

## СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ «DRUMBEATS», ПРЕДВАРЯЮЩИЙ И СОПРОВОЖДАЮЩИЙ ИЗВЕРЖЕНИЯ АНДЕЗИТОВЫХ И ДАЦИТОВЫХ ВУЛКАНОВ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ (ОБЗОР)

© 2019 П.П. Фирстов, А.А. Шакирова

*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»,  
г. Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006; e-mail: firstov@emsd.ru*

Во время экструзивных извержений андезитовых и дацитовых вулканов, в некоторых случаях, выжимание вязкой лавы сопровождалось возникновением микроземлетрясений режима «drumbeats» (барабанный бой). Особенностью микроземлетрясений такого режима являются: близкие энергии, подобные волновые формы и квазипериодичность на протяжении длительного времени (от нескольких часов до месяцев). В статье приведен обзор микроземлетрясений режима «drumbeats», зарегистрированных на некоторых вулканах мира во время выжимания экструзивных куполов: Редаут (Алеутские острова), Сент-Хеленс (Каскадные горы, Северная Америка), Суфриере Хиллс (остров Монтсеррат, Малые Антильские острова), Пичинча (Анды, Южная Америка). При извержении вулкана Кизимен (п-ов Камчатка) в 2010–2013 гг. режим «drumbeats» наблюдался не только при выжимании экструзии, но и при формировании и движении вязкого лавового потока. По форме записи землетрясения режима «drumbeats» относятся к гибридным и длиннопериодным землетрясениям, с преобладающими частотами в диапазоне 0.3–7 Гц.

*Ключевые слова: вулкан, землетрясение, сейсмичность, drumbeats, лавовый поток, экструзивный купол.*

### ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения, регистрируемые в районах активного вулканизма, прямо или косвенно связанные с магматизмом, относятся к вулканическим землетрясениям (ВЗ). Многие исследователи занимались и занимаются изучением ВЗ, и в настоящее время можно говорить о научном направлении «вулканическая сейсмология» (Горшков, 1954а, 1954б; Токарев, 1966; Endo et al., 1981; Bogoyavlenskaya et al., 1985; McNutt, 1996). Очень подробная и детальная информация об этом направлении приведена в классической монографии нашего соотечественника профессора В.М. Зобина, которая выдержала три издания (Zobin, 2003, 2012, 2017).

Рассмотрим наиболее значимые работы, посвященные классификации ВЗ.

Одной из первых попыток классификации ВЗ по форме записи и их связи с вулканической деятельностью была предпринята отечественным вулканологом Г.С. Горшковым в 1954 г.

(1954а). Так как аналоговая регистрация землетрясений проводилась с малой скоростью и небольшим увеличением, то эта классификация при незначительной статистике была достаточно условной. В его следующей работе (Горшков, 1954б) дано описание сейсмических явлений, сопровождавших извержение побочного кратера Былинкиной вулкана Ключевского. В этой работе им затронуты вопросы терминологии и впервые дано определение «вулcano-тектонических» землетрясений, имеющих тектонический характер, но приуроченных к районам действующих вулканов.

В основу известной классификации ВЗ японского исследователя Т. Минаками (Minakami, 1960) положена их связь с активностью вулкана, форма записи и глубина очагов. В этой классификации выделены четыре типа ВЗ. Позднее, на примере извержений вулканов Камчатки, П.И. Токаревым (1966) были выделены пять типов ВЗ, хорошо согласующиеся с классификацией Минаками.

В дальнейшем, с применением в сейсмологии цифровой регистрации и обработки землетрясений с помощью компьютеров, появилась возможность более детально исследовать волновые формы ВЗ и с большой точностью определять координаты гипоцентров слабых ВЗ, что послужило толчком к возникновению более совершенной типизации ВЗ, которая, естественно, унаследовала типы землетрясений, выделенных ранее (Zobin, 2017).

Данная статья посвящена особой группе вулканических микроземлетрясений, зарегистрированных во время экструзивной активности андезитовых и дацитовых вулканов. Эти ВЗ происходят в особом режиме, который был назван «drumbeats» (барабанный бой) (Moran et al., 2008b). Особенностью землетрясений режима «drumbeats» являются: квазипериодичность их возникновения на протяжении длительного времени (от нескольких часов до месяцев), подобные волновые формы малой амплитуды (рис. 1а).

В большинстве случаев землетрясения режима «drumbeats» представляют собой мультиплеты гибридных и длиннопериодных землетрясений (рис. 1б), сопровождающие выжимание вязких лавовых потоков или отдельных блоков на экструзивном куполе во время извержений андезитовых и дацитовых вулканов, имеющие хорошо выраженный квазипериод длительностью от долей до нескольких минут.

Гибридные землетрясения (ГЗ) характеризуются тем, что после четких вступлений с  $f \approx 3\text{--}10$  Гц в начальной части записи наблюдается запись явно выраженных кода волн (рис. 1б).

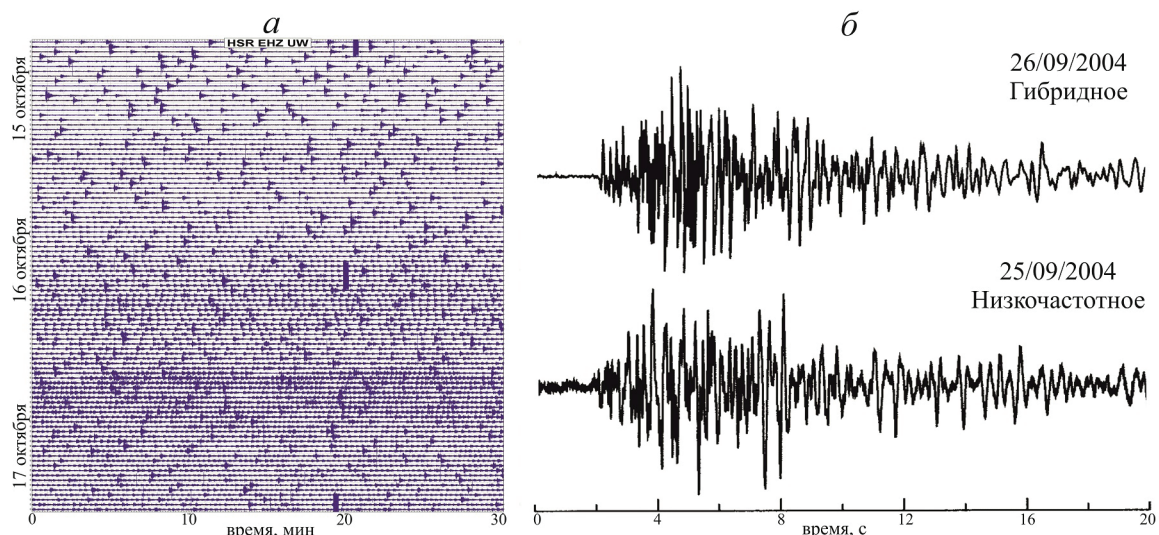
Такая форма записи, по мнению ряда авторов (Гордеев, Сенюков, 1998; Carlisle, 2013; Power et al., 1994), обусловлена разрушением геосреды под воздействием давления магмы или флюида с образованием трещины и дальнейшего ее заполнения, выделяющейся из магмы газовой составляющей или флюидом.

Для длиннопериодных землетрясений (ДЗ) с очагами в непосредственной близости от дневной поверхности характерна более низкая частота  $f \approx 1\text{--}5$  Гц (рис. 1б). Они, как и гибридные, образуют роевые последовательности или мультиплеты длительностью от нескольких часов до месяцев. Землетрясения в роях имеют близкие волновые формы. В некоторых работах этот тип землетрясений именуется «низкочастотными» (low frequency LF) (Moran et al., 2008b).

### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВУЛКАНОВ, НА КОТОРЫХ РЕГИСТРИРОВАЛСЯ СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ «DRUMBEATS»

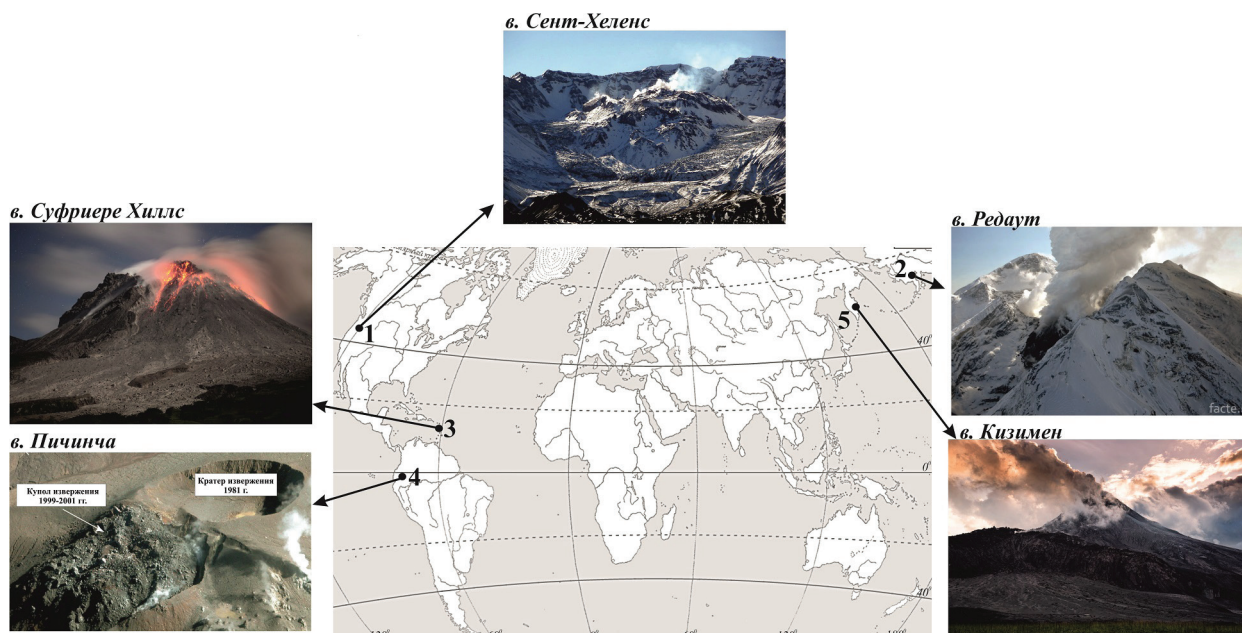
Режим «drumbeats» наблюдался при извержениях вулканов, расположенных в различных частях света: Редаут (Алеутские острова), 1989 г. и 2009 г.; Суфриере Хиллс (остров Монтсеррат, Малые Антильские острова), 1995–1997 гг.; Пичинча (Анды, Южная Америка), 1999 г.; Сент-Хеленс (Каскадные горы, Северная Америка), 1982 г. и 2004–2005 гг.; Кизимен (п-ов Камчатка), 2010–2013 гг. и др. (рис. 2).

