

УДК 550.34:550.21

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ВУЛКАНОВ КИЗИМЕН, КОРЯКСКИЙ, МУТНОВСКИЙ И ГОРЕЛЫЙ

© 2011 Ю.А. Кугаенко, И.Н. Нуждина, В.А. Салтыков

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

В статье предложена технология формализованного разделения вулcano-тектонических и низкочастотных землетрясений на примере нескольких эпизодов вулканической активности на Камчатке по данным сейсмических станций ближней зоны регистрации:

- вулкан Кизимен (эксплозивное извержение 2010-2011 гг.);
- вулкан Горелый (активизация 2009-2011 г.);
- вулкан Корякский, (активизация 2008-2009 гг.);
- вулкан Мутновский (многолетняя интенсивная фумарольная и гидротермальная активность, что адекватно непрерывному извержению средней силы).

Для визуализации корреляции спектральных характеристик волновых форм сейсмических событий различной природы предлагается использование треугольной диаграммы.

Намечено новое интересное направление исследований вулканов: выявление возможной связи между распределениями спектральных компонент в сейсмических записях и характером вулканических активизаций.

Ключевые слова: землетрясение, формализованная типизация, вулканы Кизимен, Мутновский, Горелый, Корякский.

ВВЕДЕНИЕ

Происходящие на вулканах землетрясения являются одним из естественных индикаторов вулканической активности и отражают состояние вулкана. Наряду с общими закономерностями, характерными для вулканов в период покоя, подготовки извержения и во время извержения, сейсмический режим каждого вулканического аппарата характеризуется и индивидуальными особенностями.

По характеру записи зарегистрированные на вулканах землетрясения традиционно делятся на несколько типов (Токарев, 1981; Green, Neuberg, 2006; McNutt, 2005; Minakami, 1960). Во всех типизациях присутствуют землетрясения, по характеру записи не отличающиеся от тектонических, и неструктивные низкочастотные сейсмические события.

Вулcano-тектонические землетрясения (ВТЗ) связаны в первую очередь с разрушением пород непосредственно в окрестности вулкана

и в его постройке и вызваны изменением поля напряжений в упруго-деформированной среде (Токарев, 1981). Низкочастотные сейсмические события (НЧС) сопровождают процессы, связанные с продвижением магмы по выводным каналам и с выходом магматического материала на поверхность. Они зафиксированы на многих вулканах мира. В вулканологической практике такие события рассматриваются как проявление неструктивной вулканической активности, связанной с процессами дегазации и спонтанного вскипания флюида в недрах вулкана (Chouet, 1996; Gilbert, Lane, 2008; Waite et al., 2008). Очаги таких низкочастотных землетрясений моделируются как центр расширения и рассматриваются как подземный или приповерхностный взрыв.

Для землетрясений, фиксирующихся на вулканах Камчатки, используется типизация, разработанная П.И. Токаревым (Токарев, 1981) при исследовании сейсмичности, связанной с гигантскими извержениями вулканов Безымянного в 1956 г. и Шивелуча в 1964 г., а также с прорывами

побочных кратеров вулкана Ключевского в 1951, 1953, 1956 и 1966 гг. Это разделение по типам базируется на визуальном анализе аналоговых сейсмических записей и носит описательный характер. Типизация не включает некоторые землетрясения, например, гибридные, хорошо известные в практике вулканической сейсмологии и зафиксированные на других вулканах Камчатки (Гордеев, Сеньюков, 1998; Jonson et al., 1998).

До 1996 г. обработка аналоговых сейсмограмм на Камчатке производилась «вручную». В 1996 г. был осуществлен перевод радиотелеметрических приемных центров на цифровую регистрацию (Гордеев и др., 2006), и обработка перешла на экран компьютера (в автоматизированный режим), что значительно улучшило качество каталога землетрясений. Однако переход с аналоговой записи на цифровую не внес существенных изменений в разделение сейсмических событий на вулканах по типам: работа по-прежнему носит субъективный, качественный характер и базируется на визуальном анализе (Гарбузова, Соболевская, 2010).

Возможности цифровой регистрации позволяют использовать количественные характеристики сигналов. В связи с тем, что в ходе вулканических активизаций большинство сейсмических событий слабы и регистрируется только ближайшими станциями, возрастает значение количественного анализа цифровых записей

для повышения эффективности использования имеющейся сейсмологической информации. В данной работе нами рассмотрена возможность дифференциации локальных сейсмических событий по соотношению спектральных компонент.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ

По существующим представлениям увеличение числа низкочастотных землетрясений может рассматриваться как предвестник приближающегося извержения (Горельчик, Сторчеус, 2001; Сторчеус, 2007; Chouet, 1996; Minakami et al., 1969). Мониторинг этих событий является важной задачей для оценки вулканической опасности.

Наглядным примером развития такой ситуации является начальная стадия эксплозивного извержения вулкана Кизимен, начавшегося в конце 2010 г. (рис. 1) (Малик, Овсянников, 2011; Сеньюков и др., 2011). Извержение предварялось мощной сейсмической подготовкой, которая регистрировалась с апреля-июня 2009 г. Низкочастотные землетрясения без четких вступлений объемных волн появились в сейсмических записях лишь с середины ноября 2010 г. как один из основных признаков возможного извержения (рис. 1, 2). Эксплозивное извержение вулкана Кизимен вступило в активную фазу 12 декабря 2010 г. В ходе оперативной обработки сейсми-

