



УДК 550.348.436+550.342

П. П. Фирстов, А. А. Шакирова, О. А. Арбугаева

Камчатский филиал Геофизической службы РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский

## Активность вулкана Кизимен в период май 2012 г. — март 2013 г. по сейсмическим данным и видеонаблюдениям

В период май 2012 г. – март 2013 г. в извержении вулкана Кизимен по видеонаблюдениям и сейсмическим данным наблюдались все возможные формы проявления вулканической активности для андезитовых вулканов с вязкой лавой (движение лавового потока, выжимание вершинной экструзии, пирокластические потоки, обвалы). В этот период, по данным КФ ГС РАН, регистрировались слабые вулкано-тектонические землетрясения (ВТЗ) района вулкана Кизимен с энергетическим классом  $K_S < 8$ , эпицентры которых были, в основном, приурочены к зоне северо-восточного простирания, которая была сейсмически активна в течение 2010 г. перед началом извержения (декабрь 2010 г.). Сопоставление видеонаблюдений различных форм активности с сейсмическими эффектами позволили по волновым формам и спектрам плотности мощности (СПМ) выявить особенности различных сейсмических сигналов с целью их селекции. Таким образом, основываясь на видеонаблюдениях и сейсмических эффектах, была реконструирована активность вулкана Кизимен за май 2012 г. – март 2013 г.

### Введение

Вулкан Кизимен (2485 м н. у. м.) — действующий вулкан эксплозивно-эффузивно-экструзивного типа, корово-мантийного питания, расположенный в восточной части Щапинского грабена Центральной Камчатской депрессии (рис. 1а).

Начавшееся в декабре 2010 г. извержение влк. Кизимен началось спустя 82 года после предыдущего извержения в декабре 2010 г. В результате декабрьской активизации вулкана произошло разрушение верхней части вершины и в конце февраля 2011 г. началось выжимание вязкой андезитовой магмы [2]. Лавовый поток к июлю 2012 г. образовал два языка на юго-восточном склоне вулкана (рис. 1б). Сейсмичность вулкана контролировалась тремя радиотелеметрическими сейсмическими станциями (РТСС), расположение которых показано на врезке рис. 1а. Образование вершинных экструзий и формирование лавового потока сопровождалось микроземлетрясениями близкой интенсивности с квазипериодичностью от десятков секунд до нескольких часов [4, 5]. По аналогии с характером сейсмичности, сопровождавшей выжимание экструзии на вулкане Сент-Хеленс в 2004–2005 гг., такой режим был назван «drumbeats» [8, 9]. В мае 2012 г. на вершине вулкана началось образование экструзии, которая хорошо фиксировалась видеокамерой на с/ст TUMD (рис. 2а).

В результате мощных обвалов в августе 2012 г. произошло разрушение экструзии. Новая активизация с выжиманием вершинной экструзии началась в январе 2013 г. (рис. 2б) и сопровождалась землетрясениями режима «drumbeats III». В течение всего исследуемого периода происходили отдельные

эксплозии и извержения пирокластических потоков (ПП), интенсивность которых заметно возросла во время новой активизации, выразившейся в экструзивном процессе на вершине вулкана в январе 2013 г.

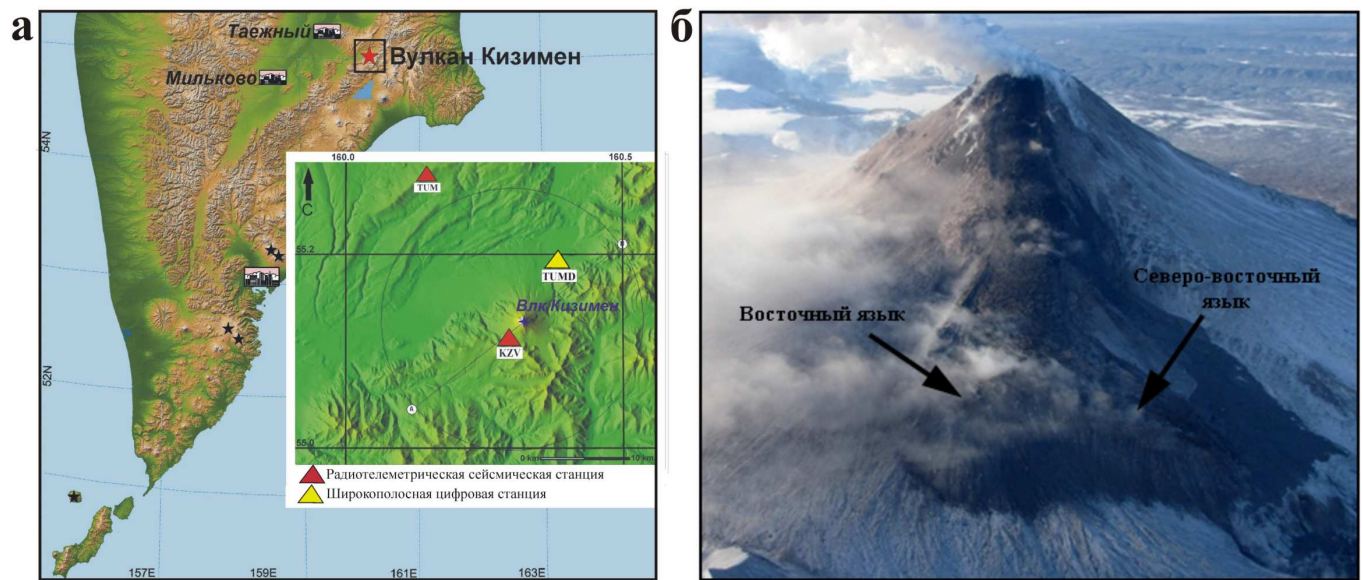
### Сейсмичность района вулкана в мае 2012 г. – марте 2013 г.