Вулкан Редаут (3108 м) — андезитовый вулкан ( $\text{SiO}_2 = 57\text{--}63\%$ ), расположенный на Алеутских островах (рис. 2). Кальдера вулкана имеет



**Рис. 1.** Сейсмическая запись микроземлетрясений роевой последовательности, зарегистрированной в 2.5 км от кратера в. Сент-Хеленс 15–17 октября 2004 года (а); характерные записи гибридного и низкочастотного микроземлетрясений из этого роя (б), по (Moran et al., 2008b).

**Fig. 1.** Seismic record of earthquakes of the swarm sequence recorded 2.5 km from the crater of St. Helens Volcano on October 15–17, 2004 (a); characteristic records of hybrid and low-frequency micro-earthquakes from this swarm (b), according to Moran et al. (2008b).



**Рис. 2.** Вулканы, для которых характерен режим «drumbeats» на карте мира: 1 — Сент-Хеленс (<http://www.belousov.pro/msh-07.jpg>); 2 — Редаут [<https://facte.ru/wp-content/uploads/2018/06/redoubt2.jpg>]; 3 — Суфriere Хиллс (<https://volcanocafe.files.wordpress.com/2014/01/11adb1c.jpg>); 4 — Пичинча (Garcia et al., 2007); 5 — Кизимен ([https://i.photographers.ua/thumbnails/pictures/32516/800xc-\\_users\\_rrrri\\_desktop\\_aklm1515.jpg](https://i.photographers.ua/thumbnails/pictures/32516/800xc-_users_rrrri_desktop_aklm1515.jpg)).

**Fig. 2.** Volcanoes characterized by the «drumbeats» mode on the world map. 1 — St. Helens (<http://www.belousov.pro/msh-07.jpg>); 2 — Redout (<https://facte.ru/wp-content/uploads/2018/06/redoubt2.jpg>); 3 — Soufriere Hills (<https://volcanocafe.files.wordpress.com/2014/01/11adb1c.jpg>); 4 — Pichincha (Garcia et al., 2007); 5 — Kizimen ([https://i.photographers.ua/thumbnails/pictures/32516/800xc-\\_users\\_rrrri\\_desktop\\_aklm1515.jpg](https://i.photographers.ua/thumbnails/pictures/32516/800xc-_users_rrrri_desktop_aklm1515.jpg)).

диаметр 2.3×1.1 км (Bull et al., 2013). Извержение вулкана Редаут в 1989–1990 гг. характеризуется мощными извержениями тefры с распространением на большие площади, пирокластическими и селевыми потоками и эпизодическим выжиманием купола с его последующим разрушением мощными эксплозиями (Power et al., 1994). Во время этого извержения в результате экструзивного процесса возникло 14 куполов, 13 из которых впоследствии были разрушены гравитационным обвалом (Miller et al., 1998). Период с повторяющейся цикличностью «рост купола — разрушение» длился до середины июня 1990 г. (Cornelius, Voight, 1994).

Перед извержением вулкана Редаут весной 2009 г. в течении шести месяцев наблюдались процессы, связанные с образованием купола: поверхностные деформации, усиление на куполе газового и теплового потоков, рой слабых мелкофокусных землетрясений и вулканическое дрожание (Power et al., 2013). Извержение началось 22 марта 2009 г. с мощных эксплозий с высотой эруптивного облака до 14 км и ростом экструзивного купола, который был замечен 5 апреля. Интенсивный рост купола наблюдался до середины июня, после чего скорость его роста замедлилась (Vuurman et al., 2013).

*Вулкан Суфriere Хиллс* (914 м) — андезитовый вулкан, расположенный в южной части острова Монтсеррат (Малые Антильские острова) (рис. 2)

(Robertson et al., 2010). Его вершина состоит из нескольких вулканических куполов с главным кратером диаметром ~1 км, возникшим при обрушении вершины ~4 тысяч лет назад (Murphy et al., 2000).

Для извержения 1995–1999 гг. был характерен широкий спектр вулканических явлений: выжимание экструзивного купола с образованием раскаленных лавин, отдельные эксплозии с формированием пирокластических потоков, а также в некоторых случаях селевые потоки (Sparks, Young, 2002).

*Вулкан Пичинча* (4784 м) — вулканический комплекс, расположенный в Андах (Южная Америка), состоит из потухшего вулкана Руку и активного вулкана Гуагуа. Состав пород: андезиты и дациты (Siebert et al., 2010). В 1999 г., после нескольких месяцев фреатической активности на пике Гуагуа наступил экструзивный период с выжиманием нескольких куполов (рис. 2), преимущественно дацитового состава, сопровождающийся эксплозиями и излиянием пирокластических потоков (Garcia et al., 2007).

Перед извержением в течение трех лет регистрировалась повышенная сейсмичность. Начиная с июля 1995 г. на протяжении четырех месяцев наблюдались извержения фреатического типа, которые прекратились с началом роста купола в середине ноября 1995 г. К февралю 1997 г. экструзивный купол занял весь кратер,



и его мантия начала заполнять долину. Сильное извержение произошло 26 декабря 1997 г., которое началось с разрушения юго-западного сектора экструзивного купола и схождение мощных пирокластических потоков. В марте 1998 г. рост экструзивного купола прекратился (Robertson et al., 2000).

Общий объем извергшейся магмы с ноября 1995 г. по декабрь 1997 г. оценивается в  $24.6 \cdot 10^7 \text{ м}^3$ , из которых  $9.3 \cdot 10^7 \text{ м}^3$  составил объем купола.  $12.5 \cdot 10^7 \text{ м}^3$  пришлось на отложения пирокластических потоков и  $2.8 \cdot 10^7 \text{ м}^3$  на пирокластику (Sparks et al., 1998).

*Вулкан Сент-Хеленс* (2549 м) — стратовулкан, расположенный в Каскадных горах (Северная Америка) с дацитовыми и андезитовыми лавами ( $\text{SiO}_2 = 57\text{--}75\%$ ) (Vogoyavlenskaya et al., 1985). До извержения 1980 г. он представлял собой стратовулкан с крутыми склонами и абсолютной высотой 2975 м. Извержение вулкана 1980 г. началось с интенсивной сейсмической активности и фреатического извержения. Кульминацией стал обвал, сопровождавшийся направленным взрывом, с последующим мощным плининским извержением (Endo et al., 1981). В дальнейшем наблюдалось выжимание экструзивного купола в кратере вулкана (Vogoyavlenskaya et al., 1985). В 1982–1983 гг. экструзивный купол выжимался со скоростью  $0.7 \text{ м}^3/\text{с}$ . К октябрю 1986 г. лавовый купол возвышался на 270 м над кратером, образовавшемся в 1980 г., имел объем  $(75\text{--}77) \cdot 10^6 \text{ м}^3$  (Swanson, Holcomb, 1990). Вспышка активности наблюдалась в 2004–2006 гг., когда одновременно с выжиманием экструзивного купола (рис. 2) регистрировались мощные эксплозии (Moran et al., 2008b). Выжимание вязкой лавы со средней скоростью около  $5 \text{ м}^3/\text{с}$  осенью 2004 г. до  $1 \text{ м}^3/\text{с}$  в начале 2006 г. привело к образованию хребтообразного экструзивного купола, состоящего из трех пиков с объемом близким к объему купола 1986 года (Scott et al., 2008).

*Вулкан Кизимен* (2485 м) — действующий стратовулкан эксплозивно-эффузивно-экструзивного типа, расположенный в восточной части Шапинского грабена Центральной Камчатской депрессии (п-ов Камчатка) (рис. 2) (Шанцер и др., 1991). Состав продуктов извержений от дацитов до андезибазальтов — результат смешения дацитовой и базальтовой магм (Иванов, 2008). По морфологии вулкан Кизимен — это крупное сложное экструзивное образование с лавовыми потоками последнего этапа деятельности вулкана (Мелекесцев и др., 1992).

