

УДК 550.34

Один из возможных механизмов генерации сейсмического режима “drumbeats” при движении по склону вязкого лавового потока вулкана Кизимен в 2011–2012 гг.

© 2020 г. А.А. Шакирова¹, П.П. Фирстов¹, М.В. Лемзиков²

¹КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия;

²ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация. Режим “drumbeats” («барабанный бой») – необычный сейсмический режим, состоящий из вулканических землетрясений с однообразными волновыми формами (мультиплеты), которые регистрируются от десятков минут до месяцев. За квазирегулярность возникновения землетрясений режим и получил такое название. Режим “drumbeats” регистрируется при выжимании отдельных блоков на экструзивных куполах андезитовых и дацитовых вулканов мира и возникает при устойчивых равновесных состояниях в системе канал-магма во время извержения. Впервые в мировой практике вулканологических исследований был зарегистрирован режим “drumbeats”, сопровождающий движение вязкого лавового потока объёмом 0.3 км³ извержения вулкана Кизимен в 2010–2013 гг. В работе рассмотрены кинематические и динамические параметры микроземлетрясений режима “drumbeats”, механизмы их очагов и предложена феноменологическая модель генерации режима “drumbeats”, возникающего при движении лавового потока по склону вулкана Кизимен.

Ключевые слова: вулкан, drumbeats, очаг, stick-slip, лавовый поток, гибридное землетрясение, Кизимен, модель.

Для цитирования: Шакирова А.А., Фирстов П.П., Лемзиков М.В. Один из возможных механизмов генерации сейсмического режима “drumbeats” при движении по склону вязкого лавового потока вулкана Кизимен в 2011–2012 гг. // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 3. – С. 43–56. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.04>

Введение

Режим “drumbeats” – это последовательности вулканических землетрясений (ВЗ) с однообразными волновыми формами (мультиплеты), которые регистрируются от десятков минут до месяцев. ВЗ регистрируются с необычной квазирегулярностью, за что режим и получил название “drumbeats” (барабанный бой) [Iverson *et al.*, 2006]. Данный сейсмический режим довольно редко регистрируется при выжимании отдельных блоков на экструзивных куполах андезитовых и дацитовых вулканов мира [Фирстов, Шакирова, 2019]. Режим “drumbeats” был зарегистрирован при экструзивно-эксплозивных извержениях на вулканах, расположенных в различных частях света: Сент-Хеленс (Каскадные горы, Северная Америка) в 1982 г. [Swanson, Holcomb, 1990] и 2004–2005 гг. [Moran *et al.*, 2008]; Редутский (Алеутские острова) в 1989 и 2009 гг. [Power

et al., 1994; Cornelius, Voight, 1994; Buurman *et al.*, 2013]; Суфриере Хиллс (остров Монтсеррат, Малые Антильские острова) в 1995–1997 гг. [Robertson *et al.*, 2000; Sparks, Young, 2002]; Пичинча (Западные Кордильеры, Южная Америка) в 1999 г. [Garcia *et al.*, 2007]; Сент-Огастин (Аляска, о. Августин) в 2004 и 2005 гг. [Buurman, West, 2010]; Ревентадор (Восточные Анды, Эквадор) в 2004–2005 гг. [Lees *et al.*, 2008]; Тунгурауа (Анды, Эквадор) в 2015 г. [Hall *et al.*, 1991; Bell *et al.*, 2017]. Во время извержения вулкана Кизимен в 2010–2013 гг. при движении мощного вязкого лавового потока по склону вулкана (полуостров Камчатка) впервые в мировой практике вулканологических исследований был зарегистрирован режим “drumbeats” [Фирстов, Шакирова, 2014].

Вулкан Кизимен (2485 м) – действующий стратовулкан корово-мантийного питания, расположенный в восточной части Щапинского

грабена Центральной Камчатской депрессии (рис. 1а). Состав продуктов извержений от дацитов до андезитобазальтов [Иванов, 2008]. Извержение, начавшееся в ноябре 2010 г. после 82 лет покоя вулкана Кизимен, является первым подкреплённым сейсмологическими наблюдениями его извержением. Извержению предшествовала длительная сейсмическая подготовка в течение более полутора лет. Вялотекущая сейсмичность свидетельствует об очень вязкой и мало газированной магме, которая медленно продвигалась к дневной поверхности [Auer et al., 2018].

Характер извержения — эксплозивно-экструзивно-эффузивный [Двигало и др., 2013]. В начальной стадии извержение носило эксплозивный характер, эксплозии сопровождалось схождением пирокластических потоков. Далее, в феврале 2011 г., начал выжиматься лавовый поток [Овсянников, Малик, 2011]. Завершилось извержение выжиманием вершинной экструзии. Продукты извержения 2010–2013 гг. представлены полосатым дацитом и андезитом с высоким содержанием кремнезёма [Auer et al., 2018].

Лавовый поток выжимался на протяжении двух лет. За шесть месяцев, с марта 2011 г., он спустился к подножию вулкана и имел длину 2.5 км (рис. 1б) при максимальной мощности фронтальной части 150 м. К моменту остановки потока он состоял из двух «языков», достиг длины 3.5 км (каждый «язык» — длиной 1 км) и имел максимальную мощность 232 м (рис. 1в). Морфология лавового потока и его низкая скорость движения указывали на чрезвычайно высокую

вязкость 10^{10} – 10^{11} Па·с с пределом текучести $3.3 \cdot 10^6$ Н/м². Объем лавового потока, образовавшегося в результате извержения, составил 0.3 км³ (рис. 1в) [Auer et al., 2018].

Необычно высокая вязкость может быть связана с длительной дегазацией летучих из магматического очага в результате фумарольной деятельности на вершине и склонах вулкана (единственное извержение вулкана Кизимен, отмеченное в историческое время, произошло в 1928–1929 гг. [Puñin, 1946]). Дегазация летучих, в которых на долю H₂O приходится до 98%, вызывает значительное увеличение её вязкости [Auer et al., 2018].

Выжимание и движение вязкого лавового потока на протяжении 2011–2012 гг. сопровождалось мультиплетами микроземлетрясений режима “drumbeats” с энергетическими классами $K_s < 6.3$ ($K_s = \lg(E, Дж)$), определённый по поперечной волне S), которые регистрировались непрерывно от десятков минут до месяцев [Фирстов, Шакирова, 2014].

В данной работе рассмотрены микроземлетрясения режима “drumbeats” в наиболее активную фазу извержения в июле–октябре 2011 г., когда регистрировался мультиплет сравнительно сильных гибридных микроземлетрясений (ГЗ) (около 200 тыс.) с $K_s = 4.0$ – 6.3 со средней частотой их следования $f \leq 2$ мин⁻¹ (рис. 2а, б), а также предложен механизм генерации землетрясений, основанный на особенностях течения вязкого лавового потока.

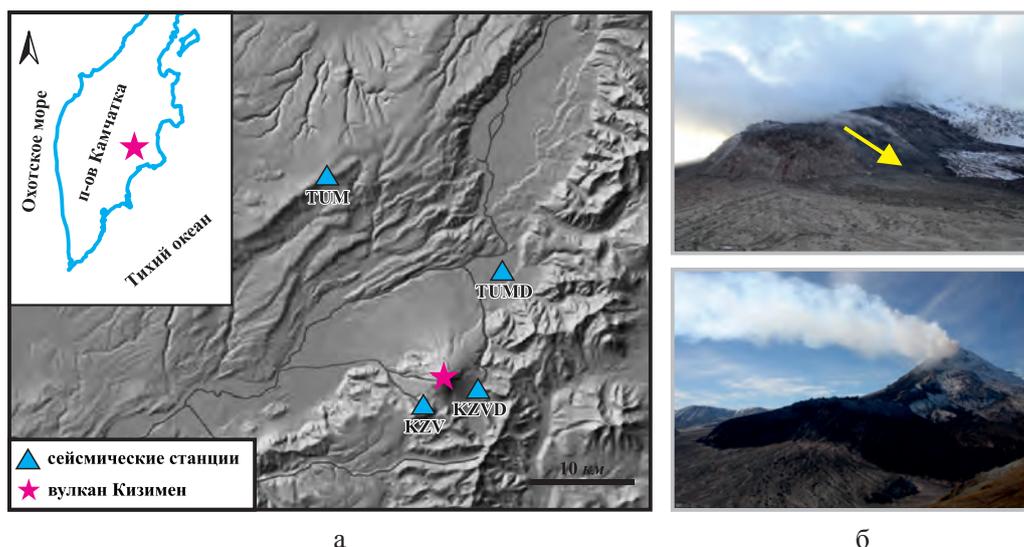


Рис. 1. Расположение вулкана Кизимен на Камчатке (а). Фронт лавового «языка» потока по состоянию на 14 сентября 2011 г. Фото В.В. Яшука (б). Стрелкой показано направление движения второго «языка» потока. Два «языка» потока по состоянию на 20 сентября 2012 г. Фото А.А. Шакировой (в).

