

На правах рукописи



ШАКИРОВА Александра Альбертовна

**СЕЙСМИЧНОСТЬ ВУЛКАНА КИЗИМЕН (П-ОВ
КАМЧАТКА) ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ В 2010-2013 ГОДАХ**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных
ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2022

Работа выполнена в Камчатском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской Академии наук» (КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский).

Научный руководитель:

Фирстов Павел Павлович, доктор физико-математических наук.

Салтыков Вадим Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией сейсмического мониторинга КФ ФИЦ ЕГС РАН.

Официальные оппоненты:

Собисевич Алексей Леонидович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник, ФГБУН Института Физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва.

Радзиминович Наталья Анатольевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории комплексной геофизики Института Земной коры СО РАН, г. Иркутск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИВиС ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский.

Защита состоится «12» сентября 2022 года на заседании диссертационного совета Д.003.022.03 при ФГБУН Институте земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте <http://crust.ru/images/upload/newsfull220/3444.pdf>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета, кандидату физико-математических наук Добрыниной Анне Александровне по вышеуказанному адресу или e-mail: dobrynina@crust.irk.ru.

Тел: 8(3952)427000.

Автореферат разослан «19» июля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.022.03,
кандидат физико-математических наук

А.А. Добрынина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Вулканы – это сложные динамические системы, контролируемые многими взаимодействующими процессами, которые обычно нелинейны и случайны. Изучение сейсмических эффектов, возникающих в районах активных вулканов, позволяет понять физические процессы, контролирующие их извержение. Для исследования динамики и прогнозирования извержений одним из наиболее результативных разделов геофизики является «вулканическая сейсмология». Анализ вулканических землетрясений, их классификация и определение природы их происхождения являются актуальными задачами для прогноза извержения и оценки вулканической опасности.

После 82-летнего перерыва началось эксплозивно-эффузивно-экструзивное извержение андезитового вулкана Кизимен (п-ов Камчатка), продолжавшееся три года (ноябрь 2010-декабрь 2013 гг.) и ставшее его первым извержением, подкрепленным сейсмологическими наблюдениями. Во время извержения, предварявшегося длительной сейсмической подготовкой на протяжении 20 месяцев, регистрировались эксплозии, пирокластические потоки, обвалы, выжимание лавового потока и вершинной экструзии. Особенностью извержения стал впервые зарегистрированный при извержении вулканов Камчатки сейсмический режим «drumbeats» («барабанный бой»).

Тематика исследования соответствует приоритетному направлению фундаментальных научных исследований в Российской Федерации – геофизика (изучение и прогнозирование катастрофических явлений (землетрясения, извержения вулканов, цунами); оценка сейсмической, вулканической и цунами опасности). Фундаментальная проблема этого вопроса представляет научный интерес, что определяет актуальность работы. В более конкретном значении актуальность работы определяется слабой изученностью вулкана Кизимен, извержение которого имеет ряд особенностей, в том числе и сейсмических, среди которых сейсмический режим «drumbeats», о механизме которого до сих пор нет единого мнения.

Целью исследования является выявление особенностей сейсмических эффектов, предварявших и сопровождавших извержение вулкана Кизимен и их связь с вулканической активностью.

Основные задачи исследования:

- Систематизация данных о сейсмической активности вулкана в процессе подготовки и во время извержения Кизимена в 2010-2013 гг., выявление особенностей сейсмической подготовки извержения вулкана Кизимен.
- Выявление закономерностей распределения очагов слабых землетрясений с энергетическим классом $K_S < 5$ перед извержением вулкана Кизимен.
- Определение типов вулканических землетрясений и их особенностей в зависимости от меняющегося характера извержения.
- Изучение динамики сейсмического режима «drumbeats», рассмотрение его связи с активностью вулкана, изучение спектральных особенностей землетрясений и разработка феноменологической модели механизма генерации сейсмического режима «drumbeats».

Объектом исследований является вулкан Кизимен (п-ов Камчатка, Россия).

Предмет исследований – сейсмические сигналы, зарегистрированные до и во время извержения вулкана Кизимен в 2010-2013 гг.

Научная новизна. Изучены особенности первого извержения вулкана Кизимен, зарегистрированного сетью сейсмических станций, и проявления в сейсмичности подготовки извержения. Изучен сейсмический режим «drumbeats», зарегистрированный впервые при извержении вулканов Камчатки. Выявлено, что он обусловлен, в основном, движением вязкого лавового потока по склону вулкана. На момент написания диссертационной работы в литературных данных подобный феномен не наблюдался.

Защищаемые положения:

1. Детальный анализ последовательности вулcano–тектонических землетрясений перед извержением вулкана Кизимен в 2010–2013 годах выявил уменьшение наклона графика повторяемости с 1.1 до 0.85 в течение 11 месяцев, что интерпретируется, как увеличение напряжений в среде в районе вулкана.

2. Выделены две пространственные области слабых землетрясений с энергетическими классами $K_S < 5$, возникшие перед извержением вулкана Кизимен, отражающие подъем магмы на глубинах менее 8 км.

3. Выделен тип сейсмического режима «drumbeats», обусловленный движением вязкого лавового потока во время извержения вулкана Кизимен в 2010–2013 гг., в отличие от известного ранее типа, генерируемого выжиманием вершинной экструзии.

Практическая значимость работы. Результаты настоящей работы могут быть использованы для прогноза последующих извержений вулкана Кизимен и при прогнозе извержений вулканов, характеризующихся вязкими лавами (с андезитовым и дацитовым составом лав), в частности тех, которые расположены в труднодоступных районах и за которыми не ведется прямого видеонаблюдения. Полученные особенности сейсмического режима «drumbeats» расширяют представления научного сообщества о вулканических процессах и механизмах генерации слабых вулканических землетрясений при извержениях. Результаты исследования вошли в отчет по научно-исследовательской работе Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН» «Комплексные геофизические исследования вулканов Камчатки и Северных Курильских островов с целью обнаружения признаков готовящегося извержения, а также прогноза его динамики с оценкой пепловой опасности для авиации» № АААА-А19-119031590060-3.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 25.00.10.

Диссертационная работа представляется по научной специальности 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых. Согласно паспорту научной специальности направление диссертационной работы, результатов и публикаций соответствует пунктам №3, 4, 5, 22. Пункт №3. Сейсмология. Пункт №4. Исследование природы, свойств и геодинамической интерпретации деформационных характеристик и естественных геофизических полей. Пункт №5. Геофизические проявления напряженного состояния недр и оценка напряженного состояния по геофизическим данным. Пункт №22. Теоретическое и экспериментальное исследование связей петрофизических и физических свойств горных пород с результатами измерения геофизических полей.

Личный вклад. Все основные результаты получены лично автором. Автор принимал непосредственное участие на всех этапах исследований, при постановке задач, обрабатывал приведенный в работе сейсмологический материал, проводил анализ полученных материалов совместно с научным руководителем. Диссертантом лично написано более 2/3 объема публикаций по теме диссертации. Автор принимал участие в качестве руководителя проекта РФФИ № 12-05-31186 (мол_а) «Особенности сейсмических явлений, сопровождавших извержение вулкана Кизимен в 2010-2012 гг.». Результаты исследований, полученные диссертантом в рамках проекта, вошли в диссертационную работу.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов определяется большим объемом экспериментального материала, статистическим обоснованием оценок, согласованностью результатов наблюдений мировым данным.

Апробация результатов исследований. Основные положения диссертации представлялись на конференциях: VII Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных», Республика Беларусь, 2012 г.; Международное совещание JKASP, Япония, 2013 г.; XIV Международная сейсмологическая школа «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных», Республика Молдова, 2019 г.; X Юбилейная международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», Камчатский Край, с. Паратунка, 2019 г.; на семинарах и конференциях, проводимых Камчатским

Филиалом ФИЦ ЕГС РАН и Институтом Вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН в г. Петропавловск-Камчатский: IX, X региональных молодежных научных конференциях «Исследования в области наук о Земле» в 2011 и 2012 гг.; региональной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога в 2013 г.; научно-технических конференциях «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (2013, 2019 и 2021 гг.).

Структура и объем диссертации. Иссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 156 страниц текста, включая 57 рисунков, 12 таблиц и два приложения. Список литературы включает в себя 149 наименований.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 статей, в том числе 4 статьи в ведущих научных рецензируемых журналах, входящих в перечень журналов ВАК.

