

УДК 550.348.436+550.342

П. П. Фирстов, А. А. Шакирова

Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: firstov@emsd.ru

Извержение вулкана Кизимен в 2009–2012 гг. и его проявление в сейсмических эффектах

В декабре 2010 г. началось извержение вулкана Кизимен, которому предшествовала сейсмическая подготовка в течение полутора лет. Извержение началось с мощных эксплозий с последующим выжиманием вязкого лавового потока. Выжимание вязкой андезитовой магмы и движение лавового потока по склону сопровождалось необычной сейсмичностью в виде квазипериодичного появления микроземлетрясений (режим «drumbeats»). Показаны пространственно-временные особенности сейсмического режима, предвещающего извержение, и сделаны выводы, что режим «drumbeats» возникает в результате выжимания и движения вязкого лавового потока за счёт особенных реологических свойств лавы этого вулкана.

Введение

Кизимен (2485 м н. у. м.) — действующий вулкан эксплозивно-эффузивно-экструзивного типа, коро-во-мантийного питания, расположенный в восточной части Щапинского грабена Центральной Камчатской депрессии (рис. 1). Извержению вулкана Кизимен в декабре 2010 г. предшествовала длительная сейсмическая подготовка, начавшаяся в апреле 2009 г., в связи с чем, летом 2009 г. была установлена радиотелеметрическая сейсмическая станция (РТСС) «KZV» (на удалении 2,6 км от вершины), которая позволила регистрировать слабые сейсмические события в постройке вулкана.

Летом 2011 г. для определения очагов слабых землетрясений была установлена цифровая широкополосная станция «TUMD» на расстоянии 6 км от вершины вулкана (рис. 1). На РТСС TUMD в июле 2011 г. была установлена фотокамера, которая производит съёмку вулкана с частотой один кадр в минуту, что позволяет идентифицировать сейсмические сигналы с проявлениями вулканической активности определённого вида.

С февраля 2011 г. на вулкане Кизимен начал выжиматься лавовый поток, длина которого в настоящее время достигла почти 5 км. Выжимание вязкого потока сопровождалось необычной сейсмичностью в виде квазипериодичного появления микроземлетрясений с амплитудой одного уровня и длительностью от десятков минут до нескольких часов.

Сейсмичность района вулкана в 2009–2011 гг.

С апреля 2009 г. в районе вулкана начали регистрироваться вулcano-тектонические (ВТ) землетрясения, число которых с течением времени стало возрастать. За период с 10 июля по 31 декабря 2009 г. было зарегистрировано более 8 тысяч ВТ землетрясений с $K_S > 2$, с глубинами очагов 5–11 км и с максимальным энергетическим классом $K_S = 9,9$

($K = \lg E/\text{Дж}$). Гипоцентры большинства событий располагались в районе вулкана и его подножия [1].

На ближайшей к вулкану РТСС KZV регистрировались вулcano-тектонические землетрясения с энергетическими классами $K_S < 5$, для определения их гипоцентров за период с ноября 2009 по февраль 2011 г. был применён поляризационный метод [8].

Как видно на рис. 2а, по концентрации очагов землетрясений выделяются две зоны: одна в виде наклонной области располагается в юго-западном направлении от вулкана, вторая в виде вертикаль-

