

УДК 550.349.4+551.21

СЕЙСМИЧЕСКИЙ ФАКТОР В АКТИВИЗАЦИИ ЭНДОГЕННО-ЭКЗОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВУЛКАНЕ КЛЮЧЕВСКОЙ (КАМЧАТКА)

© 2020 г. Р. И. Черкашин^а, *, Я. Д. Муравьев^а, И. К. Дубровская^а

^аИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

*e-mail: romainchik@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.04.2019 г.

После доработки 11.11.2019 г.

Принята к публикации 26.12.2019 г.

На одном из самых активных и крупных вулканов мира – стратовулкане Ключевской – за историческое время часто наблюдались разнообразные по масштабу изменения морфологии поверхности его постройки. Эти разрушения в основном локализовались в долгоживущих геологических образованиях – вулcano-тектонических желобах. В ряде исследований делались прогнозы обрушений, основанные на рельефе и морфологии вулкана, системе тектонических нарушений в его постройке, локализации побочных извержений, внедрением секущих постройку интрузий и даек, деятельности ледников на склонах и других факторах. Роль сейсмической активности в подготовке и образовании крупных обрушений и оползней на вулкане ранее отдельно не рассматривалась. В данной работе выполнен анализ сейсмичности Ключевского вулкана, связанной с периодами активизации извержений как одной из ключевых причин развития деформаций и крупных обрушений/оползней разного генезиса на его склонах. Согласно пространственному распределению землетрясений и их сейсмической энергии, наиболее благоприятными для развития крупных обрушений являются северо-западный и юго-восточный секторы вулкана, что, вероятно, связано с растяжением постройки относительно трансирюющего ее субмеридионального разлома северо–северо-восточного простирания.

Ключевые слова: Ключевской вулкан, эруптивный цикл, вулcano-тектонический желоб, сейсмичность, вулканическое дрожание, вибрации, обвальные процессы.

DOI: 10.31857/S0203030620020029

ВВЕДЕНИЕ

Проблема катастрофических природных процессов на действующих вулканах, возникающих при взаимодействии эндогенных и экзогенных факторов (обвалы, обрушения, оползни, лахары и т.д.), является важной с точки зрения прогноза и предупреждения негативных последствий таких событий для проживающего в их окрестностях населения и инфраструктуры. Катастрофические события в вулканических областях, как правило, имеют комплексную природу, когда активной составляющей в большинстве случаев являются лед и снег, участвующие в строении вулканических сооружений. Вызванные эндогенными факторами подвижки ледников приводят к образованию обломочных лавин, насыщенных льдом, которые могут превратиться в вулcanoгенный сель (лахар). Оценка опасности для этих типов гравитационных потоков чрезвычайно трудна из-за их характерных особенностей (в первую очередь из-за повышенных температур и газонасыщенности

перемещаемых масс пород) в отличие от собственно лавин и селевых потоков. Такие события могут затронуть области, отдаленные от вулканов и ледников, которые ранее считались безопасными. Выяснение природы катастрофических процессов и факторов, которые к ним приводят, необходимо для лучшего понимания в целом механизма работы такой сложной природной системы как вулкан, а также для прогноза подобных явлений в различных районах современного вулканизма.

Ранее в работах [Брайцева, Мелекесцев, 1984; Адушкин и др., 1994; Делемень, 1994; и др.] рассматривался ряд факторов, способных вызвать обрушения постройки вулкана в той или иной ее части, и делались прогнозы таких событий. Так, согласно работе [Адушкин и др., 1994] наиболее вероятный сектор обрушения ограничен направлениями на кратеры Билюкай и Апахончич, что связывается с наибольшей концентрацией в этом секторе побочных извержений. По мнению авто-

ров данной статьи, повышенная вероятность обрушений в северо-восточном секторе связана с возможным внедрением пластовой субгоризонтальной интрузии в постройку вулкана, которая ослабит ее устойчивость.

В.Л. Леонов [1994] отмечал, что плотность тектонических нарушений и радиальных трещин в юго-западном секторе вулкана наиболее низка по сравнению с другими секторами вулкана. В то же время, наиболее опасен в отношении возможных обвалов и проседаний юго-восточный склон вулкана. Это заключение было обосновано асимметричностью вулканической постройки, стоящей на древнем наклонном основании вулканов Ушковского и Камень, а также отсутствием на вулканах Камчатки обвалов, сошедших к западу или северо-западу. Концентрация тектонических нарушений, создающих оптимальные условия для смещения пород, наиболее заметна в северо-западной части постройки. Автор выделяет глубинную магмаподводящую зону северо-западного простираения, совпадающую по ориентировке с Апахончичским вулcano-тектоническим желобом, и подчеркивает ее превалирующую роль в возможном развитии катастрофических обвалов и направленных взрывов на юго-восточном склоне вулкана и считает незначительной вероятность крупных обрушений, связанных с поверхностными структурами вулcano-тектонических желобов.

В работе [Брайцева, Мелекесцев, 1984] также утверждается, что наиболее опасен в отношении возникновения сейсмoтектонических и вулcano-сейсмoтектонических обвалов северо-западный сектор конуса Ключевского вулкана.

Катастрофическое обвальное событие в Крестовском вулcano-тектоническом желобе при пароксизмальном извержении вулкана в 1945 г. благодаря своему видимому катастрофизму изначально было охарактеризовано как серия фреатических взрывов в результате взаимодействия лавового потока и ледника [Пийп, 1956]. Вероятным толчком к этому обвалу считалась бомбардировка северо-западного склона большим количеством вулканических бомб, хотя позже было установлено [Муравьев, Саламатин, 1993], что причиной этого события послужило многолетнее накопление в желобе отложений продуктов извержений в переслаивании со льдом. В процессе многолетнего роста мощности ледникового массива начинается протаивание мерзлых пород на его ложе, происходит отслоение отложений от подстилающих пород и при достижении критических условий их обрушение/оползень. Триггером к началу этого процесса может служить усиление по тем или иным причинам сейсмической активности в

вулканической постройке [Двигало, Мелекесцев, 2000; Муравьев, Саламатин, 1993].

И.Ф. Делемень [1994] также рассматривает северо-западный сектор постройки вулкана, а именно, ее прикратерную часть, как район возможного крупного скального оползня, имеющего потенциальную опасность для п. Ключи. Здесь развиты две системы сопряженных трещин в зоне сочленения с кратером Козыревского и Крестовского желобов. Спусковым механизмом для обрушения может стать внедрение двух даек по этим трещинам. Относительно северо-восточного сектора сказано, что здесь наиболее проявлена активность шлаковых конусов, и с данной частью постройки связывается предполагаемая зона наибольшей проницаемости в ее основании, по которой многократно внедрялась магма. В то же время, нижняя часть постройки здесь армирована упрочняющими элементами — уже остывшими дайками и силлами.

С.А. Федотовым [1993] выделяется верхняя часть конуса, выше 3500 м, которая является непрочной ввиду широкого развития здесь трещин побочных прорывов и трещин растяжения. Объем этой части постройки вулкана составляет около 4 км³. Наиболее неустойчивой он считает вершину конуса выше уровня 4300–4400 м. В пределах юго-восточного сектора также отмечено большое количество радиальных трещин, связанных с побочными извержениями, что делает этот сектор конуса (особенно в верхней его части) непрочным.

Роль сейсмической активности в подготовке и образовании крупных обрушений и оползней на склонах Ключевского вулкана в предшествующих работах рассматривается очень узко, лишь упоминается наряду с другими факторами или как возможный триггер для катастрофических событий и не оценивается количественно. В данной работе мы рассматриваем два вида воздействия сейсмической активности на процессы деформаций в вулканической постройке: 1) подготовительный, т.е. вклад долговременного умеренно-слабого сейсмического воздействия и вулканического дрожания в процессы постепенной дестабилизации пород, слагающих склоны вулкана; 2) триггерный, т.е. влияние кратковременных и более сильных роев землетрясений на наиболее ослабленные или готовые к обрушению части постройки, непосредственно инициирующих крупные обвальные события.

