

*Иванов В.В.*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, victor@kscnet.ru*

### **Введение**

Узкополосные, сравнительно длиннопериодные сейсмические сигналы, связанные с процессами дегазации основных, сравнительно маловязких магм через центральные питающие каналы полигенных вулканов, являются предметом многочисленных исследований, как за рубежом, так и в России [1,2,5,6,10-18]. В отличие от т.н. «длиннопериодных вулканических землетрясений» [17], эти сигналы не имеют различимых вступлений объемных Р и S –волн, поэтому их местоположение не может быть определено методами классической сейсмологии [14]. Они бывают в форме импульсов (вулканические землетрясения) и продолжительных сигналов (вулканическое дрожание, ВД). Дрожание подразделяется на «спазматическое», «непрерывное» и «полосчатое» [15,17,18]. Импульсные сейсмические сигналы подобного рода на Камчатке называются «взрывными вулканическими землетрясениями» или «событиями IV типа» [10].

ВД и события IV типа часто наблюдаются одновременно, их спектры подобны, источники располагаются примерно в одной области центральных питающих каналов основных вулканов в пределах первых сотен метров от дна активного кратера [14]. На этом основании было высказано предположение, что ВД образуется в результате слияния часто следующих друг за другом взрывных вулканических землетрясений [10,16]. Моделирование дрожания в виде суперпозиции таких событий, максимальные амплитуды которых подчиняются обычному для землетрясений степенному закону, дает сигнал, огибающая которого также имеет степенной закон распределения. Это распределение не имеет максимума и медленно спадает с величиной огибающей, что характерно для спазматического ВД. Напротив, максимальные амплитуды эпизодов *непрерывного* дрожания распределены по совершенно другому закону [13]. Наблюдаемый характер непрерывного ВД позволяет объяснить модель т.н. «глубинного вулканического дрожания», предложенная Б.А.Трубниковым с коллегами [11]. Не отрицая роли этого механизма для глубинных частей вулканического аппарата, следует заметить, что самое мощное дрожание на Ключевском вулкане связано со стромболианской активностью, когда крупные газовые структуры в магме разрушаются у поверхности земли. Несмотря на большое количество проведенных исследований, природа непрерывного вулканического дрожания до сих пор остается дискуссионной. ВД и события IV типа отмечаются на Ключевском вулкане практически постоянно [5]. В данном сообщении в период слабой активности вершинного кратера вулкана в 2008 - 2009 гг. проводится сопоставление этих сейсмических сигналов с характером активности, исследуются свойства сигналов, режимы сейсмичности и переходы между ними. На основе этого предлагается концептуальная модель образования непрерывного вулканического дрожания центрального кратера Ключевского вулкана, что является *целью работы*.

### **Сопоставление сейсмических событий IV типа и дрожания с вулканической активностью (вершинное извержение Ключевского вулкана в 2008 г.)**

Центральный кратер Ключевского вулкана труднодоступен, существующие дистанционные системы наблюдения не обладают достаточной разрешающей способностью, чтобы определить, что происходит внутри него. Сопоставить сейсмичность и вулканическую активность удалось 29 июля 2008 г. с 02 час 49 мин до 03 час 16 мин во время слабой активности кратера (время UTC). По данным с.ст. «Цирк» ( $\Delta = 8$  км) в это время на вулкане отмечались события IV типа с отношением амплитуды к периоду в максимальной фазе  $(A/T)_{\max}$  от 0.2 до 0.8 мкм/с, которые следовали в среднем через каждые 3 минуты. Длительность отдельных событий была от 1.5 до 2.5 мин. Нередко одно событие IV типа не успевало завершиться, как на его «хвосте» начиналось второе, затем третье и т.д. события, образуя короткие эпизоды спазматического ВД длительностью от 3 до 6 мин. По данным фото – и видеосъемок, сделанных операторами из г. Комсомольска на Амуре под рук. Ю.А. Щеглова, в глубоком кратере вулкана в это время происходили слабые стромболианские взрывы. Взрывы имели место на вершине небольшого шлакового конуса, у основания которого изливались короткие лавовые потоки. Во время взрывов выбрасывалось сравнительно немного пластичных фрагментов лавы, которые образовывали вулканический шлак и большое количество газов. Выброс лавы указывал на факт слабого извержения. Пепла не образовывалось вовсе, поэтому такая деятельность была незаметна из пос. Ключи ( $\Delta = 32$  км). Каждое событие IV типа порождалось серией из нескольких слабых стромболианских взрывов, которые следовали с интервалами в среднем 2-3 с; причем первый