По данным каталога землетрясений, полученного в лаборатории ИСВА КФ ГС РАН, в рассматриваемый период сейсмичность района была представлена слабыми вулкано-тектоническими землетрясениями (ВТЗ) с энергетическими классами по S-волнам  $4,5 < K_S < 8$ , эпицентры которых, в основном, были приурочены к зоне северо-восточного простирания вблизи постройки вулкана (рис. 3а).

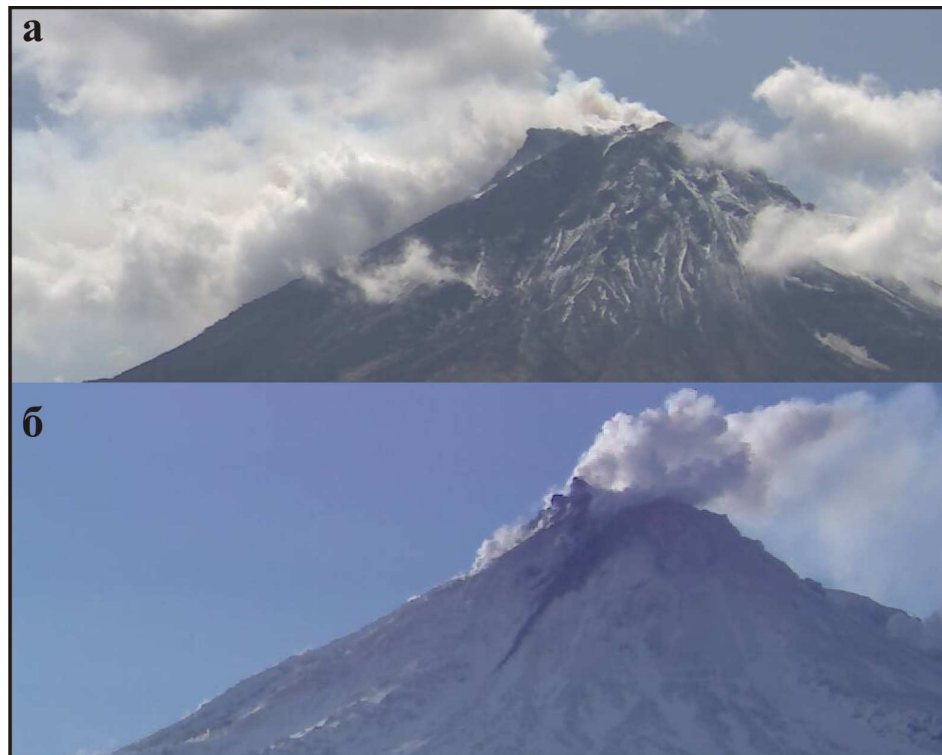
Из рис. 3б видно, что, в основном, эпицентры ВТЗ тяготеют к наклонной плоскости, располагающейся в переходной зоне горст Тумрок – грабен р. Левая Щапина. Более глубокие землетрясения происходят юго-западнее от вулкана Кизимен, более поверхностные — северо-западнее.

### Типы вулканических землетрясений, регистрируемых во время извержения вулкана Кизимен и их спектральные характеристики

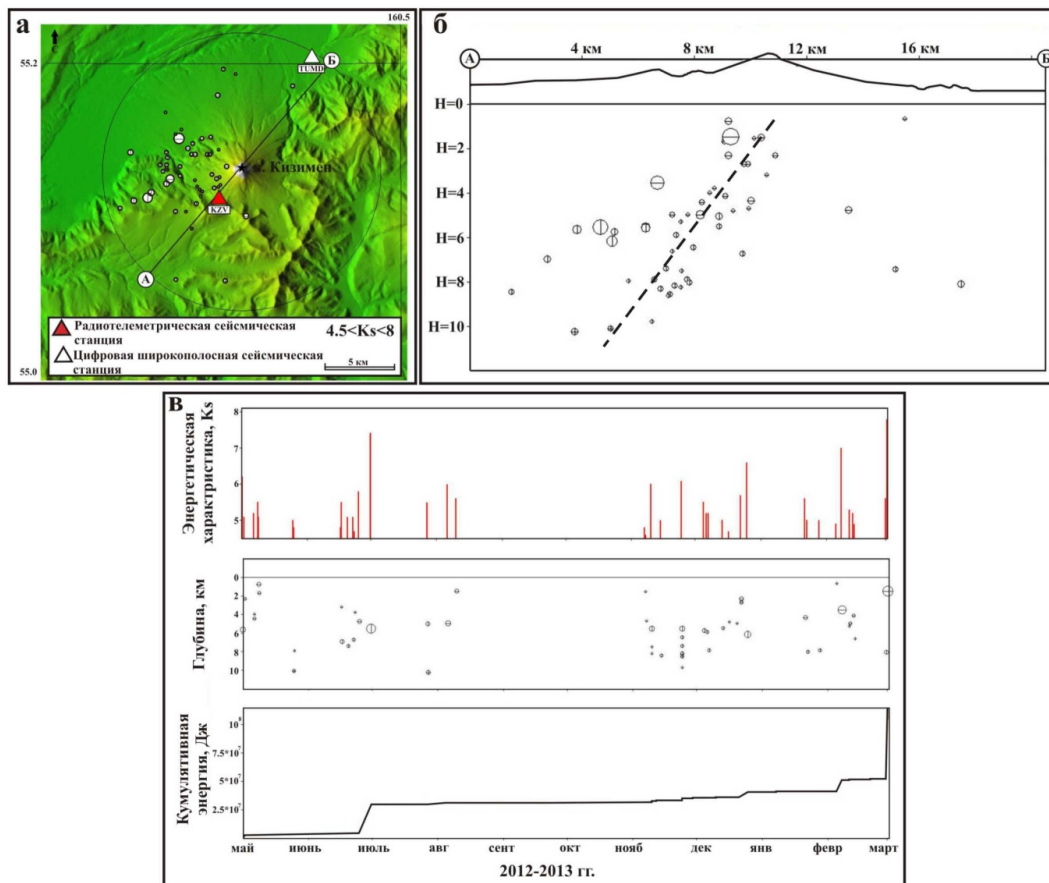
**Вулкано-тектонические землетрясения** района в. Кизимен по форме записи не отличаются от обычных тектонических землетрясений. Они имеют чётко выраженные вступления Р и S волн. На рис. 4а показаны спектральные плотности мощности (СПМ) для шести ВТЗ, зарегистрированных в ноябре 2013 г., а также СПМ фона. На рис. 4б приведён пример волновой формы ВТЗ за 2012/11/24 в  $11^h22^m$  с энергетическим классом  $K_S = 6,1$ .



