

Сравнительный анализ сейсмичности извержений Ключевского вулкана в 2013 и 2023 годах

Чемарёв А.С., Шакирова А.А., Салтыков В.А.

Comparative analysis of seismicity of Klyuchevskoy volcano eruptions in 2013 and 2023
Chemarev A.S., Shakirova A.A., Saltykov V.A.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: andrew@emsd.ru

В работе анализируется поведение сейсмичности в окрестности двух сильнейших извержений Ключевского вулкана 2013 и 2023 гг. с индексом VEI=3. Предвестниковые эффекты рассматриваются на основе методики СОУС'09. Также в работе обсуждается связь вулканической активности с глубокими длиннопериодными землетрясениями.

Извержение Ключевского вулкана в 2013 г.

Извержение вулкана Ключевской началось 15 августа 2013 г после почти трехлетнего периода молчания. Во время извержения изливались лавовые потоки, максимальная длина которых составила 5.5 км [2]. Кульминационная фаза извержения наблюдалась 15-20 октября 2013 г., когда пепловые облака поднимались на высоту ~12 км (рис. 1а, период II), индекс вулканической активности VEI=3. Спустя месяц после кульминационной фазы произошли еще два выброса пепла на высоту более 8 км – 17 и 19 ноября, а также несколько выбросов в декабре. Извержение закончилось 26 января 2014 г. В 2011 и 2012 гг. отмечены две активизации, которые не закончились извержением.

За этим извержением следовали два извержения, во время которых излился огромный объем жидкой лавы (рис. 1а, периоды III и IV) [3]. В 2015 г. из бокки в вершинном шлаковом конусе начал изливаться лавовый поток, к 18 января его длина превысила 2.5 км. В 2016 г. на высоте 4.3-4.4 км н.у.м. произошел прорыв в Апахончичском желобе, 3 мая образовался обвальный цирк в верхней части Апахончичского желоба. Такое длительное извержение с огромным объемом изверженной лавы предположительно обусловлено длительным внедрением магмы в питающую систему Ключевского вулкана [3] задолго до извержения.

Извержение Ключевского вулкана в 2023 г.

В 2023 г. произошло следующее извержение Ключевского вулкана с VEI=3, начавшееся 14 июня. Эффузивная фаза извержения продолжалась с 19 июля по 5 ноября, по желобам изливались лавовые потоки, этот процесс сопровождался фреатическими взрывами и обрушениями тefры с бортов желобов. Во время пароксизмальной фазы извержения, с 31 октября по 2 ноября, эксплозии поднимались до 14 км над уровнем моря (рис. 1б, период II), пепловые шлейфы протягивались более чем на 3200 км преимущественно в восточных направлениях от вулкана [4]. Спустя два месяца после кульминационной фазы произошло еще несколько выбросов пепла на высоту максимум 9 км: декабрь 2023 г. – январь 2024 г. В январе-апреле 2024 г. происходили единичные слабые пепловые выбросы (рис. 1б), закончилось извержение 24 апреля. Перед извержением отмечалась активизация в ноябре 2022 г.

Спустя 381 день началось очередное извержение вулкана. В мае-июле 2025 г. происходили единичные пепловые выбросы на высоту до 6 км. После мега-землетрясения в районе Авачинского залива, произошедшего 29 июля с Mw=8.8 [7], усилилось свечение над кратером Ключевского, стали происходить выбросы на высоту до 9 км, начал выжиматься лавовый поток. Со 2 по 15 августа наблюдалась кульминационная фаза извержения (рис. 1, период III) (<https://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm>), пепловые облака поднимались на высоту более 10 км. В ноябре извержение закончилось.