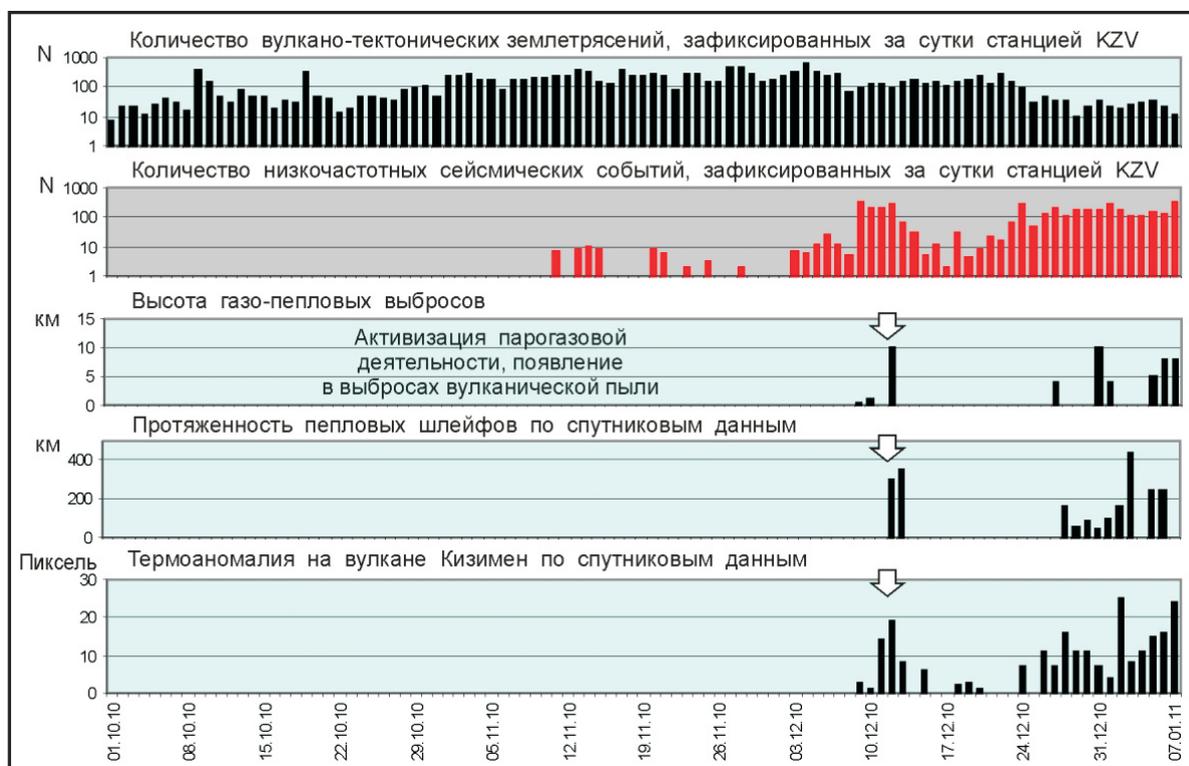


Рис. 1. Временной ход параметров мониторинга вулкана Кизимен в конце 2010 г. Стрелкой показано начало эксплозивного извержения. Использована база данных Камчатского филиала Геофизической службы РАН «Активность вулканов Камчатки». URL: <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>