Извержение вулкана Кизимен в 2010–2013 гг. характеризуется эксплозивной активностью, сопровождавшейся сходом пирокластических потоков, выжиманием вершинной экструзии с возникновением обломочных лавин,

с последующим выжиманием мощного вязкого лавового потока. На заключительной стадии наблюдалось выжимание небольшой вершинной экструзии. Лавовый поток на восточном склоне вулкана был замечен в феврале 2011 г., а в конце июля его «язык» достиг подножия конуса (Овсянников, Малик, 2011). В ноябре 2011 г. на расстоянии 2.3 км от кратера вулкана на высоте 1350 м произошло разветвление потока к северо-востоку с образованием менее мощного второго «языка», мощность первого «языка» к тому моменту достигла 200 м (Auer et al., 2018). К октябрю 2012 г. движение лавового потока прекратилось (Двигало и др., 2013). Общий объем лавового потока составил  $0.3 \text{ км}^3$  (Auer et al., 2018).

### СЕЙСМИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ РЕЖИМА «DRUMBEATS»

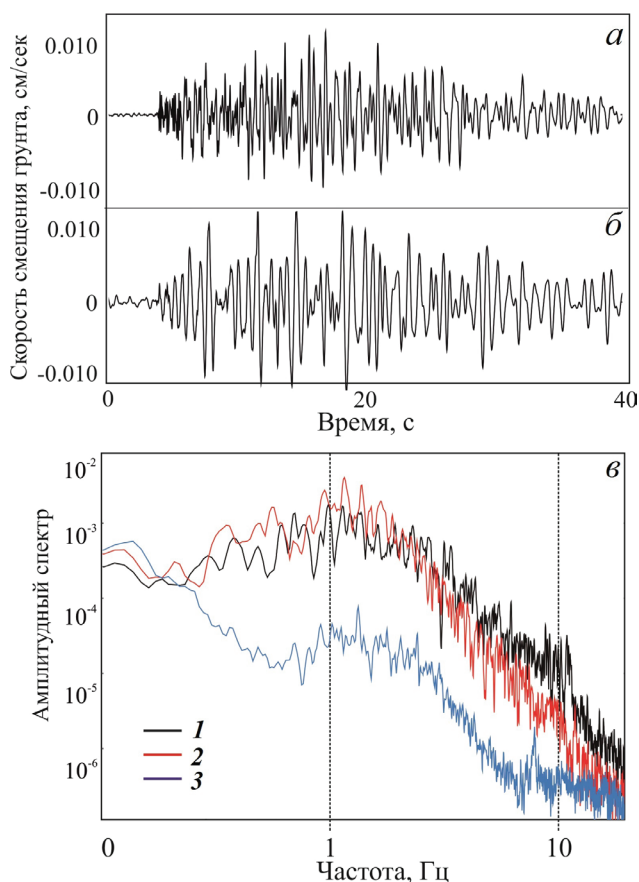
*Вулкан Сент-Хеленс*. В период октябрь 2004 г. – май 2005 г. на в. Сент-Хеленс наблюдалось выжимание экструзии в кратере извержения 1980 г. (Moran et al., 2008a). При этом регистрировались мультиплеты режима «drumbeats» с квазипериодичностью 3–300 с и  $M \leq 2$ , обусловленные экструзивным процессом (рис. 3a). ВЗ имели в начальной части частоту  $f \sim 4\text{--}10 \text{ Гц}$  и частоту коды волн  $f \sim 1 \text{ Гц}$  и их можно отнести к ГЗ (рис. 1б) (Moran et al., 2008a). При точности определения  $\sim 100 \text{ м}$ , очаги землетрясений располагались на глубине около одного километра вокруг или под экструзивным куполом (Horton et al., 2008).

В 1984 г., после катастрофического извержения вулкана Сент-Хеленс в мае 1980 г., также регистрировались рои поверхностных микроземлетрясений с идентичными волновыми формами режима «drumbeats» (Fremont, Malone, 1987).

Вариации по энергии ВЗ позволили выделить несколько мультиплетов, содержащих большое количество близких по форме и слабым по энергии событий. Плотная сеть сейсмических станций позволила установить, что большинство событий, произошедших в течение 12 часового периода в сентябре 1984 года, располагались под лавовым куполом в небольшом объеме диаметром  $\sim 30 \text{ м}$  (Fremont, Malone, 1987).

*Вулкан Редаут*. В декабре 1989 г. в районе конуса вулкана начали регистрироваться слабые землетрясения с квазипериодичностью 3–5 в минуту и имеющие подобные волновые формы с преобладающей частотой  $f \sim 2 \text{ Гц}$  (Cornelius, Voight, 1994). Волновые формы ВЗ, а также динамика развития сейсмичности напоминали землетрясения и сейсмичность, предшествующие выжиманию экструзивных куполов на вулкане Сент-Хеленс (Fremont, Malone, 1987). Исходя из этого был сделан прогноз, что возникшая сейс-





**Рис. 3.** Примеры волновых форм землетрясений режима «drumbeats», зарегистрированные в 2004 г. на вулкане Сент-Хеленс и их амплитудные спектры: *a* — гибридное; *б* — длиннопериодное; *в* — амплитудные спектры: 1 — гибридное ВЗ, 3.10.2004 г., 2 — длиннопериодное ВЗ 28.11.2004 г., 3 — фон, 01.11.2004 г. (Horton et al., 2008).

**Fig. 3.** Examples of waveforms of «drumbeats» earthquakes recorded in 2004 on St. Helens Volcano, and their amplitude spectra: *a* — hybrid, *б* — long-period, *в* — amplitude spectra: 1 — hybrid VZ, October 3, 2004; 2 — long-period VZ, November 28, 2004; 3 — background, November 1, 2004 (Horton et al., 2008).

мичность обусловлена экструзивным процессом. Действительно, в конце декабря 1989 г. в кратере вулкана был зафиксирован появившийся экструзивный купол. Таким образом, удалось предсказать начало выжимания экструзивного купола за несколько дней до его визуального подтверждения. В дальнейшем, при замедлении роста купола, микроземлетрясения перестали регистрироваться (Power et al., 1994).

При следующем извержении вулкана Редаут в 2009 г. было зарегистрировано шесть роевых последовательностей длительностью от часа до нескольких дней, состоящих от десятков до нескольких тысяч гибридных и длиннопериодных ВЗ (рис. 4) (Carlisle, 2013). Три роевых последовательности предшествовали сильным эксплозиям.

Первая роевая последовательность длительностью ~29 часов была отмечена за 25 дней до

первой сильной эксплозии 26 февраля 2009 г. В начале роя регистрировалось до 90 событий в час, но затем количество землетрясений быстро уменьшилось до 30. Магнитуда большинства землетрясений не превышала  $M < 1.7$ , с максимумом спектральной плотности мощности в диапазоне частот  $f = 1-7$  Гц и с хорошо выраженным спектральным пиком на  $\sim 2.5$  Гц (Buurman et al., 2013).

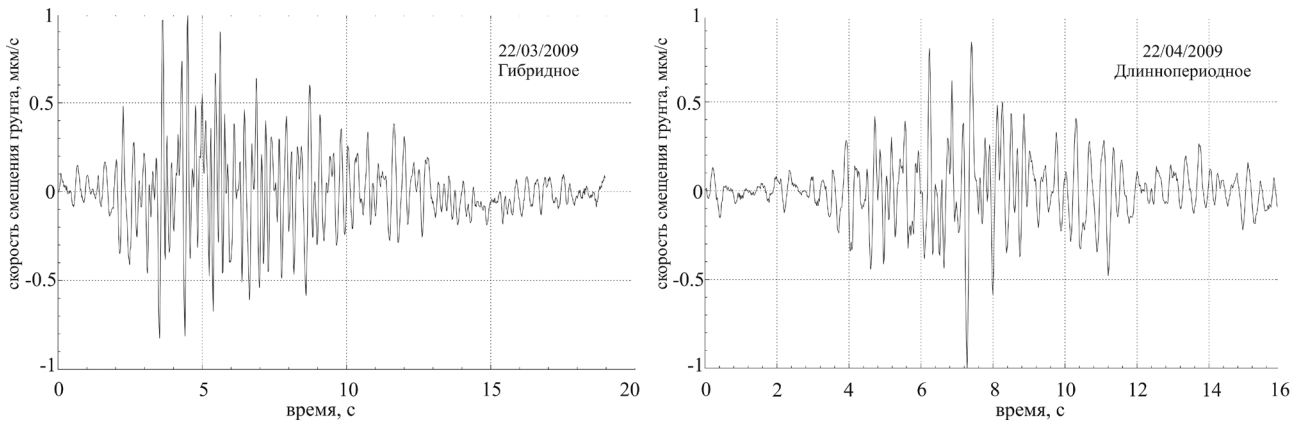
**Вулкан Суффриере Хиллс.** В период с августа 1995 г. по август 1996 г. одновременно с выжиманием лавового купола на вулкане Суффриере Хиллс регистрировалось большое количество ВЗ (рис. 5) (Miller et al., 1998b). Землетрясения, которые регистрировались двумя сейсмостанциями, с подобными волновыми формами и близкими магнитудами, происходили через регулярные промежутки времени (от  $< 1$  секунды до десятков минут) образуя мультиплеты различной длительности.

Вначале землетрясения происходили более регулярно и с большей амплитудой, в конце роя реже и с меньшей амплитудой. Иногда, в течение нескольких часов одновременно регистрировались две группы землетрясений с разными амплитудами и волновыми формами, что свидетельствовало о двух источниках ВЗ. Гипоцентры землетрясений располагались непосредственно в постройке вулкана под дном кратера. Энергетический спектр имел диапазон доминирующих частот  $f \sim 1.5-3.3$  Гц (White et al., 1998).

