

УДК 550.34: 551.21

СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНА МУТНОВСКИЙ ПО ДАННЫМ СТАНЦИИ «МУТНОВКА»: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, НОЯБРЬ 2008 – ФЕВРАЛЬ 2009 ГГ.

Ю.А. Кугаенко, И.Н. Нуждина

Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
Петропаловск-Камчатский, 683006; e-mail: ku@emsd.ru

Введение

В 2008 г. в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов были установлены две радиотелеметрические сейсмические станции: «Мутновка» (MTV) и «Асача» (ASA) (рис. 1). Совместно со станциями «Горелый» (GRL) и «Русская» (RUS) они образовали локальную сеть для детального сейсмического мониторинга этого района. С ноября 2008 г. станции MTV и ASA находились в опытной эксплуатации, а в конце декабря 2008 г. их потоки данных введены в оперативную обработку.

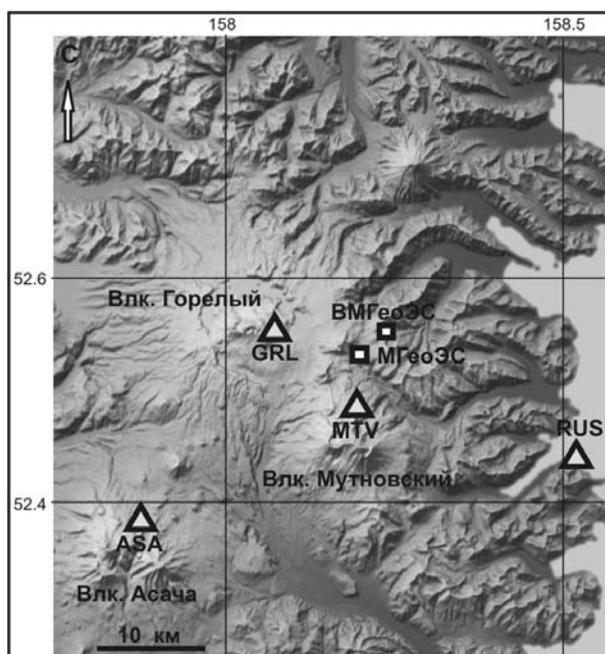


Рис. 1. Сейсмические станции Камчатской региональной сети в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов. Квадратами отмечены Мутновская и Верхне-Мутновская геотермальные электростанции.

В статье приведены первые данные о сейсмичности Мутновского вулкана и примеры записей сейсмических событий, полученной станцией MTV в ноябре 2008 г. – феврале 2009 г. Отмечена компактная локализация выявленных сейсмических событий в пространстве. Рассеянной фоновой мелкофокусной сейсмичности в рассматриваемый промежуток времени не выявлено. Зафиксированы единичные слабые тектонические и вулcano-тектонические землетрясения 3.0-5.4 класса с $T_s-p \leq 1c$ из постройки Мутновского вулкана и района сопки Двугорбой (в работе используется энергетическая классификация С.А. Федотова для Курло-Камчатских землетрясений). Зарегистрированы рои низкочастотных вулканических землетрясений из зоны современных проявлений вулканической активности. Некоторые из них инициировали кратковременное квазипериодическое дрожание – сейсмические события типа «chugging», которые на Мутновском вулкане обусловлены взаимодействием магматической и гидротермальной систем.

Сейсмическая станция MTV

Станция MTV расположена на северо-восточном гребне Мутновского вулкана на высоте 1394 м в пределах разломной структуры ССВ простирания, рассматривающейся в настоящее время как глубинная зона совместного теплового питания Мутновского вулкана и Мутновской гидротермальной системы. Расстояние до активного кратера около 3 км. Мощность покрывающего почвенного слоя в месте установки сеймопостаментов - несколько метров. Вечная мерзлота залегает на глубине

около 1.5 м. Станция оборудована трехкомпонентным комплектом короткопериодных сейсмометров СМ-3 и имеет характеристики, стандартные для Камчатской радиотелеметрической сети: аналоговая запись по скорости, рабочий частотный диапазон 0.7-20 Гц, динамический диапазон 54 дБ. Передача данных ведется в режиме реального времени по радиоканалу на приемный центр КФ ГС РАН, где осуществляется цифровая запись сейсмического сигнала и оперативная обработка землетрясений. По уровню фонового сейсмического сигнала станция соответствует мировым требованиям.

Сейсмичность исследуемого района

Мутновский вулкан расположен примерно в 50 км к западу от тыловой границы мелкофокусной сейсмичности зоны субдукции, проходящей по полуостровам Восточной Камчатки. Гипоцентры землетрясений, относящихся к уходящей под полуостров части фокальной зоны, лежат на глубине порядка 150 км под вулканом.