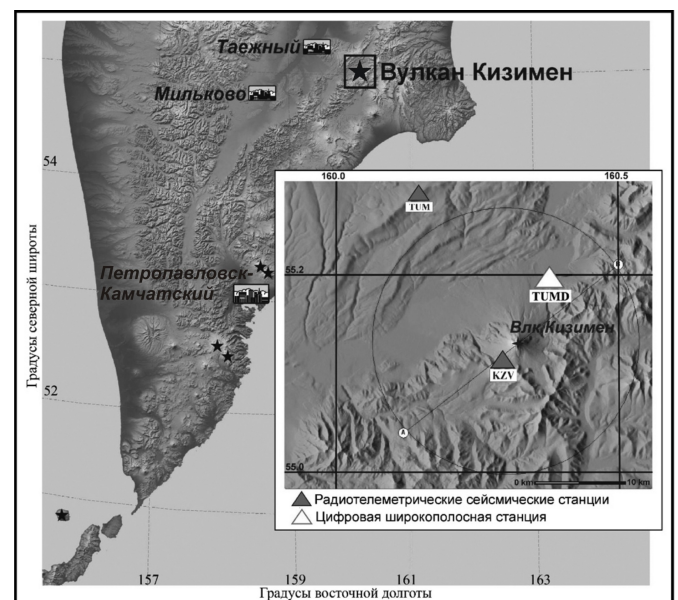


Рис. 1. Расположение вулкана Кизимен на Камчатке. На врезке показаны ближайшие к вулкану сейсмические станции КФ ГС РАН. KZV — Кизимен, TUMD — Тумроцкие источники, TUM — Тумрок.

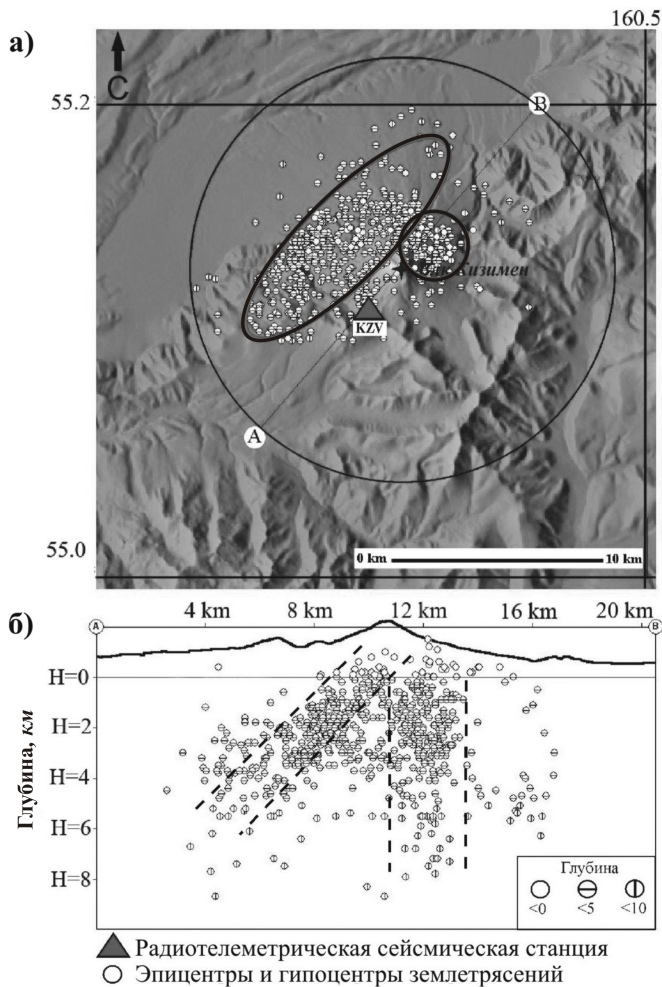


Рис. 2. Карта расположения эпицентров (а) и проекция гипоцентров землетрясений с $K_S < 5$ на вертикальную плоскость по сечению АВ района влк. Кизимен (б) за период ноябрь 2009 – февраль 2011 гг.

ной колонны находится непосредственно под вулканом. Очаги землетрясений располагались на глубинах от $-1,5$ до 8 км, а основная масса приходится на глубины $0-5$ км (рис. 2б). При удалении землетрясений от вулкана в юго-западном направлении, глубины гипоцентров увеличиваются. Эти зоны, по-видимому, отражают напряженно-деформированные объемы верхней части земной коры, связанные с движением магмы к поверхности.

Режим «drumbeats», сопровождающий выжимание лавового потока

С февраля 2011 г. на вулкане Кизимен начал выжиматься лавовый поток, длина которого в настоящее время достигла почти 5 км. Выжимание вязкого лавового потока сопровождалось по данным сейсмических станций KZV и TUMD необычной сейсмичностью в виде квазипериодичного появления микроземлетрясений с амплитудой одного уровня длительностью от десятков минут до нескольких часов.

