

## **Сейсмический фактор дестабилизации постройки и процессов активизации Ключевского вулкана**

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

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,  
e-mail: romainchik@yandex.ru*

В 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 секторы вулкана.

### **Введение**

На одном из самых активных и крупных вулканов мира – стратовулкане Ключевской – за историческое время наблюдались незначительные по масштабу обрушения верхних частей его конической постройки в 1945 г. ( $0.05 \text{ км}^3$ ) и 1988 г. ( $0.006 \text{ км}^3$ ). Эти разрушения локализовались в долгоживущих геологических образованиях – вулcano-тектонических желобах. Ранее в работах [1, 2, 5, 6, 9-13] 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 внедрении 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 работе мы количественно и пространственно оцениваем сейсмичность вулкана с целью анализа устойчивости его постройки и прогноза обрушений на его склонах. Предполагается 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-северо-восточный (В-СВ), юг-юго-восточный (Ю-ЮВ), запад-юго-западный (З-ЮЗ) и север-северо-западный (С-СЗ) (рис.1). Ось разделения на секторы взята с отклонением на северо-восток на  $20^\circ$ , что обусловлено северо-восточным простираанием глубинного разлома основной магмоподводящей структуры, контролирующей современную вулканическую деятельность Ключевской группы вулканов [13]. 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

ArcGIS10.1. Рассматривались землетрясения на данной площади с  $r = 10$  км от вершины вулкана для глубин  $5 \geq h \geq -50$  км.

### 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.

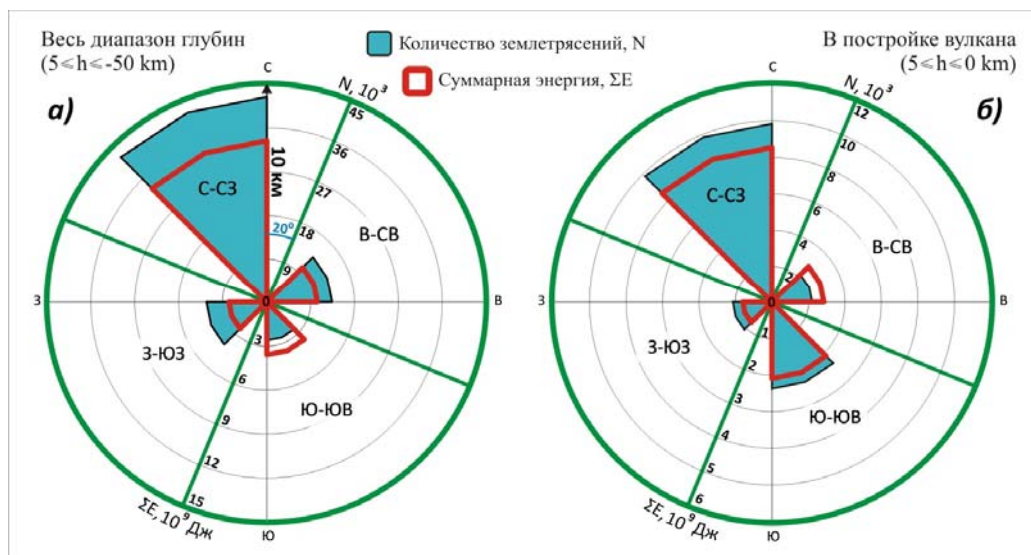


Рис. 1. Диаграммы количества землетрясений и их суммарной энергии по секторам: а) - для всего диапазона глубин ( $5 \leq h \leq -50$  км), б) - для землетрясений в постройке ( $5 \leq h \leq 0$  км). В центре - вершина вулкана.

На диаграммах видно четкое преобладание числа землетрясений и их энергии в С-С3 секторе вулкана, отмечается общее простираие облака наибольшей сейсмичности в постройке вулкана с Ю-В на С-З. Число всех землетрясений в С-С3 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. Суммарная энергия, выделившаяся в результате этих событий, в этом секторе равна  $11,1 \cdot 10^9$  Дж, что в 3-4 раза выше, чем в смежных секторах.

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

Сектор Ключевского вулкана	Доля N событий в постройке от общего, %	Доля $\Sigma$ Энергии в постройке от общей, %
В-СВ	16,4%	41,1%
Ю-ЮВ	59,9%	57,7%
3-ЮЗ	17,3%	30,7%
С-С3	23,2%	38,3%

Процентные соотношения, приведенные в таблице, говорят о преобладании событий с высокой энергией в пределах постройки вулкана (выше уровня моря) по сравнению с другими интервалами глубин и, следовательно, о доминирующем разрушительном влиянии их на постройку. На основе

комплексного анализа данных можно заключить, что наиболее вероятным местом крупного секторного обрушения вулкана является С-З сектор, а именно область, ограниченная кратером, Козыревским и Крестовским вулcano-тектоническими желобами, и имеющая нижнюю границу на уровне 3500-4400 м высоты вулкана.

Рассмотрим одно уникальное событие на начальном этапе извержения Ключевского вулкана 03.04. - 06.11.2016 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. 2). Спустя три дня, 26 апреля, в Апахончичском желобе на высоте 4,3-4,4 км начинает работу новый побочный прорыв, названный прорывом им. Е.К. Мархинина [3]. Еще спустя 7 дней, 3 мая происходит крупный обвал в Апахончичском желобе (Ю-В сектор вулкана) с объемом обрушенной части желоба, оцененной в  $0,024 \text{ км}^3$  [7].