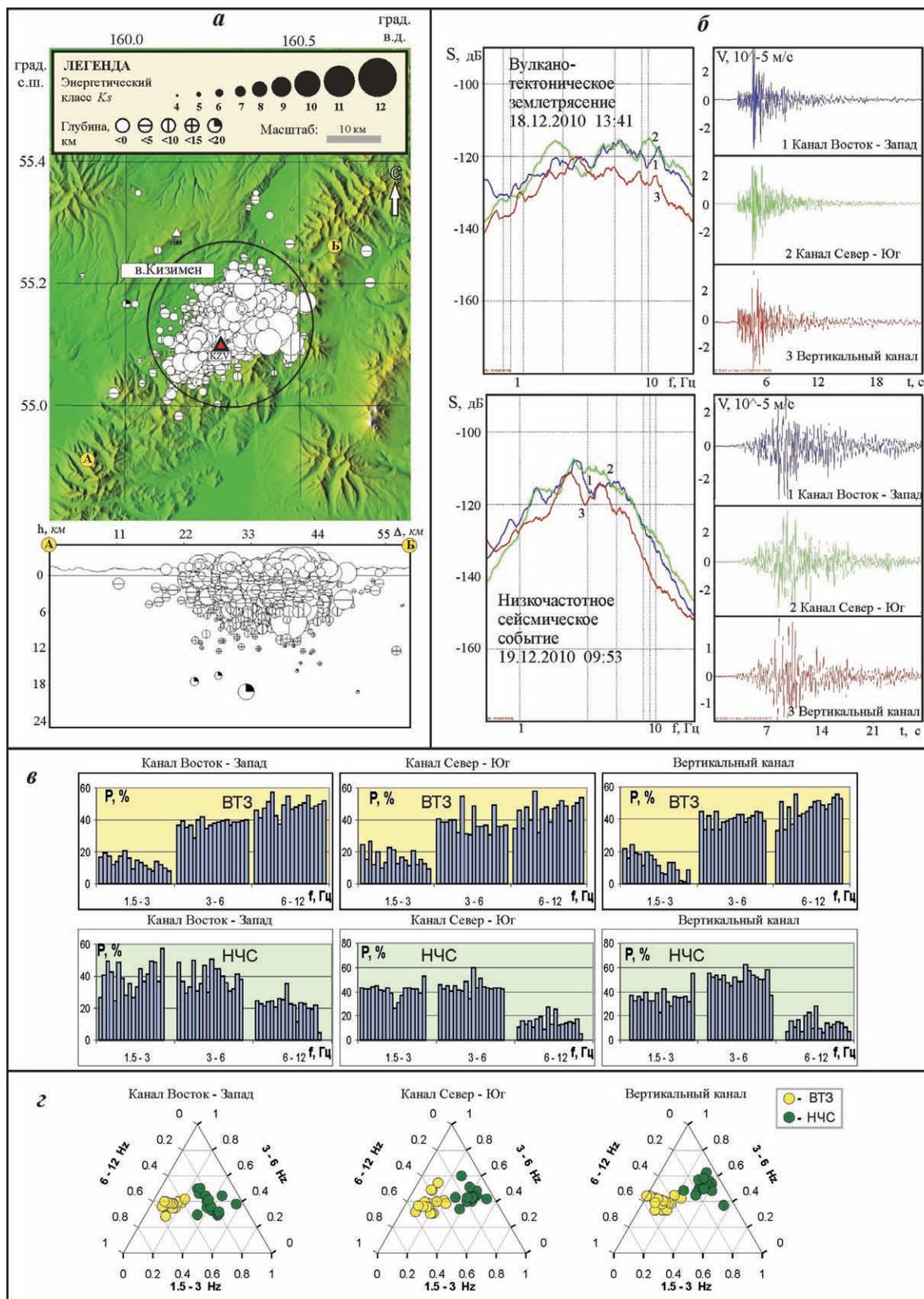


Рис. 2. Вулкан Кизимен: *а* – Карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных в районе вулкана Кизимен в 2010 г. на глубине до 24 км, и проекция их гипоцентров на вертикальную плоскость А-Б; *б* – примеры записей и спектров мощности вулкано-тектонического землетрясения (вверху) и низкочастотного сейсмического события (внизу); *в* – гистограммы распределения относительной энергии землетрясений в трех частотных интервалах (1.5-3, 3-6, 6-12 Гц) в сейсмических записях ВТЗ и НЧС по трем каналам регистрации; *з* – треугольные диаграммы распределения относительной энергии землетрясений в трех частотных интервалах (1.5-3, 3-6, 6-12 Гц) в сейсмических записях ВТЗ и НЧС по трем каналам регистрации.

ческих данных вулкана Кизимен разделение сейсмических событий по типам проводилось визуально и было сопряжено с трудностями и большими затратами времени, так как поток локальных сейсмических событий был интенсивен. В данной ситуации автоматическое или автоматизированное применение количественных характеристик землетрясений могло бы значительно ускорить процесс оперативной обработки и повысить надежность выявления низкочастотных вулканических событий в целях прогноза извержения и оценки вулканической опасности авиаполетов над Камчаткой.

ЭПИЗОДЫ ПОВЫШЕННОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ВУЛКАНИЧЕСКИМИ АКТИВИЗАЦИЯМИ

В данном разделе приведены сведения об интервалах вулканической активности, которые рассматривались при подготовке данной статьи: начало эксплозивного извержения вулкана Кизимен в 2010 г.; парогазовая активизация вулкана Горелый в 2009-2011 гг.; газо-пепловая активизация вулкана Корякский в 2008-2009 гг.; многолетняя интенсивная фумарольная и гидротермальная активность вулкана Мутновский, что адекватно непрерывному извержению средней силы.

Вулкан Кизимен (рис. 1, 2) – голоценовый вулкан, построенный из экструзивных куполов, – красивый одиночный конус высотой 2376 м с выделяющимися на склонах короткими крупноглыбовыми мощными лавовыми потоками (Шанцер и др., 1991). Это единственный действующий вулкан, расположенный на сочленении грабена Центральной Камчатской депрессии с горстом Восточного хребта. В прошлом для него были характерны эксплозивно-эффузивно-экструзивные извержения с составом пород от базальтов до дацитов. На северо-северо-западном склоне вулкана, в трехстах метрах ниже вершины, расположена постоянно действующая мощная фумарольная площадка. Известно лишь одно историческое извержение вулкана Кизимен, которое произошло в 1928-1929 гг. (Пийп, 1946). Территория малонаселенна: в 9 км от вулкана расположена туристическая база, в 23 км – кордон Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника. По сейсмическим данным первые вулcano-тектонические землетрясения в районе вулкана Кизимен были зарегистрированы в апреле 2009 года (Сенюков и др., 2011). С июня 2009 г. сейсмическая активность резко возросла и продолжается до настоящего времени. Все землетрясения сейсмической подготовки извержения имели четкие вступления продольных (*P*)

и поперечных (*S*) волн и относились к вулcano-тектоническим событиям. Малоглубинная сейсмичность района вулкана Кизимен за 2010 г. приведена на карте на рис. 2. Признаки вулканической активизации начали отмечаться со второй половины октября 2010 г.: в привершинной части вулкана образовалось два новых газовых жерла, в выбросах стала появляться вулканическая пыль (Малик, Овсянников, 2011). С середины ноября стали регистрироваться низкочастотные землетрясения (рис. 1), число которых значительно возросло перед эксплозивным извержением 10-14 декабря, в ходе которого зафиксирован пепловый шлейф на высоте 10 км длиной более 300 км. На рис. 2 представлены примеры записей вулcano-тектонических землетрясений и низкочастотных сейсмических событий для вулкана Кизимен. На момент написания статьи извержение продолжается (информационное сообщение Н.А. Малик)¹: длина лавового потока в сентябре 2011 г. достигла 2.7 км, сохраняется парогазовая деятельность, происходят небольшие пепловые выбросы, обнаружены свежие следы пирокластических потоков. По сейсмическим данным эти процессы сопровождаются прерывистым спазматическим вулканическим дрожанием и множественными сейсмическими событиями в постройке вулкана.

Вулкан Корякский (рис. 3) – классический позднеплейстоцен-голоценовый стратовулкан высотой 3456 м, сложенный породами от базальтов до андезитов (Масуренков и др., 1991). Расположен в 25-30 км от краевого центра г. Петропавловска-Камчатского и г. Елизово и представляет для них потенциальную опасность. В работе (Иванов, 2010) обобщены данные об известных активизациях Корякского вулкана – усилениями фумарольной деятельности и слабыми извержениями. Начиная с 19 столетия, они отмечены 14 раз: 1827-1828 гг., 1955 г., в конце 1880 г. – начале 1890 г., 1897-1898 гг., 1904 г., 1926 г., 1931 г., 1945 г., 1952 г., 1954 г., 1956-1957 гг., в 1970-е и 1980-е гг., 1991 г. Активизация 2008-2009 гг. (по (Иванов, 2010) – газовое извержение с примесью пепла) предварялась беспрецедентным усилением сейсмичности под вулканом, которая начала фиксироваться в феврале-марте 2008 г., за 7-8 месяцев до первых проявлений вулканической активности (Сенюков, Нуждина, 2010). С октября 2008 г. наблюдалось усиление фумарольной активности, которая сменилась мощной парогазовой эмиссией. Высота выбросов пепла достигала 2-2.5 км над вулканом, протяженность пепловых шлейфов – 200 км. В течение 2008-2009 гг. зарегистрировано несколько всплесков сейсмичности под Корякским вулканом, во

¹URL: http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform_messages/2011/Kizimen_092011/Kizimen_092011.html

