

## Анализ активности Ключевского вулкана в 2023 году на основе статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09

Шакирова А.А., Салтыков В.А.

### Analysis of Klyuchevskoy volcano activity in 2023 based on a statistical assessment of the seismicity level SOUS'09

Shakirova A.A., Saltykov V.A.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: shaki@emsd.ru

В октябре 2023 г. произошло извержение Ключевского вулкана (п-ов Камчатка), во время которого высота пепловой колонны достигла отметки ~15 км. Оно предварялось высокой сейсмической активностью. Проведен анализ сейсмической активности Ключевского вулкана в 2023 г. на основе статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 в четырех наиболее сейсмоактивных объемах среды под Ключевским вулканом.

#### Введение

Вулкан Ключевской – самый высокий действующий вулкан Евразии, его абсолютная высота над уровнем моря составляет ~4800 м. С 2003 г. он практически непрерывно находится в состоянии извержения.

На данный момент существующая сеть сейсмических станций Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) позволяет проводить детальный сейсмический мониторинг Ключевского вулкана [3], локализуя землетрясения в районе вулкана с минимальным энергетическим классом  $K_s=1.8$  [4].

В работе рассмотрено извержение Ключевского вулкана, произошедшее в 2023 г. Извержение предварялось и сопровождалось высокой сейсмической активностью с глубинами очагов землетрясений до 36 км (рис. 1). Согласно фактографической базе данных КФ ФИЦ ЕГС РАН «Активность вулканов Камчатки» (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>), с 22 июня в кратере Ключевского вулкана отмечалось свечение, а с ~21-26 июля началось излияние лавового потока. Пик пароксизмальной фазы зафиксирован 16 октября и 28 октября – 1 ноября, когда пепловые тучи поднимались до высоты 10-15 км.

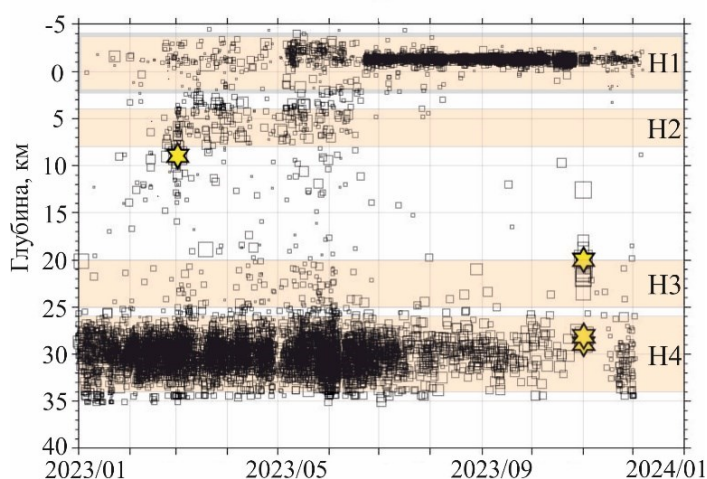


Рис. 1. Глубина гипоцентров землетрясений, зарегистрированных в районе вулкана Ключевской в 2023 г. Звездочками обозначены землетрясения с  $K_s \geq 7.3$ . Н1-Н4 – глубины четырех наиболее сейсмоактивных объемов среды, выбранных для анализа.

В данной работе проводится оценка уровней сейсмичности района Ключевского вулкана в 2023 г. Уровни привязаны к статистической функции распределения сейсмической энергии. Учитывая статистический характер базового параметра, методика получила название «Статистическая оценка уровня сейсмичности» (СОУС'09) [2]. Вариации уровней сейсмичности в четырех наиболее сейсмоактивных

объемах среды под вулканом Ключевской сопоставляются с эпизодами зафиксированной вулканической активности.

### Исходные данные и методика

В работе использован каталог землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН в районе Ключевского вулкана за 2023 г. [4]. При выборе анализируемых сейсмоактивных объемов учитывались особенности поведения сейсмичности под Ключевским вулканом и элементы его магматической питающей системы. Динамика сейсмичности анализировалась в четырех объемах среды, выделенных по максимумам плотности землетрясений (рис. 1): поверхностном ( $-4 \leq H \leq 2$  км), близповерхностном ( $4 \leq H \leq 8$  км), промежуточном в коромантийном слое ( $20 \leq H \leq 25$  км) и глубоком ( $26 \leq H \leq 34$  км). Для удобства обозначим их, соответственно, Н1, Н2, Н3, Н4. Итоговая выборка землетрясений по заданным эллипсам и глубинам Н1-Н4 приведена на рис. 2.