Благодарности. Автор признателен научному руководителю д.ф.-м.н. Павлу Павловичу Фирстову, благодаря которому определилась сфера научных интересов диссертанта и выражает благодарность за его высокопрофессиональное руководство при выполнении работы, постоянное внимание к научной деятельности автора и помощь при проведении исследований и подготовке диссертации. Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Вадиму Александровичу Салтыкову за помощь на заключительном этапе написания диссертации. Автор выражает благодарность В.Т. Гарбузовой, обратившей внимание на необычный сейсмический режим «drumbeats» во время извержения вулкана Кизимен и поделившейся своими наблюдениями с автором. Также автор выражает признательность директорам Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», где проводились исследования, В.Н. Чеброву и Д.В. Чеброву; руководителю отдела радиотелеметрических сейсмических станций В.В. Ящучку за помощь в организации полевых работ. Автор благодарен соавторам публикаций, в сотрудничестве с которыми был получен ряд интересных научных результатов: О.В. Арбугаевой, И.А. Заводевкину, Т.Ю. Кожевниковой, Р.И. Паровику. А также коллегам И.Р. Абубакирову, А.Б. Белоусову, Д.В. Дрознину, А.И. Кожурину, Е.О. Макарову, Е.А. Матвеевко, М.Ю. Некрасовой, И.Н. Нужиной, В. М. Павлову, А.А. Раевской, А.В. Рашидову, С.Л. Сенькову, О.В. Соболевской, А.С. Чемареву за консультации, которые помогли прояснить ряд вопросов, затронутых в работе.

ГЛАВА 1. ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА «DRUMBEATS»

В *разделе 1.1* приводятся типизации вулканических землетрясений, начиная с первой классификации, осуществленной российским вулканологом Г.С. Горшковым в 1949 г. [Горшков, 1954а]. Современная классификация вулканических землетрясений включает в себя следующие типы землетрясений. Вулкано-тектонические землетрясения связаны с хрупким разрушением геосреды в результате деформаций, обусловленных подъемом магмы к дневной поверхности за счет глубинных процессов. Гибридные землетрясения обусловлены разрушением среды под воздействием давления магмы или флюида с образованием трещины и дальнейшего ее заполнения выделяющейся из магмы газовой составляющей или флюидом [Гордеев, Сеньков, 1998; Carlisle, 2013; Power, 1994]. В работе [Harrington, Brodsky, 2007] особенности волновых форм гибридных землетрясений объясняются хрупким разрушением среды с низкой скоростью разрыва. Длиннопериодные землетрясения отражают колебания давления в вулканической постройке и служат индикатором приближающейся магмы к поверхности и возможного извержения [Harrington, Brodsky, 2007]. Вулканическое дрожание – непрерывные квазигармонические колебания, длительностью от нескольких минут до нескольких месяцев с преобладающими частотами $f \approx 1-5$ Гц, регистрируемые во время почти каждого вулканического извержения. В многочисленных работах указывается, что источник дрожания располагается в магматической питающей системе вулкана [Гордеев, 2007; Droznin et al., 2015]. Взрывные землетрясения сопровождают отдельные эксплозии в кратере вулкана. Кроме общепринятых

типов землетрясений, наблюдаемых на всех вулканах мира, в некоторых случаях регистрировался еще один тип землетрясений – винт («tornillo»), который характеризуется монохромным частотным спектром волновой формы и большой длительностью кода-волн [Cannata et al., 2012; Gomez, 1999], их возникновение объясняется взаимодействием водного флюида с магматическим телом [Milluzzo et al., 2010]. Еще одним типом землетрясений с вулканических районов являются очень длиннопериодные землетрясения («very long period») с частотой 0.01–0.5 Гц, выделенные в 1999 г. [Arciniega-Ceballos et al., 1999], и связанные с неразрушающимся источником в магматической системе вулкана.

В некоторых случаях роевые последовательности гибридных и длиннопериодных землетрясений, сопровождающие выжимание вязких лавовых потоков или отдельных блоков на экструзивном куполе во время извержений андезитовых и дацитовых вулканов, имеют хорошо выраженный квазипериод их возникновения длительностью от секунд до нескольких минут. Такой сейсмический режим получил название «drumbeats» («барабанный бой») в 2004–2005 гг. во время извержения вулкана Сент-Хеленс [Moran et al., 2008].

В *разделе 1.2* приводится краткое описание семи вулканов мира и их извержений, во время которых наблюдался сейсмический режим «drumbeats»: Сент-Хеленс (Saint Helens, Каскадные горы, Северная Америка), 1982 и 2004–2005 гг.; Редаут (Redoubt, Алеутские острова, Аляска), 1989 г. и 2009 г.; Суфриере-Хиллс (Soufriere Hills, остров Монтсеррат, малые Антильские острова), 1995–1997 гг.; Пичинча Гуагуа (Guagua Pichincha, Западные Кордильеры, Южная Америка), 1999 г.; Ревентадор (Reventador, Восточные Анды, Эквадор), 2004–2005 г.; Августин (Augustine, о. Сент-Огастин, Аляска), 2004 и 2005 гг.; Тунгурауа (Tungurahua, Анды, Эквадор), 2015 г. Вулканы характеризуются андезитовым и дацитовым составом лав, для их извержений (кроме извержения вулканов Августин и Тунгурауа) было характерно выжимание вершинной экструзии в кратере вулкана. Для вулканов Августин и Тунгурауа режим «drumbeats» возникал до и после эпизодов эксплозивной активности и мог сопровождать выжимание внутрикратерной экструзии, которая визуалью не наблюдалась, либо был связан с движением газа под высоким давлением перед поступающей магмой.

В *разделе 1.3* дается общая характеристика сейсмических сигналов режимов «drumbeats», зарегистрированных при извержении семи вулканов мира. По форме записи землетрясения режима «drumbeats» относились к гибридным или длиннопериодным с преобладающими частотами диапазона 0.8–7 Гц со спектральным пиком на частоте 2–3 Гц. Когда частота следования землетрясений возрастала, их сейсмическая запись сливалась, напоминая спазматическое вулканическое дрожание. Очаги землетрясений имели подобные волновые формы и располагались в постройке вулкана или непосредственно под экструзивным куполом.

Рассмотрены три основных модели механизма, ответственного за возникновение режима «drumbeats». В первой модели возникновение землетрясений объясняется переходным процессом, обусловленным вариациями давления в резонирующей трещине шириной несколько сантиметров [Wurman et al., 2013]. Во второй модели источником землетрясений рассматривается резонирующий участок магматического канала шириной несколько десятков метров и длиной несколько сотен метров [Scott et al., 2008]. В третьей модели за возникновение режима «drumbeats» отвечает механизм прилипания–скольжения «stick-slip», возникающий на границе выжимаемого экструзивного купола [Iverson et al., 2006]. Единого мнения о механизме возникновения сейсмического режима «drumbeats» нет.

ГЛАВА 2. СИСТЕМА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ

В *разделе 2.1* описана система наблюдения за сейсмичностью, входящая в зону ответственности Камчатского филиала Федерального Исследовательского Центра Единая Геофизическая Служба РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН), сеть сейсмических станций (с/ст) в районе вулкана Кизимен и применяемая аппаратура для регистрация сейсмических сигналов. Разномасштабные сети станций КФ ФИЦ с различной разрешающей способностью дают

возможность регистрировать без искажений как сильнейшие тектонические землетрясения с магнитудой $M > 8$, так и слабые землетрясения с $M \leq 1$.

В районе вулкана Кизимен сеть состоит из трех с/ст: «Тумрок» (TUM), установленной в 20 км от вершины вулкана в 2003 г.; «Кизимен» (KZV), установленной в 2.6 км в 2009 г.; «Тумрок, источники» (TUMD), установленной в июле 2011 г. в 8 км (рис. 1б на вкладке). На с/ст KZV и TUM регистрация ведется по трем составляющим скорости колебания грунта в диапазоне частот 0.5–20 Гц короткопериодными сейсмометрами CM3 с $T_s=1.2$ с, дополнительно установлен высокочувствительный канал. На TUMD установлен Guralp CMG–6TD с частотным диапазоном регистрации 0.033–40 Гц [Чебров и др., 2012а]. Также на TUMD установлена IP-видеокамера, которая в режиме реального времени с дискретностью одна минута передает данные в приемный центр «Петропавловск–Камчатский» через канал спутниковой связи.

В *разделе 2.2* представлена методика обработки записей сейсмических событий с применением различных программ. В КФ ФИЦ ЕГС РАН при оперативной обработке сейсмических сигналов до конца 2009 г. координаты землетрясений определялись по программе NIPO [Мельников, 1990]. Начиная с января 2010 г. обработка записей сейсмических событий производится с использованием интерактивной программы DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010].

Для отслеживания изменений в волновых формах землетрясений сейсмического режима «drumbeats» и разделения их на отдельные мультиплеты применялась программа «DrumCorr» [Zavodevkin et al., 2021], в основу которой заложен кросс-корреляционный детектор волновых форм. Анализ проводился по записям землетрясений на с/ст KZV, вертикальный канал SHZ. Эта станция выбрана в силу ее близости к источнику вулканических землетрясений, стабильности в работе и хорошего отношения сигнал/шум. Шаблон землетрясения выбирался исходя из следующих требований: максимальная амплитуда сигнала не должна превышать динамический диапазон регистрируемой аппаратуры, волновая форма не должна быть искажена наложением на нее другого сигнала, отношение сигнал/шум $SNR \geq 3$.

ГЛАВА 3. ВУЛКАН КИЗИМЕН И ХАРАКТЕР ЕГО АКТИВНОСТИ В 2010 - 2013 гг.