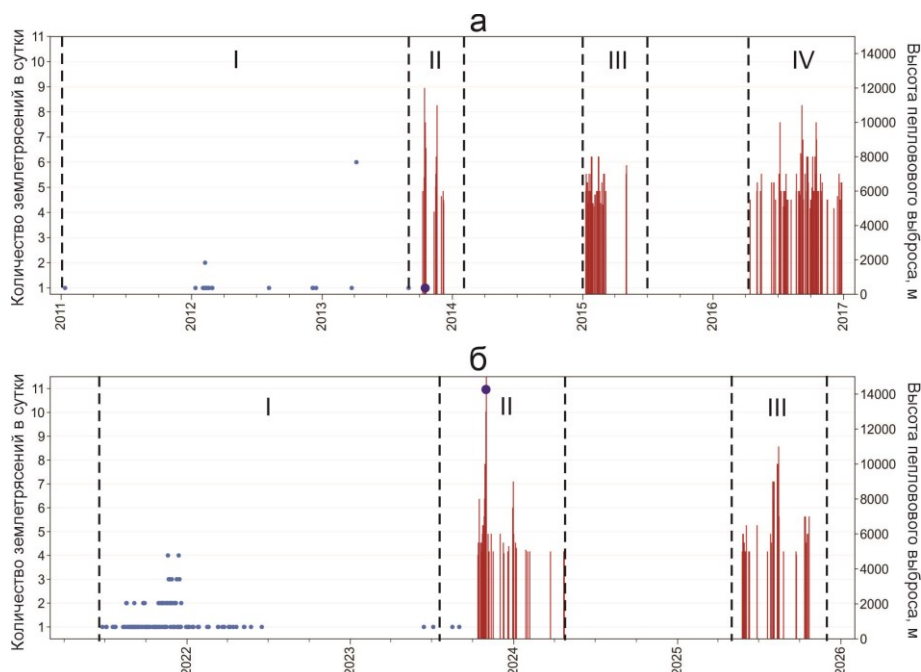


Рис. 1. Высоты пепловых выбросов на Ключевском вулкане согласно базе данных «Активность вулканов Камчатки» и число глубоких длиннопериодных землетрясений в 2011-2016 и 2021-2025 гг.: а) период I – глубокие длиннопериодные землетрясения в 2011-2013 гг., II-IV – извержения; б) период I – глубокие длиннопериодные землетрясения в 2021-2023 гг., II и III – извержения.

Данные и анализ

В работе использован каталог землетрясений Камчатского филиала (КФ) ФИЦ ЕГС РАН в районе Ключевского вулкана с 2011 по 2025 гг. Выборка землетрясений производилась по эллипсам с параметрами выделенных под Ключевским вулканом 5 сейсмоактивных зон (таблица) [8].

Таблица. Параметры выделенных зон сейсмичности Ключевского вулкана

Зона	H, км	φ , °	λ , °	a, км	b, км	α , °
H0	-5 – 40	56.066	160.630	5.76	3.31	113
H1	-4 – 2	56.064	160.635	4.86	2.95	137
H2	4 – 8	56.067	160.636	1.89	1.53	102
H _{LS}	9 – 17	56.065	160.635	6.00	3.69	119
H3	20 – 25	56.062	160.607	10.61	5.00	106
H4	26 – 34	56.067	160.628	5.96	3.13	102

Примечание. H – глубина, φ – широта (°N), λ – долгота (°E), a и b – полуоси эллипса, α – азимут эллипса.

Анализ проводится на основе статистической функции распределения сейсмической энергии (E) [5]. Шкала количественно определяет интенсивность сейсмичности в заданной пространственной области в конкретный временной интервал:

$$F(K) = P(\lg E \leq Ks),$$

где E – сейсмическая энергия (в Дж), выделившаяся за определенный временной интервал; $P(\lg E \leq Ks)$ – относительная частота временных интервалов с эквивалентным энергетическим классом $\lg E \leq Ks$.

Учитывая статистический характер базового параметра, методика получила название «Статистическая оценка уровня сейсмичности» (СОУС'09) [5]. Подробное описание методики СОУС'09 применительно к сейсмическим данным Ключевского вулкана с 2003 по 2024 гг. приведено в [8].

Результаты

Почти все извержения Ключевского вулкана предварялись повышением уровня сейсмичности до высокого или экстремально высокого в нижних слоях Н3 и Н4 (в диапазоне глубин 20-34 км), что показано в [8]. С этих глубин осуществляется питание Ключевского вулкана – под ним расположен один из самых интенсивных мировых источников глубоких длиннопериодных землетрясений (ГДЗ), соответствующих границе кора-мантия [1].

Извержения 2013 г. и 2023 г. предварялись повышением уровня сейсмичности во временных окнах $dT=3-112$ суток до высокого в слое Н3 и Н4 (рис. 2), затем через 10 месяцев – 1.5 года уровень сейсмичности достигал высокого в зоне H_{LS} , а на глубинах 4-8 км (слой Н2) примерно через месяц-два – также до высокого. Затем через 4-6 месяцев наблюдалось свечение в кратере, что означало приближение извержения.