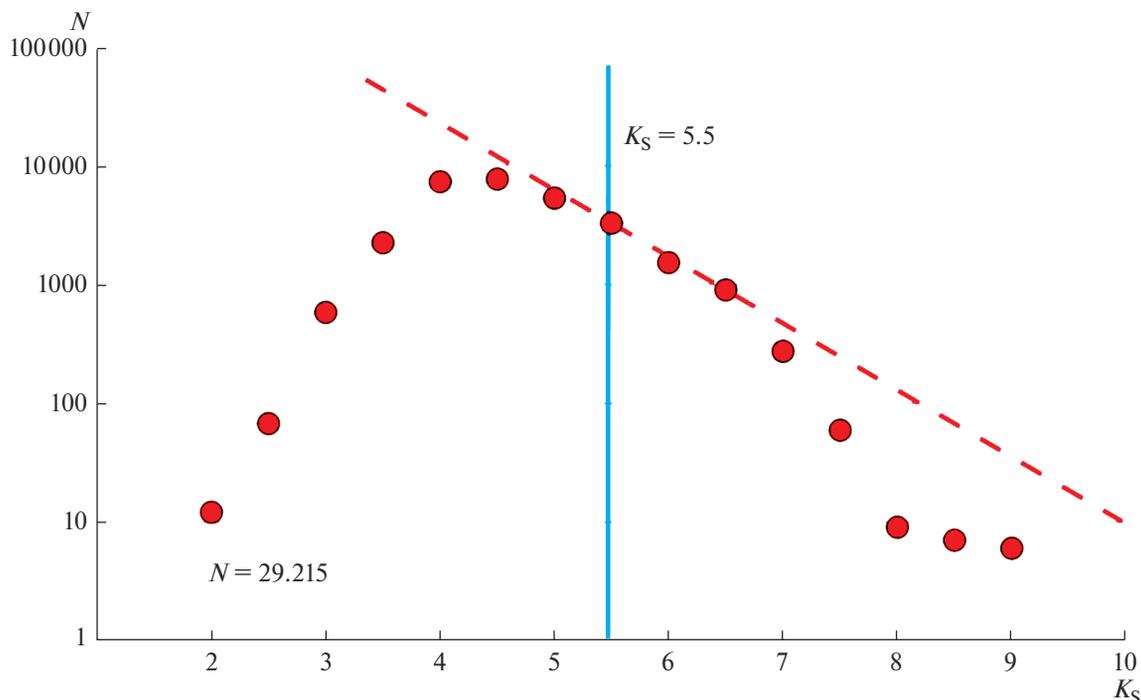


Рис. 1. Распределение числа землетрясений N по энергетическому классу K_s за 1998–2017 гг. для глубин $-5 \leq h \leq 25$ км с шагом для $K_s = 0.5$. Вертикальной линией отмечен уровень представительности выборки.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

За период последнего эруптивного цикла Ключевского вулкана 1995–2017 гг. зарегистрировано 8 вершинных извержений. Каталог землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН за этот период для рассматриваемых глубин $-5 \leq h \leq 50$ км насчитывает 76197 событий. С 1995 по 1997 гг. работало 4 сейсмостанции, с 1998 по 2005 гг. — 6, с 2005 по 2017 гг. — 9. Использовались данные энергетического класса землетрясений K_s по данным поперечных сейсмических волн S по номограмме С.А. Федотова [Федотов, 1972], с округлением значений по каталогу до 0.1. Данные о среднесуточной амплитуде вулканического дрожания A/T_{cp} за 2010–2017 гг. взяты с сайта КФ ФИЦ ЕГС РАН.¹

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования роли сейсмичности в эндогенно-экзогенных процессах на склонах вулкана данные сейсмического мониторинга из каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН были обработаны в програм-

ме ArcGIS 10.1. Подсчитывались количество землетрясений и их суммарная энергия с использованием энергетического класса K_s , при этом $K_s = \lg E$, где энергия выражена в Джоулях.

Был построен график повторяемости землетрясений по энергетическим классам за 1998–2017 гг. для глубин $-5 \leq h \leq 25$ км с шагом для $K_s = 0.5$ (рис. 1). На рисунке видно, что линейность графика обеспечивается для K_s с 5.5 по 6.5, поэтому представительным для данной выборки и для всего используемого нами диапазона данных из каталога будем считать класс землетрясений, начиная с 5.5. Землетрясения с $K_s \geq 7.0$ не подчиняются графику повторяемости, следовательно, природа их возникновения иная, чем у землетрясений представительного класса. Землетрясения с $K_s \leq 5.0$ совпадают по области своего распространения с землетрясениями представительного класса, и их мы также берем на рассмотрение, поскольку считаем важной их роль в эндогенно-экзогенных процессах.

Для учета распределения землетрясений в районе Ключевского вулкана выделена территория с радиусом 10 км от его вершины, которая была разделена на четыре сектора: восток–северо-восточный (В–СВ), юг–юго-восточный (Ю–ЮВ), запад–юго-западный (З–ЮЗ) и север–северо-за-

¹ Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г.—настоящее время). Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН. Единая информационная система сейсмологических данных, <http://sdis.emsd.ru/main.php>; <http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>.

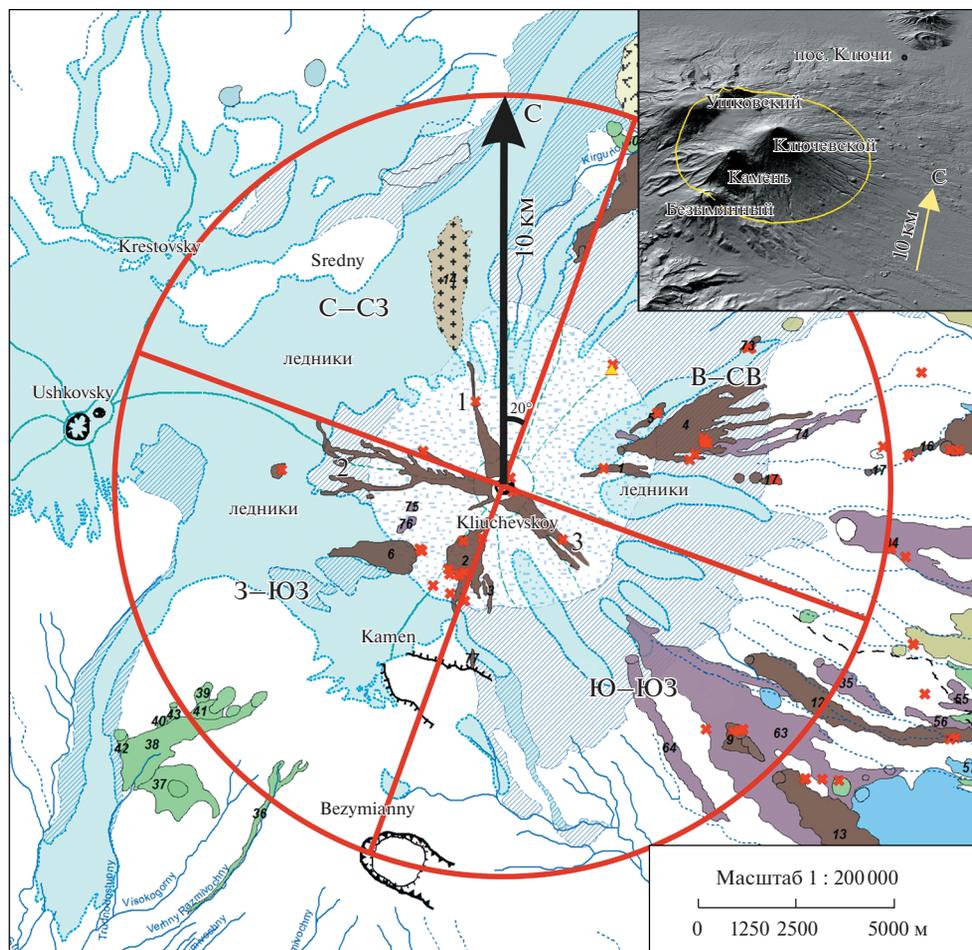


Рис. 2. Фрагмент геолого-геоморфологической карты Ключевского вулкана [Bergal-Kuvikas et al., 2017] с обзорной схемой района исследований (врезка в углу). Область исследования – радиус 10 км от вершины вулкана. 1–3 – вулcano-тектонические желоба: 1 – Крестовский, 2 – Козыревский, 3 – Апахончичский.