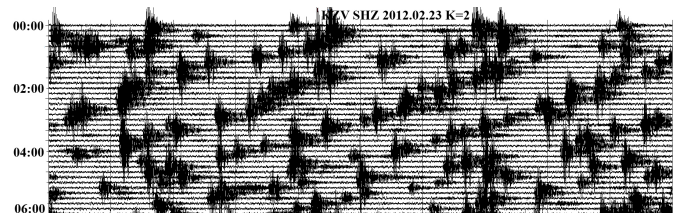


Рис. 3. Шестичасовой фрагмент сейсмограммы с записями микроземлетрясений режима «drumbeats» влк. Кизимен за 23 февраля 2012 г. Увеличение (K) = 2 .

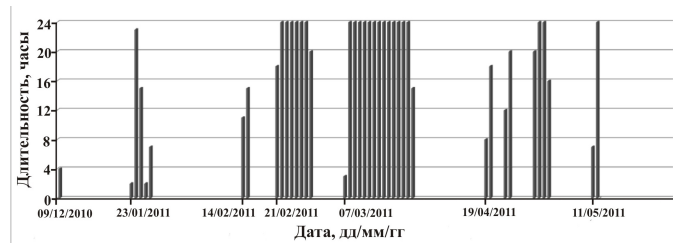


Рис. 4. График появления микроземлетрясений в период с 9 декабря 2010 г. по 11 мая 2011 г.

Отличительной особенностью такой сейсмичности являлось квазипостоянство K на длительных временных участках (рис. 3). При малых интервалах времени между микроземлетрясениями, запись сливалась, становилась непрерывной и напоминала спазматическое вулканическое дрожание. Квазирегулярное появление микроземлетрясений, зарегистрированных во время выжимания отдельных блоков вязкой магмы на экструзивном куполе вулкана Сент-Хеленс, в работах американских вулканологов было названо «drumbeats» – барабанный бой [10, 11].

Впервые такая сейсмичность была отмечена 9 декабря 2010 г. за несколько часов до начала пепловых выбросов. По визуальным данным с базы «Ипуин», расположенной в 25 км к западу от вулкана Кизимен (наблюдатель – Е. С. Власов), в $23:00$ GMT 9 декабря впервые были отмечены периодические пепловые выбросы серого цвета. По данным Аляскинской вулканологической обсерватории впервые появление термальной аномалии в кратере вулкана Кизимен было отмечено на космическом снимке в $23:13$ GMT 9 декабря, что указывало на приближение лавы к поверхности [5]. К этой же дате приурочено и появление в течение 4 часов режима «drumbeats», что, по-видимому, обусловлено выжиманием первой порции лавового материала.

С 9 декабря 2010 г. по 12 мая 2011 г. «drumbeats» появлялись нерегулярно (рис. 4). С 13 мая микроземлетрясения с квазипериодичностью от 8 до 50 секунд и энергетическим классом $K_S = 2,0-5,5$ начали регистрироваться непрерывно [7, 9].

На протяжении всего периода регистрации микроземлетрясений было замечено, что режим «drumbeats» менял свой характер. С мая по декабрь 2011 г. микроземлетрясения регистрировались непрерыв-

Общая характеристика режима «drumbeats» за период с 9 декабря 2010 г. по 31 мая 2012 г.

Дата	Характеристика режима «drumbeats»	Максимальная частота, мин ⁻¹	$(2\dot{A})_{max}$ мкм/с
09/12/2010	Первое появление режима «drumbeats»	—	—
23/01–12/05/2011	Кратковременное появление режима «drumbeats» в течение нескольких часов	—	1,69
12/05–26/06/2011	«drumbeats», прерываемые дрожанием в периоды: 12/06–14/06, 16/06–19/06, 22/06–24/06	8,5	5,03
26/06–25/07/2011	Дрожание, «drumbeats» по высокочастотному каналу	—	1,74
26/07–28/07/2011	«drumbeats»	0,7	0,57
29/07–17/08/2011	Нет информации	—	—
17/08–12/11/2011	«drumbeats»	1,7	4,8
19/10–07/11/2011	Нет информации	—	—
12/11–26/11/2011	II тип «drumbeats»	1,5	0,55
27/11–11/01/2012	«drumbeats» отсутствуют, пирокластические потоки	—	—
12/01–31/05/2012	«drumbeats»	0,7	0,83