В начале и в конце роевых последовательностей состоящих из гибридных землетрясений иногда наблюдались длиннопериодные ВЗ с более высокой магнитудой. Они имели четкие вступления S — волн, со значительным спектральным пиком в диапазоне  $f = 1.0-2.6$  Гц (Miller et al., 1998b). Гипоцентры LP землетрясений располагались на глубине  $1.7 \pm 0.2$  км выше уровня моря под кратером.

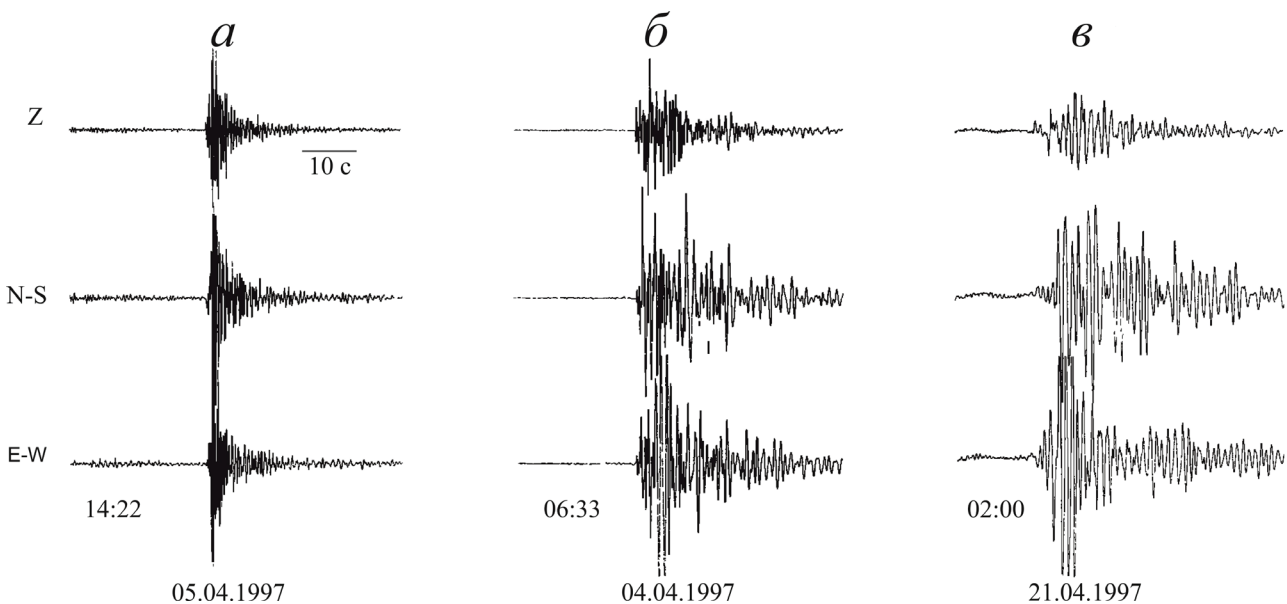
**Вулкан Пичинча.** Во время извержения в Пичинча в 1999 г. с 8 по 25 сентября наблюдался рой землетрясений, когда за 17 дней было зарегистрировано более 1000 событий (Garcia et al., 2007). Непосредственно перед первой эксплозией 26 сентября, количество ВЗ резко возросло. Новый дацитовый купол появился на поверхности между 27 и 29 сентября. До конца декабря регистрировались еще несколько мультиплетов, когда в течение суток регистрировалось более 400 ВЗ. Синхронно с появлением мультиплетов отмечался рост внутрикратерной экструзии, высота которой уменьшалась во время мощных эксплозий (Garcia et al., 2007).

Перед каждым мультиплетом события распределялись случайным образом во времени. Затем временной интервал между событиями постепенно уменьшался и упорядочивался,



**Рис. 4.** Примеры землетрясений, зарегистрированных на расстоянии 3 км от кратера в. Редаут при извержении в 2009 г. (Carlisle, 2013).

**Fig. 4.** Examples of earthquakes recorded 3 km far from Redoubt Volcano's crater during the 2009 eruption (Carlisle, 2013).



**Рис. 5.** Примеры вулканических землетрясений, зарегистрированных на вулкане Суфриере Хиллс: *a* — вулкано-тектоническое; *б* — гибридное; *в* — низкочастотное (Miller et al., 1998b).

**Fig. 5.** Examples of volcanic earthquakes recorded on Soufriere Hills: *a* — volcanic-tectonic; *б* — hybrid; *в* — low frequency (Miller et al., 1998b).

возникал режим «drumbeats». По истечении какого-то времени, ВЗ начинали регистрироваться хаотично и затем прекращались, после чего в некоторых случаях наблюдалась эксплозивная деятельность (рис. 6*a*). Очаги ВЗ, с подобными волновыми формами (рис. 6*б*), располагались в постройке вулкана на глубинах от 3 до 1 км н.у.м. (Garcia et al., 2007).

Во время этого извержения с помощью наклономеров отслеживались деформации конуса вулкана (Garcia et al., 2007). Синхронно с роями землетрясений наклонометры регистрировали подъем поверхности конуса, свидетельствующий о поступлении магмы в постройку вулкана, приводящей к возникновению деформационных процессов, сопровождающихся сейсмичностью. В среднем наклоны, указывающие на вздымание конуса вулкана, составляли

~ 10 мкрад на расстоянии 3 км. Самый сильный наклон в 26 мкрад был зарегистрирован с 18 по 21 ноября 1999 г., когда на куполе наблюдался рост обелиска объемом ~  $0.5 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>. После его обрушения 26 ноября по данным наклономеров произошло заметное проседание конуса, что связывалось с резким уменьшением давления под экструзивным куполом (Garcia et al., 2007).

**Вулкан Кизимен.** Во время извержения этого вулкана в 2010-2013 гг. на ближайшей радиотелеметрической сейсмической станции (РТСС) КФ ФИЦ ЕГС РАН «Кизимен» (KZV), расположенной в 2.5 км от кратера, регистрировались мультиплеты большого количества гибридных и длиннопериодных ВЗ с квазипериодичностью от долей секунды до нескольких минут (Фирстов, Шакирова, 2014). Их длительность варьировала от часа до нескольких десятков дней. В работах

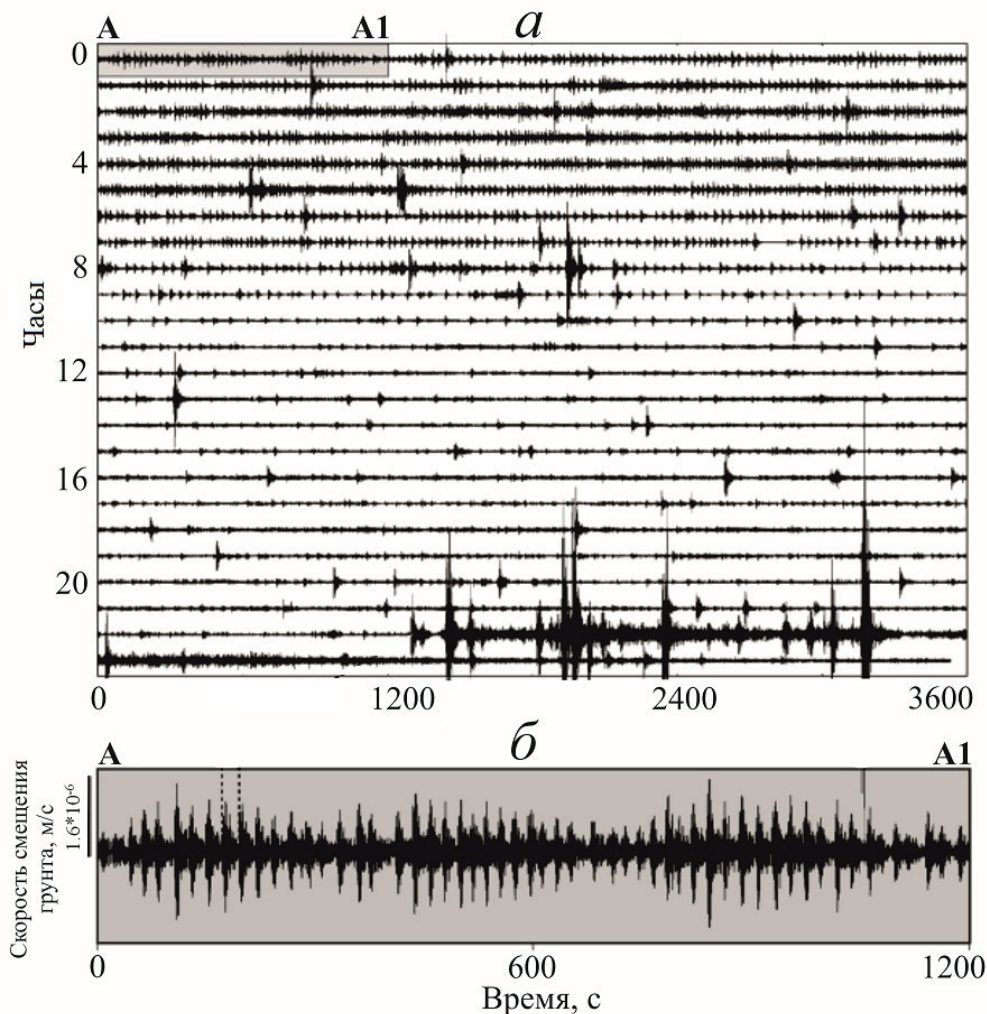


Рис. 6. Суточная сейсмограмма землетрясений режима «drumbeats» на в. Пичинча 2 декабря 1999 г. (а), увеличенный фрагмент записи сейсмограммы участка А – А' (б) (Garcia et al., 2007).