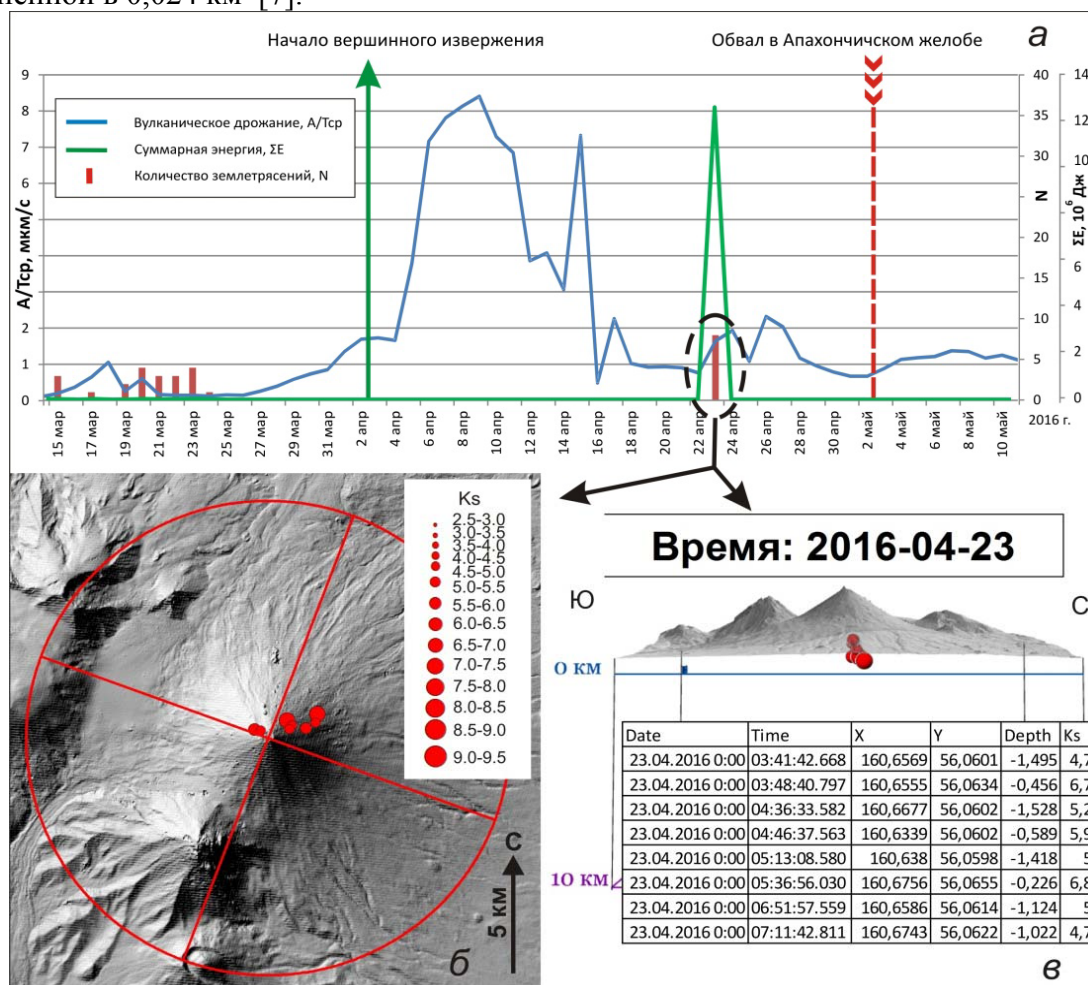


Рис. 2. График вулканического дрожания, количества и суммарной энергии землетрясений в постройке ( $-5 \leq h \leq 0$  км) в начальный период вершинного извержения 2016 г. (а), картина локализации и параметров роя землетрясений 23 апреля в плане (б) и в 3D-модели (в).

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 ч) 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  $80^\circ$  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.

## Выводы

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 - Ю-ЮВ сектор. Минимальна вероятность обрушений в З-ЮЗ и В-СВ секторах. Учитывая локализацию вулcano-тектонических желобов в указанных наиболее сейсмически активных С-СЗ и Ю-ЮВ секторах и отсутствие таких структур в менее сейсмически активных З-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.

Детально рассмотрена сейсмичность и обвал в Апахончичском желобе на начальном этапе извержения вулкана в 2016 г. Рассмотрены характеристики роя землетрясений, непосредственно предшествующего побочному прорыву им. Е.К. Мархинина, выявлена предполагаемая трещинная структура в постройке вулкана, по которой активно внедрялась магма. Триггерный эффект этого 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. № 3. (в печати)
4. Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г. и др. Хронология событий извержения вулкана Ключевской в 2016 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы конференции. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 18-21.
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 (<http://www.emsd.ru/>)
9. Леонов В.Л., Линеаменты, трещиноватость и устойчивость склонов Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 44-63.
10. Муравьев Я.Д., Саламатин А.Н. Прогнозная оценка динамики ледниковых масс в вулканотектонических желобах Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 4. С. 43-53.
11. Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом. // Тр. Лаб. вулк. Вып. 11. 1956. 312с.
12. Славина Л.Б., Гарагаш И.А., Горельчик В.И. и др. Скоростное строение и напряженно-деформированное состояние земной коры в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2001. № 1. С. 49-59.
13. Федотов С.А. Магматическая питающая система и механизм деятельности Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 23-45.