падный (С–СЗ) (рис. 2). Ось разделения на секторы взята с отклонением на северо-восток на 20° , что обусловлено простираем глубинного сквозькорового разлома основной магмоподводящей структуры, контролирующей современную вулканическую деятельность Ключевской группы вулканов (КГВ) [Славина и др., 2001]. Подобный подход, по нашему мнению, дает наиболее представительное распределение землетрясений и их сейсмической энергии относительно внутреннего строения Ключевского вулкана.

Также, для оценки длительного воздействия слабых низкочастотных вибраций на силу и частоту возникновения землетрясений в постройке вулкана и на ее устойчивость, привлечены данные о вулканическом дрожании (ВД). Влияние ВД на сейсмическую активность в постройке вулкана может иметь общие черты с подобным воз-

действием механических вибраций на процесс деформирования пород. Согласно экспериментальным данным [Куксенко, 2003], воздействие слабых низкочастотных вибраций в напряженной среде объясняется повышением подвижности структурных элементов в вибрационном поле с постепенно нарастающим масштабом образующихся трещин и нарушений. Слабые вибрации могут служить триггером для снятия напряжений в среде и приводить к сильным скачкам деформации. Амплитуда вибраций в эксперименте была около $1 \mu\text{m}$, что сопоставимо с типичными амплитудами ВД, регистрируемыми под вулканом в периоды активизации вершинного кратера. Амплитуды ВД на Ключевском вулкане варьируются в широких пределах – от $0.1 \mu\text{m}$ до максимальных величин $312 \mu\text{m}$. Частота вибраций в эксперименте 40 Hz сопоставима с преобладающими частота-

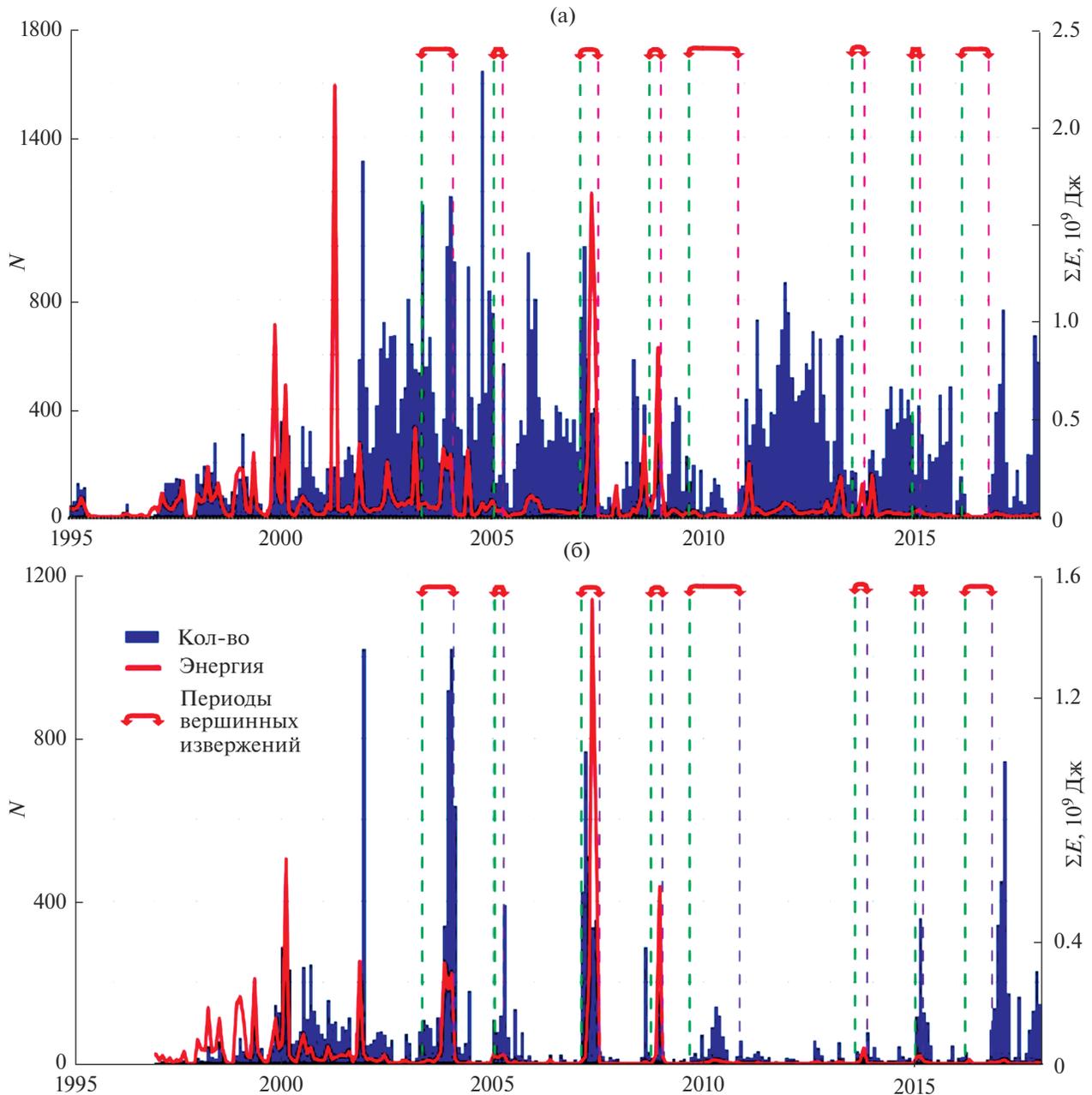


Рис. 3. Графики числа землетрясений и их суммарной энергии (шаг – один месяц) в районе исследований: а – для всего диапазона данных ($-5 \leq h \leq 50$ км), б – для событий в постройке ($-5 \leq h \leq 0$ км). Стрелками с пунктиром указаны периоды вершинных извержений.

ми ВД, лежащими в пределах 0.15–20 Hz [Токарев, 1981]. Постройка стратовулкана, сложенная чередованием лавовых потоков, пирокластики и льда, имеет гетерогенную структуру, что усиливает напряжения в ней. Воздействие вибраций в рассматриваемом случае эквивалентно увеличению заданной нагрузки на породу. В работах [Садовский и др., 1981; Мирзоев, Негматуллаев, 1990;

Мирзоев и др., 2015] также отмечался эффект воздействия продолжительных слабых вибраций на возникновение деформаций в горных породах и сейсмичность.

В связи с этими данными нами также рассмотрена роль вулканического дрожания и его связь с землетрясениями в общей картине сейсмичности Ключевского вулкана.