из взрывов был наиболее сильным. С усилением вершинного извержения в 2008 г. частота событий IV типа, их длительность и амплитуда постепенно увеличивались. Увеличивалась также продолжительность образуемых ими эпизодов спазматического дрожания. При дальнейшем усилении вулканической активности сейсмический сигнал трансформировался в сплошную запись спазматического, а затем и непрерывного дрожания, на фоне которой иногда отмечались наиболее сильные события IV типа. Подобную активность на Ключевском вулкане по удаленным сейсмическим и акустическим данным ранее наблюдал П.П. Фирстов [12]. Рассмотрим более детально характер этих сейсмических сигналов и их режим.

### Анализ огибающих вулканического дрожания и событий IV типа во время вершинного извержения Ключевского вулкана в 2009 г.

Наиболее характерный пример всех видов сейсмических сигналов, связанных с дегазацией магмы, можно было наблюдать в июле 2009 г. во время слабой стромболианской активности вершинного кратера вулкана, когда наблюдалось «полосчатое дрожание». С 5 по 7 июля 2009 г. было отмечено 13 «полос ВД», продолжавшихся от 1.5 до 13 час., которые были разделены «паузами» длительностью от 1 до 4 час. Во время «пауз» отмечались события IV типа со случайными амплитудами, происходящие случайно во времени. Развитие сейсмичности хорошо видно на графике огибающей сейсмического сигнала в условных единицах за 5 июля 2009 г. (рис.1а) и его детализации (рис. 1б).

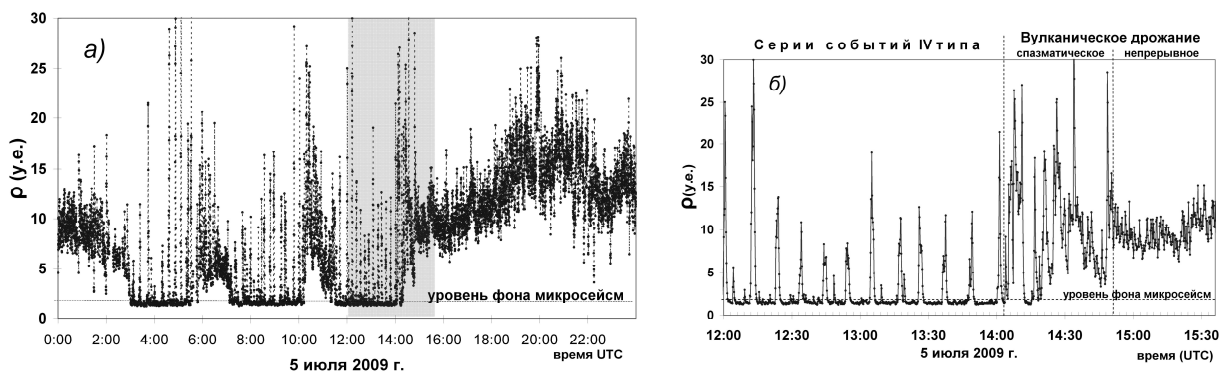


Рис. 1. Изменение во времени огибающей ( $P$ ) сейсмического сигнала на с.ст. «Цирк» ( $\Delta = 8$  км) 5 июля 2009 г., канал В-3: а) за все сутки, б) на интервале времени, изображенном на рис. а) заливкой. Время UTC. Станция оборудована короткопериодной аппаратурой, регистрирующей скорость смещения почвы. Обработано программой DIMAS [4]. Величина постоянной времени осреднения равна 10 с.

