от вулкана. Грохот извержения был явственно слышен 24-25 июля с расстояния около 9 км. Сопоставление сейсмичности и видео с кромки кратера показывает, что каждое событие IV типа было связано с сериями из 20-30 стромболианских взрывов, т.е. выбросов пластичной лавы и газов из жерла в центре шлакового конуса. Выбросы следовали один за другим с промежутком две-три секунды, первый выброс серии был самый мощный – иногда лава визуально долетала вверх на уровень кромки кратера ( $h=130$  м) и даже выше, так как ее было видно на фоне неба. Последующие выбросы серии были все слабее, ниже, примерно через тридцать секунд-минуту все затихало. Затем следовал перерыв между сериями в несколько минут, потом все повторялось. Цитата: «В перерыве из жерла тоже пыхало с характерным резким «выдохом» (звук, примерно, как у паровоза, чух-

чух-чух), и лава светилась и слегка вылетала над жерлом, но начало следующей серии происходило со звуком пушечного выстрела, да и визуально на выстрел пушки было похоже». Аналогичная картина имела место для серий НЧ землетрясений. Если не учитывать сопротивление воздуха, то подъем фрагментов лавы на высоту 130 м соответствует начальной скорости их вылета около 50 м/с.

### Выводы

1) Сейсмичность на Ключевском вулкане в июле 2009 г. представляла собой длительные полосы дрожания и «паузы» между ними, включавшие многочисленные кратковременные события IV типа с длительностями около 1 минуты. На основании наблюдений аналогичной активности 29 июля 2008 г., последние порождались сериями из 20-30 резких стромболианских взрывов из активного жерла, следующих с интервалом 2-3 секунды. Первый взрыв серии наиболее сильный, пушечный, последующие взрывы более слабые, вплоть до их прекращения. В промежутках между событиями IV типа имели место сравнительно небольшие выбросы газов и фрагментов лавы из жерла, порождавшие слабое вулканическое дрожание.

2) Частота встречаемости взрывных землетрясений IV типа не подчиняется степенному закону, характерному для землетрясений сдвигового типа. Существует предельный размер событий IV типа, что, очевидно, связано с предельным размером порождающих их газовых снарядов в магматической колонне вулкана.

3) Средняя мощность дрожания в его эпизодах на 1-2.5 порядка превышала таковую во время «пауз», состоящих из отдельных событий IV типа. Тем не менее, амплитуды событий IV типа или спазматического дрожания в несколько раз превышали величины огибающей последующего непрерывного дрожания. Отсюда и из видеонаблюдений следует, что последнее не было слившимися событиями IV типа, оно порождалось другим режимом дегазации газонасыщенной магмы с фонтанированием лавы в вершинном кратере вулкана (гавайский тип активности).

4) Переход от серии событий IV типа к вулканическому дрожанию происходил очень резко через фазу спазматического дрожания (его включение). Обратный переход также был очень резким (выключение дрожания).

Автор выражает признательность Ю.В. Демянчуку за видеоматериалы, Д.В. Мельникову и Ю.В. Шевченко за консультации. Особая благодарность Ю.А. Щеглову и А.А. Ганущенко за дневники, фото- и видеоматериалы, Д.В. Дрознину и С.Я. Дрозниной – за предоставление программы обработки цифровых сейсмограмм DIMAS.

### Список литературы

1. Гордеев Е.И., Феофилактов В.Д., Чебров В.Н. Исследование вулканического дрожания Толбачинского извержения // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975-1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 151-163.
2. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский, 2008. С. 117-121.
3. Иванов В.В. Сейсмологические предвестники вершинных извержений Ключевского вулкана на Камчатке (на примере вулканического дрожания). Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2011. 13 с.
4. Иванов В.В. О природе сейсмического дрожания Ключевского вулкана (Камчатка) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. – Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 454-458.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь. 1989. 655 с.
6. Озеров А.Ю. Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель // Петропавловск-Камчатский – Москва. Издательство ГЕОС, 2019. 306 с.