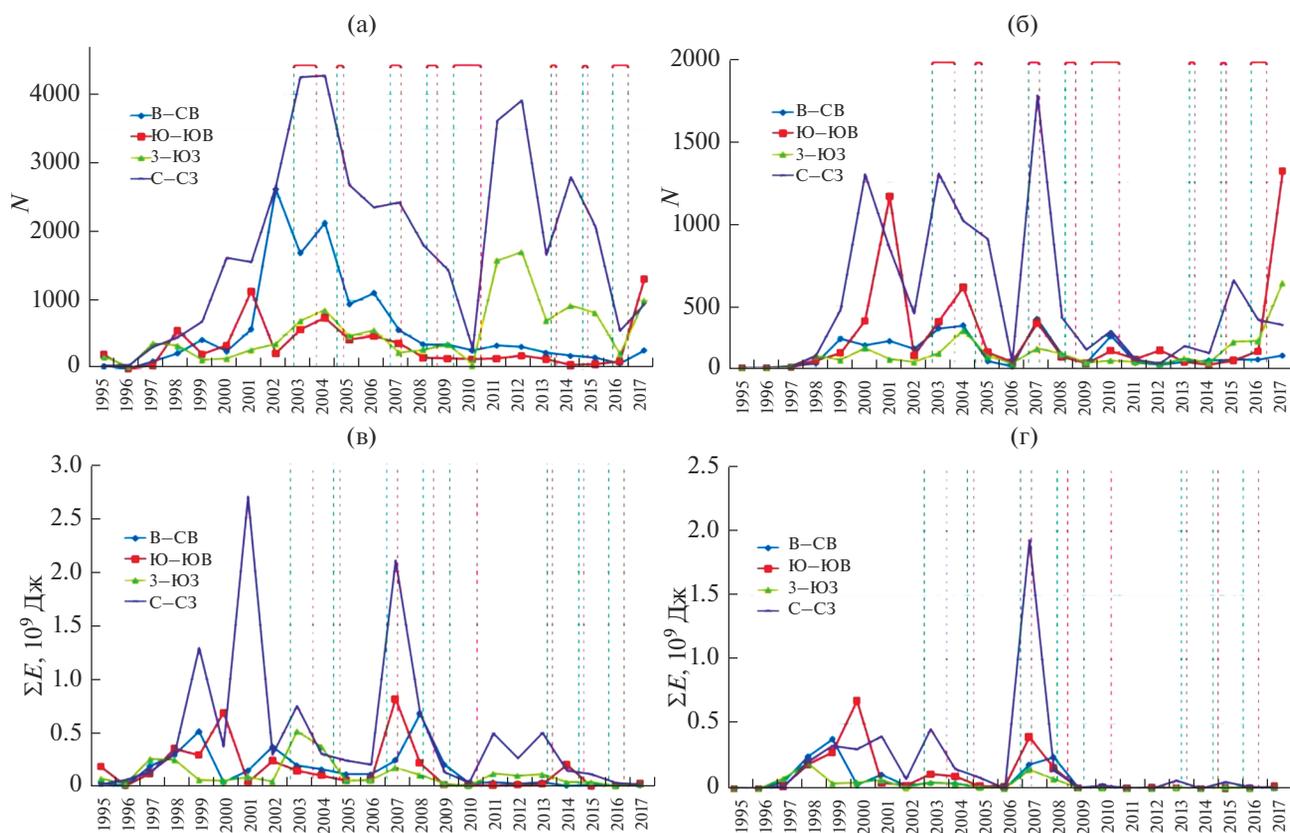


Рис. 4. Мониторинг числа землетрясений (N) и их суммарной энергии (ΣE) по секторам: а, в – для всего диапазона данных ($-5 \leq h \leq 50$ км); б, г – для событий в постройке ($-5 \leq h \leq 0$ км). Стрелками с пунктиром указаны периоды вершинных извержений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сейсмичность под вулканом и возможные деформации его постройки

По первичным данным из каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН были построены общие графики сейсмичности с временным шагом в один месяц (рис. 3), затем по обработанным в ArcGis 10.1 данным построены графики с шагом в один год по каждому отдельному сектору (рис. 4).

Согласно картине общей сейсмичности под вулканом, активизации вершинного кратера хорошо коррелируют с усилением сейсмической активности в его постройке. В то же время под вулканом происходит большое количество глубоких землетрясений ($20 \leq h \leq 35$ км), эпизоды высокой активности которых не совпадают по времени с эпизодами терминальных извержений. Графики на рис. 3 дают представление о соотношении уровня сейсмической активности между разными секторами вулкана во времени. Преобладают годы, когда уровень сейсмической активности в С–С3 секторе в два, в пять и более раз

превышает сейсмичность по другим секторам вулкана (1999–2007, 2011–2015). В другие годы сейсмичность между выделенными сегментами постройки распределена более равномерно (1995–1998, 2009–2010, 2016) (см. рис. 4).

Согласно полученным результатам, для всех зарегистрированных землетрясений были построены диаграммы распределения их числа и суммарной энергии по рассматриваемым секторам вулкана (рис. 5). Распределение сейсмической активности отчетливо анизотропно для склонов разных экспозиций постройки вулкана, что подтверждает целесообразность выбранного нами принципа деления на секторы.

На диаграмме четко прослеживается концентрация большей сейсмической активности в С–С3 секторе вулкана в целом, также общее простираение облака такой наибольшей сейсмичности в постройке вулкана с Ю–ЮВ на С–С3. Число всех землетрясений в С–С3 секторе вулкана за рассматриваемый период превышает 42 тыс., что вчетверо больше, чем в смежных секторах, и в

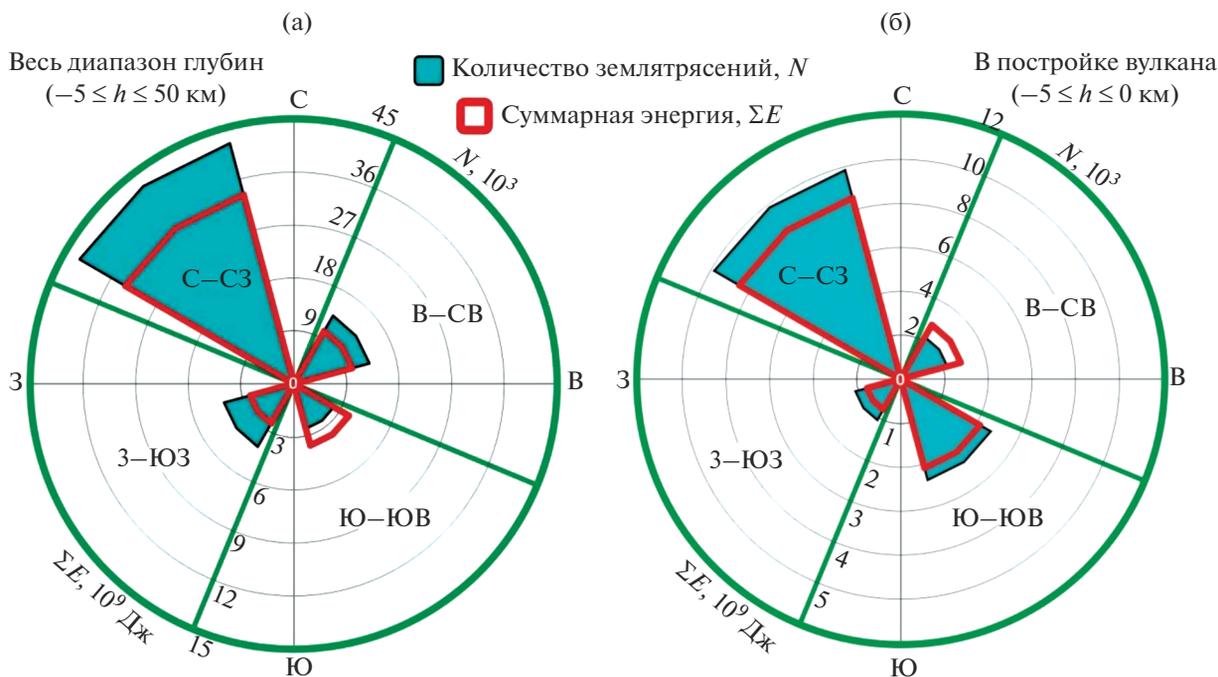


Рис. 5. Диаграммы количества землетрясений и их суммарной энергии по секторам: а – для всего диапазона глубин ($-5 \leq h \leq 50$ км), б – для землетрясений в постройке ($-5 \leq h \leq 0$ км). В центре – вершина вулкана.