Эпизоды «полосчатого ВД» начинались достаточно резко. Длительные эпизоды состояли из фазы спазматического дрожания, за которой следовала более длительная фаза непрерывного дрожания, например эпизод, начавшийся в 14 час (рис.1а и б). Более слабые эпизоды состояли целиком из спазматического дрожания, например с 6 до 7 и с 10 до 11 часов 5 июля (рис.1а). Эпизоды ВД обычно заканчивались также резко, но без выраженной спазматической фазы, например с 0 до 3 и с 6 до 7 часов (рис.1а). Спазматическое ВД напоминало частично слившиеся события IV типа, поскольку в огибающей сигнала отмечались мощные импульсы со случайными амплитудами.

Во время эпизодов дрожания средняя по длительным (20 – минутным) интервалам сейсмическая мощность на 1-2.5 порядка превышала таковую во время «пауз» (из-за отсутствия места график здесь не приводится). Это было связано с тем, что во время «пауз» отмечался не непрерывный сейсмический сигнал, а происходили серии сравнительно коротких событий IV типа (импульсов). Заметим, что высокая средняя мощность была характерна как для непрерывной, так и для спазматической фаз эпизода.

Распределения вероятности огибающих сейсмического сигнала оценивалось по данным с.ст. «Цирк» (канал В-3) для событий IV типа и ВД отдельно. Для событий IV типа брались величины огибающих в максимальной фазе этих землетрясений с 5 по 7 июля 2008 г. Поскольку станция записывала скорость смещения почвы, эта оценка соответствовала максимальным величинам отношений амплитуды к периоду этих землетрясений. Огибающие непрерывного ВД бралась в течение одних суток 10 января 2009 г., когда его уровень сохранялся примерно постоянным. Заметим, что поскольку в это время на вулкане происходило достаточно сильное извержение, величины огибающих ВД оказались примерно на порядок больше, чем в июле 2008 г.

Распределение величин огибающих в максимальной фазе событий IV типа в двойном и одинарном логарифмических масштабах показано на рис.2а и 2б. Оно подчиняется степенному закону, обычному для землетрясений (гамма равна  $\sim 1.7$ ) (рис.2а). Для квадратов максимальных отношений амплитуд к периодам (или магнитуд) это соответствует в два раза меньшей величине гаммы, равной  $\sim 0.85$ . На графике в одинарном логарифмическом масштабе хорошо виден «тяжелый хвост» этого распределения (рис.2б). С большой степенью вероятности можно предположить, что подобным образом будет вести себя также распределение и для огибающей спазматического ВД.

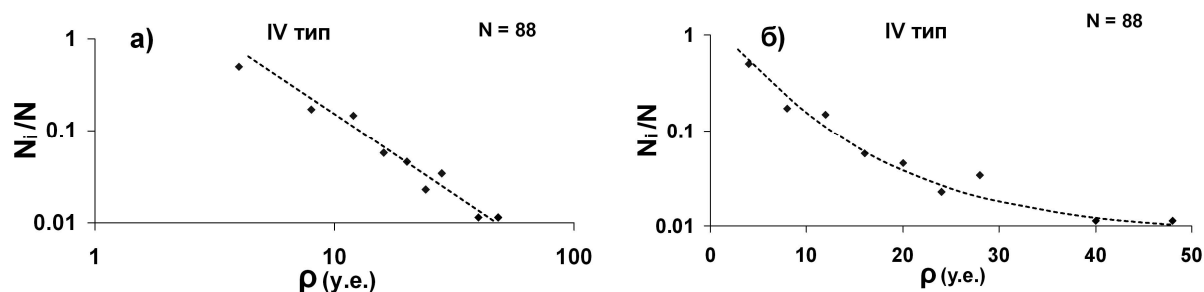


Рис. 2. Частотные распределения максимальных отношений амплитуд к периодам для событий IV типа 5-7 июля 2009 г. в двойном (а) и одинарном (б) логарифмическом масштабах.