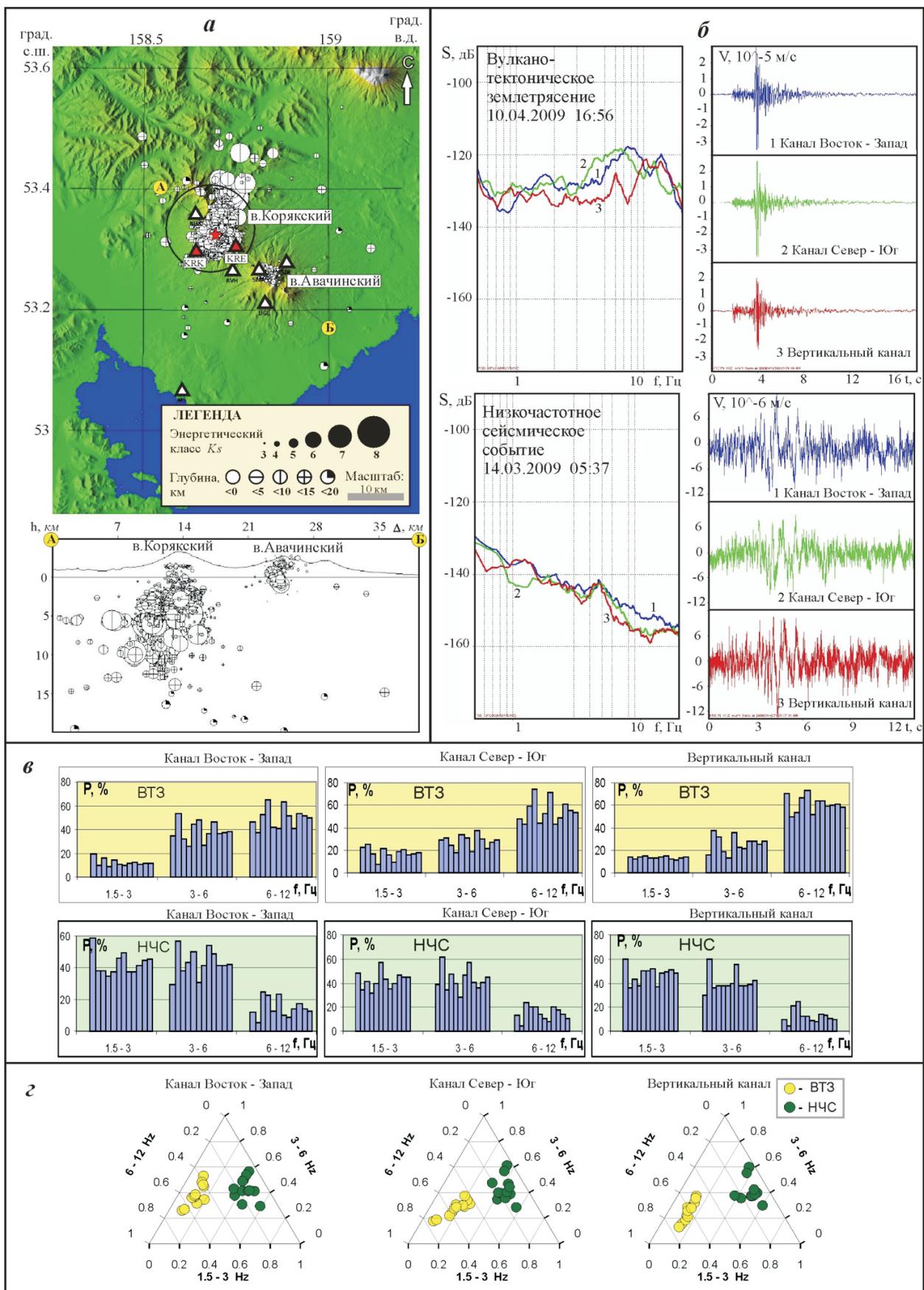


Рис. 3. Вулкан Коряжский: *а* – Карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных в районе вулкана Коряжский в 2008–2009 гг. на глубине до 20 км, и проекция их гипоцентров на вертикальную плоскость А-Б; *б-г* – аналогично рис. 2.

время которых наблюдалось усиление вулканической активности. Эпизод активизации Корякского вулкана закончился осенью 2009 г. Карта землетрясений, зарегистрированных под Корякским вулканом в 2008-2009 гг., представлена на рис. 3.

Вулкан Мутновский (рис. 4) – сложный полигенный позднеплейстоценовый вулканический массив с небольшим голоценовым конусом, высота – 2323 м (Овсянников, Зубин, 1991; Селянгин, 1993). Входит в Мутновско-Гореловскую группу вулканов. Вулкан Мутновский долгое время пребывает в стадии покоя, а его возможное извержение представляет опасность для социально значимого района Мутновского геознергетического комплекса, расположенного у его подножия (Мелекесцев и др., 1987). Постройка состоит из четырех слившихся, последовательно сформированных конусов стратовулканов. Температура фумарол, действующих в Активном кратере, достигает 600°C. Исторические извержения: 1848 г., 1852-1854 г., 1898 г., 1904 г., 1916-1917 гг., 1927-1929 гг., 1938-1939 гг., 1945 г., 1960-1961 гг., 2000 г., 2007 г.² Между извержениями вулкан характеризуется высокой газо-гидротермальной активностью, мощность которой аналогична непрерывному извержению умеренной силы («пассивному» извержению), что может происходить только при наличии конвекции в магматической питающей системе вулкана на небольших глубинах. Предполагается существование в недрах вулкана малоглубинного магматического очага и высокотемпературной магматогенной флюидной системы (Уткин и др., 2005). В результате установки на вулкане Мутновском в конце 2008 г. сейсмической станции MTV были обнаружены рои низкочастотных сейсмических событий, волновые формы которых обладают идентичностью (Кугаенко, Нуждина, 2010). Для Мутновского вулкана источником таких сигналов может выступать зона взаимодействия метеорных вод и пара с областью ретроградного кипения малоглубинного магматического очага или близповерхностная область вторичного кипения в гидротермальном резервуаре рассолов и смешанных растворов (глубина – первые сотни метров от дна Активного кратера) (Бортникова и др., 2007).