Карта взята из [Двигало и др., 2013]

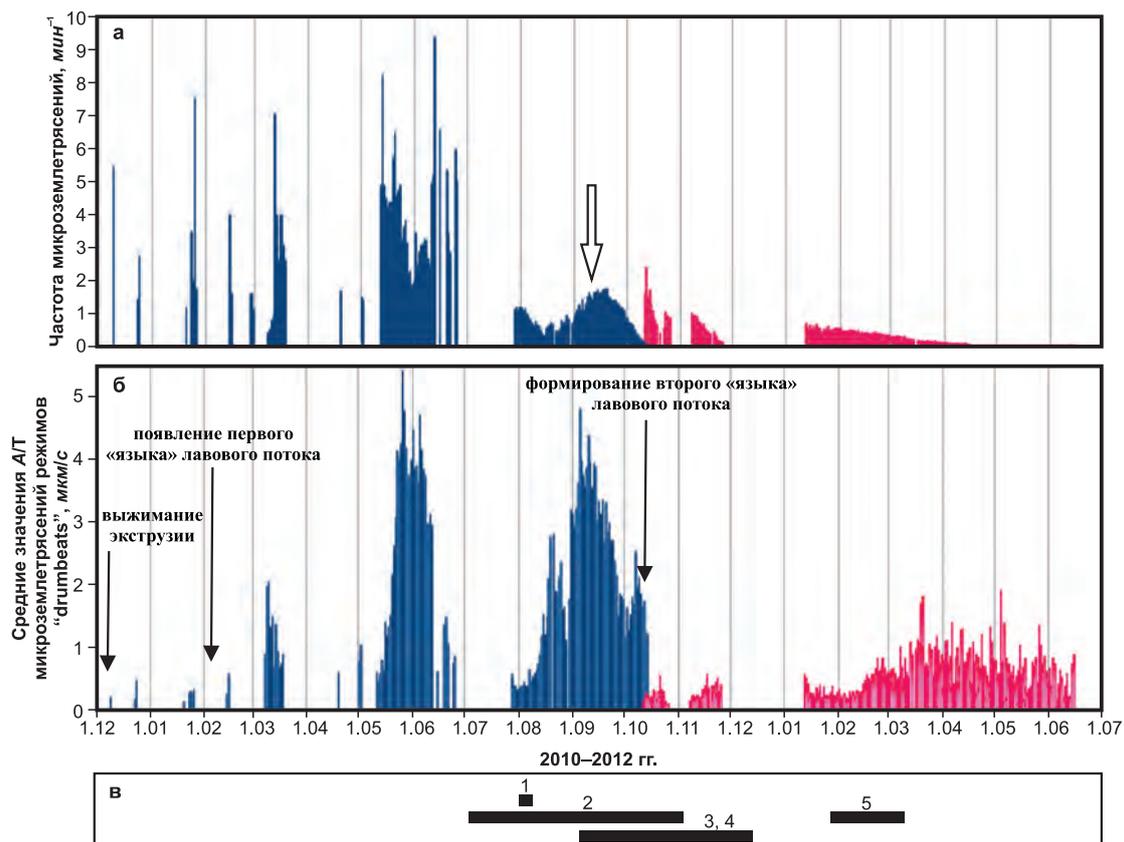


Рис. 2. Среднечасовая частота микроземлетрясений в минуту (а) и среднечасовое значение A/T (б) в период с 1 декабря 2010 г. по 1 июля 2012 г. эффузивно-эксплозивного извержения вулкана Кизимен, временные интервалы, для которых была определена средняя скорость движения лавового потока в работе [Auer et al., 2018] (в). Стрелкой показан период, когда определялись параметры очагов микроземлетрясений "drumbeats"

Стрелкой показан период, когда определялись параметры очагов микроземлетрясений "drumbeats"

Особенности землетрясений режима "drumbeats" на вулкане Кизимен

Впервые микроземлетрясения режима "drumbeats" были зарегистрированы за несколько часов до эксплозии 9 декабря 2010 г. и сопровождали выжимание старого экструзивного купола в вершинной части вулкана. Далее, в начале 2011 г., мультиплеты слабых ВЗ регистрировались периодически и сопровождали формирование фронта лавового потока. Начиная с мая 2011 г., среднечасовые значения амплитуды скорости смещения грунта A/T микроземлетрясений стали возрастать (рис. 2а, б). С конца июля в мультиплетях стали преобладать гибридные землетрясения (ГЗ), которые характеризуются чёткими вступлениями P - и S -волн, с более низкочастотной кодой волн (рис. 3а, б) [Шакирова, Фирстов, 2019]. Наиболее сильные из них регистрировались тремя ближайшими к вулкану сейсмическими станциями КФ ФИЦ ЕГС РАН – KZV, TUM, TUMD (рис. 1а), что дало возможность определять их гипоцентры.

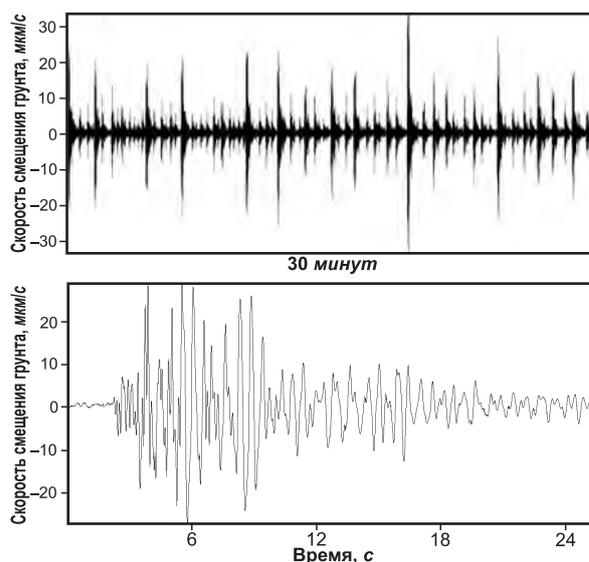


Рис. 3. Микроземлетрясения режима "drumbeats", зарегистрированные 5 сентября 2011 г. сейсмостанцией KZV, канал SHZ, начало отсчёта времени соответствует 08:15:10 (а). Гибридное землетрясение 5 сентября 2011 г. в 08:58:27 (KZV, канал SHZ) (б)

Пространственное положение очагов землетрясений режима “drumbeats”

Из мультиплета июль-октябрь 2011 г. за период 4–7 сентября 2011 г. (период показан стрелкой на рис. 2а) для 60 ГЗ с чёткими вступлениями P - и S -волн на трёх ближайших сейсмических станциях (KZV – в 2.5 км от вершины, TUMD – в 6 км, TUM – в 20 км) были определены координаты очагов. В КФ ФИЦ ЕГС РАН при массовом определении координат очагов района вулкана Кизимен использовался региональный годограф [Сенюков, 2004], в скоростной модели которого отсутствовала глубина выше уровня моря. С целью определения координат очагов землетрясений режима “drumbeats”, происходящих на дневной поверхности склона вулкана Кизимен, этот годограф был не приемлем. Перед авторами стоял выбор между двумя существующими годографами, имеющими в скоростной модели глубины выше уровня моря (вулкан Авачинский и Северной группы вулканов, табл. 1). В связи с морфологической близостью строения вулканов Кизимен и Авачинский предпочтение было отдано скоростной модели Авачинского вулкана.