В 80-годах прошлого века в Мутновско-Гореловском районе проводились масштабные геолого-геофизические работы Елизовской геофизической экспедицией производственного объединения «Камчатгеология». Сейсмичность исследовалась в течение 8 полевых сезонов (1981-1988 гг.). За это время было зафиксировано 660 землетрясений. Отмечено, что наибольшая сейсмическая активность выявлена под западным склоном недействующего Вилючинского вулкана, под полосой, соединяющей действующие Мутновский и Горелый вулканы, и далее на юго-запад от нее до верховьев р. Асача в районе озера Толмачева. Важным итогом этих работ было обнаружение роев достаточно слабых землетрясений как под активными, так и под недействующими вулканами [7]. Часть этих роев Камчатской региональной сетью станций не регистрировалась. Кроме достаточно сильного Асачинского роя землетрясений были зафиксированы Ходуткинский, Гореловский, Вилючинский, Мутновский, Толмачевский, Опалинский рои. Отмечено, что землетрясения роев концентрируются вдоль ограниченных сейсмоактивных участков и для каждого роя характерно ограниченное время активности.

С 2000 г. для Мутновско-Гореловского района в КФ ГС РАН составляется отдельный каталог вулканических землетрясений, включающий в данное время более 350 событий. Их основная часть имеет энергетический класс ниже уровня надежной регистрации для камчатской региональной сети по Южной Камчатке. Эпицентры землетрясений этого каталога приведены на рис. 2 а-б. С введением в оперативную обработку данных новых станций MTV и ASA понизился уровень надежной регистрации до $K=4.5$, начато исследование землетрясений из постройки Мутновского вулкана, определено более 450 эпицентров слабых землетрясений сейсмического роя, продолжающегося на вулкане Горелый (рис. 2 в).

Землетрясение 01 февраля 2009 г. ($K=7.4$) из района Мутновского геотермального месторождения

01 февраля 2009 г. в районе эксплуатируемой части Мутновского гидротермального месторождения было зафиксировано поверхностное землетрясение с классом 7.4. Параметры гипоцентра определены региональной сетью с привлечением данных новых станций ASA и MTV, последняя является ближайшей к эпицентру. Всего в расчетах участвовало 14 станций.

Землетрясение 01 февраля 2009 г. $K=7.4$ - одно из наиболее значительных поверхностных событий, зарегистрированных в районе месторождения за все время детальных сейсмологических наблюдений. Гипоцентр расположен под северо-восточным склоном вулкана, под южным флангом Мутновского месторождения гидротерм (рис. 2 в, эпицентр землетрясения отмечен стрелкой).

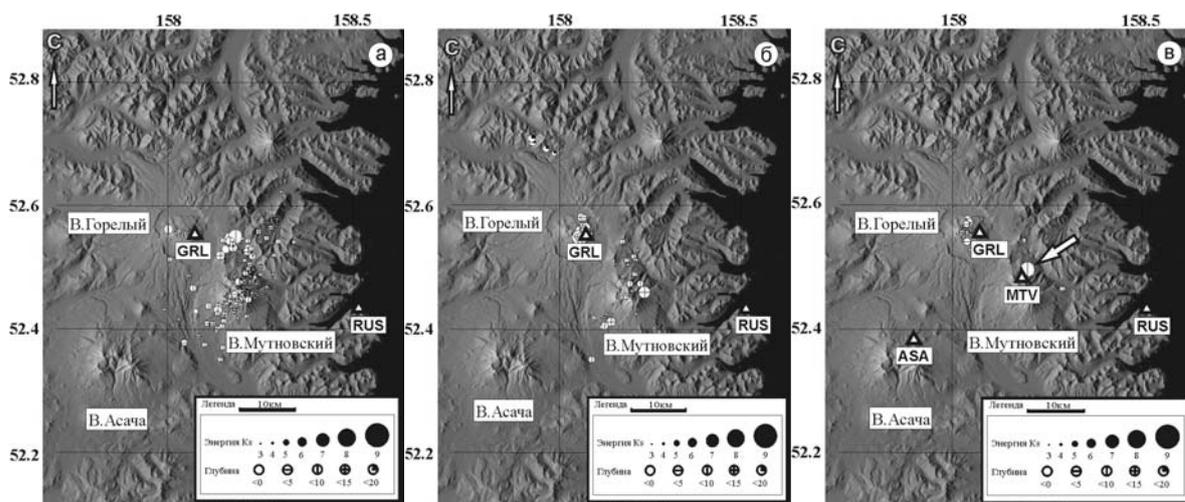


Рис. 2. Карта эпицентров поверхностных землетрясений Мутновско-Гореловского района, глубина гипоцентров до 25 км (по базе данных вулканических землетрясений Мутновско-Гореловского района): 2000-2005 гг. (а); 2006 г. – 27 декабря 2008 г. (б); 28 декабря 2008 г. – 28 февраля 2009 г. (в). Большинство сейсмических событий, описанных в тексте работы, зафиксированы только станцией MTV и на карте В отсутствуют.