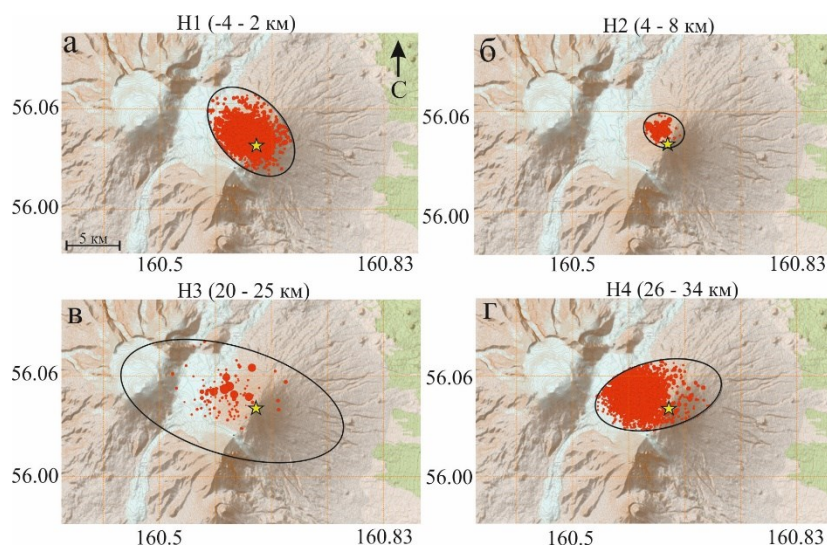


Рис. 2. Выборка землетрясений из каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН за 2023 г. по заданному эллипсу и глубине от  $-4$  до 2 км (а), 4-8 км (б), 20-25 км (в), 26-34 км (г). Звездочкой отмечена вершина Ключевского вулкана.

Для описания уровня сейсмичности в КФ ФИЦ ЕГС РАН разработана и внедрена шкала, привязанная к статистической функции распределения сейсмической энергии [2] в качестве параметра, характеризующего уровень сейсмичности заданного пространственного объекта в определенный временной интервал:

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

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

Функция распределения энергии строится по значениям сейсмической энергии в скользящем временном окне определенной длины. Интервалы между квантилями распределения выделенной сейсмической энергии формируют шкалу, включающую семь уровней сейсмичности: экстремально высокий  $0.995 \leq F(\lg E)$ ; высокий  $0.975 \leq F(\lg E) < 0.995$ ; фоновый повышенный  $0.85 \leq F(\lg E) < 0.975$ ; фоновый средний  $0.15 < F(\lg E) < 0.85$ ; фоновый пониженный  $0.025 < F(\lg E) \leq 0.15$ ; низкий  $0.005 < F(\lg E) \leq 0.025$ ; экстремально низкий  $0.005 \leq F(\lg E)$ .

Методика СОУС'09 программно реализована: разработана система вычисления уровня сейсмичности произвольного региона в виде компьютерной программы Windows [1].

Для выбранных сейсмоактивных объемов построены номограммы уровня сейсмической активности, позволяющие по значению выделившейся сейсмической энергии за конкретное время определить соответствующий уровень сейсмичности (рис. 3).

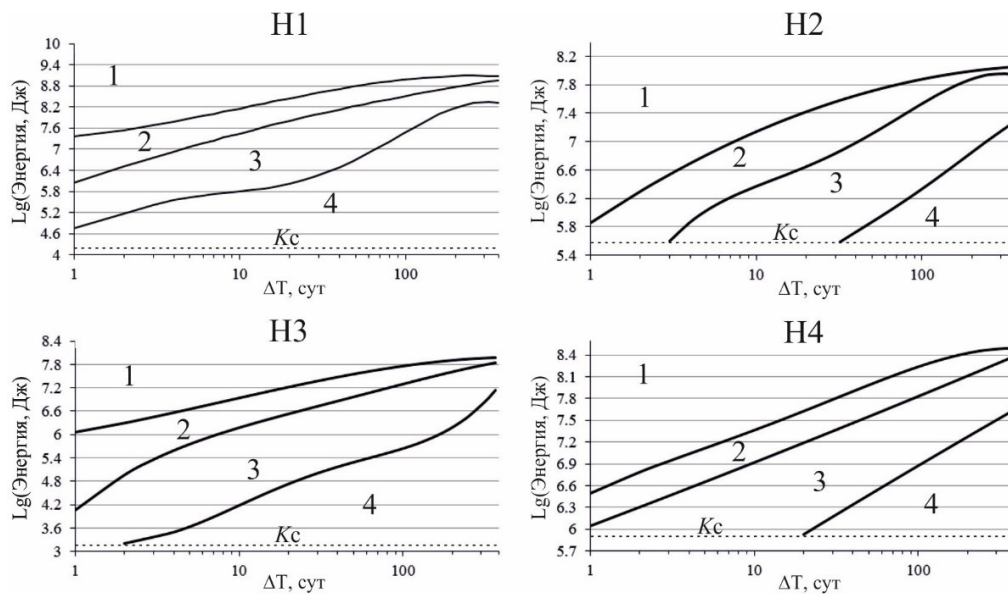


Рис. 3. Номограммы уровня сейсмической активности для вулкана Ключевской в 4 объемах среды Н1-Н4: 1 – экстремально высокий, 2 – высокий, 3 – фоновый повышенный, 4 – фоновый средний. Кс – представительный энергетический класс.

### Результаты

Анализ временного хода уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 2023 г. показывает, что извержение, начавшееся во второй половине июня 2023 г. (рис. 4, желтая полоса), предварялось статистически значимым повышением сейсмической активности.