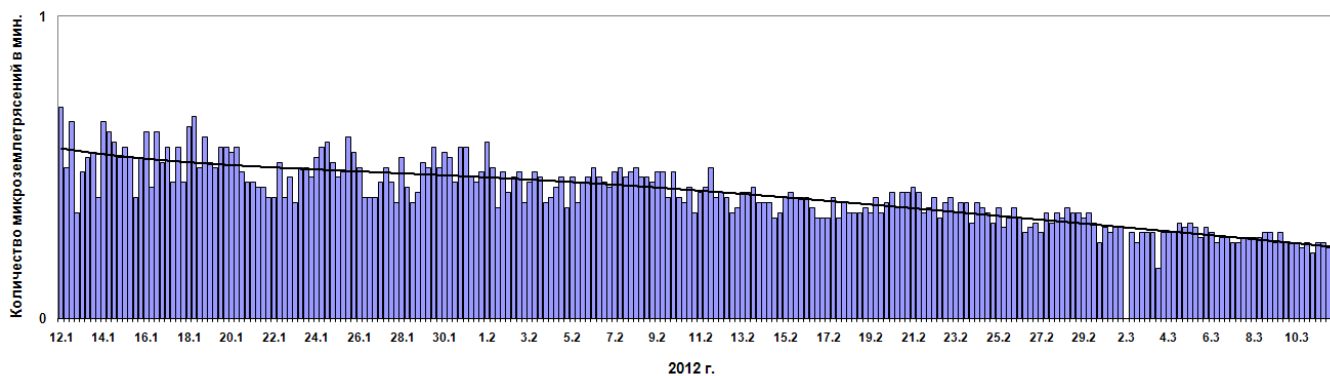


Рис. 5. График числа микроземлетрясений в минуту 12 января — 12 марта 2012 г.

но. С 7 по 12 октября количество микроземлетрясений плавно уменьшилось с 21 до 2 в минуту. Землетрясения стали хаотически расположенными и 12 октября наряду с «drumbeats» первого типа, стали регистрироваться «drumbeats» второго типа. Особенностью этих микроземлетрясений также является квазипериодичность и квазипостоянство амплитуды на длительных временных участках, но двойная амплитуда скорости смещения грунта ($2\dot{A}$) «drumbeats» II типа изменялась в пределах 0,05–0,55 мкм/с ($K_S = 2-4$), что значительно меньше «drumbeats» I типа. Частота микроземлетрясений в среднем составила одно в мин⁻¹. Постепенно «drumbeats» первого типа прекратились.

В конце ноября микроземлетрясения перестали регистрироваться, и наблюдался период извержения пирокластических потоков. Возобновился режим «drumbeats» 12 января 2012 г. и регистрируется по сегодняшний день. Количество микроземлетрясений постепенно снижалось от 40 до одного в час. На рис. 5 приведено количество микроземлетрясе-

ний в минуту за период 12 января — 12 марта 2012 г. На 31 мая 2012 г. количество микроземлетрясений не превышало одно событие в час. В таблице приведена общая характеристика динамики режима «drumbeats» за период с 9 декабря 2010 г. по 31 мая 2012 г.

В связи с ограниченной системой сейсмических наблюдений и невозможностью точного определения эпицентров микроземлетрясений режима «drumbeats», были рассмотрены изменения разностей вступлений P -волн и $S-P$ на станциях KZV и TUMD на 6 дат, во время которых уверенно выделялись микроземлетрясения режима «drumbeats» с четкими вступлениями P - и S -волн. Как видно на рис. 6, наблюдается закономерное статистически значимое изменение вступлений сейсмических волн на этих сейсмостанциях. Увеличение $S-P$ на с/ст KZV с 0,7 до 1,5 сек при среднеквадратичной ошибке $\sigma = 0,2$ сек, и уменьшение P TUMD-PKZV с 0,9 до 0,5 сек при $\sigma = 0,1$ сек свидетельствуют о том, что эпи-