В *разделе 3.1* приводится геолого-тектоническое положение вулкана Кизимен. Вулкан сформировался на сочленении Щапинского грабена и горста хр. Тумрок в зоне сбросов восточного борта грабена (рис. 1б на вкладке) [Шанцер и др., 1973]. К борту горста хребта Тумрок приурочена серия разломов северо-западного простирания [Камчатка..., 1974]. Наиболее четко выражена система сбросов северо-восточного простирания в районе вулкана [Tibaldi et al., 2008], а также сброс, деформировавший постройку вулкана в его северо-западном секторе [Мелекесцев и др., 1990; Tibaldi et al., 2008].

В истории эруптивной активности вулкана выделены четыре цикла, каждый длительностью 2.5–3.0 тыс. лет, состоящие из периодов активизации и следующих за ними периодов ослабления (вплоть до прекращения) вулканической деятельности [Мелекесцев и др., 1992]. Период активизации каждого цикла начинался с мощных эксплозий, а завершался формированием экстрезивного купола и излиянием лавовых потоков.

С 1825 г. на склоне вулкана Кизимен отмечается фумарольная активность [Дитмар, 1901], а единственное задокументированное пепловое извержение произошло в декабре 1927–январе 1928 гг. [Пийп, 1946]. Извержению предшествовали сильные местные землетрясения, произошедшие в ноябре–декабре 1927 г.

В *разделе 3.2* рассматривается глубинное строение вулкана Кизимен. По петрологическим данным [Трусов, Плечов, 2004; Чурикова и др., 2013] на глубине ниже 4–6 км существует магматический очаг кислого состава; по [Auer et al., 2018] по диапазону давлений, рассчитанным по составу амфибола и ортопироксена, магматический очаг расположен на глубинах от 5 до 11 км. Поступление в него новых высокотемпературных порций магмы более основного состава может являться причиной последующих извержений,

что, вероятно, произошло в 1963 г., когда в районе вулкана Кизимен регистрировался рой землетрясений с максимальной локальной магнитудой $M_{Lmax}=6.4$. На протяжении 47 лет поступившая базальтовая магма перемешивалась с более кислой магмой, что вызвало ее продвижение к поверхности и извержение Кизимена в конце 2010 г. [Auer et al., 2018]. Из-за длительного смешения магм происходила ее значительная дегазация, что влияло на увеличение вязкости кислой магмы в очаге. Неполное перемешивание магматических компонентов подтверждается петрографическим изучением изверженных пород вулкана Кизимен [Auer et al., 2018] по полосчатыми андезитами и дацитами. Когда давление в очаге превысило критическое, магма медленно продвигалась к поверхности, что вызвало длительную сейсмическую подготовку извержения (более полутора лет) [Auer et al., 2018].

В *разделе 3.3* рассматривается извержение вулкана Кизимен в 2010–2013 гг. Первая слабо нагруженная пеплом парогазовая эмиссия была замечена 11.11.2010 [Дрознин и др., 2011], эта дата считается началом нового извержения вулкана Кизимен, состоявшегося после 82 лет покоя. Извержение началось с эксплозивной фазы с формированием пирокластических потоков, в результате чего произошло разрушение вершинной части вулкана, а в феврале 2011 г. началось выжимание вязкой андезитовой магмы. Лавовый поток впервые был замечен в конце февраля 2011 г. [Овсянников, Малик, 2011], а к июню 2012 г. он двумя «языками» покрыл восточный склон вулкана. Необычная активизация наблюдалась 13.12.2011, когда на протяжении нескольких часов образовалась серия пирокластических потоков, которые фиксировались видеокамерой с с/ст TUMD. На завершающей стадии извержения в вершинной части вулкана выжимался экструзивный купол. Закончилось извержение в декабре 2013 г., когда на вершине вулкана перестала регистрироваться термальная аномалия [<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>].

В *разделе 3.4* приводятся периоды формирования лавового потока вулкана Кизимен в 2011–2012 гг. с оценками его морфологии, размеров, вязкости, а также приводятся оценки скорости его движения на протяжении всего времени формирования потока [Auer et al., 2018]. К концу извержения мощность потока во фронтальной части достигла 232 м (рис. 1в на вкладке) [Двигало и др., 2013]. Максимальная длина лавового потока составила 3.5 км, объем 0.3 км^3 [Auer et al., 2018], ширина правого и левого «языков» потока ~ 400 и 300 м соответственно. Особенностью лавового потока была высокая вязкость 10^{10} – 10^{11} Па·с [Auer et al., 2018], приближающаяся к значениям вязкости магмы для вулкана Шивелуч, извержения которого сопровождаются ростом экструзивного купола.

ГЛАВА 4. ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ РАЙОНА ВУЛКАНА КИЗИМЕН, ВОЗНИКШИЕ ДО И ВО ВРЕМЯ ИЗВЕРЖЕНИЯ

В *разделе 4.1* представлена сейсмичность района вулкана Кизимен в период 1962–2008 гг. Одним из наиболее примечательных событий для Камчатского полуострова в этот период была роевая последовательность землетрясений в Щапинском грабене [Гордеев и др., 2004], произошедшая в мае-июне 1963 г., когда локальные магнитуды землетрясений составили $3.2 \leq M_L \leq 6.4$ (энергетический класс по Федотову $7.9 \leq K_S \leq 14.4$ [Федотов, 1972]), но извержения после этой роевой последовательности не произошло. До 2009 г. сейсмичность района вулкана принята «фоновой» (сейсмическая активность, уровень которой характеризуется отсутствием проявлений вулканической активности, представляющей реальную опасность) [<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>].

В *разделе 4.2* представлена сейсмичность района вулкана Кизимен в период 2009–2013 гг. на основе каталога землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН с выборкой в радиусе 20 км от вершины вулкана (55.13° N , 160.33° E) (рис. 2 на вкладке). С апреля 2009 г. в районе вулкана резко возросла сейсмичность в виде вулcano-тектонических землетрясений, свидетельствующих о хрупком разрушении геосреды в результате подъема магмы к дневной поверхности. Также в каталоге содержатся решения гипоцентров землетрясений режима «drumbeats» в периоды интенсивного формирования лавового потока (август-октябрь 2011 г. и январь-май 2012 г.), которые были исключены для дальнейшего анализа распределения

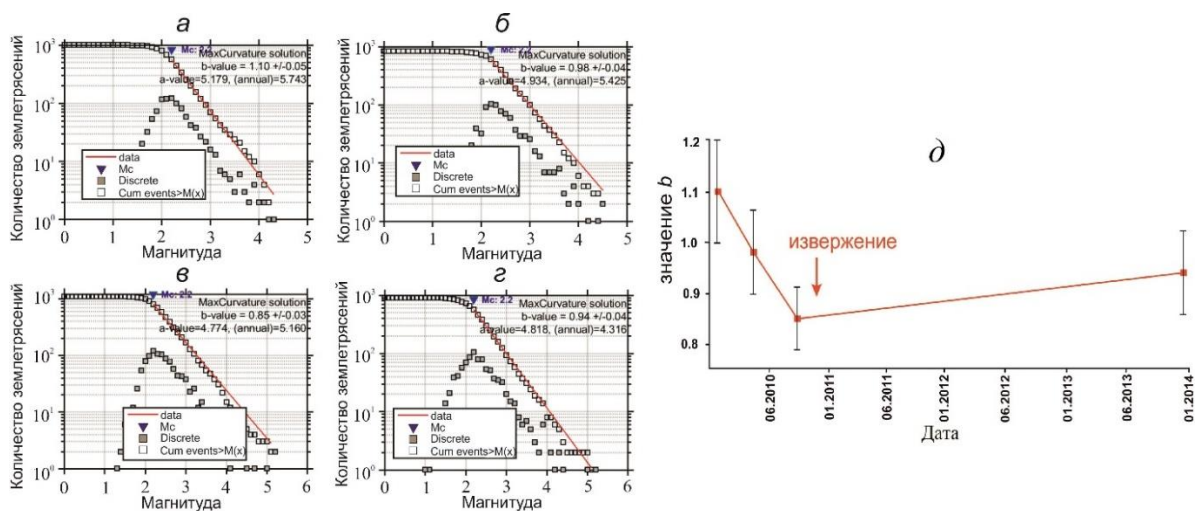


Рис. 3. Графики повторяемости землетрясений для окон длительностью 1000 землетрясений и полученные значения наклона графика повторяемости (b -value) (a – 01.01.2010 – 10.04.2010; $б$ – 25.03.2010 – 21.07.2010; $в$ – 30.06.2010 – 27.11.2010; $г$ – 23.10.2010 – 24.12.2013). M_c – величина полноты каталога; серые квадраты – дискретный график повторяемости; белые квадраты – кумулятивный. График значений b за период 2010–2013 гг. ($д$).

