УДК 550.349.4+551.21

СЕЙСМИЧЕСКИЙ ФАКТОР ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ ПОСТРОЙКИ И ПРОЦЕССОВ АКТИВИЗАЦИИ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА

Черкашин Р.И., Дубровская И.К., Муравьев Я.Д.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, romainchik@yandex.ru

В данной работе выполнен анализ сейсмичности Ключевского вулкана, связанной с периодами активизации извержений, как одной из ключевых причин дестабилизации его постройки. Получена картина пространственного распределения землетрясений и их сейсмической энергии по секторам. Согласно проанализированным данным, наиболее вероятными для развития крупных обрушений являются северо-западный и юго-восточный сектора вулкана.

Введение

На одном из самых активных и крупных вулканов мира – стратовулкане Ключевском – за историческое время наблюдались незначительные по масштабу обрушения верхних частей его конической постройки в 1945 г. (0.05 км³) и 1988 г. (0.006 км³). Эти разрушения локализовались в долгоживущих геологических образованиях – вулкано-тектонических желобах. Ранее в работах [1, 2, 5, 6, 10, 13, 14, 16, 17] рассматривались многочисленные факторы, влияющие на вероятность развития подобных этим и более крупных обрушений постройки вулкана в той или иной ее части. Делались прогнозы, основанные на рельефе и морфологии вулкана, системе тектонических нарушений в его постройке, локализации побочных извержений, возможном внедрением секущих постройку интрузий, деятельности ледников на склонах и других факторах. Роль сейсмической активности в подготовке и образовании крупных обрушений и оползней на склонах Ключевского вулкана рассматривалась очень узко, лишь упоминалась наряду с другими факторами или как возможный триггер для катастрофических событий и не изучалась подробно. В данной работе мы количественно и пространственно оцениваем сейсмичность вулкана с целью анализа устойчивости его постройки и прогноза обрушений на его склонах. Подразумевается два вида влияния сейсмичности на устойчивость вулканической постройки: 1) долговременный вклад умеренного сейсмического воздействия 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, инициирующее крупные обвальные события.

Методы исследования

Для подсчетов распределения землетрясений и их сейсмической энергии взят район Ключевского вулкана с радиусом 10 км от его вершины, разбитый на 4 сектора: восток-северовосточный (В-СВ), юг-юго-восточный (Ю-ЮВ), запад-юго-западный (З-ЮЗ) и север-северо-западный (С-СЗ) (Рис. 1). Ось разделения на сектора взята с отклонением на северо-восток на 20⁰, что обусловлено северо-восточным простиранием глубинного разлома основной магмоподводящей структуры, контролирующей современную вулканическую деятельность Ключевской группы вулканов [16]. Это, по нашим соображениям, даст наиболее представительную картину распределения землетрясений и их сейсмической энергии относительно внутреннего строения Ключевского вулкана.

Данные всего доступного диапазона землетрясений за 1995-2017 гг., зарегистрированных за время сейсмического мониторинга Ключевского вулкана, взяты из каталога Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН [8] и обработаны в программе ArcGIS 10.1. Рассматривались землетрясения на данной площади с r = 10 км от вершины вулкана для глубин $5 \ge h \ge -50$ км.

Рассмотрена роль вулканического дрожания и его связь с землетрясениями в общей картине сейсмичности Ключевского вулкана, в связи с экспериментальными данными [9, 11, 12, 15] о воздействии слабых вибраций на деформационные процессы в горных породах.

Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции 29 сентября—5 октября 2019 г. г. Петропавловск-Камчатский

Результаты и их обсуждение

Были построены диаграммы распределения числа всех зарегистрированных землетрясений и их суммарной энергии в рассматриваемых секторах вулкана (Рис. 1). По общему виду диаграмм обнаруживается целесообразность выбранного нами принципа деления на сектора. Распределение землетрясений отчетливо анизотропно для разных экспозиций склонов конуса вулкана.



Рис. 1. Диаграммы количества землетрясений и их суммарной энергии по секторам: а) - для всего диапазона глубин ($5 \le h \le -50$ км), б) - для землетрясений в постройке ($5 \le h \le 0$ км). В центре - вершина вулкана.