Эпицентры землетрясений Мутновско-Гореловской группы вулканов, зарегистрированных в 2009-2010 гг., представлены на рис. 4. Наряду с сейсмическими событиями, относящимися к вулканам Мутновскому и Горелому, четко проявляется малоглубинная сейсмичность, пространственно соответствующая району Мутновского геознергетического комплекса и

предположительно имеющая наведенную природу (Кугаенко, 2006).

Вулкан Горелый (рис. 5) – типичный кальдерный вулкан (позднеплейстоцен-голоценовый вулканический хребет из трех последовательно сформировавшихся слившихся конусов внутри позднеплейстоценовой кальдеры), высота – 1829 м (Кирсанов, Мелекесцев, 1991; Селянгин, 1999). На вершине постройки имеются 11 кратеров, наложенных друг на друга, на ее склонах – около 40 побочных прорывов с лавовыми потоками. Состав изверженного материала варьирует от базальтов до андезитов. Исторические эксплозивные извержения произошли в 1828 г., 1832 г., 1855 г. и 1869 г., 1929-1931 гг., 1947 г., 1961 г., 1980-1981 гг. и 1984-1986 гг. и имели фреатический и фреатомагматический характер. Вулкан Горелый, как и Мутновский вулкан, представляет потенциальную опасность для района Мутновского геознергетического комплекса. Признаки новой активизации, продолжающейся до настоящего времени, были зарегистрированы в июле-августе 2007 г., когда на вулкане Горелом стало регистрироваться непрерывное вулканическое дрожание. В ноябре 2009 г. впервые за последние 20 лет на вулкане Горелом была отмечена парогазовая деятельность, а в 2010 г. у основания стенки активного кратера, заполненного кислотным озером, была обнаружена бокка диаметром около 20 м (Овсянников, 2010). Температура извергающихся из нее под высоким давлением раскаленных газов по данным инфракрасной съемки достигает 870°C. Парогазовая активизация предвлялась роями множественных слабых низкочастотных землетрясений (весна-осень 2009 г., рис. 5). На момент написания статьи активизация продолжается: регистрируется спазматическое вулканическое дрожание, рои землетрясений, наблюдается парогазовая эмиссия из бокки. На рис. 5 приведены примеры записей низкочастотного сейсмического события из роев, предвлявших парогазовую деятельность, и вулкано-тектонического землетрясения, относящегося к более раннему периоду наблюдений.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В работе использованы записи радиотелеметрических сейсмических станций Камчатской региональной сети (Гордеев и др., 2006) KZV (вулкан Кизимен), MTV (вулкан Мутновский), GRL (вулкан Горелый), KRK и KRE (вулкан Корякский). На картах, приведенных на рис. 2-5, показано положение этих сейсмических станций. Станция KZV установлена в непосредственной близости к вулкану Кизимен, на юго-западном гребне его старой постройки на высоте 1509 м, расстояние до вершины составляет около 2.5 км.

²Каталог активных вулканов Камчатки и Северных Курил. URL: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volcanoes/>

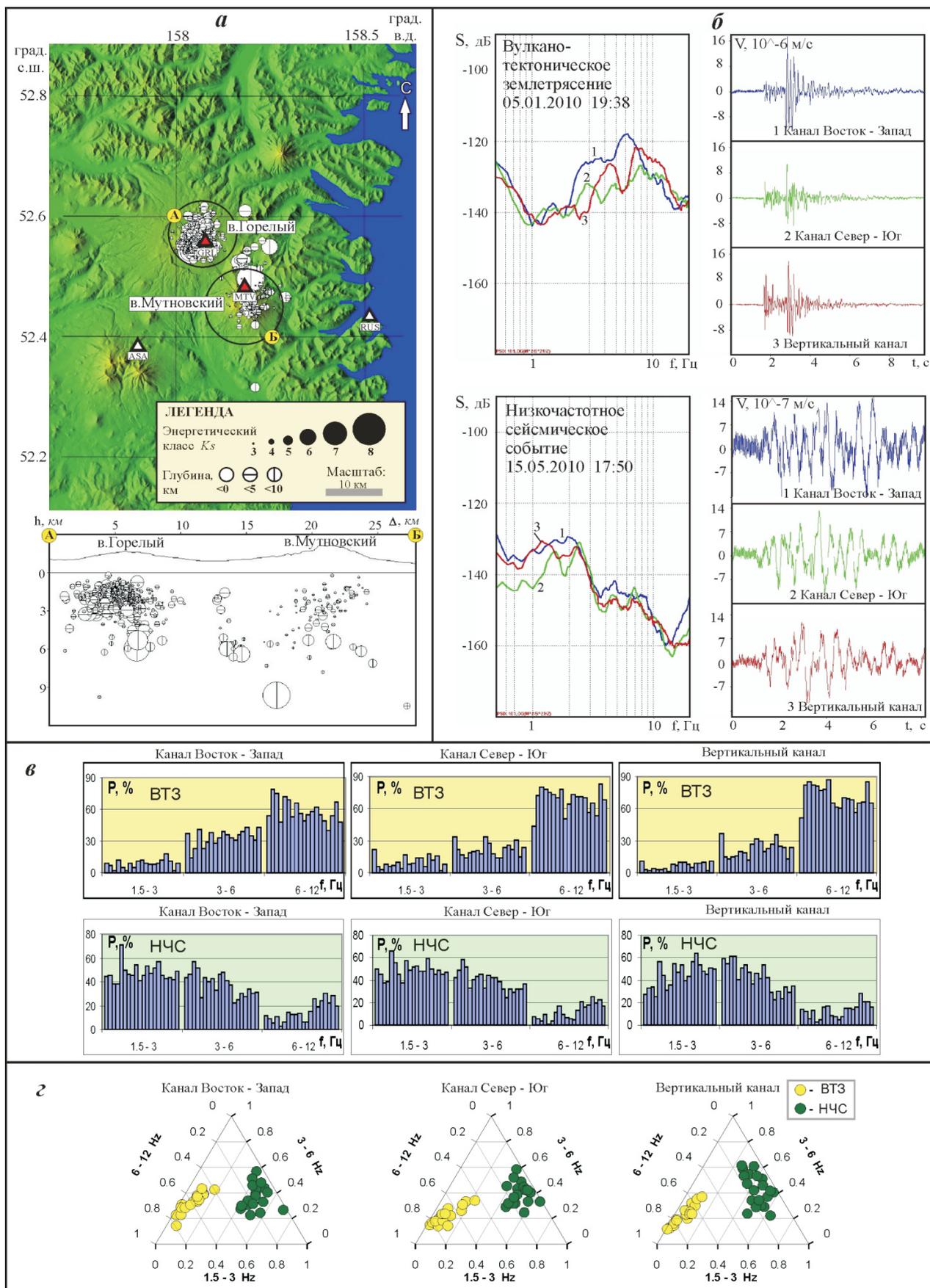


Рис. 4. Вулкан Мутновский: *а* – Карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов в 2009-2010 гг. на глубине до 10 км, и проекция их гипоцентров на вертикальную плоскость А-Б; *б-г* – аналогично рис. 2.