В работах [4, 5] показано, что в районе Мутновского геоэнергетического комплекса наблюдаются процессы техногенного изменения состояния среды. Они включают появление наведенной сейсмичности, падение пластового давления в гидротермальном резервуаре, понижение гидростатического уровня водоносного комплекса, гидротермальные взрывы.

Привлечение данных MTV и ASA к определению гипоцентра землетрясения 01.02.2009 подтвердило возможность генерации сейсмических событий под Мутновской гидротермальной системой. Возможно, это землетрясение, наряду с другими сейсмическими событиями, зафиксированными в районе месторождения в последнее десятилетие (рис. 2), является проявлением нарушения геодинамического равновесия среды в результате интенсивной промышленной эксплуатации.

Сейсмические события в районе вулкана Мутновский по данным станции MTV

Детальный анализ записей станции MTV за ноябрь 2008 г. - февраль 2009 г. показал, что сейсмические события локализованы компактно, о чем свидетельствуют узкие диапазоны диаграммы направленности первых вступлений сейсмических волн (рис. 3). Подавляющее большинство обнаруженных сейсмических событий зарегистрировано только станцией MTV, что придает определению их координат лишь приблизительный, оценочный характер. Параметры слабых землетрясений оценены по величине T_s -р и азимуту на эпицентр с использованием интерактивной программы обработки и анализа сейсмических сигналов DIMAS [3].

Тектонические землетрясения. Зарегистрированы единичные близкие высокочастотные тектонические землетрясения (T_s -р ~ 1 с) с северной границы вулкана Мутновский, из района г. Двугорбая с азимутом на эпицентр - 297-332°. Энергетический диапазон землетрясения (К) - 3.0-5.0. Максимум сейсмической энергии приходился на частотный диапазон 6-12 Гц. Пример записи приведен на рис. 4 а. Группируемость эпицентров этих событий и сходная форма записей говорит о проявлении активности единой тектонической структуры. Экструзия г. Двугорбая, среднеплейстоценового возраста, расположена между вулканами Мутновский и

Горелый и относится к цепочке экстрезий и вулканов, вытянувшихся вдоль серии разломов субмеридионального простирания к северу от вулкана Мутновский [6].

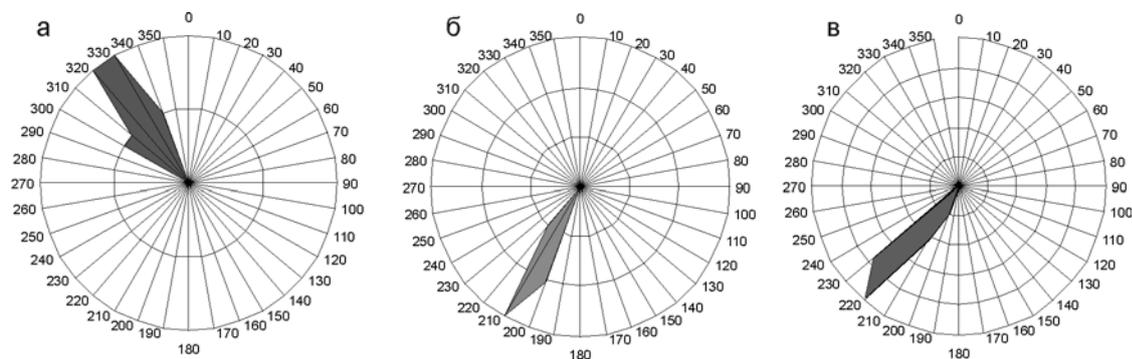


Рис. 3. Круговые диаграммы для станции MTV, иллюстрирующие направление на источник для первых вступлений сейсмических волн от различных сейсмических событий: группа тектонических землетрясений из района г. Двугорбая (а); вулcano-тектонические землетрясения (б) и низкочастотные сигналы из зоны Активного кратера (в).

Предполагается, что в ее недрах существовал самостоятельный близповерхностный магматический очаг кислой магмы. Постройка ее сильно разрушена, осложнена серией даек верхнечетвертичного возраста и многочисленными разломными нарушениями с вертикальными смещениями, на восточном склоне выделены обширные массивы обвально-осыпных отложений. Надо отметить, что упомянутые выше исследования сейсмичности этого района в 80-годах прошлого века выявили наибольшее число сейсмических событий именно в разломной зоне между Мутновским и Горелым вулканами. Возможно, нами фиксируется долговременная сейсмическая активность этой тектонической зоны.