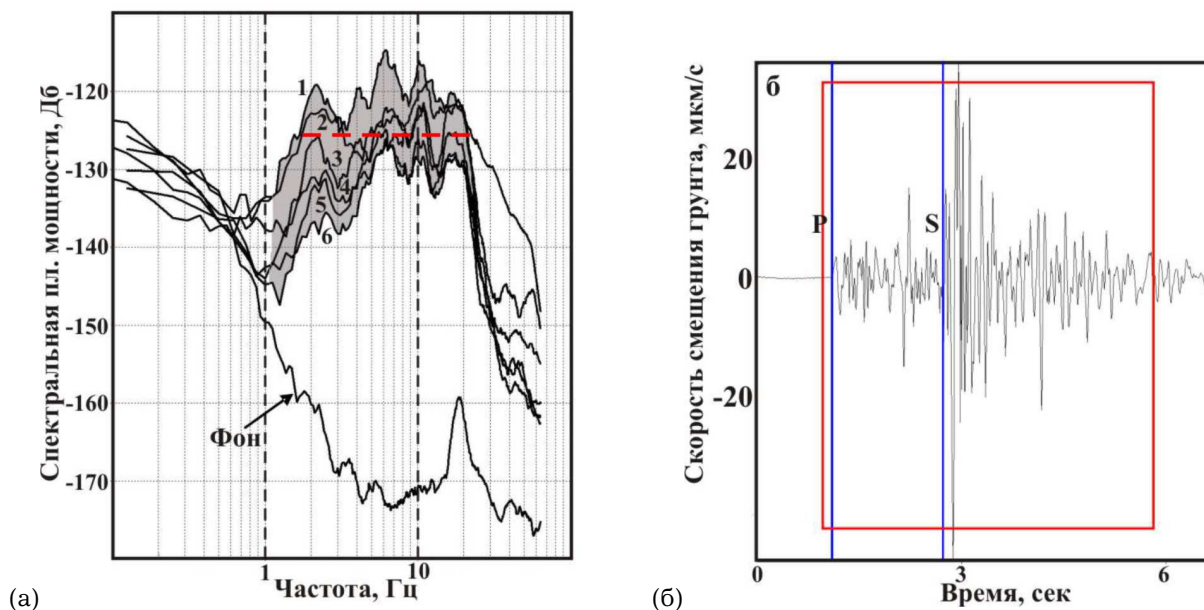
**Рис. 1.** Расположение вулкана Кизимен на Камчатке (а) и лавовый поток на восточном склоне вулкана на 23 декабря 2011 (б). Фото С. А. Чиркова. На врезке показаны ближайшие к вулкану сейсмические станции КФ ГС РАН: KZV – Кизимен, TUMD – Тумрокские источники, TUM – Тумрок.



**Рис. 2.** Экструзивные образования на вершине вулкана Кизимен: а – 1 августа 2012 г.; б – 2 января 2013 г.



**Рис. 3.** Карта эпицентров, вертикальный разрез очагов по линии АБ и график основных характеристик вулcano-тектонических землетрясений за период май 2012 г. — март 2013 г. района вулкана Кизимен. а — карта эпицентров землетрясений; б — проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по сечению АБ; в — энергетический класс ВТЗ, глубина гипоцентров и кумулятивный график энергии ВТЗ.



**Рис. 4.** Спектральная плотность мощности 6 ВТЗ с  $K_S = 5,1 - 6,1$  (а) и пример записи землетрясения 24/11/2012, 11<sup>h</sup>22<sup>m</sup>, с  $K_S = 6,1$  (б).

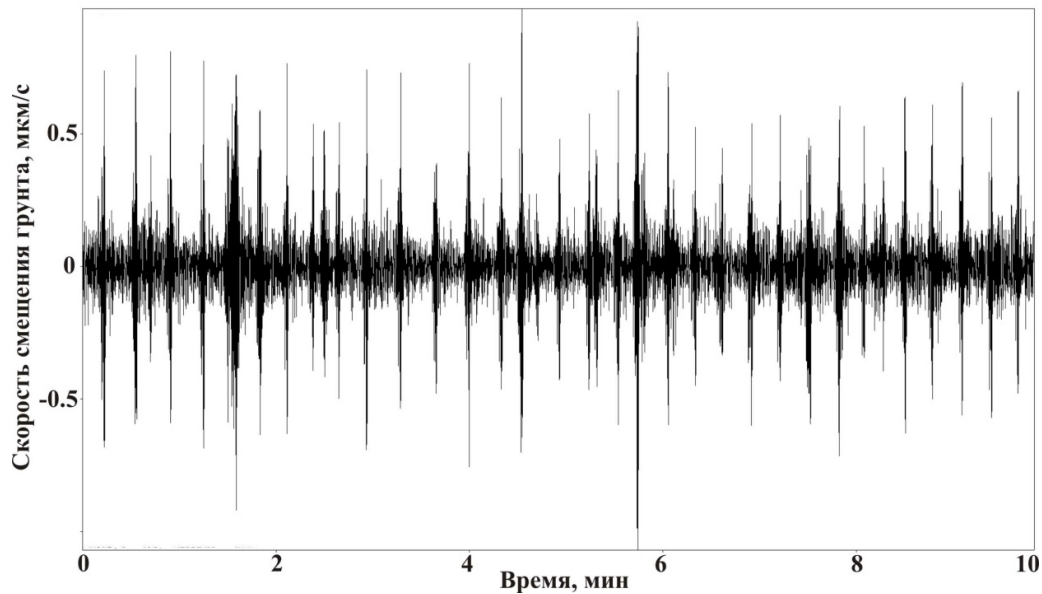


Рис. 5. Десятиминутная запись микроземлетрясений на РТСС KZV режима «drumbeats III» 4 января 2013 г., сопровождающих выжимание вершинной экструзии вулкана Кизимен.