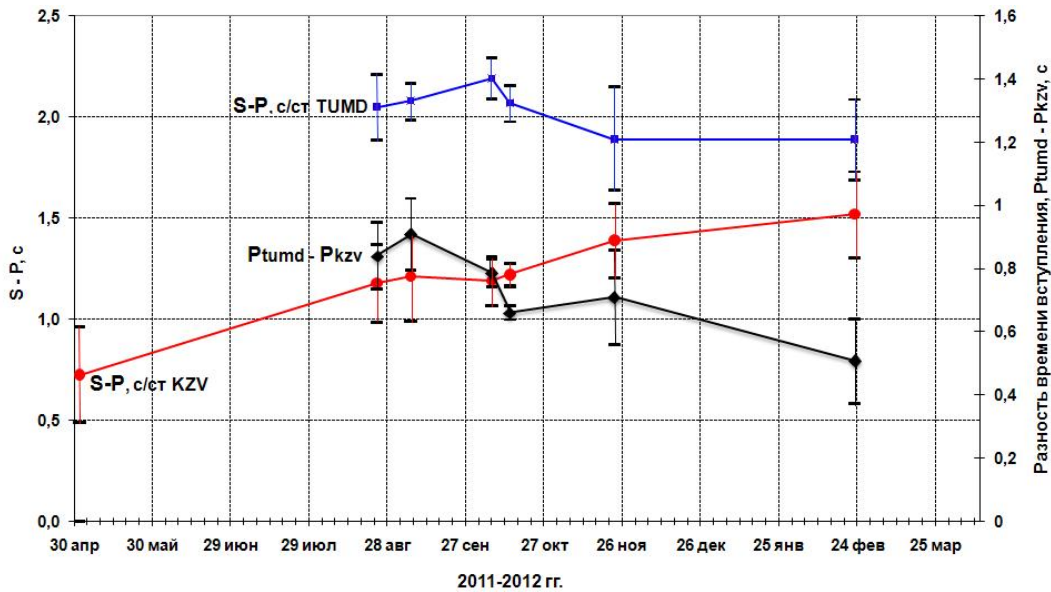


Рис. 6. Изменение разностей времен вступлений P-волн и S-P на станциях KZV и TUMD.

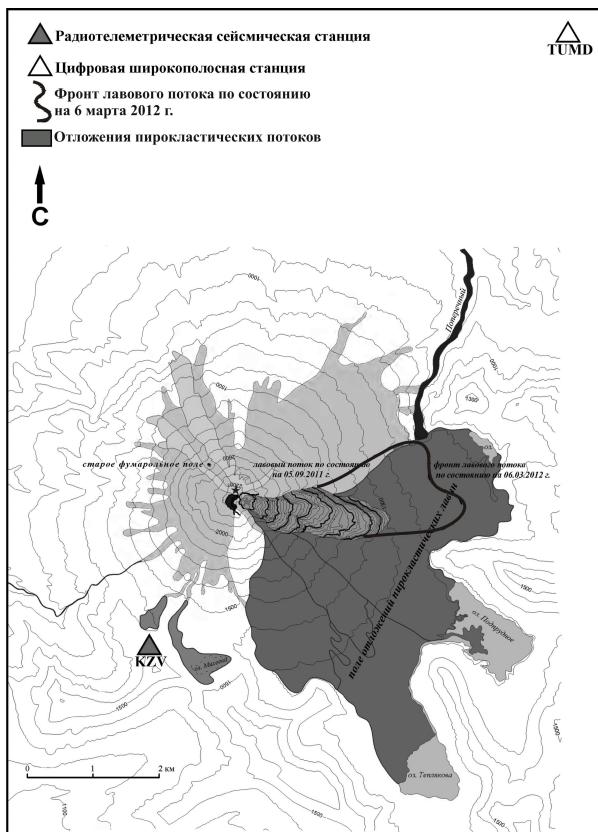


Рис. 7. Схема последствий извержения вулкана Кизимен на 5 сентября 2011 г. (составлена В. Н. Двигало), фронт лавового потока 6 марта 2012 г. и расположение сейсмических станций [4].

центры землетрясений удаляются от станции KZV и приближаются к станции TUMD.