Fig. 6. Daily seismogram of earthquakes of the «drumbeats» mode on Pichincha Volcano on December 2, 1999 (a), an enlarged fragment of the seismogram record A – A' (б) (Garcia et al., 2007).

(Фирстов, Шакирова, 2014; Шакирова, 2012) было показано, что в зависимости от характера вулканической активности существенно менялась средняя амплитуда скорости колебания грунта ( $\bar{A}$ , мкм/с) и средняя частота ( $\bar{f}$ , мин<sup>-1</sup>) возникновения в минутном интервале землетрясений режима «drumbeats».

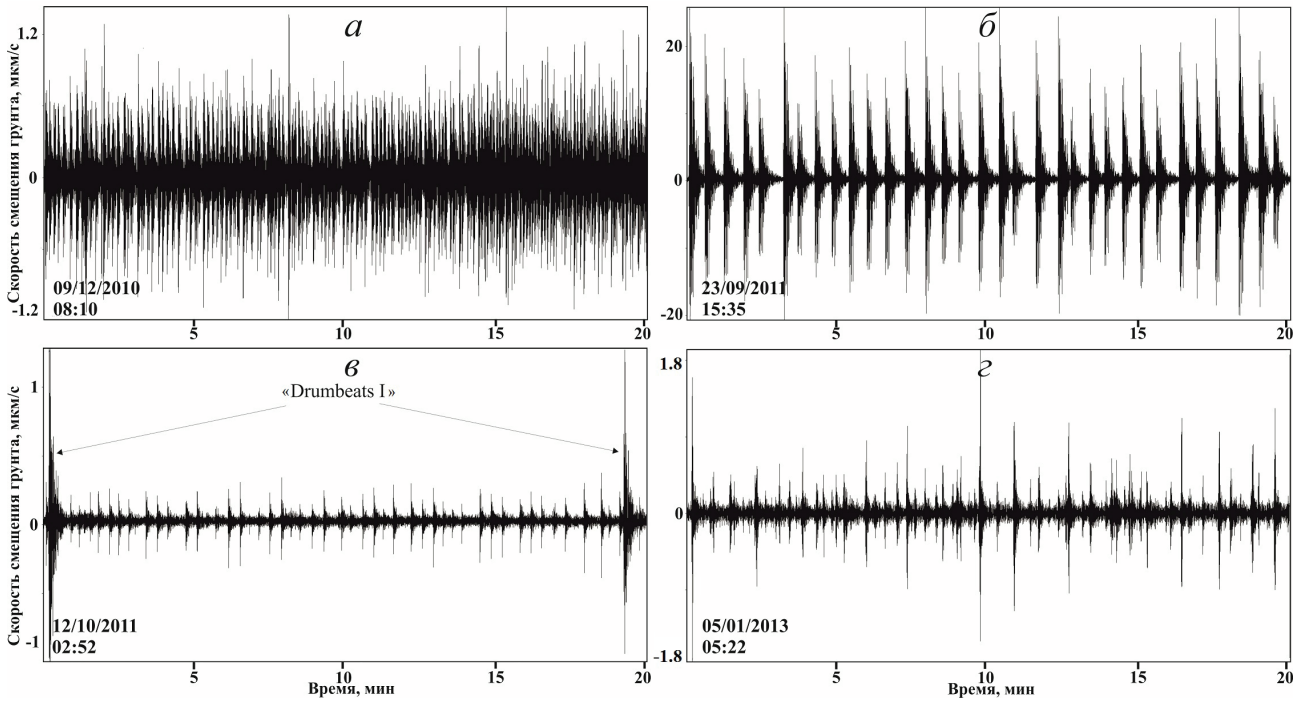
Так, в начале извержения, когда появилась экструзия в кратере, регистрировались короткие по времени мультиплеты ВЗ с  $\bar{A} = 0.3$  мкм/с и  $\bar{f} = 5.4$  мин<sup>-1</sup> (рис. 7а). Длительные мультиплеты наиболее сильных ВЗ регистрировались во время движения первого мощного «языка» лавового потока в августе и сентябре 2011 г. (рис. 7б). Данный режим был условно назван «drumbeats I», в отличие от мультиплетов режима «drumbeats II», которые возникли одновременно с появлением второго лавового «языка» (рис. 7в).

На заключительной стадии извержения регистрировались микроземлетрясения, связанные с выжиманием экструзивного купола в кратере вулкана — «drumbeats III» (рис. 7г).

Спектральная плотность мощности для микроземлетрясений «drumbeats» заключена в пределах  $f = 1.5\text{--}5.0$  Гц со спектральными максимумами на частотах  $f = 0.8, 1.2, 1.8$  и  $3.0$  Гц (рис. 8).

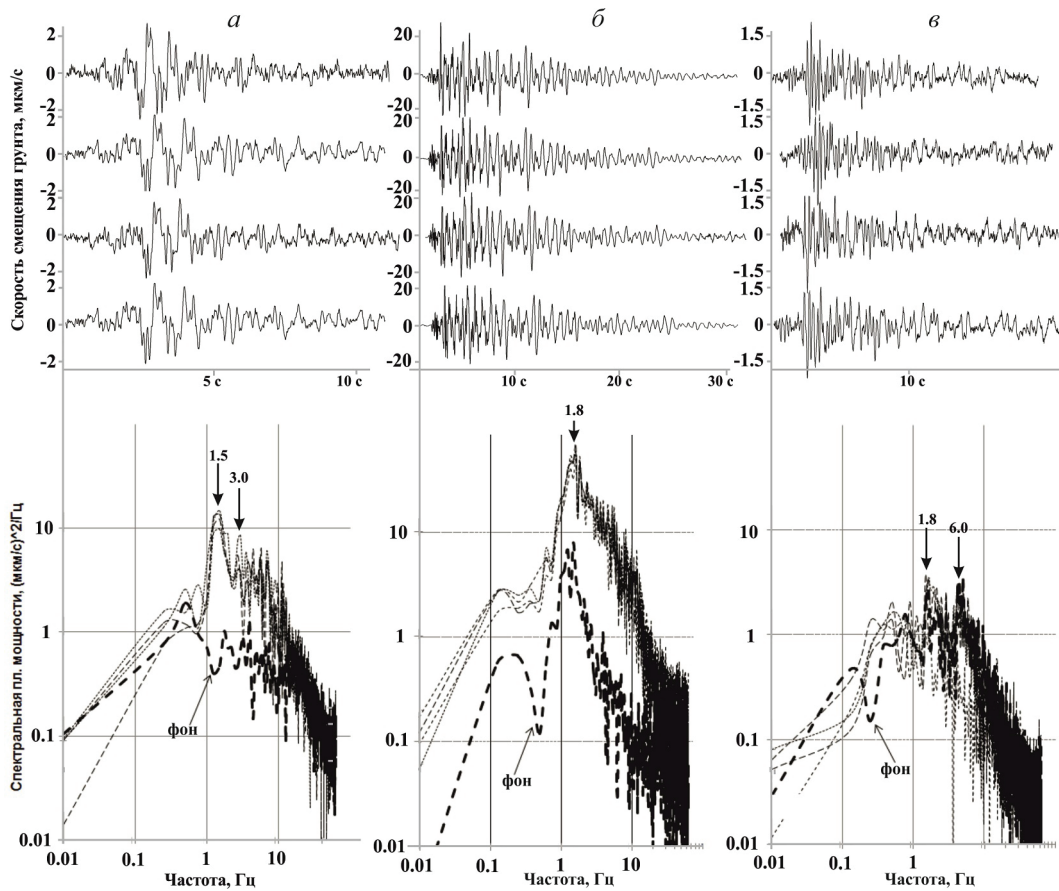
Динамика извержения хорошо прослеживается по сейсмическим данным с использованием описанных выше параметров (Фирстов, Шакирова, 2014; Шакирова, 2011). Впервые ВЗ режима «drumbeats III» были зарегистрированы 9 декабря 2010 г. за несколько часов до первых сильных эксплозий, что свидетельствовало о начале извержения, обусловленном выжиманием первой порции вязкой лавы с формированием экструзии в кратере вулкана (рис. 9). В январе-феврале 2011 г. после сравнительно коротких мультиплетов ВЗ, следовали мощные эксплозии, и наблюдалось схождение пирокластических потоков.





**Рис. 7.** Двадцатиминутные записи микроземлетрясений трех режимов «drumbeats» на РТСС «Кизимен»: а, г — «drumbeats III»; б — «drumbeats I»; в — «drumbeats II» на фоне «drumbeats I».