Вулcano-тектонические землетрясения

В рассматриваемый период произошло несколько землетрясений в западной части постройки вулкана Мутновский в районе Активного кратера. Эти события рассматриваются как вулcano-тектонические: азимут на эпицентр - 182-218°; $K=3.0-5.4$; $T_s-p=0.4-0.8$ (рис. 4б). Землетрясения характеризуются четкими вступлениями продольных и поперечных волн. По форме записи, частотному составу и разбросу эпицентров эти события имеют различный генезис. Для их изучения необходимы дополнительные исследования.

Низкочастотные землетрясения

Наряду со слабыми тектоническими землетрясениями в западной части постройки Мутновского вулкана зафиксированы рои низкочастотных сейсмических сигналов, схожих между собой по форме записи (рис. 4в). Характерные вступления волн отсутствуют. Основная часть сейсмической энергии приходится на частотный диапазон 1-3 Гц, азимут на эпицентр - 206-231°. Корреляция волновых форм в отдельных случаях превышает 0.9 (рис. 5).

Всего было зафиксировано более 170 низкочастотных сейсмических событий. Их распределение во времени неравномерно. Наиболее существенные рои были отмечены в середине декабря 2008 г. и середине января 2009 г. В связи с тем, что визуальные наблюдения за активностью вулкана ведутся с расстояния почти 70 км из здания приемного центра «Петропавловск», в это время года вулкан в основном закрыт облачностью, пока не удалось установить связь между появлением низкочастотных роев и парогазовой деятельностью вулкана.