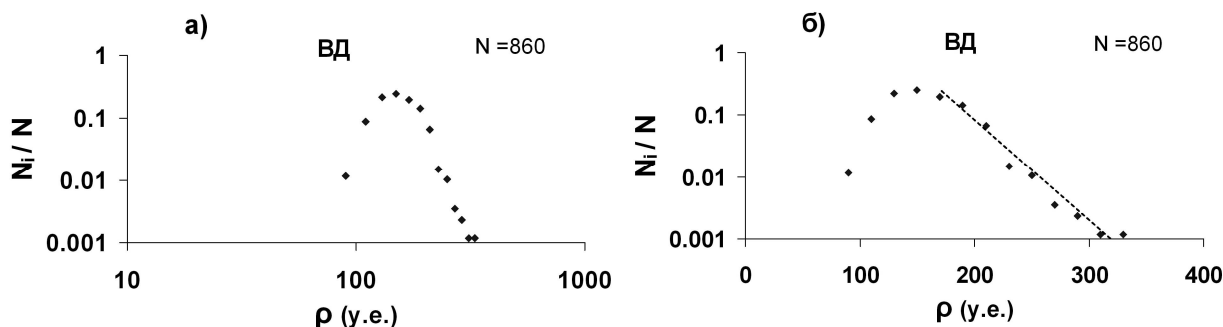


Рис. 3. Частотные распределения величин огибающей непрерывного вулканического дрожания 10 января 2009 г. в двойном (а) и одинарном (б) логарифмическом масштабах.

Распределение огибающей непрерывного ВД в двойном и одинарном логарифмических масштабах показано на рис.3. Оно принципиально отличается от распределения для событий IV типа. Во - первых, для него характерно наличие максимума, соответствующего наиболее вероятному значению огибающей. Во - вторых, распределение быстро спадает по экспоненциальному закону (рис.3б), что гарантирует конечность его моментов. Нормальность и стационарность непрерывного ВД нами не исследовалась, однако в целом характер распределения его огибающей согласуется с таковой для огибающих узкополосных нормальных стационарных процессов [Левин, 1989, с. 265-266]. Ранее нормальность и стационарность непрерывного дрожания на интервалах 200 с была показана Е.И. Гордеевым с коллегами во время Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. [3].

Из проведенного анализа можно сделать следующие выводы. Во-первых, вулканическое дрожание порождается гораздо более мощным, в среднем за большой интервал времени, сейсмическим источником, чем серии событий IV типа. Это имеет место, как для непрерывного, так и для спазматического ВД. Во-вторых, существует принципиальное различие вероятностных распределений для временных функций сейсмических источников событий IV типа и спазматического дрожания, с одной стороны, и непрерывного дрожания, с другой. В отличие от событий IV типа и спазматического ВД, огибающие временных функции источников стационарного непрерывного ВД ограничены достаточно узким диапазоном. Это согласуется с наблюдаемыми особенностями непрерывного ВД.

### **Концептуальная модель образования непрерывного вулканического дрожания Ключевского вулкана**

Наблюдения показывают, что рассматриваемые сейсмические сигналы на Ключевском вулкане связаны с выбросом в его центральном кратере различных по размерам пластичных, твердых

и газообразных вулканических продуктов в атмосферу (стромболианская и стромболианско-вулканическая активности). Иногда эти сигналы сопровождаются слабыми газовыми «продувками». Предположим, что ВД и события IV типа на вулкане в основном порождаются импульсами давления в окружающей среде, возникающими при разрушении крупных газовых структур в магматической колонне около дна кратера и разгрузкой образующихся продуктов в атмосферу. Предположение весьма вероятно, поскольку во время стромболианских взрывов на вулкане возбуждаются как акустические, так и сейсмические сигналы [12]. Определения местоположения источников сейсмических сигналов на аналогичных вулканах показывают, что это происходит в пределах первых сотен метров от дна вершинного кратера [14]. Можно полагать, что величина импульса давления в первом приближении пропорциональна вертикальному размеру разрушающейся газовой структуры [9]. Следовательно, принципиальное различие временных функций сейсмических источников для непрерывного ВД, с одной стороны, и событий IV типа и спазматического ВД, с другой стороны, вызвано различным распределением по размерам разрушающихся газовых структур. Рассмотрим возможную причину различного распределения размеров газовых структур для этих двух случаев.