На диаграммах видно четкое преобладание числа землетрясений и их энергии в C-C3 секторе вулкана, отмечается общее простирание облака наибольшей сейсмичности в постройке вулкана с Ю-В на C-3. Число всех землетрясений в C-C3 секторе вулкана за рассматриваемый период превышает 42 тыс., что вчетверо больше, чем в смежных секторах, и в шесть раз больше, чем в Ю -ЮВ секторе. А суммарная энергия, выделившаяся в результате этих событий, в данном секторе равна 11.1 · 10⁹ Дж, что в 3 - 4 раза выше, чем в смежных секторах.

Процентные соотношения, приведенные в таблице, говорят о преобладании событий с

Таблица. Доля числа и энергии землетрясений в постройке $(5 \le h \le 0 \text{ км})$ от общего $(5 \le h \le -50)$.

Сектор Ключевского вулкана	Доля N событий в постройке от общего, %	Доля Σ Энергии в постройке от общей, %
B-CB	16.4%	41.1%
Ю-ЮВ	59.9%	57.7%
3-ЮЗ	17.3%	30.7%
C-C3	23.2%	38.3%

аолице, говорят о преооладании сооытии с высокой энергией в пределах постройки (выше уровня моря) по сравнению с другими интервалами глубин и, следовательно, о доминирующем разрушительном влиянии их на вулканическую постройку.

Наиболее сейсмически активный, С-СЗ сектор вулкана, в несколько раз превосходит остальные сектора по числу землетрясений в постройке и их суммарной энергии за рассматриваемый период. В секторе расположены Козыревский и Крестовский вулкано-тектонические 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. Локализация в С-СЗ секторе этих двух глубоких ложбин и наличие небольшой перемычки между ними дают основания говорить об ослабленной прочности привершинной части вулкана в этом секторе. А огромное число сильных землетрясений (макс. $K_s = 8$ -9) в этом секторе, безусловно, должно сыграть важнейшую роль в его 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 крупных обрушений на вулкане. Оно может охватить пространство между

центральным кратером, Козыревским и Крестовским вулкано-тектоническими желобами с нижней границей 3500-4400 м высоты вулкана.

Рассмотрим данные о средней суточной амплитуде A/T_{ср} (параметр вулканического дрожания), сопровождавшего некоторые периоды сейсмической активности в течение последнего эруптивного цикла вулкана (1994-2018 гг.). На графике A/T_{ср} вулканического дрожания на Ключевском вулкане за 2010-2017 гг. совмещенных с гистограммой числа землетрясений в постройке и кривой их суммарной энергии (Рис. 2), для некоторых эпизодов наблюдается закономерность, отражающая влияние ВД на частоту возникновения и/или энергию землетрясений в постройке.

Для эпизода на рис. 2 вначале 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.



Рис. 2. График среднесуточного вулканического дрожания (A/T_{cp}), числа землетрясений (N) и их суммарной энергии (ΣЕ) для эпизода 30.09. - 30.10. 2010 г.

Во время роста ВД землетрясений практически не регистрируются, а во время убывания ВД в течение недели регистрируется небольшой по числу, но наиболее сильный за год по величине K_s рой землетрясений ($\Sigma E = 5.25$ МДж).

Для этого и еще нескольких эпизодов сейсмичности вулкана 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 повсеместно, 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 постройки вулкана, возможно, объяснить эффектом воздействия слабых вибраций на напряженную среду в породах, что было показано в экспериментах на малых образцах В.С. Куксенко с соавторами [9].

Рассмотрим одно уникальное событие на начальном этапе извержения Ключевского вулкана 19.03.2016 - 04.11.2016 г. – обвал, имевший место в Апахончичском желобе 03.05.2016 [4] в Ю-В секторе вулкана.

Начало извержения сейсмически выражено в периоде резко возросших на протяжении двух недель амплитуд вулканического дрожания A/T_{cp} с 03.04.2016, затем 23.04.2016 происходит мощный рой из 8 землетрясений, несущих половину всей сейсмической энергии за год (Рис. 3). Спустя три дня, 26 апреля, в Апахончичском желобе на высоте 4.3 - 4.4 км начинает работу новый побочный прорыв, названный прорывом Мархинина [3]. Еще спустя 7 дней, 3 мая происходит крупный обвал в Апахончичском желобе (Ю-В сектор вулкана) с объемом провальной части желоба, оцененным в 0.024 км³[7].