На рис. 7 приведена схема последствий извержения влк. Кизимен по состоянию на 5 сентября 2011 г. [4], на которой изображен лавовый по-

ток, сформировавшийся к 5 сентября. Дополнительно на карту был нанесён фронт лавового потока по состоянию на 6 марта 2012 г. (примерный контур, взятый со спутникового снимка, предоставленного Д. В. Мельниковым¹) и расположение РТСС KZV и TUMD относительно лавового потока.

По пространственному расположению лавового потока и сейсмических станций логично предположить, что микроземлетрясения режима «drumbeats» генерируются фронтом вязкого лавового потока.

Сейсмические эффекты, сопровождавшие извержение пирокластических потоков

Выжимание вязкого дацитового лавового потока и формирование внутрикратерной экструзии, естественно, должно сопровождаться схождение обвалных и автоэксплозивных каменных лавин, как это наблюдалось на андезидацитом вулкане Безьянный [3]. Обвалные и автоэксплозивные каменные лавины наблюдались во время извержения вулкана Кизимен довольно часто.

Сильные эксплозии в начальный период извержения сопровождалась схождение пирокластических потоков [2]. Схождение пирокластических потоков наблюдалось на протяжении четырёх часов 13 декабря 2011 г. На рис. 8 приведены кадры фотосъёмки, снятые с интервалом в одну минуту, схождения пирокластического потока в 23 ч 22 мин 13 декабря 2011 г. [6].

На рис. 9 приведена огибающая записи сейсмических эффектов, сопровождавших схождение пирокластических потоков, построенная по записям станций KZV и TUMD с постоянной времени 4 секунды. Как видно из графика, за четыре часа произошло извержение 16 пирокластических потоков близких по интенсивности и около 10 более слабых.

¹<http://www.kscnet.ru/webusers/dvm/kzm.html>



Рис. 8. Кадры фотосъёмки схождения пирокластического потока 13 декабря 2011 г. в 23:22 GMT.