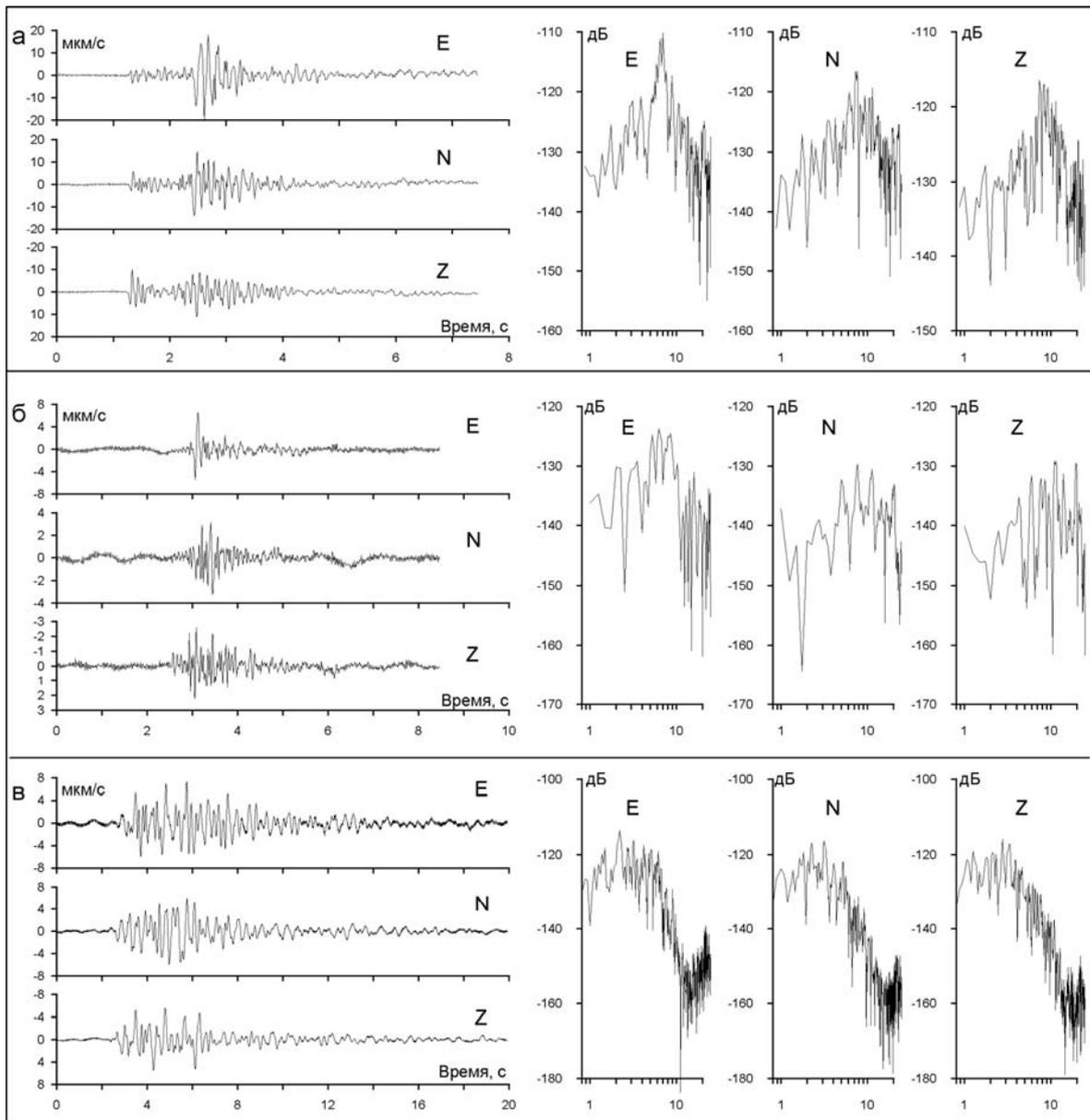


Рис. 4. Примеры записей локальных сейсмических событий, зарегистрированных станцией MTV, и их спектры мощности: тектоническое землетрясение из района г. Двугорбая 15 января 2009 г. в 08:46 UTC, $K=4.5$ (а); вулcano-тектоническое землетрясение из северо-западной части постройки Мутновского вулкана 11 января 2009 г. в 22:07 UTC, $K=3.5$ (б); низкочастотное землетрясение (азимут на источник сейсмического излучения соответствует направлению на Активный кратер) 9 декабря 2008 г. в 20:12 UTC (в).

Низкочастотные (длиннопериодные) землетрясения были зафиксированы и изучались на многих вулканах мира, например [2, 8, 11-13, 17, 18]. В вулканологической практике такие события рассматриваются как проявление недеструктивной вулканической активности, связанной с процессами дегазации и спонтанного вскипания флюида в недрах вулкана. Для Мутновского вулкана источником таких сигналов может выступать зона ретроградного кипения малоглубинного магматического очага [9] или близповерхностная область вторичного кипения в гидротермальном резервуаре рассолов и смешанных растворов на глубине первых сотен метров от дна Активного кратера [1].

Для определения глубины генерации роев низкочастотных событий необходимо привлечение дополнительных временных сейсмических станций.

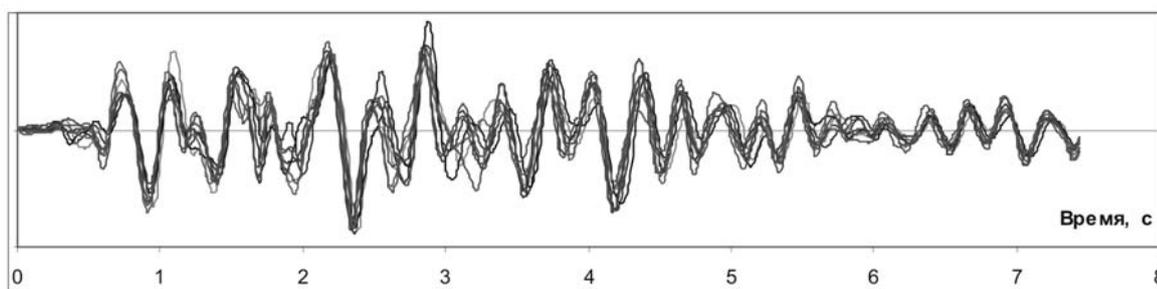


Рис. 5. Волновые формы низкочастотных землетрясений роя, который произошел на Мутновском вулкане в декабре 2008 г. Амплитуды нормированы на дисперсию сигнала.

Сейсмические сигналы «chugging»

«Chugging» – интересное, не до конца исследованное явление, наблюдаемое на активных вулканах, и соответствующее истечению из кратера газо-пепловой смеси через перекрытый отложениями (засыпанный) канал [14-16]. В сейсмических записях оно представляет собой цуги квазипериодического дрожания. Их можно рассматривать как последовательность изолированных повторяющихся импульсов. После 30-40 импульсов «chugging» обычно затухает. Характерной особенностью сигналов «chugging» является периодичность в нескольких частотных диапазонах. Преобладают низкочастотные сигналы - 1-2 Гц. На Камчатке это явление наблюдалось при извержении вулкана Карымский и регистрировалось одновременно как сейсмической аппаратурой, так и акустическими датчиками в атмосфере в инфразвуковом диапазоне частот [10, 14-16]. «Chugging» всегда предваряется иницирующим воздействием. На Карымском вулкане это были взрывы.

На Мутновском вулкане нами были зафиксированы случаи событий «chugging» длительностью 30-120 с, триггером выступало низкочастотное землетрясение (рис. 6). Участки дрожания II и III характеризуются заметной несимметрией относительно нулевой линии, что может быть объяснено влиянием свободной поверхности. Интересно, что «chugging» зафиксирован не в ходе извержения вулкана, а в фазе покоя, на фоне его фумарольной деятельности. Возможно, вместо дегазирующей магматической колонны под Активным кратером Мутновского вулкана расположен высокотемпературный гидротермальный резервуар. Как и низкочастотные землетрясения, «chugging» на этом вулкане, возможно, обусловлен взаимодействием магматической и гидротермальной систем.