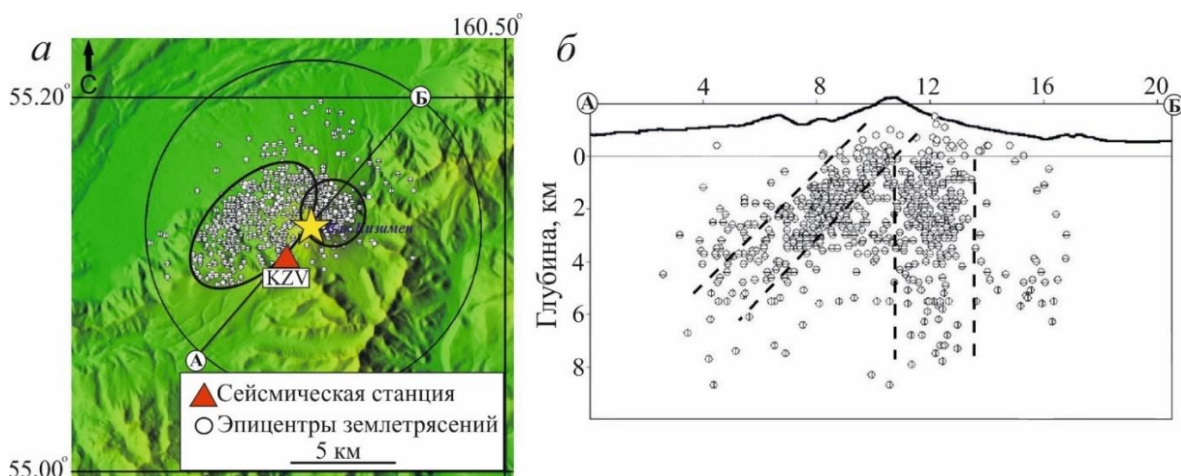


Рис. 4. Карта эпицентров (a) и вертикальный разрез с расположением очагов по линии АБ ($б$) вулканических землетрясений с $K_s < 5$ района вулкана Кизимен за ноябрь 2009 – февраль 2011 гг. Черные сплошные и пунктирные линии отражают два сейсмогенных объема в районе вулкана Кизимен.

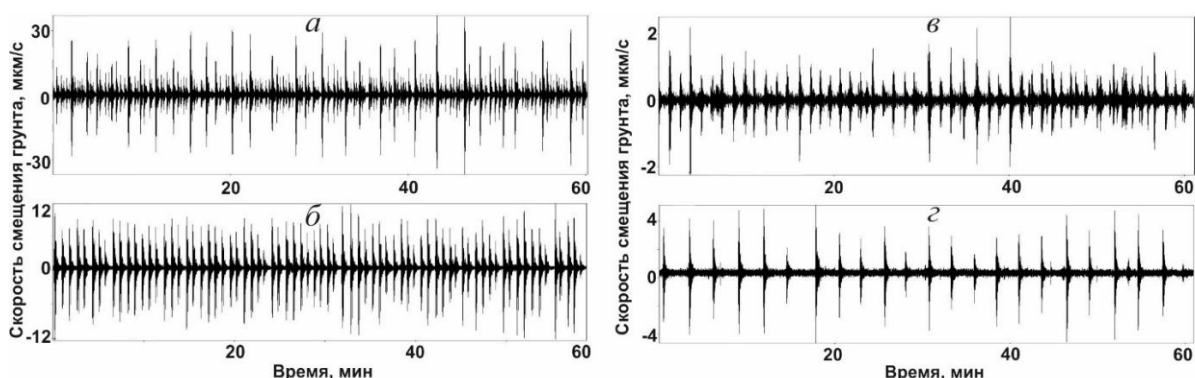


Рис. 5. Часовые фрагменты записи мультиплетов землетрясений режима «drumbeats», зарегистрированных на вертикальной составляющей SHZ с/ст KZV: a – 6.09.2011, начало отсчета времени 09:31:08; $б$ – 26.09.2011, начало отсчета времени 16:33:34; $в$ – 5.10.2011, начало отсчета времени 14:51:46; $г$ – 25.02.2012, начало отсчета времени 14:12:33.

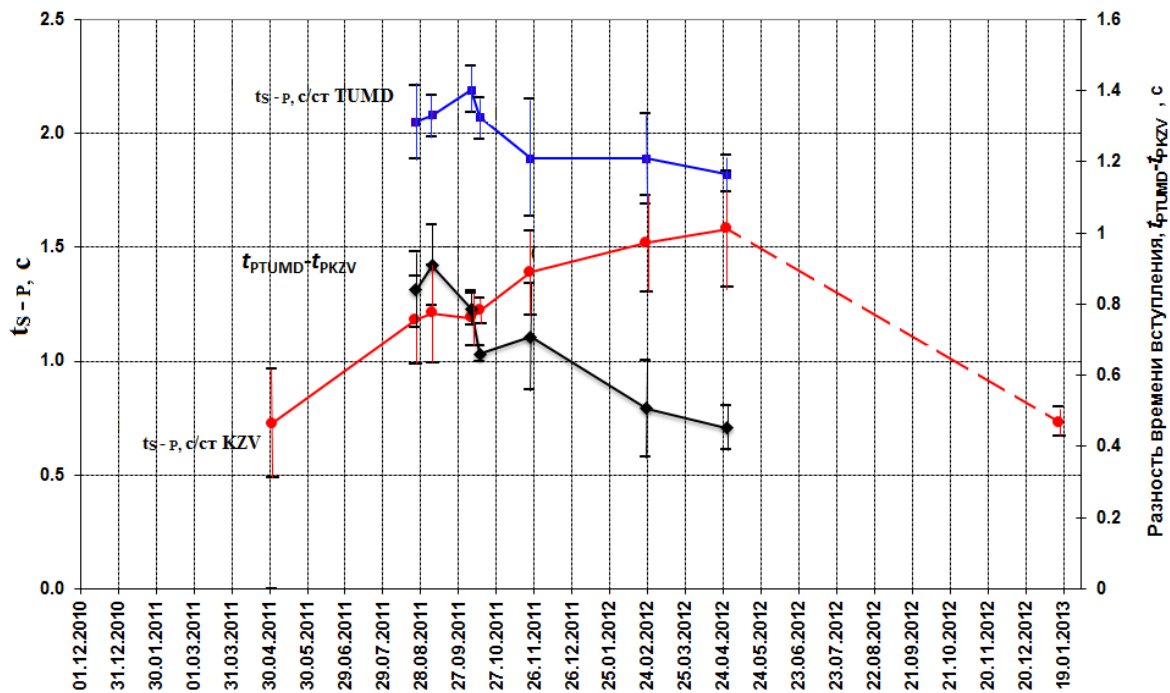


Рис. 6. Изменение разностей времен вступления волн t_{s-p} для с/ст TUMD (синий цвет), для с/ст KZV (красный цвет), разностей времен вступления $t_{p\ tumd} - t_{p\ kzv}$ (черный цвет) за период 1.05.2011 – 19.01.2013 г.

Таблица. Параметры мультиплетов землетрясений режима «drumbeats», выделенные кросс-корреляционным детектором DrumCorr.

№	Тип	Период	N	r_{corr}	$\bar{f}_D, \text{мин}^{-1}$	$\bar{A}, \text{мкм/с}$
1	III	9.12.2010	1273	0.53-0.62	0.88	0.97
2		20.01.-30.01.2011	14547	0.54-0.62	0.02-1.62	1.36-2.94
3		13-16.02.2011	7991	0.54-0.80	0.16-3.33	1.23-3.34
4	I	27.02-07.03.2011	939	0.52-0.57	0.005-0.38	2.90-7.66
5		11.03-22.03.2011	22626	0.51-0.7	0.01-3.75	2.71-6.93
6		22.04-02.05.2011	16917	0.53-0.73	0.20-2.60	0.92-4.96
7		11.05-24.05.2011	25475	0.62-0.73	0.04-4.20	1.83-9.78
8		18.05-14.06.2011	36383	0.52-0.76	0.008-3.16	2.05-16.39
9		25.07-04.08.2011	5683	0.63-0.76	0.12-0.72	1.50-2.56
10		31.07-14.10.2011	125259	0.56-0.81	0.009-2.85	1.02-13.39
11		10.10-23.10.2011	11074	0.55-0.72	0.08-1.50	0.68-2.46
12	II	13.10-23.10.2011	879	0.52-0.56	0.09-0.14	1.08-1.85
13		10.10-21.10.2011	3302	0.52-0.56	0.008-0.35	0.85-3.55
14		10.10-23.10.2011	5378	0.55-0.58	0.006-0.90	0.73-2.06
15		06.11-22.11.2011	4468	0.56-0.61	0.09-0.39	0.91-2.47
16		06.11-18.11.2011	728	0.52-0.74	0.09-0.10	1.09-3.08
17		06.11-18.11.2011	1111	0.52-0.54	0.007-0.14	0.92-2.49
18		05.01-31.05.2012	25481	0.54-0.70	0.004-0.4	1.50-5.66
19	III	04.01-04.02.2013	3703	0.52-0.61	0.008-0.25	0.72-1.70
Итого: 313217				0.51-0.81	0.004-4.20	0.68-16.35

Примечание: N – число землетрясений в мультиплете; \bar{r}_{corr} – вариации среднесуточного коэффициента корреляции в мультиплете; \bar{f}_D – диапазон среднесуточной частоты землетрясений в мультиплете; \bar{A} – диапазон среднесуточной амплитуды в мультиплете. I – первый тип режима «drumbeats», II – второй тип режима «drumbeats», III – третий тип режима «drumbeats».