Для выявления особенностей формы СПМ для различных вулканических землетрясений рассматривалась её ширина по уровню  $-10$  Дб от максимума. Для ВТЗ рассматриваемого периода она заключена в диапазоне  $2\text{--}20$  Гц с хорошо выраженными спектральными максимумами на частотах  $2, 2, 4, 6,$  и  $10$  Гц при длительности записи  $\sim 5$  секунд.

**Землетрясения режима «drumbeats».** Сопоставляя видеонаблюдения различных форм активности с сейсмическими эффектами по волновым формам и спектрам плотности мощности (СПМ) были выявлены особенности различных сейсмических сигналов с целью их селекции.

До середины июня 2012 г. регистрировались землетрясения режима «drumbeats II». Этот режим связан с движением северо-восточного (второго) «языка» вязкого лавового потока (рис. 16) [7]. После остановки лавового потока началось выжимание вершинной экструзии (рис. 2а). Новая активизация с выжиманием вершинной экструзии, начавшаяся в январе 2013 г., сопровождалась землетрясениями режима «drumbeats III» (рис. 5).

Микроземлетрясения режима «drumbeats III» имеют чёткие вступления Р и S волн с  $S\text{--}P \sim 0,7$  с. Как видно на рис. 6а, по уровню  $-10$  Дб от максимума ширина кривой СПМ для этих микроземлетрясений заключена в пределах  $1,5\text{--}5,0$  Гц с двумя спектральными максимумами на частотах  $1,8$  и  $3,0$  Гц. Образец записи микроземлетрясения режима «drumbeats» с  $K_S = 3,9$ , произошедшего  $16/01/2013$  в  $06^{\text{h}}53^{\text{m}}$ , приведён на рис. 6б.

Такие микроземлетрясения, сопровождающие экструзивный процесс, ряд исследователей относят к длиннопериодным (long period earthquake) [8, 9].

В работе [6] показано, что разность времён S-P для микроземлетрясений режима «drumbeats» за-

кономерно изменяется в зависимости от пространственного нахождения источников этих микроземлетрясений, которыми являются экструзивные процессы на вершине вулкана или движение фронта вязкого лавового потока. Это иллюстрирует рис. 7 — во время выжимания первой порции лавы на вершине вулкана (начало мая 2011 г.) S-P было такое же, как и в период выжимания экструзии на вершине вулкана в январе 2013 г. ( $S\text{--}P = 0,7$ ).

**Эксплозивные землетрясения.** За исследуемый период произошли две мощных эксплозии  $11/01/2013$  в  $05^{\text{h}}48^{\text{m}}$  и в  $06^{\text{h}}01^{\text{m}}$ , когда эруптивное облако поднялось над кратером вулкана на высоту  $\sim 5000$  м. н. у. м. Начало развития этих эксплозий показано на рис. 8а, б.

Длительность землетрясений, сопровождающих эти эксплозии, составляла  $\sim 40$  секунд (рис. 8г). По уровню  $-10$  Дб от максимума ширина кривой СПМ заключена в пределах  $1,0\text{--}5,0$  Гц (рис. 8в).

**Сейсмические сигналы от обвалов и пирокластических потоков.** Как обвалы, так и ПП, с точки зрения генерации сейсмических волн имеют два источника.

Основной источник связан с процессом разрушения материала при обвалах и с движением магмы по выводному каналу и её фрагментацией. В обоих случаях движение извергнутого и обвалившегося материала происходит под действием гравитации. Гравитационный поток движется по зоне транзита, которой, как правило, являются отрицательные формы рельефа (шарра, абразивный каньон и т. д.), а затем он попадает в зону торможения. За счёт набегания гравитационного потока на препятствия в зоне транзита и за счёт трения в зоне торможения генерируются более высокочастотные сейсмические колебания грунта (второй источник). Соотношение