Известно, что при подъеме магмы к поверхности земли выше уровня начала газоотделения в ней образуется свободная газовая фаза в виде пузырьков, которые в силу закона Архимеда начинают всплывать в магме, увеличиваясь в размерах с приближением к поверхности земли в результате разуплотнения газов из-за снижения литостатического давления.

При относительно малых массовых газосодержаниях поступающей в канал магмы, в расплаве есть место для всплывания пузырей. Плотнейшая упаковка пузырей имеет место лишь в самой верхней части магматической колонны или вовсе отсутствует. В силу ряда причин, пузырьки имеют различные размеры. Пузырьки большего размера поднимаются быстрее, чем мелкие пузырьки и могут догонять и поглощать последние. Это приводит к лавинообразному укрупнению крупных пузырей за счет мелких, в результате чего в магме могут образовываться достаточно крупные газовые полости, разрушение которых может давать газовые «продувки» или стромболианские взрывы [19]. Описанный процесс приводит к кардинальному изменению формы распределения газовых полостей по размерам. Из исходного нормального, быстро спадающего распределения пузырей по размерам может возникнуть степенное распределение с т.н. «тяжелыми хвостами». Разрушение таких пузырей порождает события IV типа со степенным распределением амплитуд в максимальной фазе.

Нередко крупные пузыри, захватывая более мелкие, не сливаются с ними, а образуют газовые пакеты (кластеры). Наличие газовых пакетов подтверждают описанные выше наблюдения в кратере Ключевского вулкана 29 июля 2008 г. Из них следует, что каждое сейсмическое событие IV типа порождалось разрушением не одной газовой полости, а целого газового пакета, верхний пузырь которого являлся наибольшим. Это подтверждается также значительно большей длительностью событий IV типа по сравнению со временем реверберации сейсмического сигнала и расположением максимальных амплитуд в его самой начальной части. Образование газовых кластеров в жидкости было экспериментально исследовано А.Ю. Озеровым [8].

Наличие спазматического ВД, представляющего собой более длительный нерегулярный сигнал, похожий на частично слившиеся события IV типа, указывает на то, что газовые пакеты указанного выше вида могут «слипаться», образуя пакеты еще больших размеров. В результирующем композитном пакете верхний пузырь самый большой, под ним располагается несколько пузырей меньшего размера, под которыми, в свою очередь, опять большой пузырь и т.д. Разрушение такого пакета должно давать указанный длительный нерегулярный сейсмический сигнал. Вероятно, это происходит при существенно большем газосодержании магмы, чем в случае серии событий IV типа.

Другая ситуация наблюдается при большом (первые проценты) массовом газосодержании магмы. Оценки показывают, что при этом в магматической колонне, начиная со значительных глубин (несколько сотен метров от дна кратера) существуют условия «плотнейшей упаковки» пузырьков. Поэтому указанный механизм укрупнения больших пузырьков за счет мелких перестает работать. В плотнейшей упаковке также может происходить укрупнение соприкасающихся пузырей за счет их объединения, однако укрупняются как большие, так и мелкие пузырьки. Изменения формы распределения пузырьков по размерам не происходит. Магматическая колонна оказывается заполнена плотнейшей упаковкой более однородных по размерам пузырей с исходным быстро спадающим распределением по размерам. Разрушение этих ограниченных по размерам газовых структур порождает непрерывное вулканическое дрожание, огибающая которого мало меняется со временем.