шесть раз больше, чем в Ю–ЮВ секторе. А суммарная энергия, выделившаяся в результате этих событий, в данном секторе равна 11.1×10^9 Дж, что в 3–4 раза выше, чем в смежных секторах. Примечательно, что в В–ЮВ секторе количество глубоких землетрясений небольшое, но в пределах постройки сконцентрированы более высокоэнергетичные землетрясения, чем в прилегающих секторах.

Для примера на рис. 6 показаны все землетрясения под вулканом за 2017 г., которые отражают типичную картину распределения его сейсмичности, наглядно соотносимую с диаграммой на рис. 5а.

Процентные соотношения и коэффициенты $\Sigma \text{Эн.}/N$, приведенные в табл. 1, говорят о преобладании событий с высокими K_s в пределах постройки вулкана (выше уровня моря) по сравнению с другими интервалами глубин и, следова-

Таблица 1. Соотношения количества землетрясений и их суммарной энергии для глубин $-5 \leq h \leq 50$ км и $-5 \leq h \leq 0$ км по секторам

Сектор Ключевского вулкана	Доля в постройке ($-5 \leq h \leq 0$ км) от общего ($-5 \leq h \leq 50$ км)		Отношение $\Sigma \text{Эн.}/N$	
	числа событий N , %	Σ энергии, %	общее ($-5 \leq h \leq 50$ км)	в постройке ($-5 \leq h \leq 0$ км)
В–СВ	16.4	41.1	0.26	0.64
Ю–ЮВ	59.9	57.7	0.46	0.44
3–ЮЗ	17.3	30.7	0.21	0.37
С–СЗ	23.2	38.3	0.26	0.43

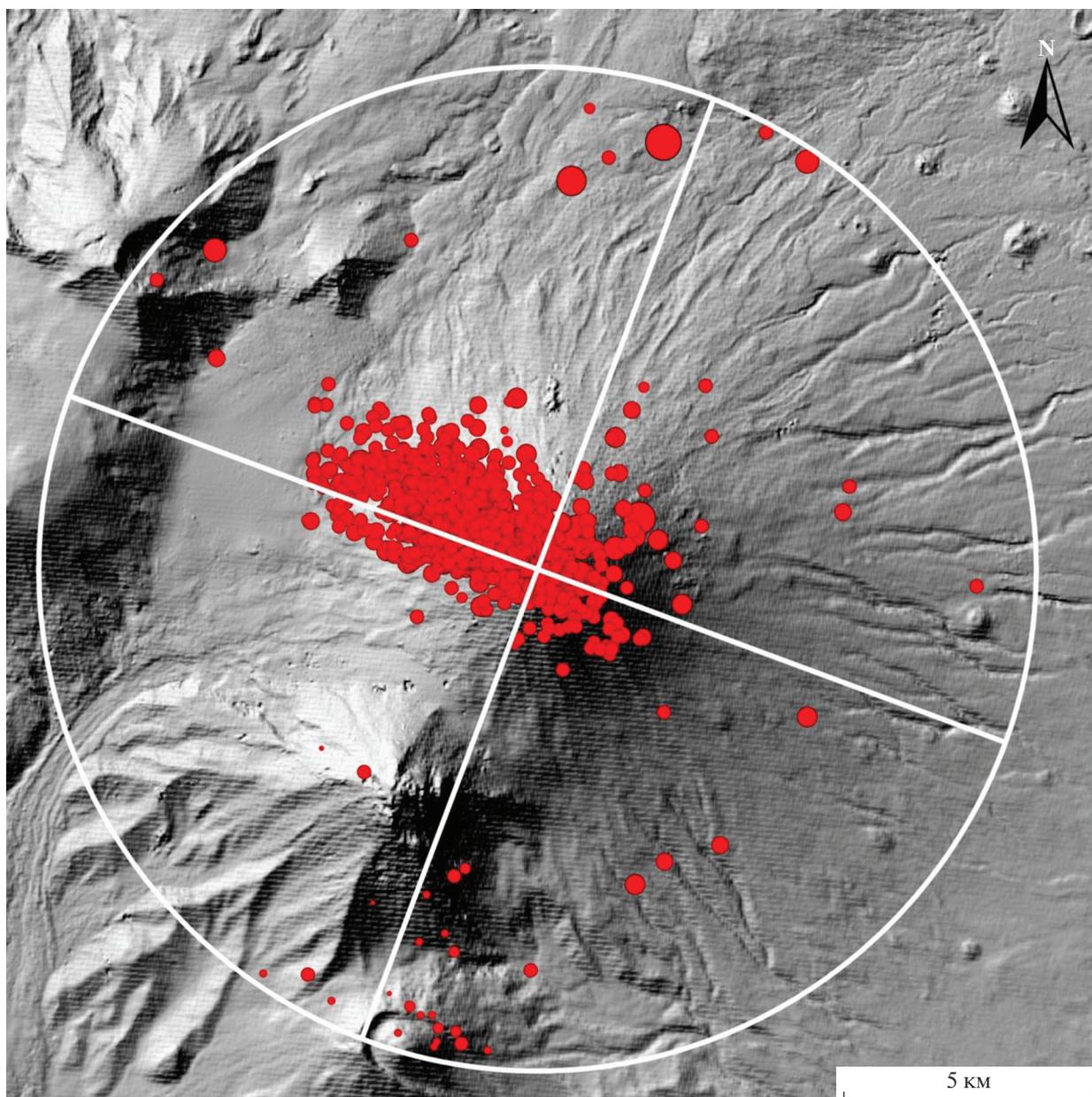


Рис. 6. Сейсмичность Ключевского вулкана в 2017 г.

тельно, о доминирующем дестабилизирующем влиянии их на постройку. Именно этот спектр землетрясений обусловлен процессами активизации вулкана и может оказывать непосредственное влияние на развитие поверхностных деформаций на его склонах. Поэтому эти землетрясения рассмотрим далее более подробно.

Согласно результатам расчетов, наименее сейсмически активным на вулкане является 3–ЮЗ его сектор. Соотношение $\Sigma E/N$ в этом секторе самое низкое – 0.37, что говорит о преобладании

здесь слабых землетрясений наряду с их относительно невысокой повторяемостью во времени. На основании этого можно заключить, что развитие в пределах 3–ЮЗ сектора обрушений постройки вулкана, спровоцированного сейсмическими событиями, маловероятно.

Относительно активнее по числу сейсмических событий и их суммарной энергии В–СВ сектор вулкана. Отношение суммарной энергии к числу землетрясений здесь самое большое – 0.64, что говорит о преобладании нечастых, но доволь-