Обработка записей сейсмических событий производилась с использованием интерактивной программы DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010], которая предназначена для детальной обработки и визуального анализа цифровых сейсмических сигналов.

Облако определённых эпицентров образовало эллипс с осями 1×2 км, вытянутый в юго-восточном направлении и соприкасающийся с контуром лавового потока на это время (рис. 4а). Это направление совпадает с направлением на самую далёкую РТСС TUM, расположенную в 20 км от вулкана. Была осуществлена оценка среднеквадратичной ошибки определения координат эпицентров ВЗ с $6.5 < K_s < 9.9$ на основании сравнения определений очагов землетрясений тремя ближайшими и всей сетью РТСС, которая составила по широте 0.7 км, а по долготе 2.9 км. Поэтому можно предположить, что отклонение эпицентров от контура лавового потока может быть связано с ошибкой их определения. В то же время на вертикальном разрезе все очаги землетрясений с глубиной $(-1.4) \pm 0.5$ км группируются вблизи дневной поверхности склона вулкана (рис. 4б).

Для более точной локализации очагов землетрясений режима “drumbeats” вблизи фронта потока 29 апреля 2012 г. была установлена временная сейсмическая станция KZVD (рис. 1а)

на базе широкополосного акселерометра CMG-5TD. Так как с вулканом Кизимен возможно только вертолётное сообщение, станция смогла проработать в течение двух часов. Однако удалось зарегистрировать три микроземлетрясения режима “drumbeats” с $t_{s-p} \sim 0.5$ с и $K_s = 4.2 - 4.9$, для которых были определены параметры гипоцентров. Эпицентры двух землетрясений располагались на 500 м севернее границы лавового потока, а эпицентр одного землетрясения совпал с границей. Очаги всех трёх землетрясений были расположены вблизи контура рельефа на высоте $(-1.3) - (+0.7)$ км [Шакирова, 2012].

Все эти факты с большой долей уверенности дают основание рассматривать возникновение ГЗ мультиплета 4–7 сентября 2011 г. как результата движения вязкого лавового потока по склону вулкана.

Особенности механизмов очагов землетрясений режима “drumbeats”

Очаг землетрясения – разрыв сплошности среды, возникающий под действием накопленных сдвиговых напряжений, которые происходят в процессе деформирования геосреды. Его параметры несут информацию о геометрии и выделившейся энергии сейсмического источника. С 60-х гг. прошлого века известен и широко применяется в настоящее время метод определения механизма очага землетрясения по поляризации первых вступлений сейсмических волн [Введенская, 1969]. Как правило, требуется не менее десяти записей землетрясений, чтобы получить приемлемую диаграмму фокусного механизма, при этом сейсмостанции должны быть географически равномерно распределены вокруг эпицентра. Однако в нашем случае могли быть использованы записи слабых землетрясений с магнитудой $M \approx 1$ только с трёх РТСС, расположенных вокруг вулкана Кизимен.

Для определения механизма очагов по редкой сети разработана методика на основе следующего допущения, что механизм ВЗ в течение периода наблюдения близок за счёт однородности тензора напряжения в блоке геосреды, включающем постройку вулкана и ближайшие окрестности. Таким образом, объединяя данные нескольких слабых ВЗ, определяется обобщённый механизм их очагов. Использовался алгоритм известной программы FPFIT [Reasenber, Oppenheimer, 1985] вместе с некоторыми дополнительно разработанными алгоритмами, детализирующими и уточняющими нахождение параметров механизмов очагов землетрясений [Лемзиков М., Лемзиков В., 2015; Лемзиков В., Лемзиков М., 2016].

Таблица 1. Скоростные модели, заложенные в годограф Авачинского вулкана и Северной группы вулканов

Вулкан Авачинский			Северная группа вулканов		
Интервалы глубин, км					
Выше уровня моря	0–4	4–7	Выше уровня моря	0–4.5	4.5–9.5
Скорость сейсмических волн, км/с					
$V_p=3.00$ $V_s=1.85$	$V_p=2.0-3.5$ $V_s=2.5-5.0$	$V_p=5.0-6.0$ $V_s=2.9-3.5$	$V_p=2.95$ $V_s=1.71$	$V_p=2.90-4.30$ $V_s=1.60-2.49$	$V_p=5.9-6.2$ $V_s=3.4-3.5$

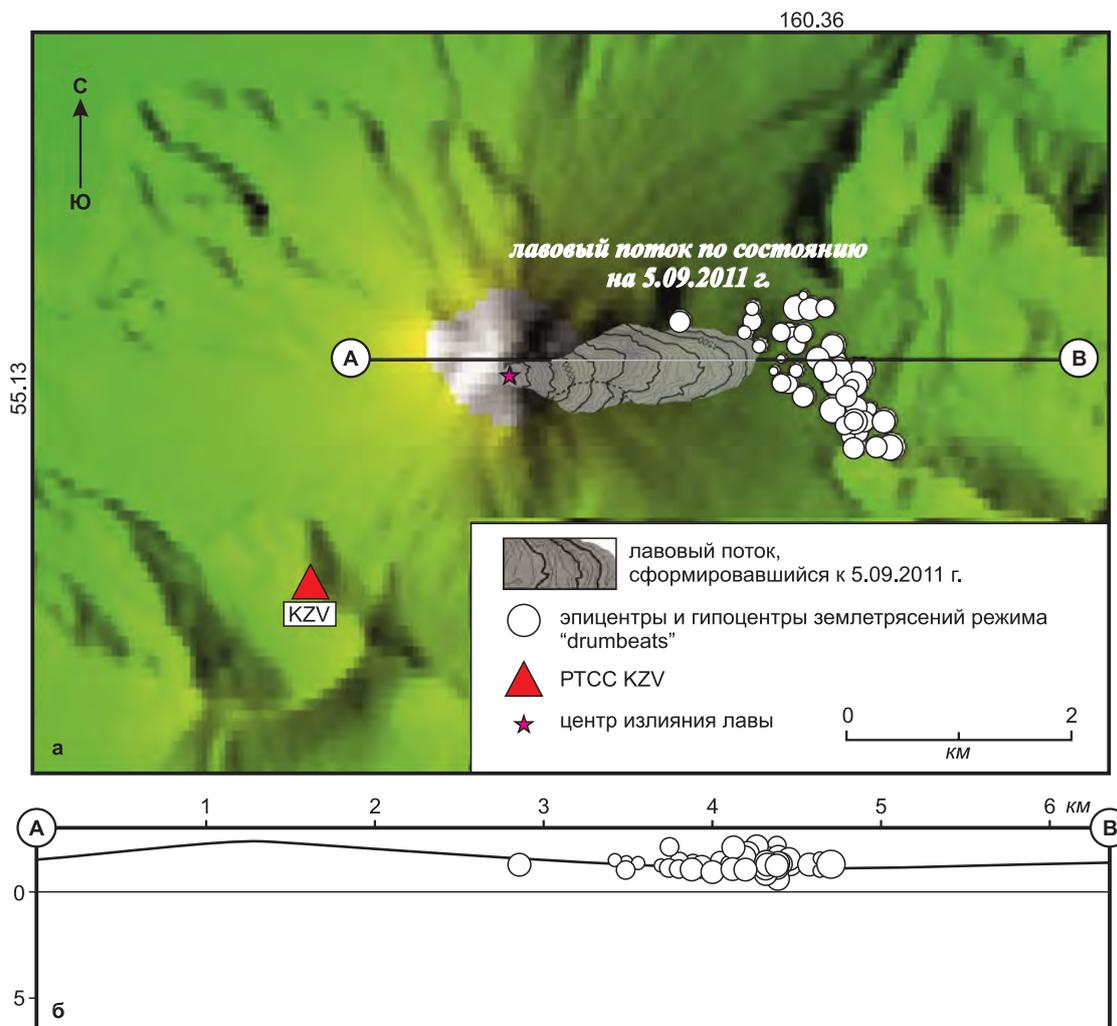


Рис. 4. Эпицентры микроземлетрясений режима "drumbeats", зарегистрированные в период 4–7 сентября 2011 г. (а) и проекция эпицентров землетрясений вдоль линии АВ (б)

В компьютерной программе FMSI [Gephart, 1990] заложено предположение об однородности тензора напряжения в блоке геосреды, а также алгоритм инвертирования, который минимизирует несоответствие между теоретическим направлением сдвига в плоскости разлома и полученным направлением главной нодальной плоскости механизма очага землетрясения. За теоретическое направление сдвига принимается любая геометрия разлома. Таких геометрий

разлома может быть бесконечное количество, однако для практических целей она определяется пространственным положением ослабленной зоны среды, рядом или непосредственно в которой были выбраны исходные данные. Затем составляется матрица преобразований между полученными и теоретическими направлениями сдвига и вычисляется значение несоответствия параметра R . При любых геометриях направлений сдвига имеется минимальное значение R_{min} .