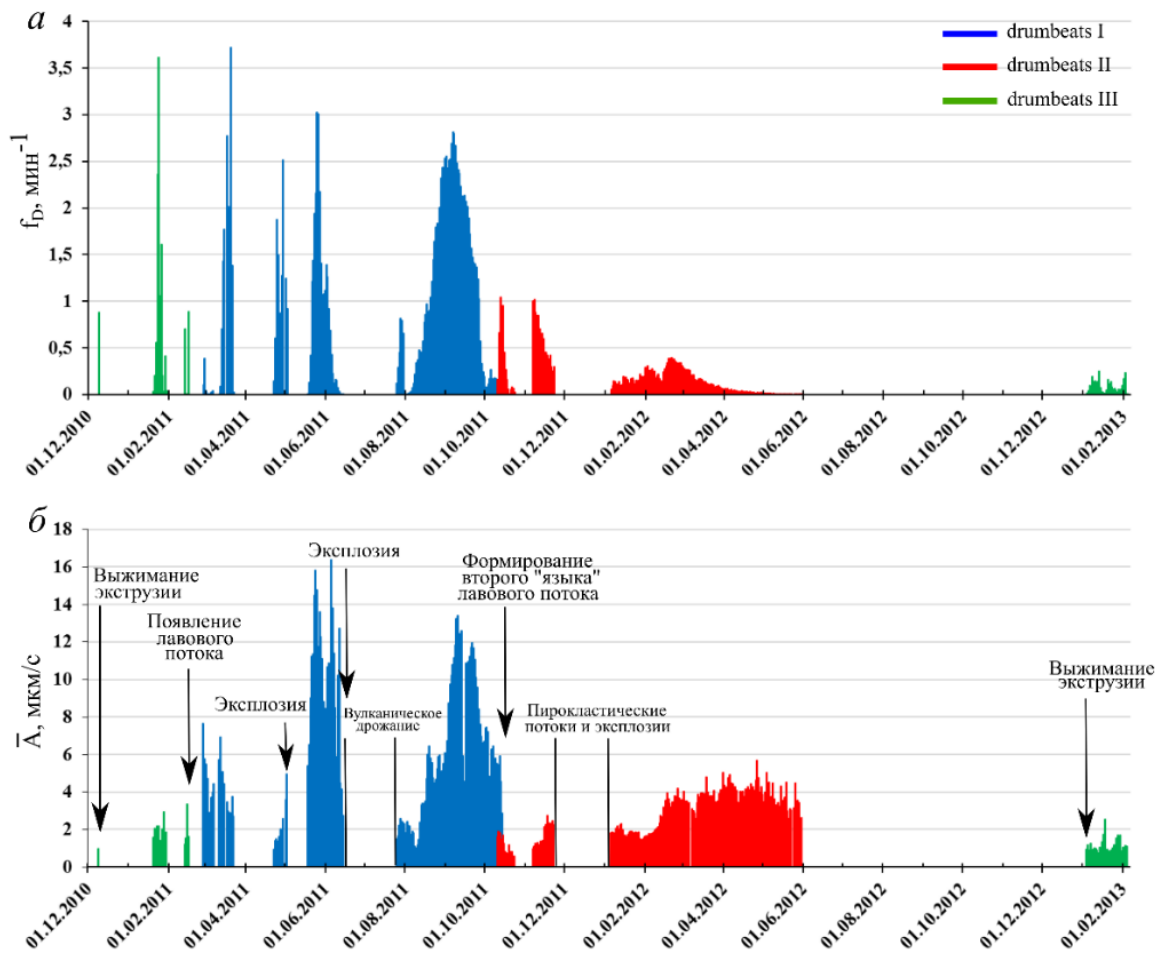


Рис. 7. Средняя частота землетрясений в сутках f_D (а) и среднее значение суточной амплитуды \bar{A} (б) в период с 1 декабря 2010 г. по март 2013 г. извержения вулкана Кизимен.

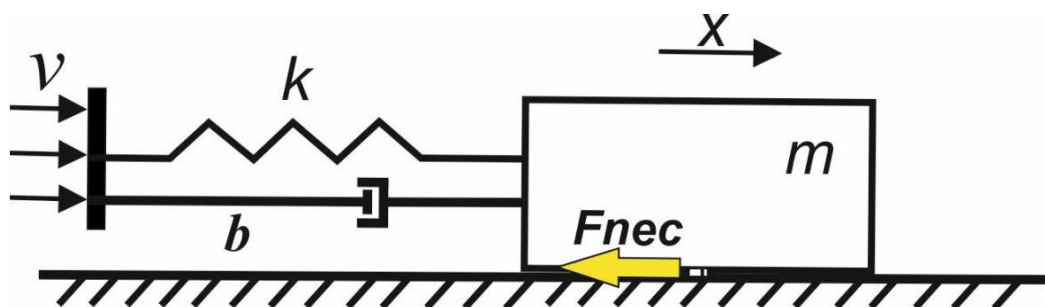


Рис. 8. Феноменологическая модель сейсмического режима «drumbeats» на основе автоколебательного процесса с механизмом «stick-slip».

вулcano–тектонических землетрясений в связи с их принадлежностью к другому типу землетрясений (рис. 2в на вкладке, заштрихованные прямоугольники).

Каталог землетрясений содержит 3611 вулcano–тектонических землетрясений с $0.8 \leq M_L \leq 5.2$ с глубинами очагов $-3.0 \leq H \leq 19.1$ км (рис. 2в на вкладке). Глубина очагов основной массы вулcano–тектонических событий в 2010-2013 гг. – 2–10 км. Несколько по-другому представлена глубина для поверхностных событий в 2009 г., что связано с определением координат очагов программой НПРО [Мельников, 1990]. После начала извержения в конце 2010 г. количество землетрясений резко снизилось (рис. 2б на вкладке). Кумулятивная сейсмическая энергия с 2009 по октябрь 2010 гг. составила $E=0.24 \times 10^{12}$ Дж. Во время усиления, выразившегося в трех сильных роевых последовательностях 9–10 октября, 19–20 октября и 27–28 ноября с $M_{Lmax}=5.2$, в течение двух месяцев было выделено $E=1.2 \cdot 10^{12}$ Дж. После сейсмической активизации в ноябре 2010 г. началось извержение вулкана Кизимен. Глубины гипоцентров землетрясений в 2010 г. ($H=7-8$ км), вероятно, маркируют верхнюю границу магматического очага.

На основе анализа роевых последовательностей вулcano–тектонических землетрясений, произошедших с района вулкана Кизимен в 2011 г. и проявлений вулканической активности было выявлено, что процесс выжимания лавового потока прерывался эксплозивными извержениями со схождением пирокластических потоков через 40–50 дней после роевых последовательностей землетрясений, что свидетельствует о поступлении на поверхность порций более газированной магмы. Такое чередование согласуется с представлениями о гибридности магм в магматическом очаге под вулканом Кизимен [Трусов, Плечов, 2004; Чурикова и др., 2013; Auer et al., 2018].

Облако эпицентров землетрясений в 2009-2013 гг. в плане имело общее направление ЮЗ–СВ, что совпадало с направлением региональных разломов, выделенных в работах [Шанцер и др., 1973; Tibaldi et al., 2008]. До ноября 2010 г. сейсмогенный объем располагался симметрично вулканической постройки как в плане, так и на вертикальных разрезах (рис. 2а на вкладке), а во время основного этапа извержения в 2011 г. прослеживалось погружение сейсмогенной зоны в районе вулкана в ЮЗ направлении до глубины 8 км. Эпицентры в СВ направлении от вулкана, по всей видимости, маркировали реактивацию разлома. В 2013 г. по распределению эпицентров выделяется оживление разлома в ЮЗ направлении от вулкана (рис. 2б на вкладке).

В *разделе 4.3* представлен анализ временных вариаций частотно–магнитудного распределения вулcano–тектонических землетрясений за период 01.2010–12.2013 гг. Пространственно-временные вариации наклона графика повторяемости (значение b) являются эффективным инструментом для исследования аспектов сейсмически активных зон и несут важную информацию о сеймотектонике региона. Повышенные значения b связаны с большим количеством слабых землетрясений, а низкие значения b – с меньшим количеством сильных землетрясений [Wyss et al., 1997]. Среднемировое значение b близко к единице [Frohlich, Davis, 1993]. Статистически значимые изменения наблюдаются для более коротких временных интервалов и ограниченных областей. Это относится и к вулканическим областям, где иногда фиксируются высокие значения, вплоть до $b=2$, что вызвано увеличением температурного градиента из-за активных магматических очагов [Wyss et al., 1997]. Также аномально высокие значения b объясняются высоким поровым давлением или аномально сильной неоднородностью из-за обширных трещин [Wyss et al., 2001]. Пониженные значения b свидетельствуют о повышении приложенного напряжения сдвига [Scholz, 1968; Wyss, 1973].