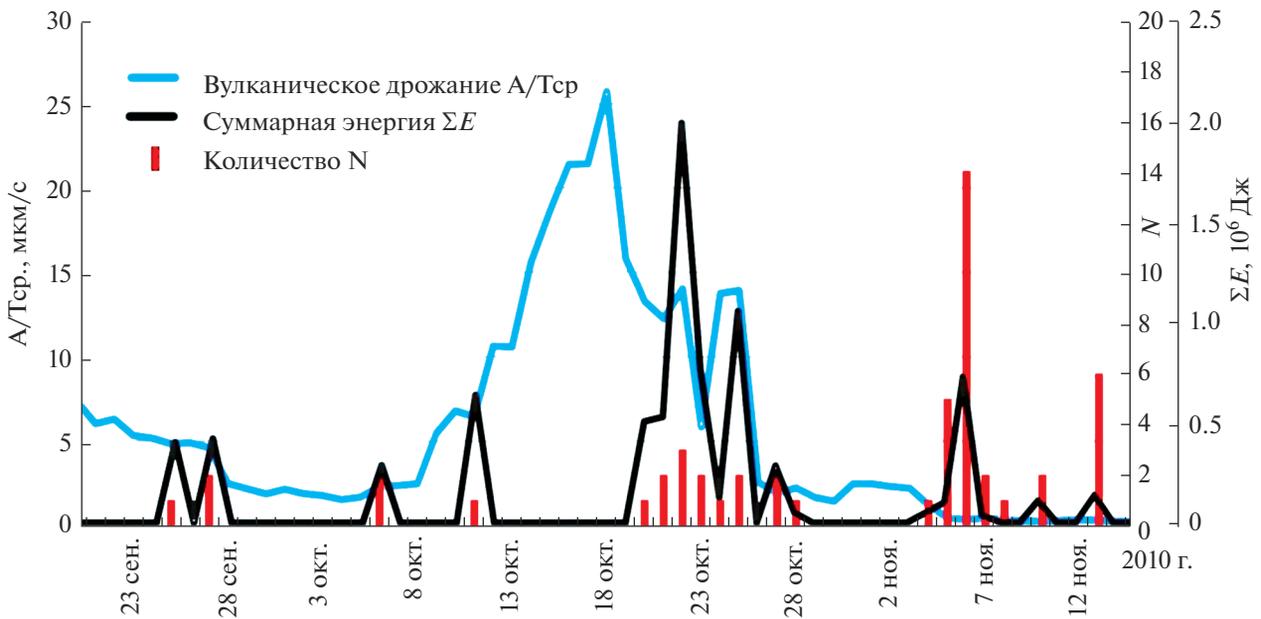


Рис. 7. График среднесуточного вулканического дрожания (A/T_{cp}), числа землетрясений (N) и их суммарной энергии (ΣE) для эпизода I (см. текст).

но сильных землетрясений в данном секторе. Это соотносится с широко развитой в секторе зоной побочных прорывов. Последнее, очевидно, связано с продолжением в этом направлении субмеридионального разлома, контролирующего вулканизм КГВ. Многократное внедрение магмы в этой зоне армирует постройку в основании [Делемень, 1994], но повышает вероятность обрушения верхней части конуса при возможном внедрении в нее субгоризонтальной интрузии. Таким образом, землетрясения в данном секторе могут послужить скорее второстепенным фактором для развития обрушений.

Ю–ЮВ сектор вулкана более чем вдвое превосходит С–СВ и З–ЮЗ секторы по уровню сейсмичности. Для этого сектора коэффициент $\Sigma E/N = 0.44$, что говорит о преобладании здесь землетрясений средней силы ($K_s = 4–5$) при их значительном количестве. Влияние этих средне-энергетических событий можно сравнить с воздействием долговременных умеренных вибраций, способствующих длительному во времени расползанию постройки [Делемень, 1994]. На ЮВ склоне расположен Апахончичский вулканотектонический желоб, наиболее древний и протяженный из трех желобов вулкана. В пределах данного сектора развито большое количество радиальных трещин, достигающих 7–10 м в ширину, связанных с побочными извержениями, что дела-

ет эту часть конуса непрочной, особенно в верхней ее части [Федотов, 1993]. Таким образом, можно сделать вывод, что достаточно сильная и частая сейсмическая активность в Ю–ЮВ секторе вполне способна как подготовить среду для обрушения или оползания, так и спровоцировать начало катастрофического обвала привершинной его части.

Наиболее сейсмически активный, С–СЗ сектор вулкана, в несколько раз превосходит остальные секторы по числу землетрясений в постройке и их суммарной энергии за рассматриваемый период. В секторе расположены Козыревский и Крестовский вулканотектонические желоба — долгоживущие геологические образования, описанные после 1945 г., в которых в период исторических наблюдений за Ключевским вулканом происходили гравитационные обвалы/оползни масс льда, лавы и пирокластики. Механизм таких обрушений описан ранее в работе [Муравьев, Саламатин, 1993]. Их повторяемость зависит от возраста желоба, степени его выработанности (глубины) и времени, требующегося для накопления в желобе критической массы льда и изверженных пород. Есть предположение, что в Крестовском и особенно в Козыревском вулканотектонических желобах, как более молодых, такие обрушения должны происходить чаще, чем в более древнем Апахончичском желобе. По всей видимости, эти

процессы несут скорее локальный экзогенный характер, они могут захватывать лишь близповерхностные части постройки, постепенно прорезая и углубляя дно желоба, но сами не приводят к развитию гигантских обрушений. Правда, участие снежно-ледовых образований в таких событиях приводит к развитию другого катастрофического процесса — формированию и сходу гигантских лавхаров на прилегающие к вулкану территории (например, при извержении вулкана Ключевской 1 января 1945 г. или извержении вулкана Безымянный 30 марта 1956 г.).

Локализация на С—СЗ склоне этих двух глубоких ложбин и наличие небольшой перемычки между ними дают основание говорить об ослабленной прочности привершинной части вулкана в этом секторе. А огромное количество сильных землетрясений (макс. $K_s = 8-9$) в этой части постройки, безусловно, должно сыграть важнейшую роль в ее возможном обрушении. На основании изложенного можно сделать вполне обоснованный прогноз, что крупное обрушение постройки Ключевского вулкана в его С—З секторе является наиболее вероятным среди всех других предполагаемых направлений обрушений на вулкане. Оно может охватить пространство между центральным кратером, Козыревским и Крестовским вулканотектоническими желобами с нижней границей до 3500 м над уровнем моря.

Стоит отметить, что наиболее выраженная сейсмическая активность С—СЗ и Ю—ЮВ секторов, выявленная при анализе пространственного распределения землетрясений под вулканом, хорошо согласуется с представлением об анизотропии структуры его постройки и наличием молодой зоны тектонической активизации СЗ простирания [Леонов, 1994].

Вулканическое дрожание и сейсмичность

Рассмотрим данные о средней суточной амплитуде A/T_{cp} (параметр вулканического дрожания), сопровождавшего некоторые периоды сейсмической активности в течение последнего эруптивного цикла вулкана (1994—2018 гг.). На графиках A/T_{cp} вулканического дрожания на Ключевском вулкане за 2010—2017 гг. совмещенных с гистограммой числа землетрясений в постройке и кривой их суммарной энергии (рис. 7), для некоторых эпизодов наблюдается закономерность, отражающая влияние ВД на частоту возникновения и/или энергию землетрясений. Рассмотрим несколько таких эпизодов в масштабе одного—трех месяцев.

I эпизод (30.09.2010—30.10.2010 гг.) (см. рис. 7). Сначала наблюдается средний уровень ВД с $A/T_{cp} = 2-3$ мкм/с. Затем с 8 октября A/T_{cp} ежедневно стремительно возрастает, и к 18 октября достигает пика 25 мкм/с, после чего начинает неравномерно убывать и к 30 октября возвращается к начальному уровню 2—3 мкм/с. Во время роста ВД землетрясения практически не регистрируются, а во время убывания ВД в течение недели регистрируется небольшой по числу, но наиболее сильный за год по величинам K_s рой землетрясений ($\Sigma E = 5.25$ МДж).

II эпизод (13.08.2013—21.11.2013 гг.). Уровень ВД 15 августа с фонового < 1 мкм/с совершает скачок до 3.36 мкм/с и затем постепенно растет в течение месяца. Одновременно с этим дрожанием появляются слабые землетрясения. С 26 сентября ВД начинает стремительно повышаться, а землетрясения прекращаются на неделю. Затем 4 октября, когда значение A/T_{cp} достигает 15 мкм/с, происходит одно сильное землетрясение с $E = 50.1$ МДж ($K_s = 7.7$), составляющее 2/3 энергии всех землетрясений за этот год. После этого землетрясения средний уровень ВД продолжает возрастать, достигая к 18 октября высоких значений, до 91 мкм/с ($A/T_{max} = 312$ мкм/с), затем в течение трех дней уровень ВД резко падает до 2—4 мкм/с, оставаясь на этом уровне еще в течение месяца, после чего ВД практически исчезает. Во время возрастания ВД до максимальных величин и его резкого падения землетрясений не зарегистрировано, кроме одного сильного, отмеченного выше. Зато в течение следующего месяца при ВД = 2—4 мкм/с происходит еще 106 событий с заметной $\Sigma E = 4.87$ МДж. За рассмотренный период произошло более половины всех землетрясений с суммарной энергией 86% от годового, и практически все они были сосредоточены в С—СЗ секторе вулкана.