Дифференциация сейсмических событий по соотношению спектральных компонент

В связи с тем, что большинство сейсмических событий вулкана Мутновский регистрируется только станцией MTV, возрастает значение анализа цифровых записей для повышения эффективности использования имеющейся сейсмологической информации. Рассмотрена возможность дифференциации локальных сейсмических событий по соотношению спектральных компонент.

Для примера рассмотрим группу тектонических землетрясений и некоторые события роев низкочастотных сейсмических событий. Записи были подвергнуты фильтрации, использовались октавные фильтры: 1.5-3 Гц, 3-6 Гц, 6-12 Гц. На рис. 7 представлены примеры диаграмм относительного распределения по указанным частот-

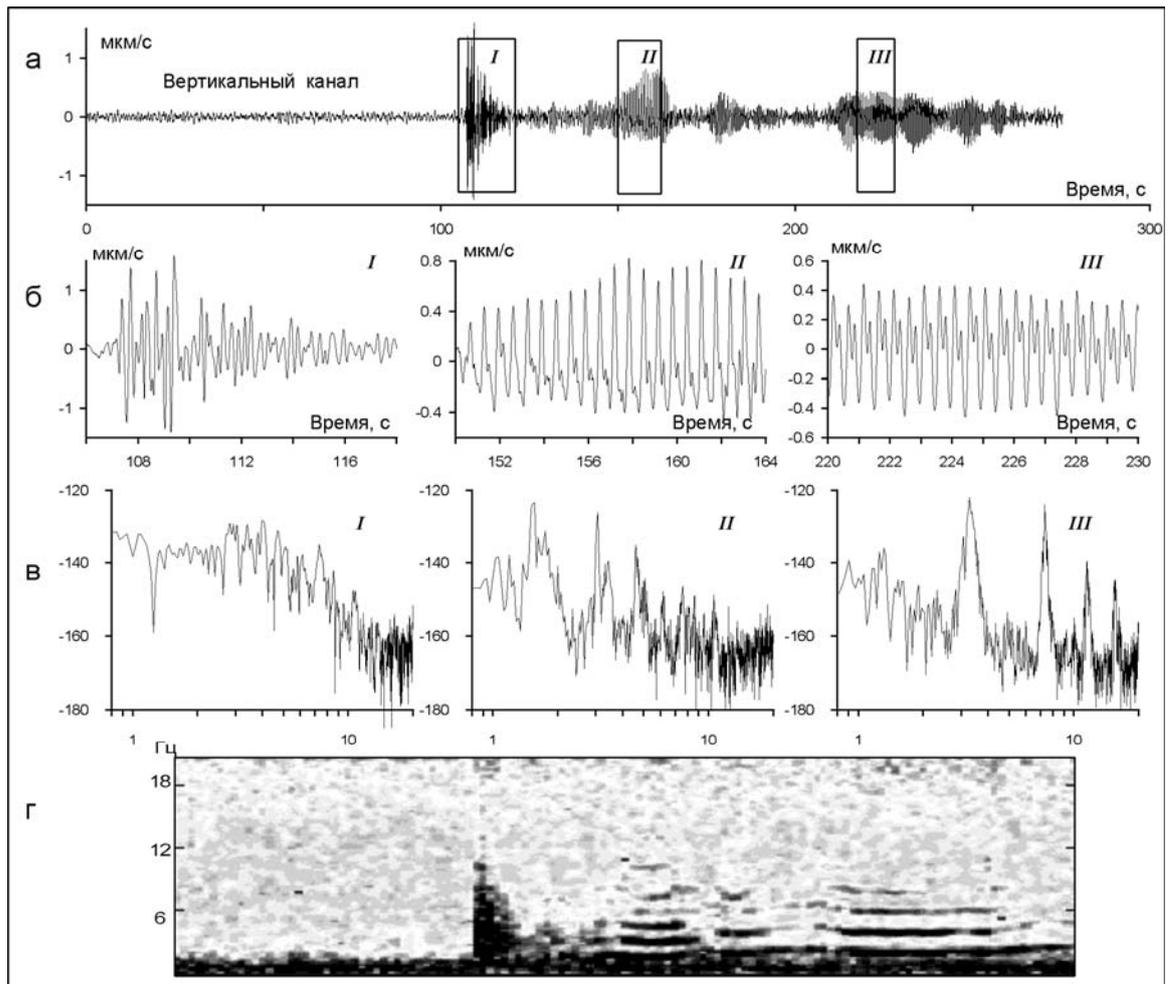


Рис. 6. Событие типа «chugging», инициированное низкочастотным землетрясением 15 января 2009 г. в 03:13 UTC: пример записи, применен полосовой фильтр 1-6 Гц (а); более детальное представление инициирующего события (I) и участков «chugging» (II, III) (б); спектры мощности выделенных фрагментов записи (в); спектрограмма записи (г).