Окончательная величина несоответствий вычисляется по сумме отдельных несоответствий по выборке главных нодальных плоскостей механизмов очагов землетрясений. Самый маленький угол вращения осей по выборке полученных механизмов, приводящий к наилучшему совпадению полученной плоскости разлома с теоретическим сдвиговым напряжением, и является определяющим для выбора механизма очага [Лемзиков В., Лемзиков М., 2016].

Для определения механизма очага ВЗ вулкана Кизимен использовались знаки первых вступлений P -волн, координаты определённых очагов, эпицентральные расстояния и азимуты из очага на станцию, а также углы выхода сейсмических волн. Вычисления углов выхода выполнялись с использованием скоростной модели среды, которая была рассмотрена выше.

Рассмотрим распределение параметров механизмов очагов для всей выборки землетрясений за 4–7 сентября. Все очаги землетрясений имеют почти одинаковые углы плоскости разрыва δ в диапазоне $52\text{--}78^\circ$ (рис. 5б) с преобладающими азимутами простираения в $270\text{--}330^\circ$ (рис. 5в), что свидетельствует о преобладании движения в северо-восточном направлении, в дальнейшем в этом направлении и начал

двигаться второй лавовый «язык» (рис. 1б). Из направления подвижки следует, что в механизмах преобладают правосторонние взбросы и сбросы, а также правосторонний наклонный сдвиг.

Генерация режима “drumbeats” движением лавового потока

В работе [Auer et al., 2018] приведена оценка скорости движения отдельных реперных точек на поверхности и на фронте лавового потока, которая производилась на основании снимков видеокамеры с РТСС TUMD и спутника ASTER, для пяти временных интервалов. Также для этих периодов сделана оценка вязкости лавы (табл. 2).

Средняя скорость движения лавового потока определялась для пяти временных участков двумя способами (табл. 1) [Auer et al., 2018]. Скорость по поверхности потока рассчитывалась с использованием последовательностей изображений, полученных с видеокамеры РТСС TUMD, когда в качестве реперной точки выбирался хорошо выраженный блок на поверхности потока (№ 1, 5 в табл. 2). По снимкам спутника ASTER вычислялась скорость движения фронта потока [Auer et al., 2018].

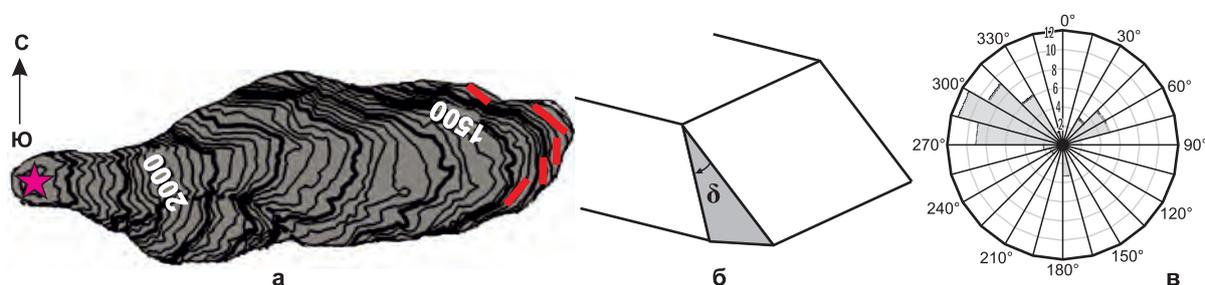


Рис. 5. Схема лавового потока на вулкане Кизимен на 5 сентября 2011 г. [Двигалю и др., 2013] (а), угол плоскости разрыва очага землетрясения (б), диаграмма азимутов простираения нодальных плоскостей разрывов в очагах землетрясений режима “drumbeats” 4–7 сентября 2011 г. (в).

Красными линиями выделены основные направления фронта лавового потока на этот период

Таблица 2. Оценки средних скоростей движения и вязкости лавового потока в различные периоды его формирования [Auer et al., 2018]

№	Дата, дд.мм.гггг	T	S_1	S_2	η	$v \cdot 10^{-4}$	Метод измерения скорости потока
1	01.08.–07.08.2011	5.5	370	67	$4.4 \cdot 10^{10}$	7.8	Поверхность потока
2	03.07.–05.11.2011	63.0	550	8.7	$1.5 \cdot 10^{11}$	1.0	Фронт потока
3	05.09.–11.12.2011	98.0	490	5.0	$3.0 \cdot 10^{11}$	0.6	Фронт левого «языка»
4	05.09.–11.12.2011	98.0	540	5.5	$4.0 \cdot 10^{11}$	0.7	Фронт правого «языка»
5	27.01.–09.03.2012	42.0	600	14.2	$2.8 \cdot 10^{11}$	1.6	Поверхность потока

Примечание: T – длительность интервала наблюдений, сутки; S_1 – путь, пройденный реперной точкой за период наблюдения, м; S_2 – путь реперной точки пройденный за сутки, м; η – вязкость, Па·с; v – средняя скорость движения реперной точки, м/с.

Из пяти временных оценок скорости движения лавового потока (v) и вязкости (η) только оценки для первого временного этапа отличаются от остальных почти на порядок. С 01.08.2011 г. по 07.08.2011 г. фронт лавового потока двигался по склону в $\sim 30^\circ$ и был наиболее близок к кратеру, эти два фактора определили наибольшую v и наименьшую η . В дальнейшем с удалением от источника и выполаживанием склона η увеличивается, а v — уменьшается (табл. 2). В начале 2012 г. скорость движения лавового потока несколько увеличилась, возможно, это было связано с поступлением новой порции магмы в постройку вулкана. Индикатором этого служит активизация сейсмичности в январе 2012 г., когда было зарегистрировано несколько землетрясений с $6.9 \leq K_s \leq 7.5$, произошедших на глубинах $0 < H < 2.8$ км [Каталог ..., 2020].

В целом оценки вязкости лавового потока приближаются к значениям вязкости магмы для вулкана Шивелуч 10^{10} – 10^{11} Па·с и совпадают с минимальными оценками вязкости для ледников [Озеров, 2017].

При определённых условиях вязкопластичное течение лавового потока по склону вулкана Кизимен происходило в результате прерывистого скольжения с включением механизма "stick-slip" и возбуждением автоколебательного процесса с генерацией сейсмического режима "drumbeats". Модель прерывистого скольжения "stick-slip" впервые был предложена в работе [Brace, Byerlee, 1966] для объяснения механизма внезапного высвобождения энергии в напряжённом материале по плоскости с дефектами, материал в которой ранее подвергался разрушению. В нашем случае под напором вышележащей лавы (давление по потоку и силы гравитации) происходит «срыв» фронта лавового потока с последующим проскальзыванием по подстилающей поверхности с генерацией отдельного землетрясения режима "drumbeats".

Исходя из этого представления, проведём оценку смещения в результате отдельного ВЗ, используя рассмотренные выше скорости движения лавового потока v [Auer et al., 2018]. На определённых временных участках смещение в результате одного землетрясения можно рассчитать, исходя из следующего соотношения:

$$u = v / \Delta T,$$

где u — смещение в результате одного землетрясения, ΔT — период между двумя микроземлетрясениями режима "drumbeats" [Iverson et al., 2006]. Оценки смещения в результате одного события в различные временные периоды формирования лавового потока приведены в табл. 3.