III эпизод (28.12.2014—07.01.2015 гг.). 28 декабря A/T_{cp} начинает возрастать скачкообразно от 0.4 мкм/с и к 7 января достигает 5.4 мкм/с, после чего его уровень резко падает до 2 мкм/с и в течение следующих двух месяцев плавно понижается. Картина землетрясений здесь похожа на эпизод I: с началом роста ВД толчков практически нет, а после прохождения A/T_{cp} через точку максимума и с началом ее убывания возникают достаточно частые и относительно сильные землетрясения.

IV эпизод (13.03.2016—02.05.2016 гг.). В течение первых трех недель A/T_{cp} плавно повышается от 0.15 мкм/с и 8 апреля достигает 8.4 мкм/с. В этот период землетрясения не регистрируются.

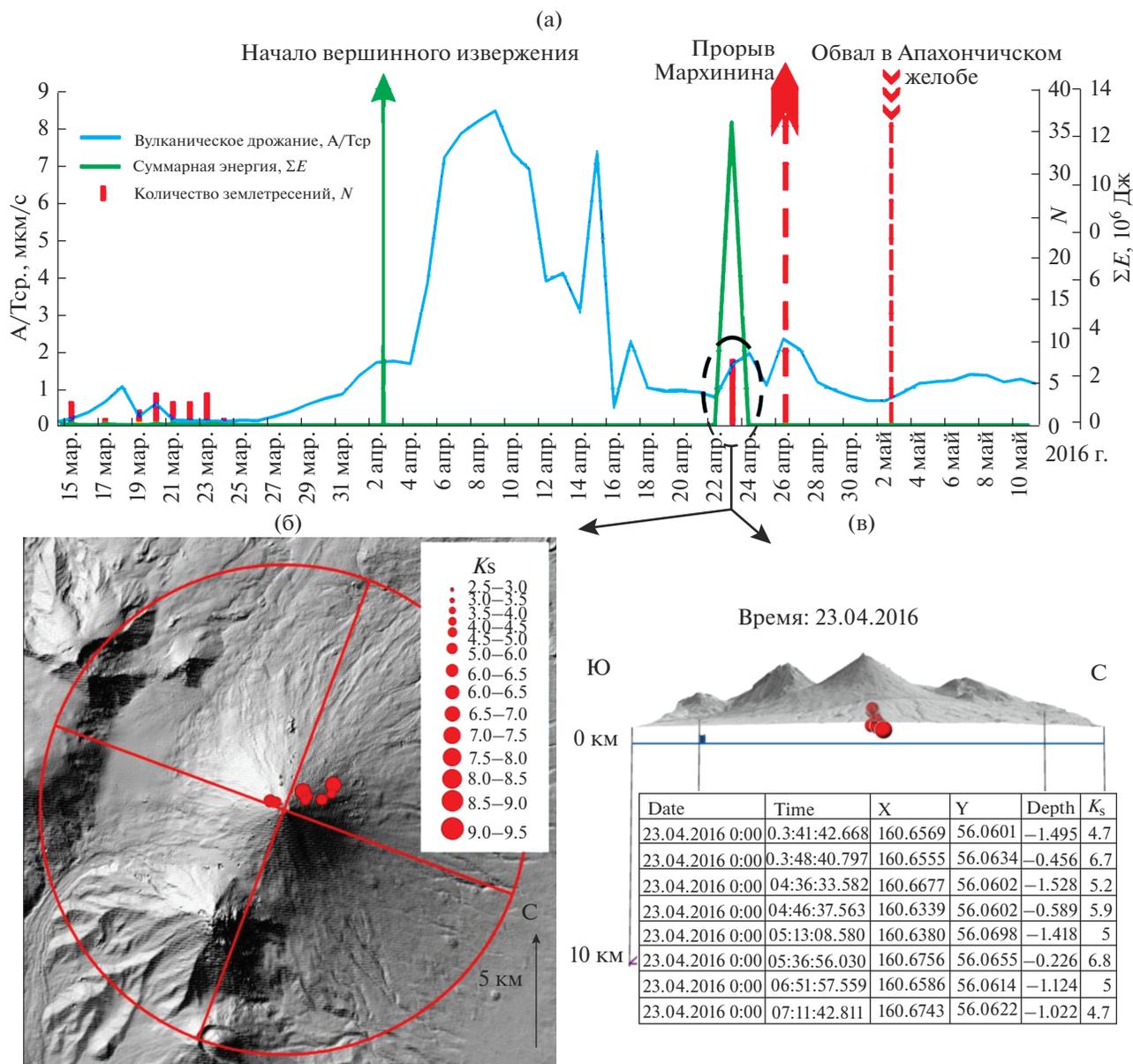


Рис. 8. График вулканического дрожания, количества и суммарной энергии землетрясений в постройке ($-5 \leq h \leq 0$ км) в начальный период вершинного извержения 2016 г. (а), картина локализации и параметров роя землетрясений 23 апреля в плане (б) и в 3D-модели (в).

Затем, с 9 апреля A/T_{cr} скачкообразно снижается до 0.7 мкм/с, а сразу после этого (23 апреля) происходит короткий сильный рой из 8 землетрясений с $\Sigma E = 12.5$ МДж, что составляет около половины ΣE землетрясений за год.

Для всех рассмотренных примеров характерна одна общая особенность — после повышения уровня ВД, прохождения его через точку максимума и начала убывания, происходит повышение числа и/или мощности землетрясений. Такие

эпизоды отмечаются не всегда, и нередко кривая ВД и графики землетрясений ведут себя независимо друг от друга. Однако эпизоды с рассмотренным характером возможного влияния ВД на количество и энергию землетрясений часто фиксируются на графиках, в том числе и для других лет наблюдений за сейсмичностью в постройке вулкана. Природу отмеченного влияния вулканического дрожания на сейсмическую разгрузку напряженной среды постройке вулкана возможно объяснить эффектом воздействия слабых вибра-

ций на напряженную среду в породах, что было показано в экспериментах на малых образцах в работе [Куксенко и др., 2003].

Сейсмичность при подготовке извержения и обвальном событии в 2016 г.

В заключение рассмотрим в свете сейсмичности одно уникальное событие на начальном этапе извержения Ключевского вулкана 19.03.2016–04.11.2016 гг. – обвал в Апахончичском желобе 3 мая [Гирина и др., 2019] в Ю–В секторе вулкана.

Начало извержения сейсмически выражено в периоде резко возросших амплитуд вулканического дрожания на протяжении двух недель A/T_{cp} (см. **IV эпизод**), затем 23 апреля происходит упомянутый краткий рой из 8 землетрясений, несущих значительный энергетический эффект (рис. 8). Спустя три дня, 26 апреля, в Апахончичском желобе начинает работу новый побочный прорыв, названный прорывом Мархинина [Гирина и др., 2019]. Еще спустя 7 дней, 3 мая, происходит крупный обвал в Апахончичском желобе (Ю–ЮВ сектор вулкана) с площадью провальной части желоба, близкой к 0.34 км^2 , и оцененным объемом в 0.024 км^3 [Жаринов, Демянчук, 2018].