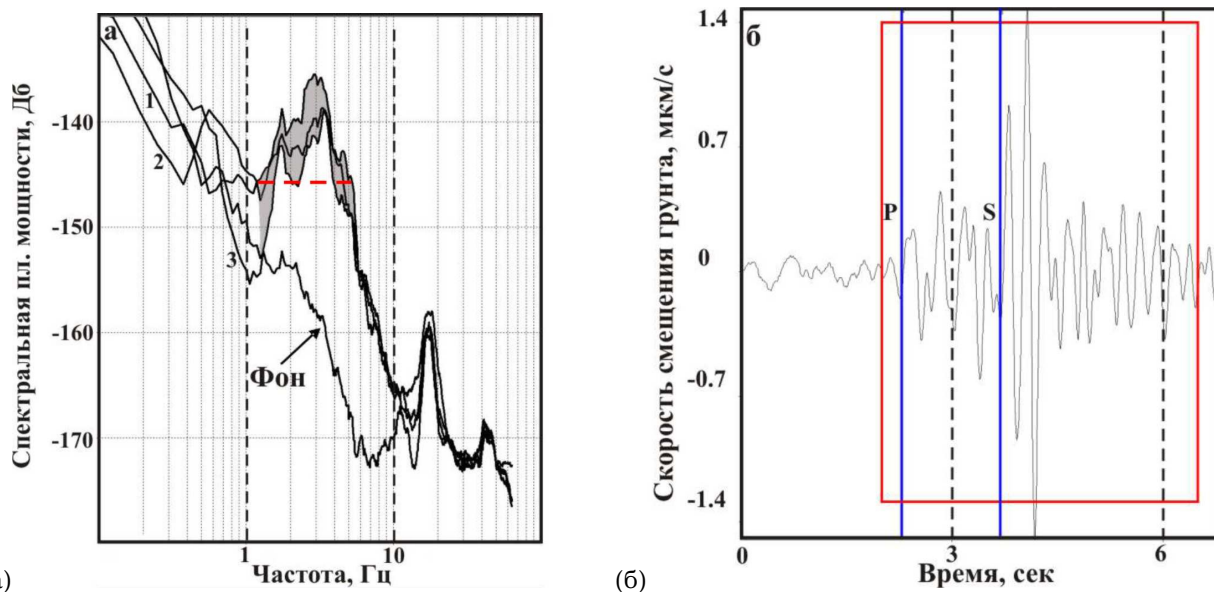


Рис. 6. СПМ 3-х микроземлетрясений режима «drumbeats» (а) и пример записи землетрясения 16/01/2013 в 06<sup>h</sup>53<sup>m</sup> с  $K_S = 3,9$  (б).

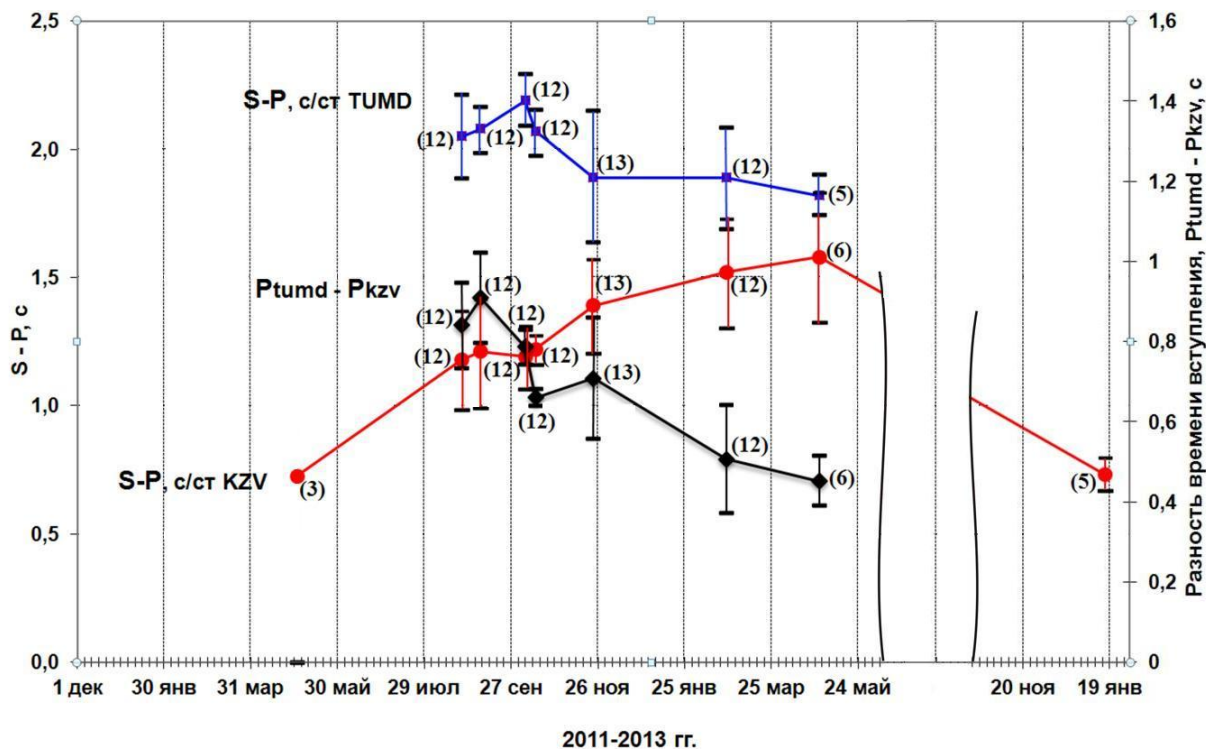
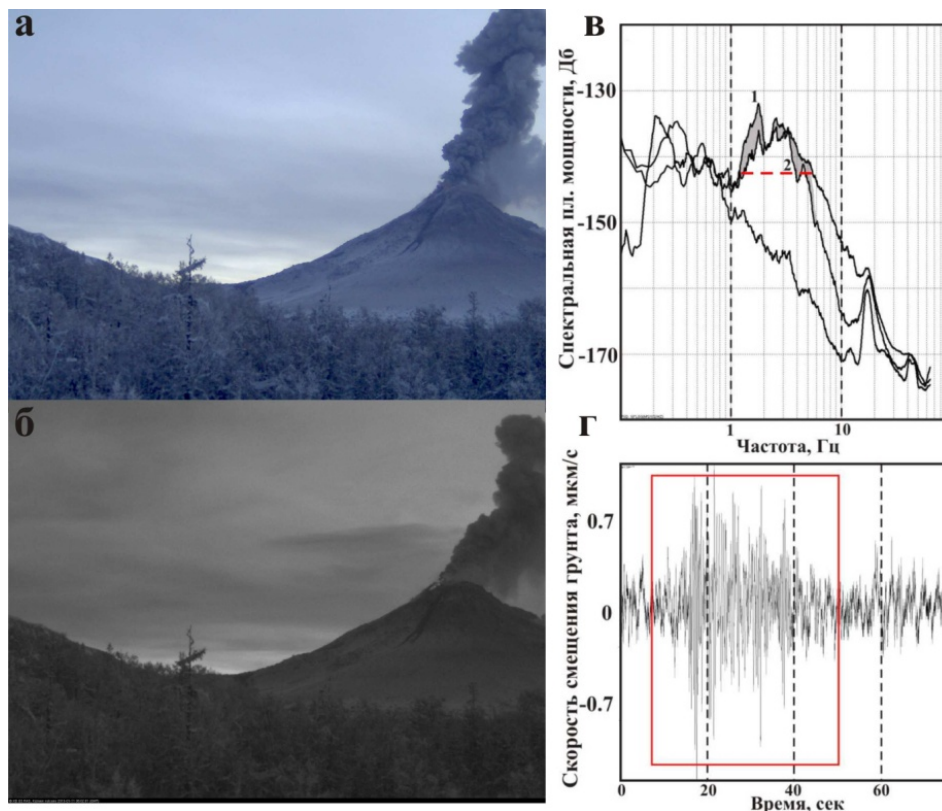


Рис. 7. Изменение S-P и разностей времен вступлений S-волн на станциях KZV и TUMD в период с 1 декабря 2010 г. по 24 февраля 2012 г. для режимов «drumbeats» эффузивно-эксплозивного извержения вулкана Кизимен. В скобках приведено количество замеров.