В результате экспериментов [Lei et al., 2018], в которых цилиндрические образцы гранитного блока с очень низкой изначальной плотностью трещин подвергались напряжению, было установлено, что значение b , равное 1.2–1.5, уменьшалось до 0.6 по мере увеличения напряжения сдвига, а затем быстро увеличивалось обратно до 1.0–1.3, что наблюдалось непосредственно перед падением динамического напряжения. При этом

минимальное значение b совпадало с максимальной частотой событий и уровнем напряжений от 70 до 95% прочности на сдвиг.

Изучались временные вариации значений b до и во время извержения, и их связь с динамикой извержения с целью получения информации о геомеханических свойствах блока геосреды в окрестности вулкана Кизимен. Корректность оценки значений b зависит от конфигурации сети сейсмических станций и полноты выборки землетрясений, которая определяется величиной минимальной представительной магнитуды M_C [Rydelek, Sacks, 1989; Wyss et al., 1997; Wiemer, Wyss, 2000]. Временные изменения b были рассчитаны для окон, содержащих в себе 1000 землетрясений с перекрытием 200, начиная с 2010 года с $M_C=2.2$ в каждой выборке.

Значение b заключено в пределах 0.85–1.1 (рис. 3 на вкладке). Уменьшение значения b с начала 2010 г. по ноябрь 2010 г. с 1.1 ± 0.05 до 0.85 ± 0.03 показало, что в районе вулкана происходило постепенное увеличение напряжений в среде во времени в соответствии с [Scholz, 1968; Wyss, 1973], что подтвердилось сильнейшим землетрясением, зарегистрированным 27.11.2010 с $M_L = 5.2$ и $H = -1.8\pm 2.7$ км. Механизм очага этого землетрясения, посчитанный Раевской А.А. в КФ ФИЦ ЕГС РАН по методике RSMТ (Regional Seismic Moment Tensor) [Абубакиров, Павлов, 2021], а также по данным каталога GCMT (Global Centroid Moment Tensor) – сброс. Эпицентр землетрясения совпадает с разломом, выделенным Кожуриным А.И. [Tibaldi et al., 2008].

Оценка значимости рассчитанного значения b проводилась по тесту значимости разницы в величине b между двумя группами землетрясений (ΔAIC) [Utsu, 1992]. Согласно ΔAIC рассчитанные значения b считаются значимыми. После начала извержения значение b в 2011–2013 гг. приблизилось к 0.94, что свидетельствует об уменьшении напряжения среды в связи с начавшимся извержением. Увеличение напряжения среды, выразившееся в виде уменьшения значения b в 2010 г., коррелирует с деформацией грунта в виде подъема поверхности в 2008-2010 гг. [Ji et al., 2013], что указывает на закрытую вулканическую систему с очень высоким давлением, согласно идеям [Chaussard et al., 2013].

Напряженно-деформированное состояние среды в районе вулкана Кизимен возникло вокруг магматического очага, канала и внедряющихся в вулканическую постройку систем силлов и даек в результате совокупности напряжений и деформаций при подъеме магмы к поверхности. Геомеханические процессы, по всей видимости, сопровождалось сжатием массива горных пород и определяли сейсмичность и деформацию недр в районе вулкана.

В **разделе 4.4** рассматривается микросейсмичность района вулкана Кизимен за период ноябрь 2009–февраль 2011 гг. Изучалось пространственное положение очагов землетрясений с $K_s < 5$, зарегистрированных только одной ближайшей к вулкану с/ст KZV. Определение гипоцентров производилось поляризационным методом в программе DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010]. Ошибка в определении глубины гипоцентра составила ~ 2 км, на поверхности ~ 4 км. В эпицентральной области слабых землетрясений, по плотности эпицентров с определенной долей условности можно выделить две зоны (рис. 4а на вкладке). Первая зона почти круговой формы с диаметром ~ 4 км несколько сдвинута к северо-востоку от вулкана Кизимен с диапазоном глубин -1–8 км, а вторая, эллипсоидной формы (5×10 км), совпадает с разломом, ограничивающим Щапинский грабен с диапазоном глубин очагов землетрясений -1–6 км. На вертикальной проекции очагов землетрясений также выделены два объема (рис. 4б на вкладке). Один в виде вертикальной колонны в СВ части вулкана, а второй в виде наклонной области в ЮЗ направлении от вулкана, где глубина очагов увеличивалась от -1 до 6 км. Возникшая сейсмогенная зона в районе вулкана Кизимен связана с локальным полем тектонических напряжений, обусловленным началом интрузивного процесса на глубине не более 8 км. Зона очагов землетрясений, ориентированная в СВ–ЮЗ направлении, отражает региональное поле напряжений, связанное с активным разломом в районе Щапинского грабена. Верхняя часть цилиндрической зоны, отличающаяся высокой концентрацией землетрясений на глубинах

менее 5 км может отражать путь (канал), по которому магма поднималась к поверхности. По петрологическому изучению изверженных пород [Auer et al., 2018], магматический очаг вулкана предположительно находится на глубинах от 5 до 11 км, что согласуется с распределением гипоцентров землетрясений.

ГЛАВА 5. СЕЙСМИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ ОТ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ИЗВЕРЖЕНИЯ КИЗИМЕНА В 2010–2013 ГГ.

Во время извержения вулкана Кизимен в 2010–2013 гг. различные формы проявления вулканической активности сопровождались характерными сейсмическими сигналами. Рассмотренные далее сейсмические сигналы не отражены в классической типизации землетрясений, описанной в первой главе, а дополняют ее. В данной главе проведен краткий анализ волновых форм землетрясений и спектрального состава сигналов, зарегистрированных во время извержения вулкана Кизимен, и детально исследованы землетрясения режима «drumbeats». Анализ спектральных и волновых особенностей сигналов проводился по записям ближайшей к вершине вулкана с/ст KZV.

В *разделе 5.1* рассматривается спазматическое вулканическое дрожание, возникавшее на протяжении всего периода извержения вулкана Кизимен. В начале извержения, в декабре 2010 г., дрожание связано с формированием экструзивного купола в привершинной части вулкана. В 2011–2012 гг. дрожание регистрировалось как непрерывные землетрясения «drumbeats», когда они происходили очень часто и сливались. Для спазматического вулканического дрожания в начале извержения 9.12.2010 по спектрограмме выделяются частоты $f = 0.5–0.8, 1.8, 2.7$ и 4 Гц; для дрожания 25 декабря – $0.5, 1.8, 2–2.5$ и $3–3.5$ Гц. В июне и июле наблюдалось исчезновение низкой частоты с $f = 0.5$ Гц. В декабре 2011 г. и январе 2012 г. на спектрограммах дрожания вновь появились пятна спектральной плотности на частоте 0.5 Гц. Наибольшая частота на спектрограммах дрожания отмечалась в начале извержения $f = 3.5–4$ Гц. Наличие более высоких частот в спектре дрожания, зарегистрированного в начале извержения вулкана Кизимен, объясняется меньшей вязкостью выжимающихся блоков лавы [Гордеев, 1997]. Более низкие частоты в спектре дрожания в 2011–2012 гг. связаны с движением фронта лавового потока и отражают большую вязкость выжимающихся блоков лавы.

В *разделе 5.2* рассматриваются землетрясения, возникающие во время сильных эксплозий. К сильным эксплозиям, произошедшим во время извержения Кизимена, отнесены эксплозии, высота которых была более 8 км, и от которых наблюдалось выпадение пепла в ближайших населенных пунктах. Наиболее сильные эксплозии произошли 12 декабря в 19:49 и 31.12.2010 в 17:56. Во время эксплозивных извержений регистрировались сейсмические сигналы с четкими вступлениями Р-волн со спектром сигнала $1.5–8$ Гц.

В *разделе 5.3* рассматриваются сейсмические сигналы, сопровождавшие сход пирокластических потоков и обвалов. Пирокластические потоки на вулкане Кизимен образовывались при движении вниз по склону вулкана ювенильного высокотемпературного, обладающего автоэксплозивностью материала, возникающего при фрагментации (разрушении) вязкой газонасыщенной, поступающей по магматическому каналу, магмы. Периоды схождения отдельных потоков спорадически наблюдались на протяжении всего периода извержения, образовав у подножия конуса мощный покров отложений. Самый длинный пирокластический поток образовался 2 мая 2011 г., который прошел путь длиной 7 км, достигая высот 500 м. В течение полутора часов 2 мая наблюдалось непрерывное схождение потоков, сопровождающееся образованием эруптивных облаков высотой ~ 6 км. Следующий период схождения потоков наблюдался с 13 декабря по конец декабря 2011 г., когда, 13 декабря, в течение 4 часов, было зарегистрировано 16 крупных потоков и пепловый шлейф высотой 10 км. Сигналы от пирокластических потоков имели длительность записи на ближайшей к вулкану с/ст KZV 40–80 с, с характерными частотами в диапазоне $f = 1–6$ Гц.