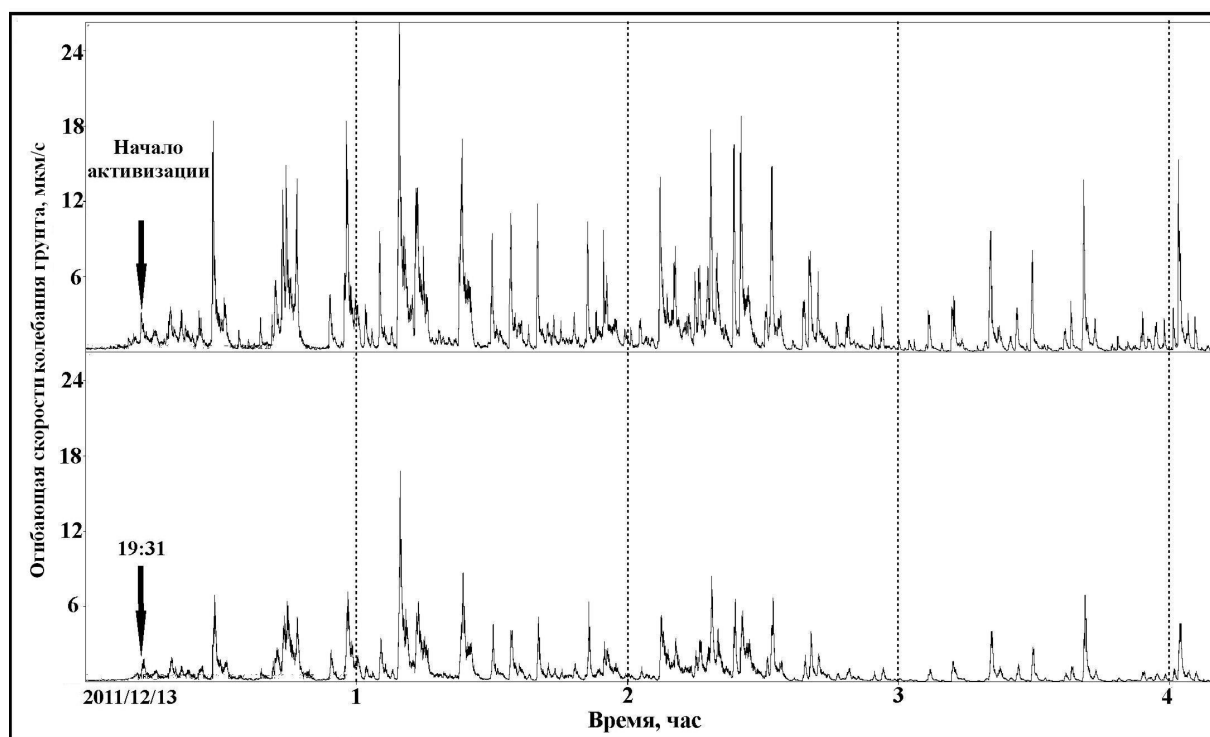


Рис. 9. Огибающая сейсмических сигналов, сопровождавших сход пирокластических потоков 13 декабря 2011 г.

Выводы

Микроземлетрясения режима «drumbeats», появившиеся 9 декабря 2010 г., сопровождали выжимание дацитовой пробки, после чего в кратере наблюдалась термальная аномалия, и отмечались пепловые выбросы. Режим «drumbeats», регистрировавшийся в 2011 г. генерировался движением фронта лавового потока по склону вулкана. Возникновение «drumbeats» II типа, по-видимому, связано с формированием и движением второго языка лавового потока. Уменьшение частоты микроземлетрясений режима «drumbeats» свидетельствует об уменьшении интенсивности эффузивного извержения вулкана.

Сейсмическая подготовка и динамика извержения вулкана Кизимен являются уникальными и ранее подобные явления на вулканах Камчатки не наблюдались. Длительный процесс подготовки извержения, а также режим «drumbeats» указывают на осо-

бые реологические свойства магмы этого извержения.

Список литературы

1. Гарбузова В. Т., Соболевская О. В. Сейсмическая активизация в районе вулкана Кизимен в 2008–2010 гг. // Материалы региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 30 марта — 1 апреля 2011 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 176.
2. Малик Н. А., Овсянников А. А. Извержение вулкана Кизимен в октябре 2010 г. — марте 2011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 1. Вып. 17. С. 7–14.
3. Мальшев А. И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 259 с.
4. Мельников Д. В., Двигало В. Н., Мелекесцев И. В. Извержение 2010–2011 гг. Камчатского вулкана Кизимен: Динамика эруптивной активности и геолого-геоморфологический эффект (на основе данных дистанционного

- зондирования) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 87–101.
5. Сенюков С. Л., Нурждина И. Н., Дроздина С. Я. и др. Сейсмичность вулкана Кизимен // Труды третьей научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 144–148.
 6. Фирстов П. П., Шакирова А. А. Сейсмические явления, сопровождавшие извержение вулкана Кизимен в 2011 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2011. № 2. Вып. 18. С. 7–13.
 7. Шакирова А. А. Режим «DRUMBEATS» во время извержения вулкана Кизимен в 2011 г. // Материалы IX региональной молодежной конференции «Исследования в области наук о Земле». 1–2 декабря 2011 г. Петропавловск-Камчатский. 2011. С. 201–212.
 8. Шакирова А. А., Кожевникова Т. Ю. Анализ смещения гипоцентров землетрясений в районе вулкана Кизимен с использованием различных методов в 2009–2011 г. // Природная среда Камчатки. Матер. X региональной молодежной научной конференции 12–13 сентября. 2011. Петропавловск-Камчатский. С. 195–206.
 9. Шакирова А. А., Махмудов Е. Р., Фирстов П. П. Сейсмические явления на вулкане Кизимен в мае-июне 2011 г. // Материалы мол. науч. симпозиума «Современные научные исследования на Дальнем Востоке». 2011. Южно-Сахалинск. С. 18–22.
 10. Iverson R. M., Dzurisin D., Gardner C. A. et al. Dynamics of seismogenetic volcanic extrusion at Mount St Helens in 2004–2005 // Nature. 2006. Vol. 444. P. 439–443.
 11. Moran S. C., Malone S. D., Qamar A. I. et al. Seismicity associated with renewed Dome-Building at Mount St. Helens, 2004–2005 / A volcano rekindled: The renewed eruption of Mount St. Helens, 2004–2006. Ch. 2. 2007. U.S. P. 64–101.