интенсивности источников и спектрального состава сейсмических колебаний при этом зависит от многих причин, которые требуют детального изучения [3].

В нашем случае процесс выжимания двух экструзивных образований сопровождался обрушением и сходом небольших каменных лавин. При достиже-

нии значительного объёма экструзивного материала на вершине вулкана, процесс заканчивался мощным обвалом. Такие обвалы экструзивных образований 01/08/2012 в 02<sup>h</sup>37<sup>m</sup> и 02/01/2013 в 00<sup>h</sup>38<sup>m</sup>, заснятые видеочамерой, установленной на РТСС TUMD, показаны на рис. 9а, б. СПМ сейсмических сигналов от этих обвалов имеет широкополосный максимум



**Рис. 8.** Начало развития эксплозий на вулкане Кизимен 11/01/2013 в 05<sup>h</sup>48<sup>m</sup> (а) и в 06<sup>h</sup>01<sup>m</sup> (б), спектральная плотность мощности эксплозивных землетрясений (в) и пример записи эксплозивного землетрясения (г).

0,8–4 Гц со спектральным максимумом на частоте 1,8 Гц (рис. 9в). При этом длительность сигнала составляет не менее 100 с (рис. 9г).

Извержение пирокластических потоков сопровождается сейсмическими сигналами длительно-стью более 100 с. СПМ сейсмического сигнала от ПП имеет широкополосный максимум 1,5–6 Гц (рис. 10), сдвинутый в более высокочастотную часть относительно кривых СПМ для обвалов.

### Обсуждение результатов

Сделан предварительный анализ СПМ для различных типов сейсмических сигналов, предварявших и сопровождавших различные формы активности. Рассмотрена ширина СПМ по уровню -10 Дб от максимума спектра. Ширина спектральной плотности мощности для ВТ землетрясений с  $K_S = 5,1 - 6,1$  заключена в диапазоне 2–20 Гц со спектральными максимумами на частотах 2,2, 4, 6 и 10 Гц при длительности записи 5 секунд. Ширина СПМ микроземлетрясений режима «drumbeats» заключена в диапазоне 1,5–5 Гц с двумя спектральными максимумами на частотах 1,8 и 3 Гц при длительности записи 5 с. Спектральный максимум для СПМ эксплозивных землетрясений приходится на частоты 1–4 Гц, а их длительность составляет не более 40 секунд. СПМ сейсмического сигнала от крупных обвалов имеет широкополосный максимум 0,8–4 Гц, а длительность составляет не менее

100 с. СПМ сейсмического сигнала от ПП имеет широкополосный максимум 1,2–6 Гц, а длительность сигнала более 100 с.

Различия волновых форм и спектральных характеристик сигналов позволили реконструировать динамику извержения вулкана Кизимен по сейсмическим данным. На рис. 11 показана динамика развития сейсмических сигналов, сопровождавших извержение вулкана Кизимен за рассматриваемый период. В период май-июль, одновременно с экструзивными процессами на вершине вулкана, регистрировались слабые ВТЗ ( $K_S < 7,5$ ). После мощного обвала части экструзивного образования, произошедшего первого августа, с августа по ноябрь в активности вулкана наступило затишье. В этот же период отсутствуют и ВТЗ с  $K_S \geq 4,5$ . Первые «глубокие» ВТЗ с  $H = 6 - 10$  км появились в середине ноября и предваряли очередное интенсивное выжимание экструзии, которое также закончилось мощным обвалом 2 января 2013 г. (рис. 3). Такая синхронизация между сейсмичностью района и экструзивной деятельностью вулкана Кизимен указывает на связь между процессами под вулканом и проявлением различных форм активности, связанных с выжиманием вязкой лавы.

Как показал предварительный анализ СПМ для различных типов сейсмических сигналов, сопровождавших различные формы активности, методика треугольных диаграмм, предложенная в работе [1]