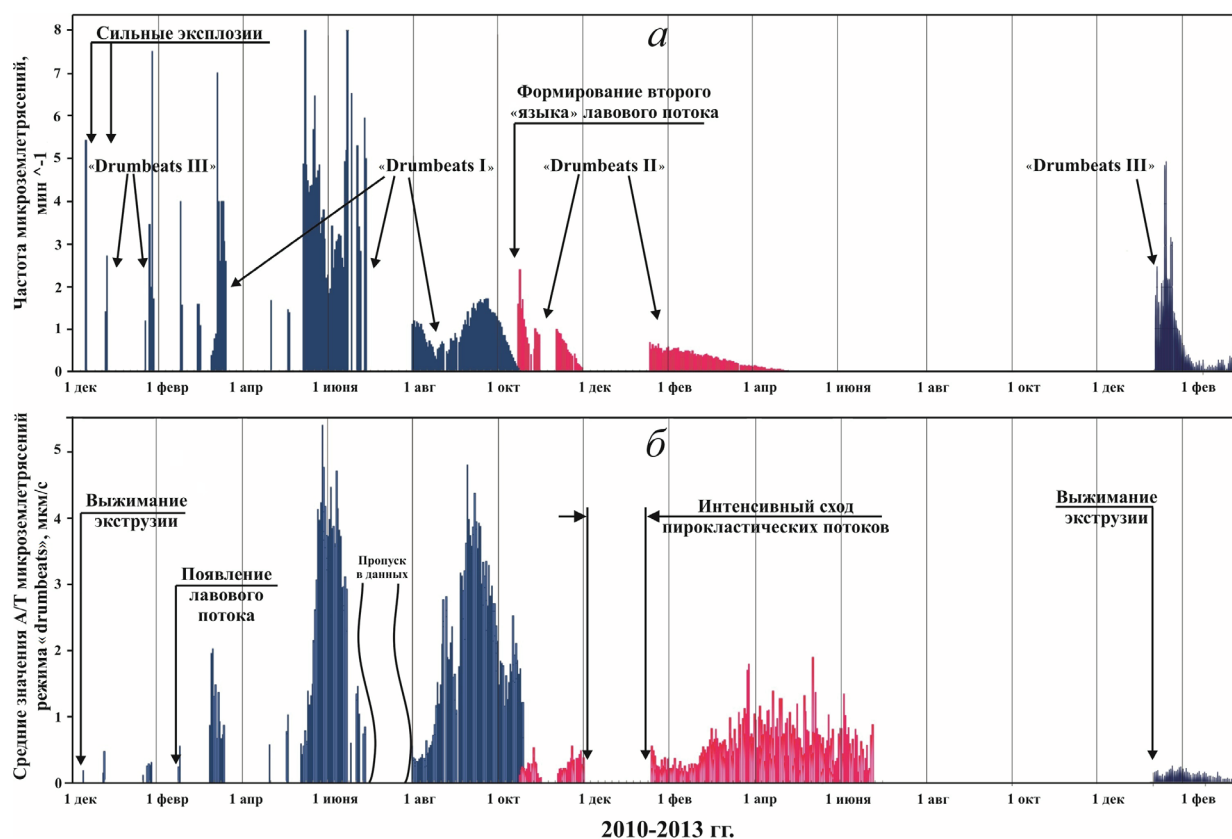
**Fig. 7.** Twenty-minute micro-earthquake recordings of three «drumbeats» modes on the seismic station «Kizimen»: а, г — «drumbeats III»; б — «drumbeats I»; в — «drumbeats II» against the background of «drumbeats I».



**Рис. 8.** Спектральная плотность мощности микроземлетрясений режима «drumbeats» в 2010-2011 гг. в Кизимен: а — 9 декабря 2010 г.; б — 23 сентября 2011 г.; в — 12 октября 2011 г.

**Fig. 8.** Power spectral density of micro-earthquakes of the «drumbeats» mode in 2010-2011 of Kizimen volcano: а — December 9, 2010; б — September 23, 2011; в — October 12, 2011.

## СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ «DRUMBEATS»



**Рис. 9.** Среднее количество числа ВЗ (а) и их среднее значение А/Т (б) в минутном интервале для режима «drumbeats» в период с 1 декабря 2010 г. по 23 февраля 2013 г. эффузивно-эксплозивного извержения вулкана Кизимен.

**Fig. 9.** The average number of volcanic earthquakes (a) and their average A/T (b) in the minute interval for the «drumbeats» mode from December 1, 2010 to February 23, 2013 of the effusive-explosive eruption of the Kizimen volcano.

Интенсивный мультиплет был зарегистрирован с 8 по 12 марта, когда количество событий стало быстро нарастать, 12 марта их было зарегистрировано  $\sim 7000$  с частотой  $\bar{f} = 1-7 \text{ мин}^{-1}$ . По-видимому, этот мультиплет предшествовал началу формирования «языка» мощного вязкого лавового потока на северо-восточном склоне конуса вулкана (Овсянников, Малик, 2011).

Длительный мультиплет был зарегистрирован с 13 мая по 12 июня, когда ВЗ с энергетическими классами  $K = 2.0-5.5$  возникали с квазипериодичностью от 8 до 50 секунд ( $\bar{f} = 1-8 \text{ мин}^{-1}$ ). Этот мультиплет завершился мощной эксплозией. При высокой частоте следования ВЗ, их запись иногда сливалась и напоминала спазматическое вулканическое дрожание. С конца июля по октябрь также регистрировались мультиплеты довольно сильных ВЗ с  $K = 4.0-5.5$  и  $\bar{f} \leq 2 \text{ мин}^{-1}$ , гипоцентры которых были локализованы по контуру лавового потока вблизи дневной поверхности (1-1.4 км н.у.м.). Этот факт дает основание рассматривать ВЗ этого

мультиплета как следствие продвижения вязкого лавового потока по склону вулкана. С 11 октября 2011 г. на фоне наблюдаемых ранее ВЗ (рис. 6в) начали регистрироваться более слабые микроземлетрясения с  $\bar{A} = 0.5 \text{ км/с}$  с  $\bar{f} < 2 \text{ мин}^{-1}$ , по-видимому, связанные с формированием второго «языка» лавового потока — «drumbeats II» (Фирстов, Шакирова, 2014).

В июне 2012 г. прекратилось выжимание лавового потока и началось формирование экструзивного купола в вершинной части вулкана, которое в начале 2013 г. также сопровождалось периодическим возникновением мультиплетов режима «drumbeats III» (рис. 7д).

### ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЕ РЕЖИМА «DRUMBEATS»

На основании записей землетрясений режима «drumbeats» и особенностей проявления этого сейсмического режима на качественном уровне было предложено несколько объяснений этого интересного явления, как правило,

связанного с выжиманием вязкой лавы в виде экструзивных куполов.

На вулкане Сент-Хеленс в период с 2004 по 2005 гг. было установлено, что землетрясения режима «drumbeats» связаны с выжиманием вершинной экструзии (Scott et al., 2008). В качестве модели очагов микроземлетрясений был рассмотрен механизм неустойчивой подвижки с трением (stick-slip), который показал приемлемые результаты. На основании данных комплекса геофизических методов была предложена математическая модель механической связи между экструзивным процессом и возникновением ВЗ режима «drumbeats».

В модели (Iverson et al., 2006) (рис. 10) на основании пространственного расположения очагов землетрясений, было принято: магма поступает под экструзивный купол с глубины 8 км с постоянной объемной скоростью  $2 \text{ м}^3/\text{с}$ . Вертикальный размер жесткой экструзивной части оценен в 0.5 км. Уровень основания экструзии относительно кратера мог меняться из-за поступления магмы с массовой скоростью:  $Q_m = \rho_m v_m$ , где  $\rho_m$  — плотность магмы,  $v_m$  — объемная скорость ее поступления,  $\text{м}^3/\text{с}$ . Сделано предположение, что масса экструзивной пробки плотностью  $\rho_e = 2 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ , не постоянна из-за ее разрушения в результате эксплозий. Для простоты расчетов было принято, что разница поступления магмы и массо-

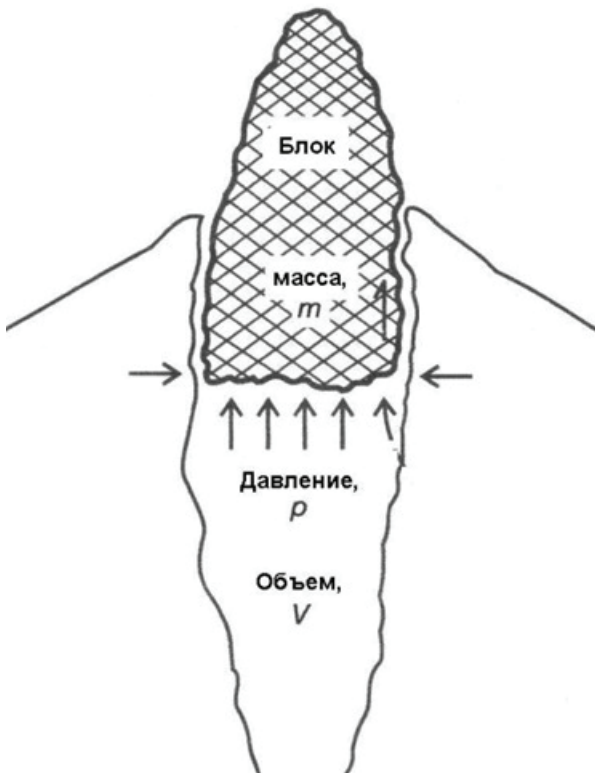


Рис. 10. Модель генерации режима «drumbeats» на в. Сент-Хеленс (Scott et al., 2008).

Fig. 10. «Drumbeats» mode generation model on St. Helens volcano (Scott et al., 2008).

вой скорости разрушения экструзии постоянна:  $K = \rho_m v_m - \rho_e v_e$ .