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ

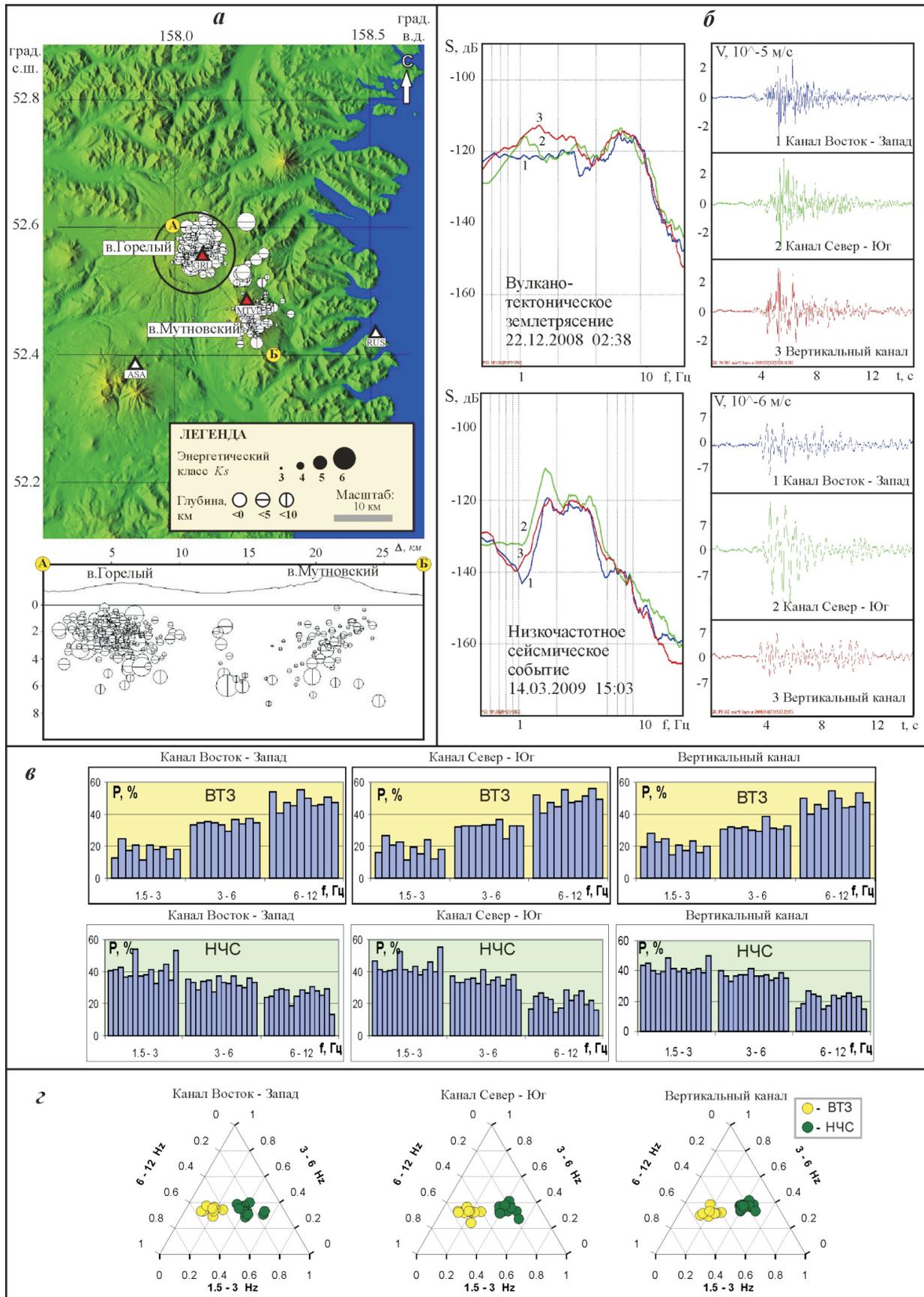


Рис. 5. Вулкан Горелый: а – Карта эпицентров землетрясений, зарегистрированных в районе Мутновско-Гореловской группы вулканов в марте-сентябре 2009 г. на глубине до 10 км, и проекция их гипоцентров на вертикальную плоскость А-Б. (Проиллюстрирован период активности вулкана Горелый, который предшествовал началу его парогазовой активизации осенью 2009 г.); б-г – аналогично рис. 2.

Станция KKK находится на юго-западном склоне Корякского вулкана на высоте 1050 м на расстояние 5.3 км до вершины; станция KRE – на его восточном гребне на высоте 1847 м в 3.2 км от вершины. Станция GRL расположена на лавовом потоке на восточном склоне вулкана Горелый на высоте 1400 м в 4 км от вершины. Станция MTV установлена на северо-восточном гребне Мутновского вулкана на высоте 1394 м в 3 км от активного кратера в пределах разломной структуры северо-северо-восточного простирания, рассматривающейся в настоящее время как глубинная зона совместного теплового питания Мутновского вулкана и Мутновской геотермальной системы. Таким образом, все станции находятся в ближней зоне регистрации сейсмических сигналов, генерируемых этими вулканами, и позволяют исследовать наиболее слабые сейсмические события, отсутствующие в региональном камчатском каталоге, но являющиеся ярким индикатором состояния вулкана.