За период 1–7 августа 2011 г. взята скорость движения поверхности потока, равная $7.8 \cdot 10^{-4}$ м/с [Auer et al., 2018]. С 1 по 7 августа было зарегистрировано 11448 микроземлетрясений "drumbeats" со средним периодом между двумя следующими друг за другом микроземлетрясениями $\Delta T = 52$ с (использовались данные станции KZV). Исходя из предположения, что каждое отдельное ВЗ, зарегистрированное в период 1–7 августа, генерирует смещение активной части лавового потока, то $u = 4$ см (табл. 3). Аналогичные расчёты были проведены для других четырёх периодов с некоторыми ограничительными поправками. По картам [Двигало и др., 2013] на 5 сентября 2011 г. лавовый поток состоял из одного «языка», а к концу 2011 г. уже из двух «языков» потока. Поэтому для периода 2 были выбраны даты с 17 августа по 10 сентября, а для периода 3 приняли даты с 10 сентября по 13 октября. По мнению авторов, с 13 октября наибольшую активность стал проявлять второй «язык» лавового потока, поэтому для периода 4 были взяты даты с 13 октября по 25 ноября.

За различные периоды регистрации микроземлетрясений режима "drumbeats" одно отдельное землетрясение, сопровождающее смещение

Таблица 3. Смещение лавового потока вулкана Кизимен в результате одного ВЗ, рассчитанное по сейсмическим данным за 2011–2012 гг.

№	Период	N , шт.	K_s	K_{cp}	ΔT , с	u , см
1	1–7 августа 2011 г.	11448	3.9–5.4	4.5	52.0	4.0
2	17 августа – 10 сентября 2011 г.	30624	4.0–6.3	5.7	80.5	0.8
3	10 сентября – 13 октября 2011 г.	54432	3.7–7.0	5.0	98.0	0.6
4	14 октября – 25 ноября 2011 г.	26880	3.4–7.0	5.3	148.7	1.0
5	27 января – 9 марта 2012 г.	32592	3.8–6.9	4.3	127.0	2.0

Примечание: N — количество микроземлетрясений режима "drumbeats" за указанный период; K_s , K_{cp} — диапазон энергетических классов и их средний; ΔT — средний период между двумя следующими друг за другом ВЗ; u — рассчитанное смещение лавового потока в результате одного ВЗ "drumbeats".

лавового потока, оценивается $u=0.6-4$ см (табл. 3). Эта оценка близка к величине смещения ($u=0.5$ см), рассчитанного для одного землетрясения режима “drumbeats”, возникающего при выжимании отдельных блоков на экструзивном куполе вулкана Сент-Хеленс [Iverson et al., 2006].

Энергетические классы K_s за периоды 3–5 в табл. 3 были взяты из каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН [Каталог ..., 2020]. Для первого и второго периодов K_s определялся авторами (10 – первый период, 60 – второй).

На основании методики, изложенной в работе [Гусев, Мельникова, 1990], по скалярному сейсмическому моменту M_0 и моментной магнитуде M_w проведена оценка параметров очагов землетрясений режима “drumbeats” энергетического класса $K_s=4.0-7.0$. Они составили: максимальная площадь разрыва $S=0.01-2$ м², длина разрыва $L=0.4-10$ м, подвижка по разрыву $D=0.56-2.6$ см (табл. 4). Естественно, разрушение монолитной породы и сдвиг вязкопластичного блока по подстилающей поверхности не могут генерировать землетрясение с близким параметрами. Рассчитанная подвижка для землетрясений режима “drumbeats” (табл. 3) превышает подвижку по разрыву тектонических землетрясений, однако по порядку величины её можно считать вполне допустимой.

Таблица 4. Динамические параметры очагов землетрясений с энергетическими классами $K_s=4.0-7.0$, рассчитанные по [Гусев, Мельникова, 1990]

K_s	$\lg M_0$	M_w	$S, \text{ м}^2$	$L, \text{ м}$	$D, \text{ см}$
7.0	19.27	2.15	2.0	10.0	2.60
6.5	18.81	1.84	1.0	6.0	2.08
6.0	18.35	1.53	0.4	3.6	1.58
5.5	17.88	1.22	0.2	2.0	1.20
5.0	17.42	0.91	0.09	1.2	0.95
4.5	16.96	0.60	0.04	0.7	0.72
4.0	16.49	0.29	0.01	0.4	0.56

Примечание: K_s – энергетический класс микроземлетрясений режима “drumbeats”; $\lg M_0$ – скалярный сейсмический момент; M_w – моментная магнитуда; S – максимальная площадь разрыва; L – длина разрыва; D – подвижка по разрыву.

Обсуждение результатов

Эффузивная активность вулкана Кизимен в 2011–2012 гг. выразилась в формировании очень вязкого андезитового (SiO_2 62–65%) пото-

ка с $\eta=10^{10}-10^{11}$ Па·с [Auer et al., 2018], который по внешнему виду его поверхности следует отнести к глыбовому типу. Как было показано выше, механизм формирования режима “drumbeats” обусловлен именно движением лавового потока.

Кратко рассмотрим общие представления о строении лавовых потоков глыбового типа. Внутренняя структура глыбового лавового потока состоит из плотного активного ядра, часто богатого кристаллами, который двигается по базальной брекчии, формирующейся на фронте потока за счёт осыпи поверхностной брекчии (рис. 6а). Для поверхности таких потоков характерны выпучивание отдельных блоков и складчатые структуры, возникающие при его движении под действием сил сжатия и растяжения за счёт неравномерности напряжений вдоль лавового потока [Harris et al., 2017]. В работе [Harris, Rowland, 2015] на примере лавового потока вулканического острова Сан-Пьетро (Италия) показано, что основные формы образованных складок на поверхности вязких лавовых потоков – это поперечные гребни, которые представляют(представляющие) собой дугообразные складки, которые на краях становятся почти параллельными границе потока (рис. 6б).

По состоянию на 5 сентября 2011 г. на протяжении верхней половины лавового потока вулкана Кизимен от кратера до высоты 1850 м отчётливо просматривались бортовые валы, возвышающиеся над поверхностью активной части лавы не менее чем на 20 м. Ширина лавового русла верхней части потока 150–200 м, нижней – 500–600 м. На высоте 1800 м бортовые валы постепенно исчезали (рис. 5а). Большая часть наиболее подвижной, активной части лавового потока деформирована крупными, шириной до 70 м и относительной высотой до 15 м, волнообразными, выпуклыми в направлении движения складками, которые разделены узкими и тоже дугообразными понижениями. Средняя мощность лавы по состоянию на 5 сентября составляла 52 м при максимальной мощности 150 м, измеренной по отвесной линии вблизи фронта потока, но уже на 11 декабря 2011 г. средняя мощность составляла ~100 м при максимальной на фронте – 232 м [Двигалю и др., 2013].

На основании изложенного авторы предлагают следующую феноменологическую модель генерации сейсмического режима “drumbeats”, возникающего при движении лавового потока по склону вулкана Кизимен в 2011–2012 гг. На фронте потока формируются отдельные лавовые блоки (В), которые под действием активного ядра, двигающегося с постоянной скоростью V ,