### **Возможные практические применения**

Если указанные представления верны, то смена характера сейсмичности от слабых событий IV типа к более сильным, затем к спазматическому и непрерывному вулканическим дрожаниям отражает увеличение массовой доли газов поступающей в магматический канал магмы, что приводит к изменению ее структуры как газожидкостной системы. Мониторинг характера сейсмического режима вероятно можно использовать для прогнозирования вершинных извержений Ключевского вулкана и их развития. В частности, «полосчатое дрожание» означает периодический подход к дну кратера вулкана больших порций сильно газонасыщенной магмы, которая перемежается с менее газонасыщенной. С усилением активности эпизоды «полосчатого ВД» обычно удлиняются и затем переходят в длительное непрерывное дрожание. Это свидетельствует о переходе от отдельных поднимающихся порций к непрерывной струе газонасыщенной магмы. Следовательно, слежение за развитием таких сейсмических эпизодов на Ключевском вулкане может быть использовано для изучения «всплывания» свежей газонасыщенной магмы в его магматической питающей системе.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность И.Р. Абубакирову и А.Ю. Озерову за консультации и полезные обсуждения рассматриваемых в статье вопросов. Особая благодарность Ю.А. Щеглову, А.Г. Балашову, С.А. Погодаеву и А.А. Ганушенко за фото- и видеоматериалы, Д.В. Дрознину за предоставление программы обработки цифровых сейсмограмм DIMAS и В.А. Широкову за научное редактирование статьи.

### **Список литературы**

1. Гордеев Е.И., Мельников Ю.Ю., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Вулканическое дрожание Ключевского вулкана (извержение вершинного кратера в 1984 г.) // Вулканология и сейсмология. 1986. № 5. С. 39–53.
2. Гордеев Е.И. Природа сейсмических сигналов на активных вулканах. Автореф. дисс. доктора физ.-мат. М.: Наука, 1998. 35 с.
3. 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.
4. Дроздин 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.
5. Иванов В.В. Сейсмологические предвестники вершинных извержений Ключевского вулкана на Камчатке (на примере вулканического дрожания). Автореф. дисс. кандидата геол.-мин. наук. Иркутск, 2011. 13с.
6. Конов А.С., Озеров А.Ю. Закономерности в динамике извержений Ключевского вулкана и сопровождающем их вулканическом дрожании // Вулканология и сейсмология. 1988. № 3. С. 21-38.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники, М.: Радио и связь. 1989. 655 с.
8. Озеров А.Ю. Механизм базальтовых взрывов (экспериментальное моделирование) // Вулканология и сейсмология. 2010. №5. С. 3-19.
9. Сторчеус А.В., Плотников С.П. Сейсмологические исследования эксплозий вулкана Карымский в 2001-2004 гг. // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма: К 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный». Петропавловск-Камчатский, 25-30 марта 2006 г. ИВиС ДВО РАН. 2006. С. 106-111.
10. Токарев П.И. Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118с.
11. Трубников Б.А., Слезин Ю.Б., Самойленко Б.И., Сторчеус А.В. К теории глубинного вулканического дрожания // ДАН СССР. 1981. Т.256. №6. С. 1337-1340.
12. Фирстов П.П. Вулканические акустические сигналы диапазона 0.5-10 Гц в атмосфере и их связь с эксплозивным процессом. Петропавловск-Камчатский: 2003. ИВГиГ и Камчатский государственный педагогический университет. 90 с.
13. Benoit J.B., McNutt S.R. Duration-amplitude distribution of volcanic tremor // J.G.R. 2003. V.108. No. B3. PP. ESE 5-1—5-15. doi: 10.1029/2001JB001512.
14. Chouet B. et al. Array analyses of seismic wavefields radiated by eruptive activity at Stromboli volcano, Italy. 1998. CNR-Gruppo Nazionale per la Vulcanologia. Felici Editore.Ospedaletto-Pisa. 158 p.
15. Finch R.H. Volcanic tremor (Part I) // Bull. Seismol. Soc. America. April 1949. V. 39. P. 73-78.
16. Gordeev E.I., Ripepe M. Sources of volcanic tremor at basaltic volcanoes //Volc. Seis. 1998. V.19. P. 353-369.
17. Koyanagi R.Y., Chouet B., Aki K. Origin of volcanic tremor in Hawaii. Pt. 1 // Volcanism in Hawaii. V. 2. Chapter 45. U.S. Geological Survey Professional Paper 1350. W. 1987. P. 1221-1257.
18. McNutt S. R. Volcanic seismicity // Encyclopedia of volcanoes. Academic Press. Ed. Sigurdsson H. 1999. P. 1015-1033.
19. Parfitt E. A., Wilson L. The role of volatiles // Fundamentals of Physical Volcanology. 2008. P. 64-76.