Оборудование и технические характеристики используемых сейсмических станций стандартны для камчатской аналоговой телеметрии, установленной в труднодоступных вулканических районах (Гаврилов и др., 1987, Гордеев и др., 2006). Они оборудованы трехкомпонентными комплектами короткопериодных сейсмометров СМ-3 (собственный период $T_s = 1.2$ с) и имеют следующие характеристики: аналоговый тип записи – по скорости, рабочий частотный диапазон – 0.8–20 Гц, динамический диапазон – 54 дБ. Передача данных ведется в режиме реального времени по радиоканалу на приемный центр в г. Петропавловск-Камчатский, где осуществляется цифровая запись сейсмического сигнала и оперативная обработка землетрясений. Чувствительность сейсмометрических каналов с цифровой регистрацией на приемном центре составляет 2×10^7 отсчет/м/с.

Предлагаемая работа носит демонстрационный и методический характер, поэтому нами были рассмотрены тестовые выборки наиболее качественных (не зашумленных) сейсмических записей ВТЗ и НЧС для каждого вулкана (рис. 2–5).

МЕТОДИКА РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ

В основе наших дальнейших построений лежит положение о том, что каждый конкретный тип сейсмического сигнала имеет характерное для него соотношение спектральных компонент. В рамках задачи данной работы мы предполагаем, что ВТЗ и НЧС могут быть разделены по этому признаку.

Выбор рабочего частотного диапазона обусловлен особенностями регионального поля микросейсм и техническими характеристиками

сейсмических сигналов. Снизу мы ограничили диапазон частотой 1 Гц, что определяется близостью крупных морских акваторий и высоким уровнем штормовых микросейсм на Камчатке (Гордеев, 1979). Высокие частоты записей радиотелеметрических станций ($f > 15 \div 20$ Гц) традиционно осложнены радиопомехами, на этих же частотах наиболее заметно влияние ветра. На этом основании диапазон 1–12 Гц был определен как рабочий.

Цифровые записи сейсмических событий были подвергнуты фильтрации с использованием октавных фильтров: 1.5–3 Гц, 3–6 Гц, 6–12 Гц. Для оценки энергии рассчитывалась дисперсия сигнала в соответствующем диапазоне частот.

Абсолютные значения энергии (дисперсии) сигнала в данной работе не играют роли, учитывая, что мы можем перейти к относительным энергетическим оценкам в каждом частотном диапазоне, нормировав их на суммарную энергию.

Полученный набор данных (трехмерный, но с двумя степенями свободы) может быть наглядно представлен на достаточно редко применяемой в сейсмологии, но широко используемой в геологии треугольной диаграмме.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2–5 представлены примеры работы по оценкам относительного распределения выделившейся сейсмической энергии в указанных частотных диапазонах для ВТЗ и НЧС на вулканах Кизимен, Корякский, Мутновский и Горелый. Для каждого события выполнены построения для трех каналов сейсмических записей. Для сравнения приведено два варианта визуализации результатов: в виде гистограмм и треугольной диаграммы.

Сопоставление гистограмм показывает устойчивую тенденцию в соотношении спектральных компонент в трех рассмотренных диапазонах частот для обоих типов сейсмических событий.

На треугольных диаграммах ВТЗ и НЧС уверенно разделяются.

На рис. 6 скомпилированы области, занимаемые на треугольной диаграмме ВТЗ и НЧС на четырех рассмотренных вулканах (представлены только вертикальные каналы). Границы областей соответствуют 2σ интервалам разброса каждого соответствующего облака точек в каждом частотном интервале. Показано, что разделение событий по типам сохраняется, однако записи каждого вулкана имеют свои особенности и различные пропорции в соотношениях спектральных компонент.

Следует отметить очевидную (рис. 6) инте-

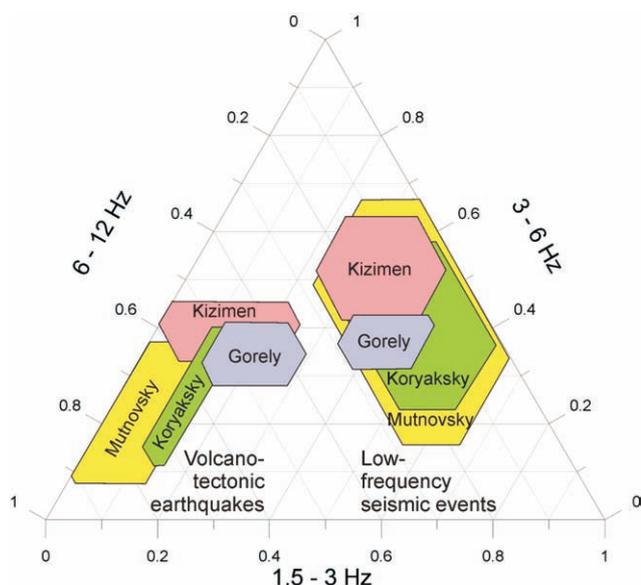


Рис. 6. 2σ -области рассеяния облаков точек, отражающие соотношения спектральных компонент в сейсмических записях ВТЗ и НЧС (вертикальные каналы), для вулканов Кизимен, Корякский, Горелый и Мутновский.

ресную особенность во взаимном расположении выделенных зон, соответствующих различным вулканам:

- для вулканов Мутновский и Корякский области как ВТЗ, так и НЧС достаточно схожи. (Напомним, что рассмотренные активизации на этих вулканах не окончились извержениями).

- области для вулканов Горелый и Кизимен заметно отличаются от вулканов Мутновский и Корякский, однако близки между собой.

Является ли такое соответствие случайным или нет на данном этапе определить проблематично, но ответ в принципе может быть получен при массовой обработке сейсмических сигналов и их разделении в автоматическом/автоматизированном режиме на два типа согласно предложенной нами методике.

С точки зрения фундаментальной вулканологии обнаруженные особенности определяют новые аспекты вулканической сейсмологии: выявление возможной связи между распределениями спектральных компонент в сейсмических записях и характером вулканических активизаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика разделения сейсмических сигналов различной природы по соотношению спектральных компонент в сейсмических записях с использованием треугольной диаграммы, что является простым приемом визуализации скрытой корреляции параметров последовательности событий.

Продемонстрирована возможность формализованного разделения сейсмических событий на вулканах (вулcano-тектонических землетрясений и низкочастотных сейсмических событий) по этому признаку для вулканов Кизимен, Корякский, Мутновский, Горелый.