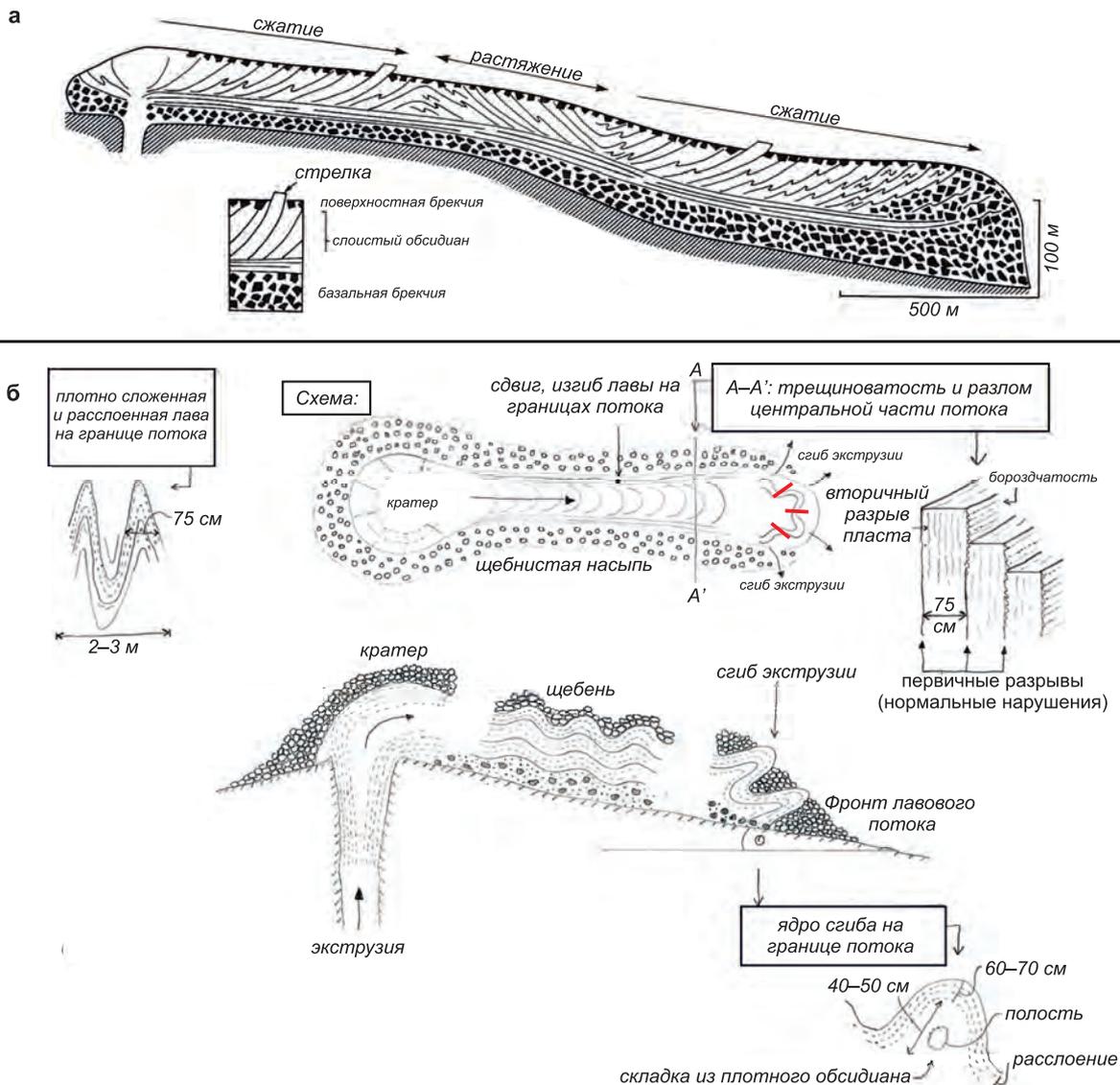


Рис. 6. Поперечное сечение по длине лавового потока Рокке Россе (о. Липари, Италия) с обобщёнными схемами расслоения [Harris et al., 2017] (а) и схематический план, разрез и детали основных структур глыбовой лавы на о. Сан-Пьетро в Сардинии, Италия [Harris, Rowland, 2015] (б).

Красными линиями показаны возможные границы блоков на фронте потока

перемещаются. Возбуждение автоколебательного процесса происходит за счёт сил некулонова трения $F_{\text{нec}}$ с падающей характеристикой в зависимости от скорости (рис. 7). Естественно, между активным ядром и отдельными блоками следует включить элементы с коэффициентом жёсткости C и вязкого сопротивления b_0 . Такая модель будет обеспечивать автоколебательный процесс движения вязкого потока по склону с генерацией сейсмического режима "drumbeats". Более детально, с математическими выкладками, авторы планируют рассмотреть предложенную феноменологическую модель в следующей работе.

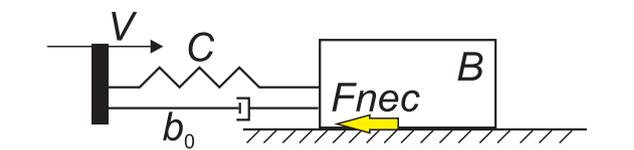


Рис. 7. Феноменологическая модель генерации сейсмического режима "drumbeats", возникающего при движении лавового потока по склону вулкана Кизимен в 2011–2012 гг.

Заключение

Сейсмический режим "drumbeats" регистрируется при выжимании отдельных блоков

на экструзивных куполах андезитовых и дацитовых вулканов мира и возникает при устойчивых равновесных состояниях в системе канал-магма во время извержения. Впервые в мировой практике вулканологических исследований был зарегистрирован режим “drumbeats”, зарегистрированный при движении мощного вязкого лавового потока по склону вулкана Кизимен во время его извержения в 2010–2013 гг.

В пользу этого говорит облако распределения эпицентров микроземлетрясений, которое соприкасается с контуром лавового потока. На вертикальном разрезе все очаги землетрясений с глубиной 1.4 ± 0.5 км группируются вблизи дневной поверхности склона вулкана. Из механизмов очагов следует, что преобладающие азимуты простирания составляют $270\text{--}330^\circ$, что свидетельствует о преобладании движения в северо-восточном направлении, в котором в дальнейшем начал двигаться второй лавовый «язык». В механизмах преобладают правосторонние взбросы и сбросы, а также правосторонний наклонный сдвиг.

Авторы предполагают, что сейсмический режим генерируется движением отдельных лавовых блоков, которые перемещаются под действием активного ядра. В различные периоды движения потока площадь разрыва оценивается в $0.01\text{--}2$ м² с длинами разрывов от 0.4 до 10 м.

За различные периоды регистрации микроземлетрясений режима “drumbeats” по скорости движения лавового потока оценено его смещение, сопровождаемое одним отдельным землетрясением, которое составило 0.6–4 см, что соотносится с расчетами динамических параметров очагов землетрясений, из которых смещение оценивается в $D=0.56\text{--}2.60$ см.

Проанализировав скорости движения и вязкости лавового потока за различные периоды, энергетические и динамические характеристики микроземлетрясений, сопровождавших его движение, и механизмы их очагов, авторы считают, что при определённых условиях вязкопластичное течение лавового потока по склону вулкана Кизимен происходило в результате прерывистого скольжения с включением механизма “stick-slip” и возбуждением автоколебательного процесса с генерацией сейсмического режима “drumbeats”. «Срыв» фронта лавового потока с последующим проскальзыванием происходил под напором вышележащей лавы (давление по потоку и силы гравитации).

Предложена феноменологическая модель генерации сейсмического режима “drumbeats”, которая обеспечивает автоколебательный про-

цесс движения вязкого потока по склону вулкана Кизимен. На фронте потока формируются отдельные лавовые блоки, которые перемещаются под действием активного ядра. За счёт сил некулонова трения $F_{\text{нec}}$ с падающей характеристикой в зависимости от скорости происходит возбуждение автоколебательного процесса.

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

Литература

Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. — М.: Наука, 1969. — 130 с.

Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами — среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. — 1990. — № 6. — С. 55–63.

Двигало В.Н., Мелекесцев И.В., Шевченко А.В. и др. Извержение 2010–2012 гг. вулкана Кизимен — самое продуктивное (по данным дистанционных наблюдений) на Камчатке в начале XXI века. Часть I. Этап 11.11.2010–11.12.2011 гг. // Вулканология и сейсмология. — 2013. — № 6. — С. 3–21.

Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 22–34.

Иванов Б.В. Андезиты Камчатки. — М.: Наука, 2008. — 467 с.

Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. — наст. вр.) // Единая информационная система сейсмологических данных, КФ ФИЦ ЕГС РАН [Сайт]. — URL: <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>. (дата обращения 20-03-2020).

Лемзиков В.К., Лемзиков М.В. Определение механизмов очагов слабых вулканических землетрясений по редкой сети сейсмических станций // Вулканизм и связанные с ним процессы: региональная научная конференция, посвящённая Дню вулканолога, 30 марта — 1 апреля 2011 г. — Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. — С. 198–209.