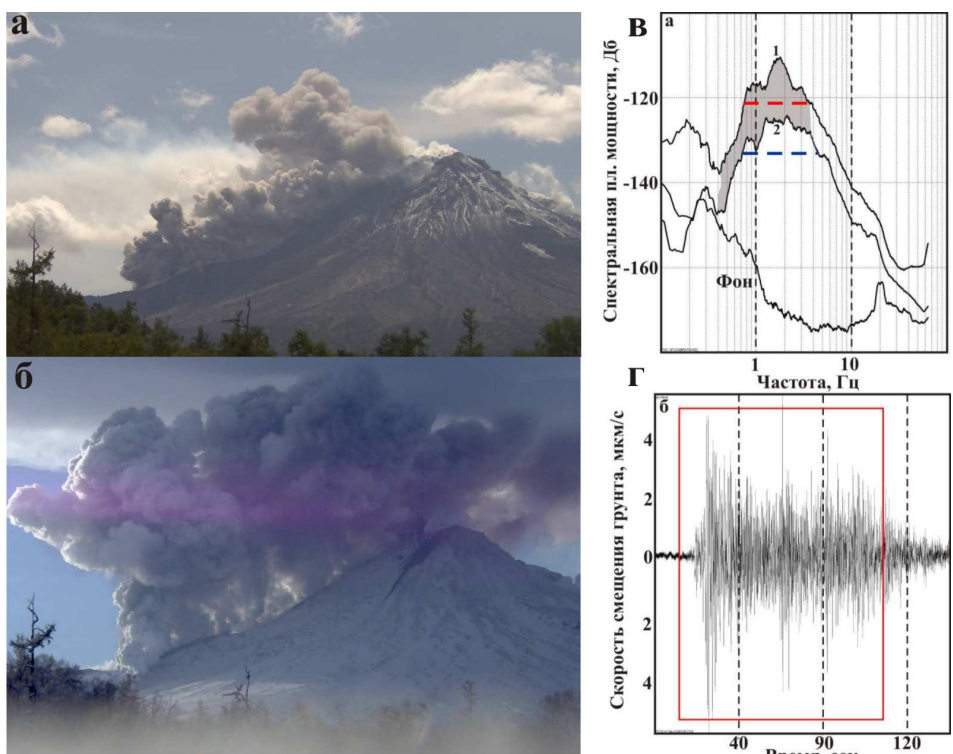


Рис. 9. Распространение обвала 01/08/2012 в 02<sup>h</sup>38<sup>m</sup> (а) и 02/01/2013 в 00<sup>h</sup>38<sup>m</sup> (б), спектральная плотность мощности обвалов (в) и сейсмический сигнал, сопровождавший обвал 02/01/2013 в 00<sup>h</sup>38<sup>m</sup> (г).

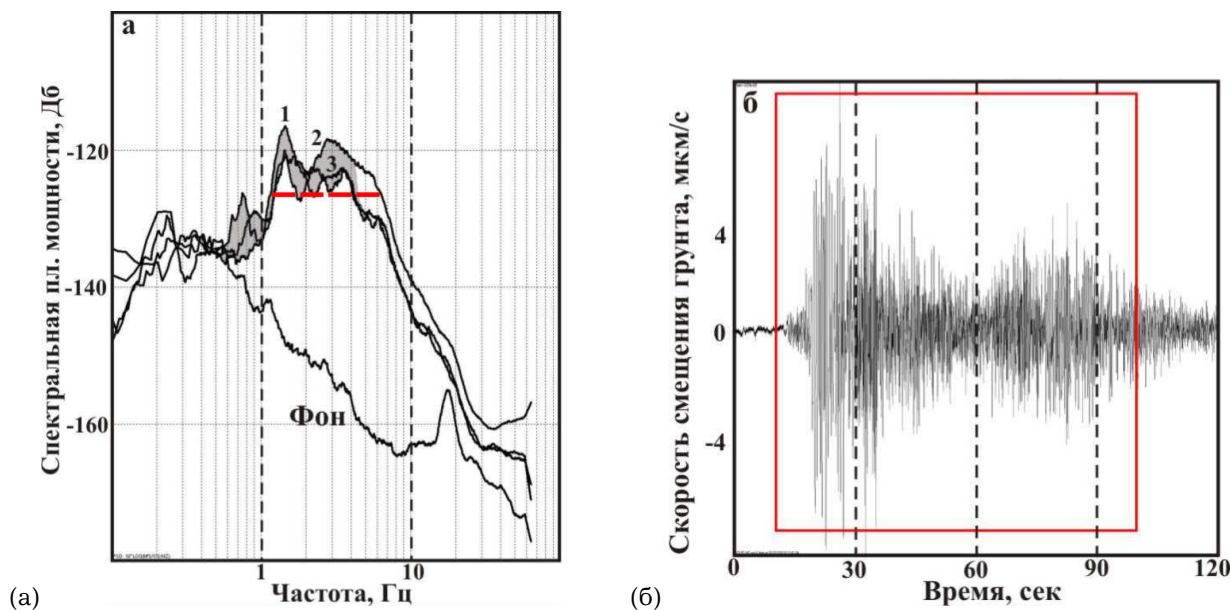


Рис. 10. Спектральная плотность мощности сейсмического сигнала для ПП: 1–18/01/2013, 2–19/01/2013, 3–31/01/2013 (а) и сейсмический сигнал от ПП 21/01/2013 в 22<sup>h</sup>23<sup>m</sup> (б).