По всей видимости, мощный рой землетрясений 23 апреля связан с активным внедрением и подъемом магмы к жерлу вулкана, о чем говорит краткосрочность этого роя (в течение 4 часов) и относительно высокие K_s . Также примечательно пространственное расположение этих землетрясений: из рис. 2 видно, что рой расположен 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 прорывом 26 апреля. В подготовке обвала 3 мая, очевидно, главную роль сыграл непосредственно прорыв. Однако, беря в расчет яркую сейсмическую активность за полторы недели до обвала, можно сказать, что и она сыграла заметную триггерную роль в расцеплении обвальных пород в желобе.



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

Заключение

Впервые для Ключевского вулкана получена картина пространственного распределения землетрясений по секторам, которая позволяет по-новому взглянуть на механику его активности. По фактору сейсмичности, вероятность возникновения в С-СЗ секторе вулкана катастрофических обвальных событий в 3-4 раза превышает таковую по другим секторам, второй по вероятности склон обрушения - в Ю-ЮВ секторе. Минимальна вероятность обрушений в 3-ЮЗ и В-СВ секторах. Учитывая локализацию вулкано-тектонических желобов в указанных наиболее сейсмически активных С-СЗ и Ю-ЮВ секторах и отсутствие таких структур в менее сейсмически активных 3-ЮЗ и В-СВ секторах можно с еще большей уверенностью сказать, что любые разрушения затронут в первую очередь зону СЗ простирания вулкана относительно его вершины. Такие потенциальные обвальные события несут лишь косвенную опасность для ближайших населенных пунктов.

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 вулкано-тектонических 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 и обвал в Апахончичском желобе на начальном этапе извержения вулкана в 2016 г. Рассмотрены характеристики роя землетрясений, непосредственно предшествующего побочному прорыву Мархинина, выявлена предполагаемая трещинная структура в постройке вулкана, по которой активно внедрялась магма. Триггерный эффект данного мощного роя сейсмических толчков на достаточно редкое и уникальное событие – обвал в Апахончичском желобе вулкана – предполагается также весьма значительным.

Список литературы

1. 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.

2. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. Гигантские обвалы на вулканах // Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 14–23.

3. 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 (в печати)

4. Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., и др. Хронология событий извержения вулкана Ключевской в 2016 г. // Материалы XX региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 30-31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. 230 с.

5. 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.

6. Делемень И. Ф. Механизмы потери гравитационной устойчивости вулканической постройки (на примере Ключевского вулкана) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 64-80.

7. Жаринов Н. А., Демянчук Ю. В., Борисов И. А., Извержения вулкана Ключевской в 2015-2016 гг. // Вулканология и сейсмология. 2018. № 2. С. 3–13.

8. Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Единая информационная система сейсмологических данных, Фактографическая база данных «Активность вулканов Камчатки», http://www.emsd.ru/

9. Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Тилегенов К. и др. Триггерный эффект слабых вибраций в твердых телах (горных породах) // Физика твердого тела. 2003. Том 45. Вып. 12. С. 2182–2186.

10. Леонов В. Л., Линеаменты, трещиноватость и устойчивость склонов Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 44–63.

11. Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., и др. Скачкообразность пластических деформаций и возможности управляемого снятия накопленных напряжений // Геофизические исследования. 2015. Том 16. № 3. С. 12–30.

12. Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х. Влияние механических вибраций на сейсмичность // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. №1. С. 78–83.

13. Муравьев Я.Д., Саламатин А.Н., Прогнозная оценка динамики ледниковых масс в вулканотектонических желобах Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 4. С. 43-53.

14. Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом. // Тр. Лаб. вулк. вып.11, 1956. 312 с.

15. Садовский М.А., Мирзоев К.М., Негматуллаев С. Х., Саломов Н. Г. Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // Изв. АН СССР. Сер. Физика земли. 1981. № 6. С.32–42.

16. Славина Л. Б., Гарагаш И. А., Горельчик В. И., и др. Скоростное строение и напряженнодеформированное состояние земной коры в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2001. № 1. С. 49–59.

17. Федотов С.А., Магматическая питающая система и механизм деятельности Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С.23–45.