Лемзиков М.В., Лемзиков В.К. Изучение механизмов очагов слабых вулканических землетрясений вулкана Кизимен // Проблемы комплексного геофизического мониторинга геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Пятой научно-технической конференции / Отв. ред. В.Н. Чебров. — Обнинск: ГС РАН, 2015. — С. 1–5.

Овсянников А.А., Малик Н.А. Тefра извержения вулкана Кизимен в декабре 2010 г. — феврале 2011 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы: региональная научная конференция, посвящённая

- Дню вулканолога, 30 марта – 1 апреля 2011 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. – С. 57–61.
- Озеров А.Ю. К вопросу о механизмах базальтового-андезитобазальтового и андезитового-дацитового типов извержений // Вулканизм и связанные с ним процессы: региональная научная конференция, посвящённая Дню вулканолога, 30 марта – 1 апреля 2011 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. – С. 70–73.
- Пийп Б.И. Вулкан Кизимен // Бюллетень вулканологической станции на Камчатке. – 1946. – № 13. – С. 22–32.
- Сенюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными методами // Комплексные сейсмологические и геофизические наблюдения на Камчатке. – Петропавловск-Камчатский: «Камчатский печатный двор», 2004. – С. 279–291.
- 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.
- Фирстов П.П., Шакирова А.А. Сейсмический режим "drumbeats", предвещающий и сопровождающий извержения андезитовых и дацитовых вулканов и его особенности (обзор) // Вестник КРАУНЦ. – 2019. – № 3, вып. 43. – С. 75–88. doi: 10.31431/1816-5524-2019-3-43-75-88
- Шакирова А.А. Движение лавового потока вулкана Кизимен как генератор режима "drumbeats" // Исследования в области наук о Земле: Материалы X региональной молодёжной научной конференции 28–29 ноября 2012 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. – С. 127–139.
- Шакирова А.А., Фирстов П.П. Сейсмический режим "drumbeats", обусловленный движением вязкого лавового потока при извержении вулкана Кизимен в мае-октябре 2011 г. // Российский сейсмологический журнал. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 67–74. doi: 10.35540/2686-7907.2019.1.06
- 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, N 4. – P. 33. doi: 10.1007/s00445-018-1199-z
- Bell A.F., Hernandez S., Gaunt H.E., Mothes P., Ruiz M., Sierra D., Aguaiza S. The rise and fall of periodic "drumbeat" seismicity at Tungurahua volcano, Ecuador // Earth and Planetary Science Letters. – 2017. – V. 475. – P. 58–70.
- Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes // Science. – 1966. – V. 153. – P. 990–992.
- 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. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.04.024
- Buurman H., West M.E. Seismic precursors to volcanic explosions during the 2006 eruption of Augustine Volcano // U.S. Geological Survey Professional Paper 1769. Ch. 2. – 2010. – 17 p. – URL: <https://pubs.usgs.gov/pp/1769/>
- 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. doi: 10.1016/0377-0273(94)90048-5
- 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. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2006.12.007
- Gephart J.W. FMSI: A FORTRAN program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the original stress tensor // Computers & Geosciences. – 1990. – V. 16, N 7. – P. 953–989.
- Hall M.L., Robin C., Beate B., Mothes P., et al. Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 1991. – V. 91. – P. 1–21.
- Harris A.J.L., Rowland S.K. Lava flows and rheology // The Encyclopedia of Volcanoes. – 2015. – Part III, Ch. 17. – P. 321–342.
- Harris A.J.L., Rowland S.K., Villeneuve N., et al. Páhoehoe, 'a'ā, and block lava: an illustrated history of the nomenclature // Bulletin of Volcanology. – 2017. – V. 79, N 7. – P. 2–34. doi: 10.1007/s00445-016-1075-7
- 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. doi: 10.1038/nature05322
- Lees M.J., Johnson B.J., Ruiz M., et al. Reventador Volcano 2005: Eruptive activity inferred from seismo-acoustic observation // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2008. – V. 176, Is. 1. – P. 179–190.
- 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. – P. 27–60.
- 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. doi: 10.1016/0377-0273(94)90029-9
- Reasenber P., Oppenheimer D. FPFIT, FPPLLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating

and displaying earthquake fault-plane solutions // U.S. Geological Survey Open-File Report. – 1985. – V. 739, N 85. – 109 p.

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. doi: 10.1098/rsta.2000.0607

Sparks R.S.J., Young S.R. The eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat (1995-1999): overview of scientific results // Memoirs. – London: Geological Society Publ., 2002. – V. 21. – P. 45–69. doi: 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 // IAV-CEI Proceedings in Volcanology book series. – 1990. – V. 2. – P. 3–24.

Сведения об авторах

Шакирова Александра Альбертовна, мл. науч. сотр. Камчатского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: shaki@emsd.ru

Фирстов Павел Павлович, д-р физ.-мат. наук, зав. лаб. КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: ppf@emsd.ru

Лемзиков Михаил Владимирович, мл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: lemzikov@kscnet.ru

One of the possible mechanisms for generating the seismic mode “drumbeats” when moving the Kizimen Volcano viscous lava flow along the slope in 2011–2012

© 2020 A.A. Shakirova¹, P.P. Firstov¹, M.V. Lemzikov²

¹KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; ²IVS FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract “Drumbeats” is an unusual seismic mode consisting of volcanic micro-earthquakes with monotonous waveforms (multiplets) that are recorded from tens of minutes to months. Due to the quasi-regularity of the occurrence of earthquakes, the mode was called “drumbeats”. The “drumbeats” mode is registered when individual blocks are squeezed out on the extrusive domes of andesite and dacite volcanoes of the world and occurs at stable equilibrium states in the channel-magma system during an eruption. For the first time in the world practice of volcanological research, the “drumbeats” mode was registered, accompanying the movement of a viscous lava flow with a volume of 0.3 km³ of the Kizimen volcano eruption in 2010-2013. The paper considers kinematic and dynamic parameters of micro-earthquakes of the “drumbeats” mode, their mechanisms, and offers a phenomenological model for generating the “drumbeats” mode that occurs when a lava flow moves along the slope of the Kizimen volcano.

Keywords Volcano, drumbeats, stick-slip, lava flow, hybrid earthquake, Kizimen, model.

For citation Shakirova, A.A., Firstov, P.P., & Lemzikov, M.V. (2020). [One of the possible mechanisms for generating the seismic mode “drumbeats” when moving the Kizimen Volcano viscous lava flow along the slope in 2011-2012]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 2(3), 43-56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.3.04>