Таким образом,  $m = m_0 + Kti$ , где  $m_0$  — начальная масса пробки,  $t_i$  — текущее время. Оценка площади экструзии была сделана из следующих соображений: на основании геодезических данных скорость роста экструзии составляла  $7 \cdot 10^{-5} \text{ м}/\text{с}$ , тогда при принятой объемной скорости  $2 \text{ м}^3/\text{с}$ , площадь экструзии составила  $S = 3 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ . Это эквивалентно площади круга диаметром  $\sim 200 \text{ м}$ , что хорошо согласуется с результатами фотограмметрических данных (Scott et al., 2008). При этом было показано, что каждое отдельное землетрясение генерировало смещение экструзии на 5 мм (Iverson et al., 2006).

На вулкане Редаут при извержении 2009 г. было зарегистрировано несколько роевых последовательностей (Vuurman et al., 2013). Первый рой гибридных землетрясений связывался с продвижением к дневной поверхности газовой «шапки» перед внедряющимся магматическим телом. Четкие вступления Р и S-волн, наблюдавшиеся в первых двух роях (26 февраля и 20 марта), свидетельствовали о том, что происходило хрупкое разрушение постройки вулкана с образованием трещин и с дальнейшим внедрением газовой фазы. Подобные волновые формы, квазипериодически возникающих ВЗ, указывали на сейсмогенную область. Исходя из того, что данная сейсмичность предвещала извержение (Vuurman et al., 2013) сделали предположение, что в данном случае режим «drumbeats» возникал в результате разрушения геосреды перед медленно движущимся магматическим телом. Очаговая область низкочастотных землетрясений третьего роя (27 марта) имела явно другой более поверхностный источник, связанный с выжиманием экструзивного купола и мощной эксплозией. По мере увеличения скорости внедрения экструзии, возрастала и энергия землетрясений (с  $M = 0.7$  до  $M = 1.5$  за 6 часов). С увеличением скорости экструзивного процесса полностью дегазироваться магма не успевала, что приводило к эксплозивной активности. Следующая роевая последовательность (29 марта) характеризовалась меньшей энергией ВЗ, что дало основание сделать предположение, об уменьшении давления за счет расширения выводного канала (Vuurman et al., 2013)...канала (Vuurman et al., 2013).

На основании спутниковых данных было установлено, что третий лавовый купол появился 29 марта, одновременно с началом 4-роевой последовательности ВЗ (Power et al., 2013). Рост экструзии определялся следующими факторами. С одной стороны, он был обусловлен массовой скоростью подъема магмы по каналу, а с другой стороны зависел от влияния термодинамических условий на вязкость магмы. Эти два фактора спо-



способствуют установлению постоянства давления в канале, что прослеживается в эволюции волновых форм событий режима «drumbeats» от 3- к 4-роевой последовательности. По-видимому, условия возбуждения ВЗ менялись в связи с замедлением роста экструзивного купола, что может быть связано с изменением свойств геоматериала вблизи сейсмогенной области, а также с изменением ее местоположения (Vuurman et al., 2013).

ВЗ следующих роев (2 апреля и 2 мая) отличались более высокой частотой квазипериодичности ( $\sim 3 \text{ мин}^{-1}$ ) и меньшими энергиями. Образцы экструзивных пород для этого периода показали изменение вязкости и текстуры, свидетельствующие на выжимание магмы уже другого состава и при других термодинамических условиях (Vuurman et al., 2013).

*Рой землетрясений, зарегистрированный на вулкане Суффриере Хиллс.* В работе (White et al., 1996) механизм возникновения сейсмичности режима «drumbeats» представлен следующим образом. Под действием глубинного источника давление, которым может быть дегазация магмы, магматическая колонна осуществляет импульсное движение вверх, приводящее к временному его снижению. Этот процесс сопровождается возникновением мультиплетов ВЗ, предполагается, что они могут быть результатом дегазации верхней части магматической колонны через трещины. Об этом свидетельствуют временные изменения волновых форм и спектров ВЗ, которые могут возникать в результате изменения физических свойств геосреды из-за газообразования в верхней части колонны (White et al., 1998).

*Для вулкана Кизимен,* в отличие от описанных выше случаев, землетрясения режима «drumbeats» наблюдались как при выжимании экструзии, так и при движении вязкого лавового потока по склону вулкана.

Возникновение длительных мультиплетов указывает на стабильный механизм источника на достаточно длительных временных участках. Однако, после мощных обвалов и эксплозий частота следования и энергия землетрясений резко уменьшались, что указывало на падение сопротивления движению магмы к поверхности.

Разность времен прихода волн S-P на РТСС KZV, расположенной в 2.5 км от кратера, землетрясений режима «drumbeats» закономерно изменялась в течение всего извержения вулкана Кизимен и качественно указывала на изменение пространственного нахождения источников отдельных мультиплетов. В начале и при завершении извержения источником мультиплетов являлся процесс выжимания вершинной экструзии (drumbeats III). Движение вязкого лавового потока также сопровождалось генера-

цией землетрясений режима «drumbeats I» или «drumbeats II».

Причем ДЗ, в основном, регистрировались во время выжимания вершинной экструзии и при формировании второго «языка» лавового потока. В то время как ГЗ регистрировались при движении основного лавового потока на достаточном удалении от кратера, когда вязкость лавы должна была значительно увеличиться.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Начальная стадия экструзивных извержений андезитовых и дацитовых вулканов, как правило, сопровождается роевыми последовательностями ВЗ. В дальнейшем, как видно из обзора работ зарубежных коллег и исследований авторов статьи, при выжимании вершинной экструзии, иногда наблюдается сейсмический режим «drumbeats», характеризующийся возникновением мультиплетов ВЗ (квазипериодических землетрясений с почти постоянной энергией). Продолжительность мультиплетов может варьироваться от нескольких минут до десятков суток. Когда частота следования землетрясений возрастает, их сейсмическая запись сливается, напоминая спазматическое вулканическое дрожание. По форме записи землетрясения режима «drumbeats», как правило, относятся или к ГЗ или к ДЗ, с преобладающими частотами в диапазоне 0.3–7 Гц.

В настоящей работе детально не рассматривается разница режимов «drumbeats» на предваряющей и сопровождающей стадиях экструзивных извержений андезитовых и дацитовых вулканов. В дальнейшем планируется выполнить эту работу для извержения вулкана Кизимен, по которому есть обширный сейсмический материал на протяжении всего периода извержения.

Зарубежные коллеги рассматривают две модели механизма источника режима «drumbeats». В первой — предлагается механизм возникновения микроземлетрясений за счет переходного процесса, обусловленного давлением в резонирующей трещине шириной несколько сантиметров (Vuurman et al., 2013). Во второй модели источником микроземлетрясений рассматривается резонирующий участок магматического канала шириной несколько десятков метров и длиной несколько сотен метров (Scott et al., 2008). Не исключено, что возникновение мультиплетов следует рассматривать как процесс автоколебаний релаксационного типа. Эта идея требует детальной проработки, которую авторы планируют осуществить в дальнейшем.

Режим «drumbeats» является уникальным индикатором физических процессов, сопровождающих выжимание вязкой магмы и его пара-

метры могут быть весьма полезны для изучения физики экстремальных извержений и предсказания развития вулканической активности.

В заключение авторы выражают благодарность В.М. Зобину за конструктивную критику, способствующую лучшему изложению материала.

Работа выполнялась в рамках государственного задания по проекту АААА-А19-119031590060-3.