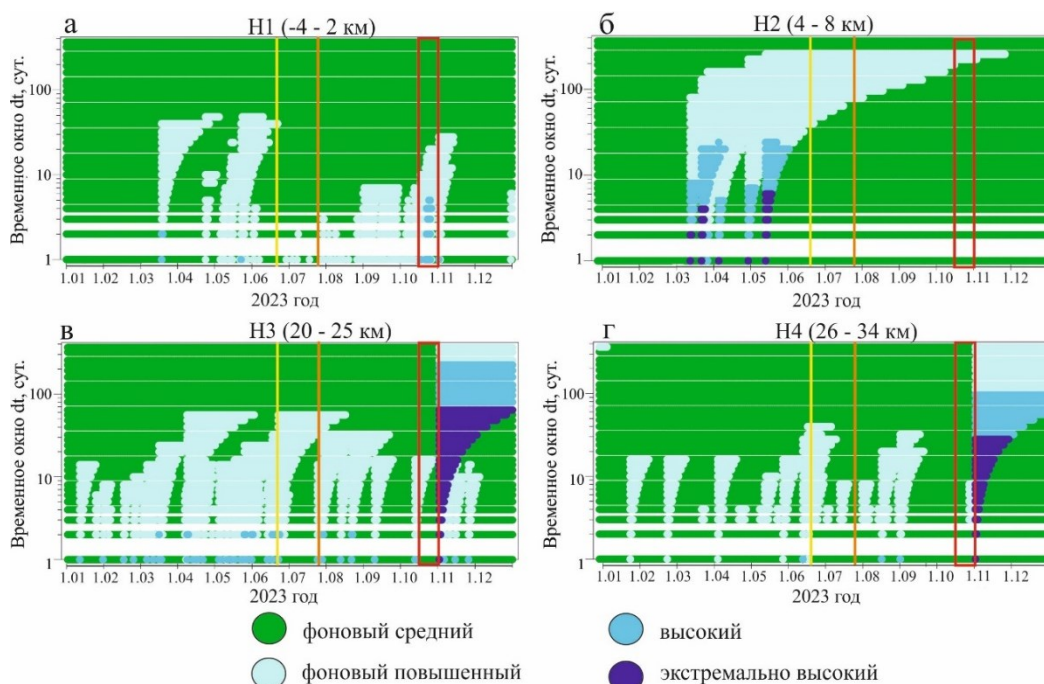


Рис. 4. СОУСграммы для вулкана Ключевской за 2023 г. для объемов Н1-Н4. Желтая полоса – появление лавы в кратере вулкана, оранжевая полоса – начало излияния лавового потока, красный прямоугольник – наиболее сильная эксплозивная фаза извержения Ключевского вулкана.

Наиболее ярко рост сейсмичности с выходом на высокий и экстремально высокий уровни проявился в объеме Н2 за 1-3 месяца до появления лавы в кратере вулкана (рис. 4б). Высокий уровень получен в окнах 2-12 сут., экстремально высокий – в окнах 2-6 сут.

Высокий уровень сейсмичности в Н1 в окнах 2-5 сут. соответствовал периоду сильной эксплозивной фазы извержения в конце октября (рис. 4а). Кульминационная фаза извержения произошла 31 октября – 1 ноября, когда пепловые облака поднимались до высоты 10-15 км (согласно базе «Активность вулканов Камчатки» Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>)). После кульминационной фазы сейсмическая активность в Н1 снизилась, а в Н3 и Н4 достигла экстремально высокого уровня в окнах 2-70 сут. и 2-30 сут., соответственно (рис. 4в, г), что может быть связано с перераспределением напряжений в окрестности питающей системы вулкана. На настоящей стадии исследования можно предложить гипотезу о том, что экстремально высокий или высокий уровень сейсмичности на больших глубинах (в Н3 и Н4) после кульминационной фазы извержения может свидетельствовать об окончании извержения.

### **Заключение**

Проведен анализ вариаций уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 2023 г. Оценки сделаны на основе использования функций распределения сейсмической энергии, выделившейся в различных временных окнах в нескольких диапазонах глубин в районе вулкана, по данным каталога Ключевской группы вулканов КФ ФИЦ ЕГС РАН. Построены функции распределения сейсмической энергии и номограммы уровня сейсмичности. Полученные вариации уровня сейсмичности в 2023 г. могут быть соотнесены с эпизодами зафиксированной вулканической активности Ключевского вулкана: с процессом подготовки извержения и его окончанием. Ретроспективный анализ предыдущих извержений этого вулкана позволит уточнить выявленные особенности поведения сейсмичности до и после извержения и оценить перспективы использования методики СОУС'09 при мониторинге состояния Ключевского вулкана.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-20019, <https://rscf.ru/project/24-17-20019/>, Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) и 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://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

### **Список литературы**

1. *Воропаев П.В.* Программная реализация оценки уровня сейсмичности по методике СОУС'09 // Материалы X региональной молодежной научной конференции. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 101-113.
2. *Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53-59.
3. *Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18-40. <https://doi.org/10.7868/S0203030613010021>
4. *Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66-91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>