References

- Auer, A., Belousov, A., & Belousova, M. (2018). Deposits, petrology and mechanism of the 2010–2013 eruption of Kizimen volcano in Kamchatka, Russia. *Bulletin of Volcanology*, 80(4), 33. doi: 10.1007/s00445-018-1199-z
- Bell, A.F., Hernandez, S., Gaunt, H.E., et al. (2017). The rise and fall of periodic «drumbeat» seismicity at Tungurahua volcano, Ecuador. *Earth and Planetary Science Letters*, 475, 58–70.
- Brace, W.F., & Byerlee, J.D. (1966). Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, 153, 990–992.
- Buurman, H., & West, M.E. (2010). Seismic Precursors to Volcanic Explosions during the 2006 Eruption of Augustine Volcano. U.S. *Geological Survey Professional Paper 1769. Ch. 2*, 17 p. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/pp/1769/>
- Buurman, H., West, M.E., & Thompson, G. (2013). The seismicity of the 2009 Redoubt eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 259, 16–30. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.04.024
- Cornelius, R.R., & Voight, B. (1994). 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*, 62, 469–498. doi: 10.1016/0377-0273(94)90048-5
- Droznin, D.V., & Droznina, S.Y. (2011). Interactive DIMAS program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3), 215.
- Dvigalo, V.N., Melekestsev, I.V., Shevchenko, A.V., et al. (2013). The 2010–2012 eruption of Kizimen Volcano: The greatest output (from the data of remote-sensing observations) for eruptions in Kamchatka in the early 21st century part I. The November 11, 2010 to December 11, 2011 phase. *Journal of Volcanology and Seismology*, 7(6), 345–361.
- Earthquakes catalogue for Kamchatka and the Commander Islands (1962–present). (2020). *Unified information system seismological data KB GS RAS*. Retrieved from <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>
- Firstov, P.P., & Shakirova, A.A. (2014). Seismicity observed during the precursory process and the actual eruption of Kizimen Volcano, Kamchatka in 2009–2013. *Journal of Volcanology and Seismology*, 8(4), 203–217.
- Firstov, P.P., & Shakirova, A.A. (2019). [Seismic regime “drumbeats” that precedes and accompanies the eruption of andesite and dacite volcanoes and its features (review)]. *Vestnik KRAUNC* [Vestnik KRAUNTS], 3(43), 75–88. (In Russ.). doi: 10.31431/1816-5524-2019-3-43-75-88
- Garcia, A.A., Kumagai, H., Samaniego, P., et al. (2007). Seismic, petrologic, and geodetic analyses of the 1999 dome-forming eruption of Guagua Pichincha volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161, 333–351. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2006.12.007
- Gephart, J.W. (1990). FMSI: A FORTRAN program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the original stress tensor. *Computers & Geosciences*, 16(7), 953–989.
- Gusev, A.A., & Melnikova, V.N. (1990). [Connections between magnitudes – world average and for Kamchatka]. *Vulkanologija i seismologija* [Journal of Volcanology and Seismology], 6, 55–63. (In Russ.).
- Hall, M.L., Robin, C., Beate, B., Mothes, P., et al. (1991). Tungurahua Volcano, Ecuador: structure, eruptive history and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91, 1–21.
- Harris, A. J., & Rowland, S. K. (2015). Lava flows and rheology. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 321–342). Academic Press.
- Harris, A. J., Rowland, S. K., Villeneuve, N., & Thorndarson, T. (2017). Pāhoehoe, ‘a ‘ā, and block lava: an illustrated history of the nomenclature. *Bulletin of Volcanology*, 79(1), 7. doi: 10.1007/s00445-016-1075-7
- Ivanov, B.V. (2008). *Andezity Kamchatki* [Andesites of Kamchatka]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 467 p. (In Russ.).
- Iverson, M.R., Dzurisin, D., Gardner, C.A., et al. (2006). Dynamics of seismogenetic volcanic extrusion at Mount St Helens in 2004–2005. *Nature*, 444, 439–443. doi: 10.1038/nature05322
- Lees, M.J., Johnson, B.J., Ruiz, M., et al. (2008). Reventador Volcano 2005: Eruptive activity inferred from seismo-acoustic observation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 179–190.
- Lemzikov, M.V., & Lemzikov, V.K. (2015). [Study of mechanisms of foci of weak volcanic earthquakes of Kizimen volcano]. In *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. Trudy Pjatoj nauchno-tehnicheskoy konferencii (otv. red. V.N. Chebrov)* [Problems of integrated geophysical monitoring of the Russian Far East. Proceedings of the Fifth scientific and technical conference (ed. V.N. Chebrov)] (pp. 1–5). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Lemzikov, V.K., & Lemzikov, M.V. (2016). [Determination of mechanisms of weak volcanic earthquake foci by a rare network of seismic stations]. In *Vulkanizm i svjazannye s nim processy: regional'naja nauchnaja konferencija, posvjashhjonnaja Dnju vulkanologa, 30 marta - 1 aprilja 2011 g.* [Volcanism and related processes: Materials of the regional conference March 30–April 1, 2016, Petropavlovsk-Kamchatsky] (pp. 198–209). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: IVS FEB RAS Publ. (In Russ.).
- Moran, S.C., Malone, S.D., Qamar, A.I., Thelen, W.A., Wright, A.K., & Caplan-Auerbach, J. (2008). Seismicity

- associated with renewed dome building at Mount St. Helens, 2004–2005. In *A Volcano Rekindled: The Renewed Eruption of Mount St. Helens, 2004–2006* (Vol. 1750, pp. 27-60). Menlo Park, Calif: US Geological Survey.
- Ovsyannikov, A.A., & Malik, N.A. (2011). [Tephra of the Kizimen volcano eruption in December 2010 – February 2011]. In *Vulkanizm i svjazannye s nim processy: regional'naja nauchnaja konferencija, posvjashhonnaja Dnju vulkanologa, 30 marta - 1 aprelja 2011 g.* [Volcanism and related processes: Materials of the regional conference March 30 - April 1, 2011, Petropavlovsk-Kamchatsky] (pp. 57-61). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: IVS FEB RAS Publ. (In Russ.).
- Ozerov, A.Yu. (2017). [On the question of mechanisms of basalt-andesibasalt and andesite-dacite types of eruptions]. In *Vulkanizm i svjazannye s nim processy: regional'naja nauchnaja konferencija, posvjashhonnaja Dnju vulkanologa, 30 marta - 1 aprelja 2011 g.* [Volcanism and related processes: Materials of the regional conference March 30-April 1, 2017, Petropavlovsk-Kamchatsky] (pp. 70-73). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: IVS FEB RAS Publ. (In Russ.).
- Piip, B.I. (1946). [Vulkan Kizimen]. *Bulleten' vulkanologicheskoy stancii na Kamchatke* [Bulletin Vulkanol. stations on Kamchatka], 13, 22-32. (In Russ.).
- Power, J.A., Lahr, J.C., Page, R.A., Chouet, B.A., Stephens, C.D., Harlow, D.H., ... & Davies, J.N. (1994). Seismic evolution of the 1989–1990 eruption sequence of Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1-4), 69-94. doi: 10.1016/0377-0273(94)90029-9
- Reasenber, P., & Oppenheimer, D. (1985). FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions. *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 739(85), 109 p.
- Robertson, R.E.A., Aspinall, W.P., Herd, R.A., Norton, G.E., Sparks, R.S.J., & Young, S.R. (2000). The 1995–1998 eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat, WI. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1770), 1619-1637. doi: 10.1098/rsta.2000.0607
- Senyukov, S.L. (2004). [Monitoring the activity of volcanoes in Kamchatka by remote methods]. In *Kompleksnye seismologicheskie i geofizicheskie nabljudenija na Kamchatke* [Complex seismological and geophysical studies of Kamchatka] (pp. 279-291). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: "Kamchatka Printing Yard" Publ. (In Russ.).
- Shakirova, A.A. (2012). [Movement of the lava flow of the Kizimen volcano as a generator of the "drumbeats" mode]. In *Issledovanija v oblasti nauk o Zemle: Materialy H regional'noj molodjozhnoj nauchnoj konferencii 28–29 nojabrja 2012 g.* [Research in the field of Earth Sciences: Materials of the X regional youth scientific conference on November 28-29, 2012] (pp. 127-139). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: IVS FEB RAS Publ. (In Russ.).
- Shakirova, A.A., & Firstov, P.P. (2019). [Seismic regime "drumbeats" caused by the movement of a viscous lava flow during the eruption of the Kizimen volcano in May-October 2011]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 1(1), 67-74. (In Russ.). doi: 10.35540/2686-7907.2019.1.06
- Sparks, R.S.J., & Young, S. R. (2002). The eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat (1995–1999): overview of scientific results. *Geological Society, London, Memoirs*, 21(1), 45-69. doi: 10.1144/GSL.MEM.2002.021.01.03
- Swanson, D.A., & Holcomb, R.T. (1990). Regularities in Growth of the Mount St. Helens Dacite Dome, 1980–1986. *IAVCEI Proceedings in Volcanology book series*, 2, 3-24.
- Vvedenskaya, A.V. (1969). *Issledovanie naprjazhenij i razryvov v ochagah zemletrjasenij pri pomoshhi teorii dislokacij* [Investigation of stresses and ruptures in earthquake foci using dislocation theory]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 130 p. (In Russ.).

Information about the authors

Shakirova Alexandra Albertovna, Junior Researcher of the Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (KB GS RAS), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: shaki@emsd.ru

Firstov Pavel Pavlovich, Dr., Head of Laboratory of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: ppf@emsd.ru

Lemzиков Mikhail Vladimirovich, Junior Researcher of the Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch, RAS (IVS FEB RAS), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: lemzиков@kscnet.ru