ным диапазонам выделившейся сейсмической энергии. Для относительной оценки энергии применялась дисперсия сигнала в соответствующем диапазоне частот. Распределение энергии для этих групп событий имеет устойчивый характер, однако между собой группа высокочастотных тектонических землетрясений и группа низкочастотных неструктивных событий различаются. Поэтому целесообразно представить их распределения на треугольной диаграмме (рис. 8), что является простым приемом визуализации скрытой корреляции параметров последовательности событий. Такой подход может использоваться для разделения потока сейсмических событий по типам в автоматическом режиме. В дальнейшем, в ходе накопления записей, аналогичные построения можно будет провести и для выделения землетрясений, отнесенных в данной работе к вулcano-тектоническим.

Заключение

Сейсмичность Мутновского вулкана в рассматриваемый период (ноябрь 2008 г.– февраль 2009 г.) характеризуется низким энергетическим уровнем. На станции MTV круговая диаграмма направлений первых вступлений сейсмических волн не является равномерной. Выделены два лепестка преимущественных направлений на эпицентры: северо-запад и юго-запад к Активному кратеру. Наиболее интересным результатом

является выделение в записях станции MTV низкочастотных сейсмических землетрясений, объединяющихся в рои, неравномерно распределенные во времени, и сейсмических событий типа Chugging.

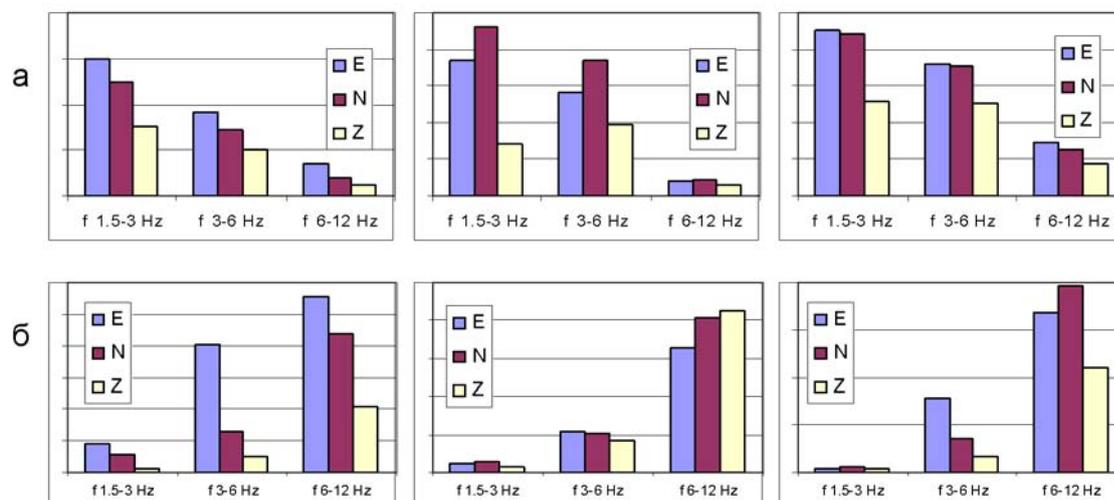


Рис. 7. Примеры относительного распределения энергии по частотным диапазонам для высокочастотных тектонических землетрясений (а) и низкочастотных землетрясений (б). Масштаб по оси ординат – линейный.

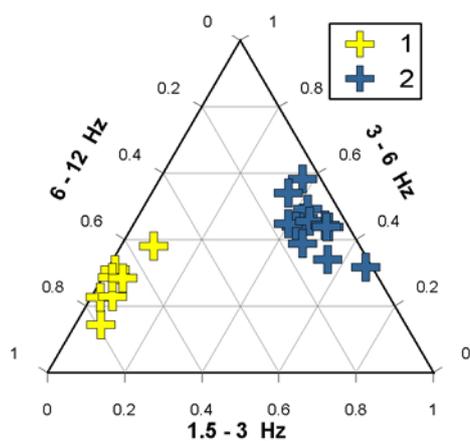


Рис. 8. Распределение энергии по частотным диапазонам для высокочастотных тектонических землетрясений (1) и низкочастотных сейсмических событий (2), представленное на треугольной диаграмме.

По существующим представлениям, увеличение числа низкочастотных землетрясений может рассматриваться как предвестник вулканической активизации [8, 11]. Мониторинг этих событий является важной задачей для оценки вулканической опасности. Станция MTV позволяет регистрировать как локальные тектонические землетрясения, так и недеструктивные вулканические явления, связанные с геометрией каналов и фазовым состоянием и движением флюида в недрах вулкана. Записи станции являются надежной основой для организации автоматизированной обработки цифровых записей для выделения сейсмических событий, относящихся к вулкану Мутновский, и их динамики. Актуальность этой задачи определяется тем, что вулкан долгое время пребывает в стадии покоя, а его извержение представляет опасность для социально значимого района Мутновского геотермического комплекса.