#### Список литературы [References]

- 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. 112–126 [*Gordeev E.I., Senyukov S.L.* Renewal of seismic activity on Koryaksky volcano in 1994: hybrid seismic events and their use for volcanic hazard assessment // *Journal of Volcanology and Seismology*. 1999. V. 20. Is. 4–5. P. 507–524].
- Горшков Г.С.* Сейсмические наблюдения в 1949 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1954а. № 21. С. 19–39 [*Gorshkov G.S.* Seismic observations in 1949 // *Bulletin of volcanological stations*. 1954а. № 21. P. 19–39].
- Горшков Г.С.* Вулканическое дрожание, связанное с прорывом кратера Былинкиной // Бюллетень вулканологических станций. 1954б. № 23. С. 33–37 [*Gorshkov G.S.* Volcanic tremor associated with the breakthrough of the crater Bylinkina // *Bulletin of volcanological stations*. 1954б. № 23. P. 33–37].
- Иванов Б.В.* Андезиты Камчатки. М.: Наука, 2008. 467 с. [*Ivanov B.V.* Andesites of Kamchatka. M.: Science, 2008. 467 p.].
- Мелекестев И.В., Пономарева В.В., Волынец О.Н.* Вулкан Кизимен (Камчатка) — будущий Сент-Хеленс? // Вулканология и сейсмология. 1992. №4. С. 3–32. [*Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Volynets O.N.* Kizimen volcano, Kamchatka — a future Mount St. Helens? // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. V. 65. Iss. 3–4. P. 205–226. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)00082-R](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)00082-R)].
- Овсянников А.А., Малик Н.А.* Тephра извержения вулкана Кизимен в декабре 2010 г. – феврале 2011 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Матер. региональной конференции 30 марта – 1 апреля. 2011 г. Петропавловск-Камчатский. С. 57–61 [*Ovsyannikov A.A., Malik N.A.* Tephra of the Kizimen volcano eruption in December 2010 – February 2011 // *Volcanism and related processes. Materials of Regional Conference March 30 – April 1. 2011. Petropavlovsk-Kamchatsky*. P. 57–61].
- Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы (1949–1963 гг.). М: Наука, 1966. 104 с. [*Tokarev P.I.* Eruptions and seismic regime of the Klyuchevskaya group volcanoes (1949–1963). M: Science, 1966. 104 p].
- Фирстов П.П., Шакирова А.А.* Особенности сейсмичности в период подготовки и в процессе извержения вулкана Кизимен (Камчатка) в 2009–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 4. С. 3–20. [*Firstov P.P., Shakirova A.A.* Features of seismicity during the preparation and in the process of the Kizimen volcano eruption (Kamchatka) in 2009–2013 // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2014. Iss. 4. P. 3–20. <https://doi.org/10.7868/S0203030614040026>].
- Шакирова А.А.* Режим «drumbeats» во время извержения вулкана Кизимен в 2011 г. // Исследования в области наук о Земле. Матер. IX региональной молодежной научной конференции 1–2 декабря. 2011. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2011. С. 201–212 [*Shakirova A.A.* The «drumbeats» mode during the eruption of the Kizimen volcano in 2011 // *Research in the field of Earth Sciences. Proceedings of the IX Regional Youth Scientific Conference December 1–2. 2011. Petropavlovsk-Kamchatsky. Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS*, 2011. P. 201–212].
- 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: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2012. С. 127–139 [*Shakirova A.A.* Kizimen volcano lava flow as a generator of the «drumbeats» mode // *Research in the field of Earth sciences. Proceedings of the X Regional Youth Scientific Conference November 28–29. 2012. Petropavlovsk-Kamchatsky. Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS*, 2012. P. 127–139].
- Шанцер А.Е., Кутыев Ф.Ш., Петров В.С. и др.* Вулкан Кизимен // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 18–23. [*Shantser A.E., Kutiev F.Sh., Petrov V.S. et al.* Kizimen Volcano // *Active volcanoes of Kamchatka*. V. 2. Science. 1991. P. 18–23].
- Auer A., Belousov A., Belousova M.* Deposits, petrology and mechanism of the 2010–2013 eruption of Kizimen volcano in Kamchatka, Russia // *Bulletin of volcanology*. 2018. V. 80. Iss. 4. Article 33. <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1199-z>.
- Bogoyavlenskaya G.E., Braitseva O.A., Melekestsev I.V. et al.* Catastrophic eruptions of the directed-blast type at Mount St. Helens, Bezymianny and Shiveluch volcanoes // *Journal of Geodynamics*. 1985. № 3. P. 189–218.
- Bull K.F., Anderson S.W., Diefenbach A.K. et al.* Emplacement of the final lava dome of the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. V. 259. P. 334–348.
- Buurman H., West M.E., Thompson G.* The seismicity of the 2009 Redoubt eruption // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. V. 259. P. 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.04.024>
- Carlisle C.J.* Pattern recognition in earthquake swarms from the 2009 eruption of Redoubt volcano, Alaska // A thesis submitted in partial fulfillment of the degree of

- Master of Science in Geophysics Boise State University. 2013. 82 p.
- Cornelius R.R., Voight B.* Seismological aspects of the 1989–1990 eruption at Redoubt Volcano, Alaska: the Materials Failure Forecast Method with RSAM and SSAM seismic data // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1994. V. 62. P. 469–498. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90048-5](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90048-5).
- Endo E.T., Malone S.D., Nosen L.L. et al.* Locations, magnitudes, and statistics of the March 20–May 18 earthquake sequence // *The 1980 Eruptions of Mount St. Helens, Washington*. U.S. Geological Survey. 1981. Prof. Pap. 1250. P. 93–107.
- Fremont M., Malone S.D.* High precision relative location of earthquakes at Mount St. Helens, Washington // *Journal of Geophysical Research*. 1987. V. 92. P. 10223–10236.
- Garcia A.A., Kumagai H., Samaniego P. et al.* Seismic, petrologic, and geodetic analyses of the 1999 dome-forming eruption of Guagua Pichincha volcano, Ecuador // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2007. V. 161. P. 333–351. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.12.007>.
- Horton S.P., Norris R.D., Moran S.C.* Broadband characteristics of earthquakes recorded during a dome-building eruption at Mount St. Helens, Washington, between October 2004 and May 2005 // *A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, 2004–2006*. U.S. Geological Survey Professional Paper. 2008. Ch. 5. P. 97–110.
- Iverson M.R., Dzurisin D., Gardner C.A. et al.* Dynamics of seismogenetic volcanic extrusion at Mount St Helens in 2004–2005 // *Nature*. 2006. V. 444. P. 439–443. <https://doi.org/10.1038/nature05322>.
- McNutt S.R.* Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: A review of the state-of-the-art and case histories. *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, Eds. R. Scarpa and R. Tilling. Springer-Verlag, Berlin New York. 1996. P. 99–146.
- Miller A.D., Stewart R.C., White R.A. et al.* Seismicity associated with dome growth and collapse at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat // *Geophysical research letters*, 1998. V. 25. № 18. P. 3401–3404.
- Minakami T.* Fundamental research for predicting volcanic eruption. Part 1 // *Bull. Earthq. Res. Inst.* 1960. V. 38. P. 497–544.
- Moran S.C., McChesney P.J., Lockhart A.B.* Seismicity and Infrasound Associated with Explosions at Mount St. Helens, 2004–2005 // *A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, 2004–2006*. U.S. Geological Survey Professional Paper. 2008a. Ch. 6. P. 111–127.
- 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*. U.S. Geological Survey Professional Paper. 2008. Ch. 2. 2008b. P. 27–60.
- Murphy M.D., Sparks R.S., Barclay J. et al.* Remobilization of Andesite Magma by Intrusion of Mafic Magma at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, West Indies // *Journal of Petrology*. 2000. V. 41. № 1. P. 21–42. <https://doi.org/10.1093/petrology/41.1.21>.
- Power J.A., Lahr J.C., Page R.A. et al.* Seismic evolution of the 1989–1990 eruption sequence of Redoubt Volcano, Alaska // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1994. V. 62. P. 69–94. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0377-0273(94)90029-9).
- Power J.A., Stihler S.D., Chouet B.A. et al.* Seismic observations of Redoubt Volcano, Alaska — 1989–2010 and a conceptual model of the Redoubt magmatic system // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. V. 259. P. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.09.014>.
- Robertson R.E.A., Aspinall W.P., Herd R.A. et al.* The 1995–1998 eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2000. P. 1619–1637. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0607>.
- Scott W.E., Sherrod D.R., Gardner C.A.* Overview of the 2004 to 2005, and continuing, eruption of Mount St. Helens, Washington // *A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, 2004–2006*. US Geological Survey Professional Paper. 2008. P. 3–22.
- Siebert L., Simkin T., Kimberly P.* *Volcanoes of the world* // University of California Press. Berkeley and Los Angeles. Third Edition. 2010. 551 p.
- Sparks R.S.J., Young S.R., Barclay J. et al.* Magma production and growth of the lava dome of the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, West Indies: November 1995 to December 1997 // *Geophysical research letters*. 1998. V. 25. № 18. P. 3421–3424. <https://doi.org/10.1029/98GL00639>.
- Sparks R.S.J., Young S.R.* The eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat (1995–1999): overview of scientific results // *Geological Society. London. Memoirs*. 21. 2002. P. 45–69. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2002.021.01.03>.
- Swanson D.A., Holcomb R.T.* Regularities in Growth of the Mount St. Helens Dacite Dome, 1980–1986 // *IAVCEI Proceedings in Volcanology book series*. V. 2. *Lava Flows and Domes*. 1990. P. 3–24.
- White R.A., Miller A.D., Lynch L. et al.* Observations of hybrid seismic events at Soufriere Hills Volcano, Montserrat: July 1995 to September 1996 // *Geophysical research letters*. 1998. V. 25. № 19. P. 3657–3660. <https://doi.org/10.1029/98GL02427>.
- Zobin V.M.* *Introduction to volcanic seismology*. First edition. Elsevier. V. 6. 2003. 302 p.
- Zobin V.M.* *Introduction to volcanic seismology*. Second edition. Elsevier: London, 2012. 474 p.
- Zobin V.M.* *Introduction to volcanic seismology*. Third edition. Elsevier: Amsterdam, 2017. 559 p.



**SEISMIC MODE «DRUMBEATS»: PROMOTING AND SUPPORTING ERUPTION OF ANDESITIC AND DACITIC VOLCANOES AND THEIR FEATURES (OVERVIEW)**

**P.P. Firstov, A.A. Shakirova**

*Kamchatka branch of the federal research center «United geophysical survey, RAS»,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

During extrusive eruptions of andesitic and dacitic volcanoes, in some cases, squeezing of viscous lava was accompanied by the occurrence of «drumbeats» earthquakes. The peculiarities of this earthquake regime are: their close energies, similarity of wave forms, and quasi-periodicity over a long period of time (from several hours to months). The article provides an overview of the micro-earthquakes of the regime «drumbeats» recorded on several volcanoes of our planet during the extrusion of extrusive domes: Redout (the Aleutian Islands), St. Helens (the Cascade Mountains, North America), Soufriere Hills (Montserrat Island, the Lesser Antilles), Pichincha (the Andes, South America). During the eruption of Kizimen Volcano (Kamchatka Peninsula) in 2010–2013 the «drumbeats» mode was observed during the movement of a viscous lava flow. According to the record form, earthquakes of the «drumbeats» regime refer to hybrid or long-period earthquakes, with prevailing frequencies within the range of 0.3–7 Hz.

*Keywords: volcano, earthquake, seismicity, drumbeats, lava flow, extrusive dome.*