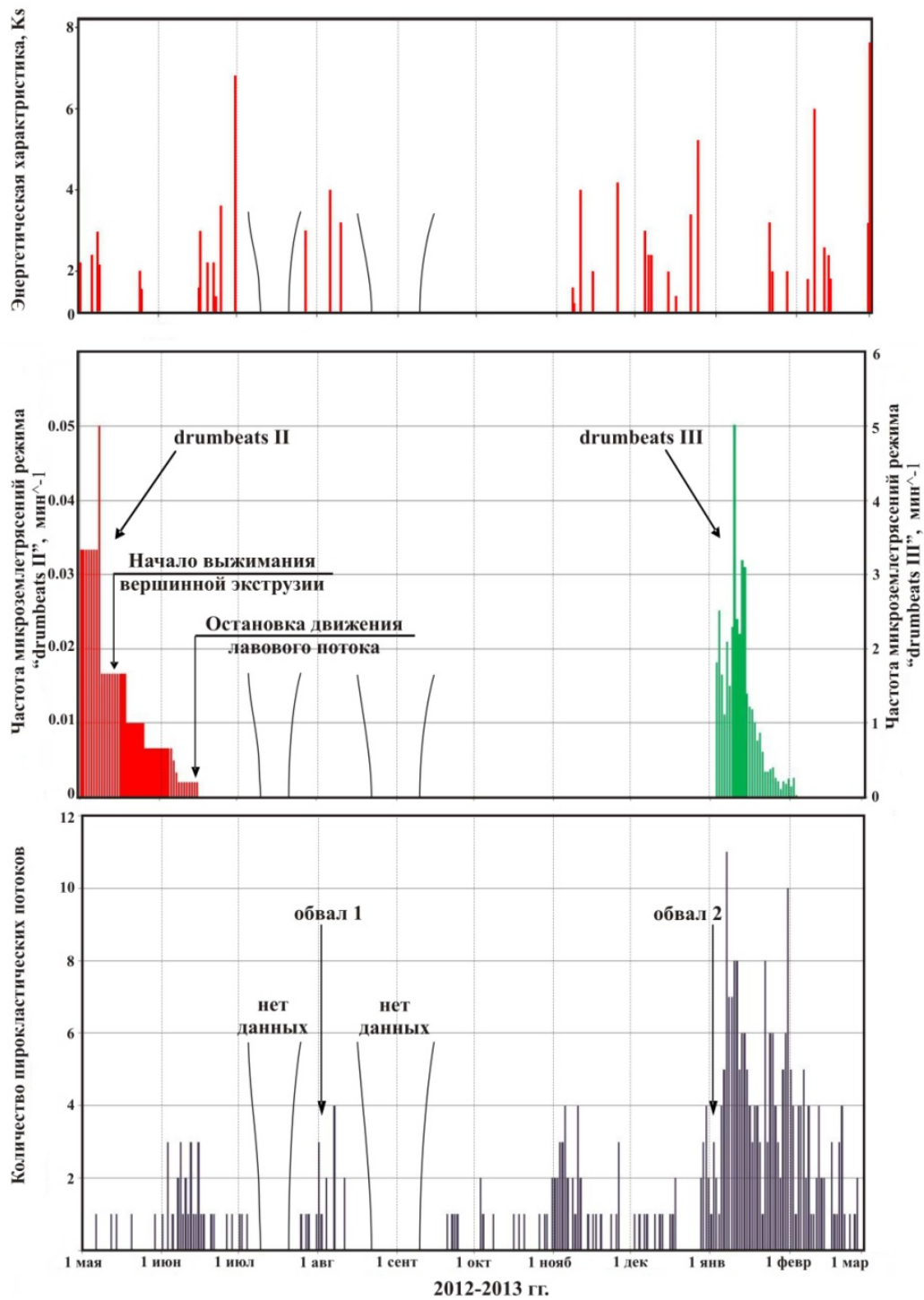
может быть использована для многопараметрического анализа сейсмических сигналов с целью их автоматической селекции, а значит и для мониторинга динамики активности вулкана Кизимен.

**Выводы**

1. Основываясь на видеонаблюдениях и сейсмических эффектах, была реконструирована актив-

ность вулкана Кизимен за период май 2012 г. – март 2013 г. Северо-восточный язык лавового потока прекратил своё движение в середине июня 2012 г. В мае началось интенсивное выжимание вершинной экструзии, которое сопровождалось извержением пирокластических потоков и небольшими обвалами.

2. Большой обвал, сопровождавшийся сейсмическим сигналом с амплитудой скорости смещения



**Рис. 11.** Энергетический класс вулканотектонических землетрясений (а), частота микроземлетрясений режимов «drumbeats» (б) и количество пирокластических потоков (в) за период май 2012 — март 2013 г.



грунта 5 мкм/с, произошёл 1 августа 2012 г. После чего скорость выжимания вершинной экструзии замедлилась. Второй активный период выжимания вершинной экструзии начался в декабре 2012 г. – январе 2013 г. после серии вулcano-тектонических землетрясений в ноябре-декабре 2012 г. с  $H = 5 - 10$  км и  $K_{max} = 6,6$ . Интенсивное выжимание вершинной экструзии сопровождалось микроземлетрясениями режима «drumbeats III».

3. На основе реконструкции активности вулкана в период май 2012 г. – март 2013 г. можно предположить, что в дальнейшем возможно ещё несколько циклов выжимания и разрушения вершинной экструзии, которые будут предваряться ВТ землетрясениями с  $K_S > 6$ .

4. 25 марта с района в. Кизимен произошло ВТ землетрясение с  $H = 3,5$  и  $K_S = 8,5$ , а на следующей день произошло ещё три более слабых ВТЗ. Авторы предполагают, что вскоре возможен новый цикл выжимания вершинной экструзии.

#### Список литературы

1. Кугаенко Ю. А., Нуждина И. Н., Салтыков В. А. Особенности спектральных компонент вулканических землетрясений на примере вулканов Кизимен, Корякский, Мутновский и Горелый // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 102–113.
2. 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. 7–14.
3. Махмудов Е. Р., Фирстов П. П., Кожевникова Т. Ю. Сейсмические эффекты, сопровождающие извержения вулкана Безымянного (Камчатка) // Материалы V Сахалинской молодежной научной школы 8–11 июня 2010 г. 2011. ИМиГ: Южно-Сахалинск. С. 178–185.
4. Фирстов П. П., Шакирова А. А. Сейсмические явления, сопровождавшие извержение вулкана Кизимен в 2011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 7–13.
5. Фирстов П. П., Шакирова А. А. Извержение вулкана Кизимен в 2009–2012 гг. и его проявление в сейсмических эффектах // Материалы ежегодной конференции посвящённой Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский. ИВиС ДВО РАН. 2012а. С. 76–81.
6. Фирстов П. П., Шакирова А. А. Сейсмические эффекты, сопровождавшие извержение вулкана Кизимен в 2009–2012 гг. (Камчатка) // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы VII Международной сейсмологической школы. 2012б. Обнинск: ГС РАН. С. 312–318.
7. Шакирова А. А. Движение лавового потока вулкана Кизимен как генератор режима «drumbeats» // Исследования в области наук о Земле. Матер. X региональной молодежной научной конференции 28–29 ноября. 2012. Петропавловск-Камчатский. С. 127–139.
8. Iverson R. M., Dzurisin D., Gardner C. A. et al. Dynamics of seismogenetic volcanic extrusion at Mount St Helens in 2004–2005 // Nature. 2006. Vol. 444. P. 439–443.
9. Moran S. C., Malone S. D., Qamar A. I. et al. Seismicity associated with renewed Dome-Building at Mount St. Helens, 2004–2005 / A volcano rekindled: The renewed eruption of Mount St. Helens, 2004–2006. Ch. 2. 2007. U.S.