Надежность предлагаемого подхода подтверждена его применением для четырех различных камчатских вулканов и получением сходных результатов (рис. 6).

Разделение является наглядным и интуитивно понятным. Представленную в данной работе методику предлагается использовать при оперативной обработке вулканических землетрясений для разделения потока сейсмических событий по типам в автоматическом и автоматизированном режиме для оценки состояния и развития вулканической активности. Своевременное обнаружение низкочастотных землетрясений и выявление тенденций развития потока этих событий во времени направлено на повышение эффективности и оперативности прогнозов вулканической опасности на базе сейсмического мониторинга активных вулканов с целью обеспечения безопасности населения и прогноза возможности полетов авиации в вулканических районах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 10-05-00139).

Список литературы

- Бортникова С.Б., Шарапов 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.
- Гаврилов В.А., Воронаев В.Ф., Головицкова И.А. и др.* Комплекс радиотелеметрической аппаратуры ТЕСИ-2 // Сейсмические приборы. 1987. Вып. 19. С. 5-16.
- Гарбузова В.Т., Соболевская О.В.* Обновленная классификация вулканических землетрясений П.И. Токарева // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 25-28.
- Гордеев Е.И.* Штормовые микросейсмы на Камчатке и их связь с волнением моря // Вулканология и сейсмология. 1979. № 4. С. 68-80.
- Гордеев Е.И., Сеньюков С.Л.* Сейсмическая активизация вулкана Корякский в 1994 г.: гибридные сейсмические события и их применение для оценки вулканической опасности //

- Вулканология и сейсмология. 1998. № 4-5. С. 112-127.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др.* Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 6-27.
- Горельчик В.И., Сторчеус А.В.* Глубокие длинно-периодные землетрясения под Ключевским вулканом // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 373-379.
- Иванов В.В.* Активизация вулкана Корякский (Камчатка) в конце 2008 – начале 2009 гг.: оценки выноса тепла и водного флюида, концептуальная модель подъема магмы и прогноз развития активизации // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 30–31 марта 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2010. С. 24-37.
- Кирсанов И.Т., Мелекесцев И.В.* Вулкан Горелый // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 294-317.
- Кугаенко Ю.А.* Проблемы эксплуатации геотермальной системы в сейсмологическом аспекте (на примере Мутновского геознергетического комплекса, Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 43-56.
- Кугаенко Ю.А., Нуждина И.Н.* Низкочастотные землетрясения на Мутновском вулкане // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 52-56.
- Малик Н.А., Овсянников А.А.* Извержение вулкана Кизимен в октябре 2010 г. – марте 2011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С. 7-10
- Масуренков Ю.П., Пузанков М.Ю., Егорова И.А.* Вулкан Корякский // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 230-243.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В.* Динамика активности вулканов Мутновский и Горелый в голоцене и вулканическая опасность для прилегающих районов (по данным тефрохронологических исследований) // Вулканология и сейсмология. 1987. № 3. С. 3-18.
- Овсянников А.А.* Состояние вулкана Горелый в июне 2010 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 1. Вып. 15. С. 10.
- Овсянников А.А., Зубин М.И.* Вулкан Мутновский // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 318-339.
- Пийп Б.И.* Вулкан Кизимен // Бюл. вулканол. станций. 1946. № 13. С. 10-22.
- Селянгин О.Б., Пономарева В.В.* Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка // Вулканология и сейсмология. 1999. № 2. С. 3-23
- Селянгин О.Б.* Новое о вулкане Мутновский: строение, развитие, прогноз // Вулканология и сейсмология. 1993. № 1. С. 17-35.
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н.* Сейсмичность вулкана Корякский в 1966-2009 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 91-95
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дроздина С.Я. и др.* Сейсмичность вулкана Кизимен // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9-15 октября 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2011. С. 144-148.
- Сторчеус А.В.* Рой длиннопериодных вулканических землетрясений, предвещающих извержение Карымского вулкана в 1996 г. // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 75-82.
- Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
- 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
- Шанцер А.Е., Ф.Ш. Кутыев, Петров В.С., Зубин М.И.* Вулкан Кизимен // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 2. С. 18-31.
- Chouet B.A.* Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting // Nature. 1996. V. 380. P. 309-316.
- 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.
- 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.
- Jonson J.B., Lees J.M., Gordeev E.I.* Degassing Explosions at Karymsky Volcano, Kamchatka // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. № 21. P. 3999-4002.
- McNutt S. R.* Volcanic Seismology // Annual Review

- of Earth and Planetary Sciences. 2005. V. 32. P. 461-491.
- Minakami T.* Fundamental research for prediction of the volcanic eruptions (I) // Bull. Earthquake Res. Inst. 1960. V. 38. Pt. 3. P. 497-544.
- Minakami T., Higara S., Miyazaki T., Utibori S.* Fundamental research for predicting volcano (II) // Bull. Earthquake Res. Inst. 1969. V. 47. Pt. 5. P. 893-949.
- 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 // JGR. 2008. V. 113. B02305. doi:10.1029/2007JB005259.

PECULIARITIES OF VOLCANIC EARTHQUAKES SPECTRAL COMPONENTS FOR KIZIMEN, KORIAKSKY, MUTNOVSKY AND GORELY VOLCANOES

Yu.A. Kugaenko, I.N. Nuzhdina, V.A. Saltykov

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

The article presents a technique for formalized separation of volcano-tectonic earthquakes and low-frequency seismic events which occurred on volcanoes. The technique was used as a case study for four episodes of volcanic activity in Kamchatka based on data from seismic stations located near volcanoes: explosive eruption of Kizimen Volcano (2010-2011), activation of Gorely Volcano (2009-2011), activation of Koriaksky Volcano (2008-2009), long-term intense hydrothermal activity of Mutnovsky Volcano. For visualization of hidden correlation in waveform spectral characteristics we use the triangle diagram. We have targeted a trend in volcano investigation which supposes study of possible relation between types of volcano activity and distribution of spectral components in seismic records.

Keywords: earthquake, volcano, Kizimen, Koriaksky, Mutnovsky, Gorely, formalized typification.