Помимо пирокластических потоков, в ходе затяжных экструзивно–эффузивных извержений наблюдаются автоэксплозивные каменные лавины и обвалы. Установить четкую

разницу между ними зачастую довольно трудно, так как эти процессы могут с равным успехом рассматриваться и как мощные каменные, и как слабые автоэксплозивные лавины [Малышев, 2000]. Автором будет применяться термин обвал, характеризующий как обрушение части экструзивного купола, так и блоков лавы с лавового потока.

Сигналы от обвалов, которые образовывались при выжимании экструзивного купола в начале извержения 9.12.2010, имели длительность сейсмической записи на с/ст KZV 60–140 с частотой $f = 1.8–6$ Гц с пиком на частоте $f = 3.5$ Гц. Обрушения экструзивного купола, зарегистрированные камерой видеонаблюдения с с/ст TUMD, 1.08.2012 в 02:38 и 2.01.2013 в 00:38 имели спектр плотности мощности $f = 0.8–4$ Гц с максимумом на частоте $f = 1.8$ Гц при длительности сигнала не менее 100 с.

В *разделе 5.4* рассматривается сейсмический режим «drumbeats» как индикатор динамики эффузивной фазы извержения вулкана Кизимен в 2010–2013 гг. При извержениях дацитовых и андезитовых вулканов с очень вязкой магмой, представленных в *разделе 1.2*, выжимание вершинной экструзии сопровождалось сейсмическим режимом «drumbeats». Для такого режима характерно возникновение мультиплетов квазипериодических землетрясений с почти постоянной энергией с небольшой магнитудой ($M < 3$) и длительностью от нескольких минут до нескольких часов, за что он получил название «drumbeats» (барабанный бой) [Iverson et al., 2006]. Под мультиплетами понимается группа вулканических землетрясений, характеризующаяся схожим признаком, в данном случае однообразными волновыми формами. Режим «drumbeats», наблюдаемый при извержении вулкана Кизимен в 2010–2013 гг., был весьма необычен, так как наряду с землетрясениями, которые возникали при выжимании вершинной экструзии, движение мощного вязкого лавового потока, продолжавшееся почти 1.5 года, также сопровождалось режимом «drumbeats» (рис. 5 на вкладке). Насколько известно, в литературных источниках подобный механизм возникновения режима «drumbeats» на настоящий момент не описан.

В *разделе 5.4.1* рассматриваются характеристики землетрясений режима «drumbeats». Впервые режим «drumbeats» на Кизимене был зарегистрирован 9.12.2010 г. за несколько часов непосредственно перед серией эксплозий, и сопровождал выжимание блоков вязкой лавы в привершинной части вулкана. Начиная с января 2011 г., режим «drumbeats» начал регистрироваться эпизодически, при этом основное количество землетрясений (более 500000) было зарегистрировано в марте 2011–июне 2012 гг. во время формирования лавового потока.

Рассматривалась разность вступлений продольных Р-волн на с/ст TUMD и KZV ($t_{PTUMD} - t_{PKZV}$) и разница времен вступлений поперечных и продольных волн (t_{S-P}) землетрясений режима «drumbeats», имеющих четкие вступления S и Р-волн (рис. 6 на вкладке). Увеличение t_{S-P} на с/ст KZV в 2011–2012 гг. с 0.7 до 1.6 с (красная линия) при среднеквадратичной ошибке $\sigma = 0.2$ с последующим возвращением к значению 0.7 с, свидетельствует о миграции источника землетрясений режима «drumbeats» с удалением от с/ст KZV и возвращением в январе 2013 г. Уменьшение $t_{PTUMD} - t_{PKZV}$ с июля 2011 г. по апрель 2012 г. (черная линия) с 1.4 до 0.7 с при $\sigma = 0.1$, и одновременное уменьшение t_{S-P} на с/ст TUMD (синяя линия) свидетельствуют о том, что эпицентры землетрясений в процессе извержения закономерно удалялись от с/ст KZV и приближались к с/ст TUMD. Исходя из ориентации с/ст TUMD и KZV (рис. 1б на вкладке), продвижение границы лавового потока происходило с удалением от с/ст KZV и приближением к с/ст TUMD.

В *разделе 5.4.2* приводятся 19 мультиплетов землетрясений режима «drumbeats» (таблица), которые содержат 313217 землетрясений, выделенных по сходству волновых форм, а также спектральные особенности землетрясений за различные периоды регистрации. В пределах мультиплета волновые формы землетрясений имели высокое подобие (коэффициенты корреляции $0.51 \leq \bar{r}_{\text{corr}} \leq 0.81$), что означает, что они имели схожий неразрушающийся механизм генерации и их местоположение значительно не изменялось в пределах мультиплета. Все мультиплеты отнесены к трем типам режима «drumbeats».

«Drumbeats I» связан с движением первого «языка» лавового потока, «drumbeats II» связан с движением второго «языка» лавового потока, «drumbeats III» – с выжиманием вершинной экструзии.

Первые три мультиплета по времени совпадают с выжиманием первых порций вязкой магмы. Мультиплет №1 регистрировался 9 декабря перед сильной эксплозией, подобный феномен был отражен в зарубежных исследованиях [Costa et al., 2012; Buurman et al., 2013]. Мультиплет №3 в феврале мог сопровождать как выжимание вершинной экструзии, так и формирование первого лавового потока, который в марте был замечен на склоне вулкана [Овсянников, Малик, 2011]. В мультиплетах №7 и 8 и №9 и 10 отмечалась трансформация волновой формы землетрясений, когда на фоне землетрясений с одной волновой формой регистрировались землетрясения с иной волновой формой. Среднесуточная амплитуда \bar{A} землетрясений в мультиплетах №9 и №10 была близкой и равнялась $\bar{A}_1=2.2$ и $\bar{A}_2=2.3$ мкм/с. Учитывая близкую форму спектров мультиплетов №9 и №10 можно предположить, что волновая форма трансформировалась из-за изменения условий на границе лавовый поток-подстилающая поверхность, а размеры блоков, генерирующих эти землетрясения, были примерно равными. Максимальная среднесуточная частота землетрясений \bar{f}_D регистрировалась в мультиплетах №3 и №5 (в феврале и марте 2011 г.), совпадающих по времени с выжиманием экструзии и началом выжимания лавового потока небольшой мощности (~70 м),двигающегося по крутому склону вулкана (~30°) вблизи его вершины. По мере удаления от вершины происходило увеличение мощности фронта потока и уменьшение \bar{f}_D , что также выражалось в увеличении \bar{A} .

Из 19 мультиплетов выделяются два самых продолжительных – №10 (76 суток) и №18 (146 суток). Мультиплет №10, регистрировавшийся на последней стадии движения основного «языка» лавового потока, содержал 125259 землетрясений, \bar{A} и \bar{f}_D были максимальными в средней части мультиплета. Мультиплет №18, состоящий из 25481 землетрясений, сопровождал движение второго «языка» лавового потока в конце эффузивного периода извержения. Особенностью мультиплета является плавное снижение \bar{f}_D начиная с середины февраля 2012 г., значение \bar{A} сильно не отклонялось от 4 мкм/с, что косвенно указывало на медленное уменьшение скорости движения фронта лавового потока.

По спектральному составу землетрясения режима «drumbeats» подразделяются на длиннопериодные с $f=1.4-5.6$ Гц и гибридные, для которых добавлялся более высокочастотный пик с $f=6.2-7.1$ Гц. Длиннопериодные землетрясения регистрировались, когда выжимался экструзивный купол и формировался лавовый поток и второй «язык» лавового потока. Гибридные землетрясения регистрировались во время движения двух «языков» лавового потока, когда их мощность приблизилась к максимальной. Более высокие частоты в спектре гибридных землетрясений указывают на добавление хрупкого разрушения среды [Harrington, Brodsky, 2007].

В *разделе 5.4.3* рассматривается связь динамики сейсмического режима «drumbeats» с проявлениями вулканической активности во время извержения вулкана Кизимен в 2010-2013 гг. на основе параметров выделенных мультиплетов: среднесуточных значений частоты возникновения землетрясений в минуту (f_D , мин⁻¹) и среднесуточных значений максимальной амплитуды землетрясений (\bar{A} , мкм/с) (рис. 7 на вкладке). Землетрясения, зарегистрированные в декабре 2010 – январе 2011 гг. и начале 2013 г., связываются с формированием вершинной экструзии («drumbeats III»). Для них характерны небольшие среднесуточные значения амплитуд сигналов ($\bar{A} < 2$ мкм/с), связанные с меньшим размером источника генерации землетрясений. Во время движения лавового потока наибольшая \bar{f}_D регистрировалась в марте 2011 г. при его движении по крутому склону вулкана. Максимальные \bar{A} , выросшие с 7 до 16 мкм/с, отмечались с конца мая по октябрь 2011 г. и связаны с увеличением мощности фронта лавового потока. В этот период поток спустился к подножию конуса, в результате его торможения происходило увеличение толщины во фронтальной части. При движении

второго «языка» лавового потока отмечалось плавное снижение f_D с середины февраля по июнь 2012 г., \bar{A} сильно не отклонялись от 4 мкм/с, что указывает на снижение скорости движения фронта лавового потока при одинаковом размере источника генерации землетрясений.