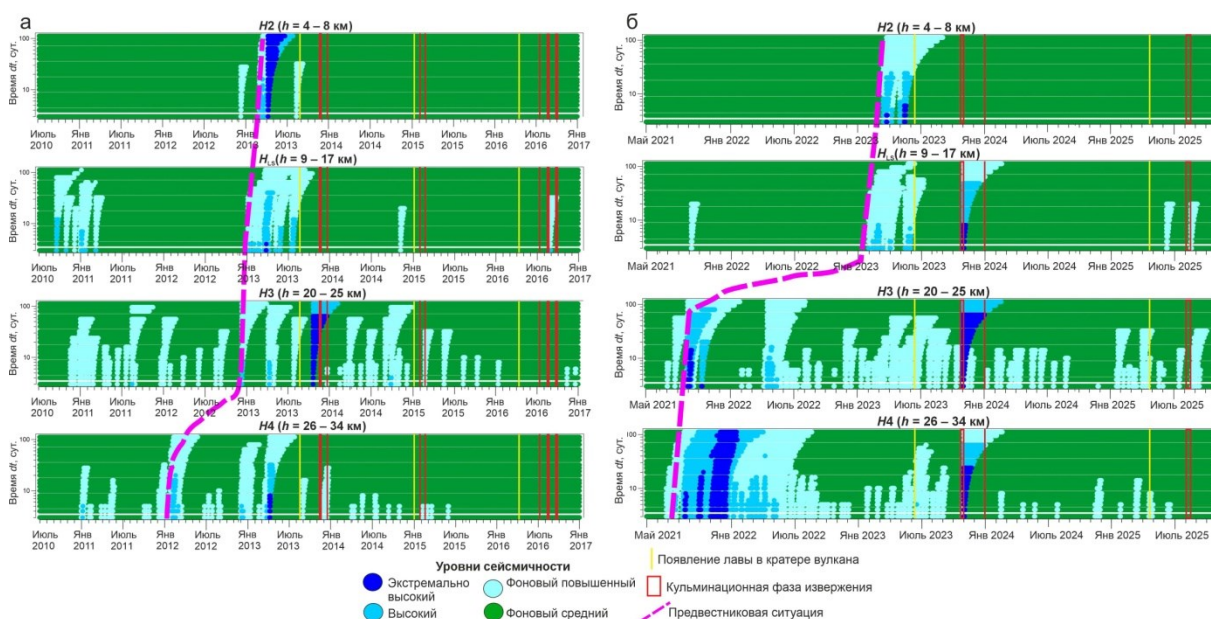


Рис. 2. Уровни сейсмической активности для вулкана Ключевской в пяти объемах среды Н1–Н4, H_{LS} в 2021-2025 годах.

Перед двумя извержениями отмечались сейсмические активизации в декабре 2011, конце декабря 2012 – январе 2013 г., а также в ноябре 2022 г. (рис. 2), в связи с чем можно предположить, что подготовка извержения начиналась намного раньше, за 10-16 месяцев. Перед остальными извержениями Ключевского вулкана сейсмические активизации не происходили [8].

Для извержений 2013 и 2023 гг. отмечена еще одна особенность – во время кульминационной фазы извержений в трех объемах среды H_{LS} , Н3 и Н4 отмечен высокий и экстремально высокий уровень сейсмичности (рис. 2), что также не выделено для остальных извержений вулкана [8].

Обратим внимание на извержения, произошедшие после 2013 и 2023 гг., их подготовка почти никак не проявилась на СОУСграммах (рис. 2). Мы видим повышение уровня сейсмичности в четырех объемах среды только до повышенного, подготовки извержения в виде высокого или экстремально высокого уровня сейсмичности на больших глубинах не происходило.

Во время кульминационной фазы извержений 2013 и 2023 гг. сильнейшие ГДЗ происходили спустя несколько часов после начала извержения, такое наблюдение позволяет выдвинуть предположения в пользу наиболее подходящей модели генерации ГДЗ. Вероятно, из-за развивающегося мощного эксплозивного извержения магматическая колонна резко опустошалась, вызвав большие градиенты напряжения в окрестности питающей системы вулкана. Снижение уровня магмы в вулканическом

канале приводит к соответствующему уменьшению давления на глубинах 20-34 км и возобновлению процесса, ответственного за генерацию ГДЗ. К примеру, отделению свободной флюидной фазы из пересыщенного летучими магматического расплава [6]. ГДЗ являются проявлением инъекции глубинных базальтовых флюидов в основание магматической камеры и могут рассматриваться как показатель скорости поступления магмы перед извержениями.

Выводы

Извержения 2013 и 2023 гг. между собой очень похожи, перед ними происходили активизации, которые могут говорить о длительном внедрении магмы в питающую систему Ключевского вулкана перед извержением – ГДЗ регистрировались на протяжении двух с половиной лет. Если за повышением уровня сейсмичности до высокого и экстремально высокого в нижних объемах среды Н3 и Н4 в течение года не происходило извержения, но отмечалась активизация, то стоит ожидать более мощного по индексу VEI извержения. Повышение уровня сейсмичности до экстремально высокого во время извержения в объеме среды Н3 или Н4 может говорить об автоматической подготовке будущего извержения Ключевского вулкана, соответственно, по вариациям уровней сейсмичности на СОУСграммах предвестниковой ситуации не будет выявлено.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-20019, <https://rscf.ru/project/24-17-20019/> и при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00609-26) с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://skp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Список литературы

1. Горельчик В.И., Сторчеус А.В. Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом, Камчатка // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. 2001. С. 373-389.
2. Демянчук Ю.В., Селиверстов Н.И. О продолжении эруптивного цикла вулкана Ключевской в 2013 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. Вып. 22. № 2. С. 7-14.
3. Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В., Борисов И.А. Извержения вулкана Ключевской в 2015-2016 гг. // Вулканология и сейсмология. 2018. № 2. С. 3-13.
4. Маневич А.Г., Гирина О.А., Мельников Д.В. и др. Извержения вулкана Ключевской в 2023-2024 годах по данным дистанционного мониторинга в информационной системе VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 94-103.
5. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53-59.
6. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во: КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.
7. Чебров Д.В. Камчатское мега-землетрясение 29 июля 2025 г. (Mw=8.8) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2025. № 3. Вып. 67. С. 113-117.
8. Shakirova A.A., Saltykov V.A. Mosaic nature of seismicity patterns associated with eruptions of the Klyuchevskoy Volcano (Kamchatka, Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2025. V. 468. P. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2025.108477>