По всей видимости, рой землетрясений 23 апреля напрямую связан с резким внедрением и подъемом магмы к жерлу вулкана, о чем говорит краткосрочность этого роя (в течение 4 ч) и относительно высокие K_s . Также примечательно пространственное расположение этих землетрясений: на рис. 7в видно, что рой расположен примерно на одной плоскости с В–СВ простиранием и падением около 80° на С–СЗ. Это дает представление о трещинной зоне в постройке вулкана, по которой происходило внедрение магмы перед привершинным прорывом 26 апреля в Апахончичском желобе. В подготовке здесь обвала 3 мая, очевидно, главную роль сыграло непосредственно начавшееся извержение со шлаковым конусом и лавовыми потоками, изливавшимися преимущественно в Апахончичский желоб. Однако, беря в расчет яркую сейсмическую активность за полторы недели до обвала, можно сказать, что и она сыграла свою заметную триггерную роль в расцеплении обвальных пород в желобе. Такая связь событий, когда обрушение привершинной части постройки обуславливается усилением сейсмичности и активизацией извержения, может указывать на то, что при более крупном секторном обрушении на Ключевском вулкане на месте такого обвала произойдет более масштабное извержение. Одним из главных факторов

в образовании такого обрушения может послужить рой высокоэнергетических землетрясений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена сейсмичность под Ключевским вулканом за последний эруптивный цикл 1995–2018 гг., что дает возможность более всесторонне оценить его деятельность в целом, а также представляет хорошую базу данных для дальнейшего пространственно-временного анализа механики его активности. Пространственное распределение землетрясений по секторам, впервые выполненное для этого вулкана, позволяет по-новому взглянуть на механизм вулканизма в недрах исполина, на его внутренне строение, и дает дополнительные возможности прогноза развития будущих обрушений его постройки вследствие сейсмической и вулканической активности.

Выявлена резкая неоднородность распределения землетрясений в постройке вулкана, которую можно связать с долговременным процессом растяжения его конуса относительно субмеридионального северо-восточного разлома, контролирующего современный вулканизм КГВ. Такое растяжение может усиливаться под действием давления пород, слагающих вершинную часть постройки конуса вулкана.

Таким образом, вероятность возникновения катастрофических обвальных событий в С–СЗ секторе вулкана в 3–4 раза превышает таковую по другим секторам, несколько ниже она в Ю–ЮВ секторе, и наиболее низка в З–ЮЗ и В–СВ секторах вулкана. Локализация вулканотектонических желобов в наиболее сейсмически активных С–СЗ и Ю–ЮВ секторах усиливает вероятность, что разрушения затронут в первую очередь зону С–З простирания вулкана относительно его вершины.

Рассмотрена возможная связь землетрясений под вулканом и вулканического дрожания. Показано, что возрастание амплитуд ВД, наблюдаемое чаще в периоды извержений вулкана, может сказываться на повышении числа и энергии вулканотектонических землетрясений. Это может происходить из-за воздействия продолжительных слабых вибраций на внутреннюю структуру пород вулканической постройки. Для уточнения физики механизма такого влияния ВД на сейсмичность требуется более детальное изучение данного вопроса.

Детально рассмотрена сейсмичность, предвзявшая побочный прорыв Мархинина и обвальное событие на начальном этапе извержения вулкана в 2016 г. Пространственно показан короткий

близповерхностный рой землетрясений перед прорывом, на фоне чего выявлена предполагаемая трещинная структура в постройке вулкана, по которой активно внедрялась магма. Этот рой землетрясений наряду с деятельностью побочного прорыва мог послужить триггером к обвальным процессам в Апахончичском желобе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят КФ ФИЦ ЕГС РАН за возможность пользоваться данными архива землетрясений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа частично выполнена при поддержке Проекта № 18-5-075 “Разработка методов выделения и оценки территориального сочетания экстремальных природных процессов с использованием ГИС-технологий” по программе “Дальний Восток”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Зыков Ю.Н., Федотов С.А.* Механизм разрушения вулканической постройки вследствие потери устойчивости и оценка размеров возможного обрушения Ключевского вулкана // *Вулканология и сейсмология*. 1994. № 6. С. 81–95.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В.* Гигантские обвалы на вулканах // *Вулканология и сейсмология*. 1984. № 4. С. 14–23.
- Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В. и др.* Извержения вулканов Камчатки и Северных Курил в 2016 г. и их опасность для авиации // *Вулканология и сейсмология*. 2019. № 3. С. 34–48.
- Двигало В.Н., Мелекесцев И.В.* Крупные современные обвалы на конусе вулкана Ключевской (по результатам ревизии последствий событий 1944–1945 и 1984–1985 гг.) // *Вулканология и сейсмология*. 2000. № 1. С. 3–8.
- Делемень И.Ф.* Механизмы потери гравитационной устойчивости вулканической постройки (на примере Ключевского вулкана) // *Вулканология и сейсмология*. 1994. № 6. С. 64–80.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В., Борисов И.А.* Извержения вулкана Ключевской в 2015–2016 гг. // *Вулканология и сейсмология*. 2018. № 2. С. 3–13.
- Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Тилегенов К. и др.* Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах) // *Физика твердого тела*. 2003. Т. 45. Вып. 12. С. 2182–2186.
- Леонов В.Л.* Линеаменты, трещиноватость и устойчивость склонов Ключевского вулкана // *Вулканология и сейсмология*. 1994. № 6. С. 44–63.
- Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А. и др.* Скачкообразность пластических деформаций и возможности управляемого снятия накопленных напряжений // *Геофизические исследования*. 2015. Т. 16. № 3. С. 12–30.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х.* Влияние механических вибраций на сейсмичность // *Докл. АН СССР*. 1990. Т. 313. № 1. С. 78–83.
- Муравьев Я.Д., Саламатин А.Н.* Прогнозная оценка динамики ледниковых масс в вулканотектонических желобах Ключевского вулкана // *Вулканология и сейсмология*. 1993. № 4. С. 43–53.
- Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 312 с.
- Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Саломов Н.Г.* Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // *Физика Земли*. 1981. № 6. С. 32–42.
- Славина Л.Б., Гарагаш И.А., Горельчик В.И. и др.* Скользящее строение и напряженно-деформированное состояние земной коры в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. 2001. № 1. С. 49–59.
- Токарев П.И.* Вулканическое дрожание // *Вулканология и сейсмология*. 1981. № 3. С. 55–72.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Федотов С.А.* Магматическая питающая система и механизм деятельности Ключевского вулкана // *Вулканология и сейсмология*. 1993. № 3. С. 23–45.
- Bergal-Kuvikas O., Nakagawa M., Kuritani T. et al.* A petrological and geochemical study on time-series samples from Klyuchevskoy volcano, Kamchatka arc // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2017. V. 16. <https://doi.org/10.1007/s00410-017-1347-z>

Seismic Factor in Activization of Endogenous-exogenous Processes on Kluchevskoy Volcano (Kamchatka)

R. I. Cherkashin^{1,*}, Ya. D. Muravyev¹, and I. K. Dubrovskaya¹

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Bul'var Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*
*e-mail: romainchik@yandex.ru

On one of the most active and largest volcanoes in the world – the Klyuchevskoy stratovolcano – over the historical time, morphological changes of different scale in its edifice were often observed. These destructions were mainly localized in long-living geological formations – volcano-tectonic trenches. In a number of stud-

ies, collapse forecasts were made based on the topography and morphology of the volcano, the system of tectonic disturbances in its construction, the localization of side eruptions, the introduction of intrusions and dikes that cut through the edifice, the activity of glaciers on the slopes and other factors. The role of seismic activity in the preparation and formation of large collapses and landslides on the volcano has not previously been separately considered. In this paper, we made an analysis of the seismicity of the Klyuchevskoy volcano associated with periods of activation of eruptions as one of the key reasons for the development of deformations and large collapses/landslides of different genesis on its slopes. According to the spatial distribution of earthquakes and their seismic energy, the northwestern and southeastern sectors of the volcano are most favorable for the development of large collapses, which is likely due to the stretching of the edifice along the tracing sub-meridional fault of the northwestern strike.

Keywords: Kluchevskoy volcano, eruptive cycle, volcano-tectonic trench, seismicity, volcanic tremor, vibrations, landslide events.