В *разделе 5.4.4* рассматривается пространственное положение очагов землетрясений режима «drumbeats» по сети станций КФ ФИЦ ЕГС РАН и с привлечением данных временной с/ст, установленной в районе фронта лавового потока в апреле 2012 г. Эпицентральная область землетрясений режима «drumbeats» имела компактную эллипсную форму, ориентированную в направлении СЗ–ЮВ с осями 1×2 км, соприкасающуюся с контуром лавового поля. Среднеквадратичная ошибка определения координат эпицентров составила по широте 0.7 км, а по долготе 2.9 км. Глубина очагов землетрясений составила -0.9–1.9 км. Очаги землетрясений, зарегистрированные дополнительно установленной временной с/ст, расположены вблизи контура лавового потока на высоте -0.7 – -1.3 км над у. м., что совпадает с рельефом, по которому на тот момент двигался лавовый поток.

В *разделе 5.4.5* проведена оценка смещения лавового потока uT с привлечением скоростей его движения из работы [Auer et al., 2018] и оценка площади S , длины L и ширины W разрыва, подвижки по разрыву D на основании расчета параметров очага [Гусев, Мельникова, 1990]. Смещение лавового потока, генерировавшее одно отдельное землетрясение, оценено в $uT=0.6-4$ см. Размеры блоков лавового потока, отвечающие за генерацию землетрясений, выглядят вполне правдоподобными относительно размеров лавового потока: $L/W=46/0.4 - 241/11.6$ м, $D=0.57 - 2.64$ см.

Исходя из анализа землетрясений режима «drumbeats» сделан вывод, что они возникают не только при выжимании вершинной экструзии, а также при движении вязкого лавового потока по склону вулкана.

В *разделе 5.5* предпринята попытка обосновать возникновение сейсмического режима «drumbeats» феноменологической моделью, основанной на движении вязкого лавового потока по склону вулкана.

В *разделе 5.5.1* приводятся сведения о лавовых потоках андезитовых вулканов. Они, как правило, относятся к глыбовому типу. Особо хрупкое поведение лавы наблюдается во фронтальной части потока, где происходит наибольшая деформация из-за увеличения вязкости, связанной с охлаждением потока, что приводит к существенному изменению механических свойств лавы [Cioni, Fudetta, 2005]. Строение вскрытых эрозией лавовых потоков показало, что их движение осуществляется путем скольжения по подстилающей поверхности – базальной брекчии (обломки, падающие с фронта лавового потока и затем перекрывающиеся активным ядром потока) подобно движению ледников. В пользу этого говорят субгоризонтальные плоскости сдвига в его основании, параллельные движению лавового потока [Harris, Rowland, 2015]. Для обоснования движения ледников предложена модель прерывистого скольжения «stick-slip» [Fischer, Clarke, 1997]. Также модель прерывистого скольжения была предложена для объяснения возникновения сейсмического режима «drumbeats» во время выжимания экструзии во время извержения в. Сент-Хеленс [Iverson et al., 2006]. Исходя из вязкости лавового потока ($10^{10}-10^{11}$ Па·с [Auer et al., 2018]) и ледника ($10^{10}-10^{16}$ Па·с [Озеров, 2017]), можно говорить о подобии механизмов, отвечающих за генерацию циклов прилипания и скольжения.

В *разделе 5.5.2* обсуждается феноменологическая модель возникновения сейсмического режима «drumbeats» как возбуждение автоколебательного процесса с механизмом прилипания-скольжения «stick-slip» [Brace, Byerlee, 1966], которая объясняет механизм внезапного высвобождения энергии в напряженном материале по плоскости с дефектами.

Автоколебательный процесс возникает в системе, в которой амплитуда колебаний, с одной стороны, в течение долгого времени может оставаться постоянной, а с другой стороны, определяется не начальными условиями, а свойствами самой системы, то есть не

зависит от начальных условий. Второй особенностью возбуждения автоколебательной системы является непериодический источник энергии, за счет которого создается периодический процесс [Анищенко и др., 2010]. В случае с вулканом Кизимен квазипериодические автоколебания создаются во фронтальной части потока, имеющей достаточно большую мощность, и поддерживаются за счет давления выжимающейся лавы. За счет силы трения и «примерзания» блоков к базальной брекчии происходит скачкообразное движение «stick-slip» с генерацией землетрясений с квазирегулярной периодичностью, которая объясняется стационарностью поступления лавового материала на дневную поверхность.

При движении лавового потока под напоромдвигающегося ядра потока (давление по потоку и силы гравитации) происходит «срыв» отдельных блоков его фронта с разрушением связки между блоком и подстилающей поверхностью, в результате чего и генерируются землетрясения режима «drumbeats». Скольжение будет происходить при достижении силой предельного значения при прямой пропорциональности между силой трения $F_{тр}$ и прижимающей силой P в процессе проскальзывания. Возникновение таких фрикционных автоколебаний может объясняться моделью сухого трения [Лушников, 2010]. В случае с лавовым потоком кроме сухого трения так же возникает сцепление поверхностей разнородных твердых тел – адгезия, препятствующая сдвигу отдельных блоков в его фронтальной части.

Феноменологическая модель возникновения сейсмического режима «drumbeats» выглядит следующим образом. Лавовый блок m (рис. 8 на вкладке) во фронтальной части потока (примем его в виде параллелепипеда) перемещается под действием активного ядра,двигающегося с постоянной скоростью v . При этом блок m можно рассматривать как правый элемент системы,двигающийся за счет сил некулонова трения $F_{нec}$ с падающей характеристикой в зависимости от скорости. Естественно, между активным ядром и блоком следует включить элементы с коэффициентом жесткости k и вязкого сопротивления b . Такая модель может обеспечить автоколебательный процесс движения вязкого потока по склону с генерацией сейсмического режима «drumbeats».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа выявлено уменьшение наклона кумулятивного графика повторяемости вулcano-тектонических землетрясений района вулкана с 1.1 до 0.85 в течение января–ноября 2010 г. (непосредственно перед извержением), что указывает на постепенное увеличение напряжений в среде, вызвавших хрупкое разрушение горных пород и миграцию вязкой лавы на поверхность.

По пространственному положению очагов вулcano-тектонических землетрясений района вулкана Кизимен с энергетическим классом $K_s < 5$, предварявших и сопровождавших извержение в ноябре 2009–феврале 2011 гг., выделены две сейсмогенные области, отражающие процессы, связанные с подъёмом магмы на глубинах менее 8 км. Одна – в виде вертикальной колонны, несколько сдвинутой к северо-востоку от вулкана, диаметром 4 км, простирающейся до глубины 8 км; вторая – в виде наклонной области в юго-западном направлении от вулкана, эллипсоидной формы на плоскости, с размером 5×10 км с основной массой очагов на глубинах 0–5 км.

Установлено, что сейсмический режим «drumbeats», зарегистрированный впервые для извержений вулканов п-ва Камчатка, генерировался движением вязкого лавового потока по склону вулкана, что в практике вулканологических исследований ранее не было зафиксировано; предложена феноменологическая модель генерации сейсмического режима «drumbeats», связанного с движением мощного вязкого лавового потока по склону вулкана Кизимен.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в журналах, входящих в перечень журналов ВАК:

1. 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. <http://www.kscnet.ru/journal/kraesc/article/viewFile/410/pdf>
2. 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. <https://doi.org/10.7868/S0203030614040026>
3. Фирстов П.П., Шакирова А.А. Сейсмический режим «drumbeats», предвещающий и сопровождающий извержения андезитовых и дацитовых вулканов и его особенности (обзор) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 3. Вып. № 43. С. 75-88. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-3-43-75-88>
4. **Shakirova A.**, Firstov P. Features of the Kizimen volcano area seismicity prior to and during the 2010-2013 eruption // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2022. V. 421. P. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107420>

Прочие публикации:

5. Шакирова А.А., Фирстов П.П. Сейсмический режим «drumbeats», обусловленный движением вязкого лавового потока при извержении вулкана Кизимен в 2011 г. // Российский сейсмологический журнал. 2019. Т. 1. № 1. С. 67–74. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2019.1.06>
6. Шакирова А.А., Фирстов П.П., Паровик Р.И. Феноменологическая модель генерации сейсмического режима «drumbeats» при движении по склону вязкого лавового потока вулкана Кизимен в 2011 – 2012 гг. // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2020. №4. Т. 33. С. 86-101. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2020-33-4-86-101>
7. **Shakirova A.**, Firstov P. Observation of the seismic mode «drumbeats» on volcanoes of the world and Kizimen volcano (Russia) // E3S Web Conf. 2019. V. 127. P. 1-6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912703004>

Подписано в печать 11.07.2022г. Формат 60x84 1/16

Бумага офсетная. Печать Riso.

Усл. печ. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 150 экз. Заказ 282.

Отпечатано в Институте земной коры СО РАН

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128.