Список литературы

1. Бортникова С.Б., Шаранов В.Н., Бессонова Е.П. Гидрогеохимический состав источников фумарольного поля Донного Мутновского вулкана (Южная Камчатка) и проблемы их связи с надкритическими магматическими флюидами // ДАН. 2007. Т. 413. № 4. С. 530–534.

2. Горельчик В.И., Сторчеус А.В. Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск- Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН. 2001. С. 373-379.
3. Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 2. С. 117-121.
4. Кугаенко Ю.А. Проблемы эксплуатации геотермальной системы в сейсмологическом аспекте (на примере Мутновского геотермического комплекса, Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 43-56.
5. Кугаенко Ю.А., Мельников Д.В. Проявления техногенеза в геодинамически активном районе Мутновского геотермического комплекса (Южная Камчатка) // География и природные ресурсы, 2006, № 3, С. 30-37
6. Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 105 с.
7. Пак Г., Пономарев П.М. Рои вулканических землетрясений на Юго-Восточной Камчатке в 1981-1984 гг. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Выпуск 1. Тезисы докладов VI Всесоюзного вулканологического совещания. Петропавловск-Камчатский, 1985. С.226-227.
8. Сторчеус А.В. Рой длиннопериодных вулканических землетрясений, предвзвещающих извержение Карымского вулкана в 1996 г. // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 75-82.
9. Уткин И.С., Федотов С.А., Делемень И.Ф., Уткина Л.И. Динамика роста и развития проточных магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов, их тепловое питание и накопленное ими подземное тепло // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С.11-29.
10. Фирстов П.П., Маневич А.Г., Озеров А.Ю. Волновые возмущения в атмосфере от эксплозий вулкана Карымский (1997-1999 гг.) // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 2004, С. 17-24.
11. Chouet B.A. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting // Nature. 1996. V. 380. P. 309-316.
12. Green D.N., Neuberg J. Waveform classification of volcanic low-frequency earthquake swarms and its implication at Soufrière Hills Volcano, Montserrat // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2006. V. 153. Is. 1-2. P. 51-63.
13. Gilbert J.S., Lane S.J. The consequences of fluid motion in volcanic conduits // Journal of the Geological Society, London. Special Publications. 2008. V. 307. P. 1-10.
14. Johnson J. B., Lees J. M. Plugs and chugs—seismic and acoustic observations of degassing explosions at Karymsky, Russia and Sangay, Ecuador // Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 101, Is. 1-2, August 2000, P. 67-82.
15. 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.
16. Lees J.M. , Gordeev E.I., Ripepe M. Explosions and periodic tremor at Karymsky volcano, Kamchatka, Russia // Geophysical Journal International. 2004 Volume 158 Is. 3, P. 1151 – 1167.
17. Petersen T. Swarms of repeating long-period earthquakes at Shishaldin Volcano, Alaska, 2001–2004 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2007. V. 166. Is. 3-4. P. 177-192.
18. Waite G. P., Chouet B., Dawson P. B. Eruption dynamics at Mount St. Helens imaged from broadband seismic waveforms: Interaction of the shallow magmatic and

hydrothermal systems. Journal of Geophysical Research. 2008. V.113. B02305, doi: 10.1029/2007JB005259.

SEISMICITY OF MUTNOVSKY VOLCANO IN NOVEMBER 2008 – FEBRUARY 2009 ON THE DATA FROM MUTNOVKA STATION: FIRST RESULTS

Yu. A. Kugaenko, I.I. Nuzhdina

Kamchatka Branch of Geophysical Survey RAS, 683006, Petropavlovsk-Kamchatsky; e-mail: ku@emsd.ru

We present first data on the seismicity of Mutnovsky volcano and some records of seismic events from Mutnovka (MTV) station received through November 2008 – February 2009. Single weak tectonic and volcano-tectonic earthquakes of the class energy $K=3.0 - 5.4$ at $T_s - p \leq 1$ were registered at the edifice of Mutnovsky and the area of Dvugorbaya Sopka. Swarms of low-frequency volcanic earthquakes were recorded in the zone of current volcanic activity. Short-lived quasi-periodic tremor was observed similar to the Chugging-type of seismic events that are due to the interaction of magmatic and hydrothermal systems of Mutnovsky. All recorded events are densely located in space. The energy class $K=7.4$ earthquake registered by the Kamchatka regional network in the area of the Mutnovsky geo-power complex could have been indicative for generation of seismic events beneath the Mutnovskaya hydrothermal system.