

УДК 550.34

## МОНИТОРИНГ КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ СЕЙСМИЧНОСТИ (СОУС'09) В 2017-2019 ГГ.

*Воропаев П.В., Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А.*

*Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г.Петропавловск-Камчатский,  
chicoli@emsd.ru*

Еженедельный мониторинг сейсмичности Ключевской группы вулканов с помощью методики Статистической Оценки Уровня Сейсмичности (СОУС'09) [4] осуществляется с 2012 года. Рассматриваются сейсмоактивные области вулканов Ключевской, Безымянный, Толбачик, Удина, Зимины (рис. 1). Для автоматизации вычислений и оперативного представления результатов используется компьютерная программа статистической оценки уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 [1].

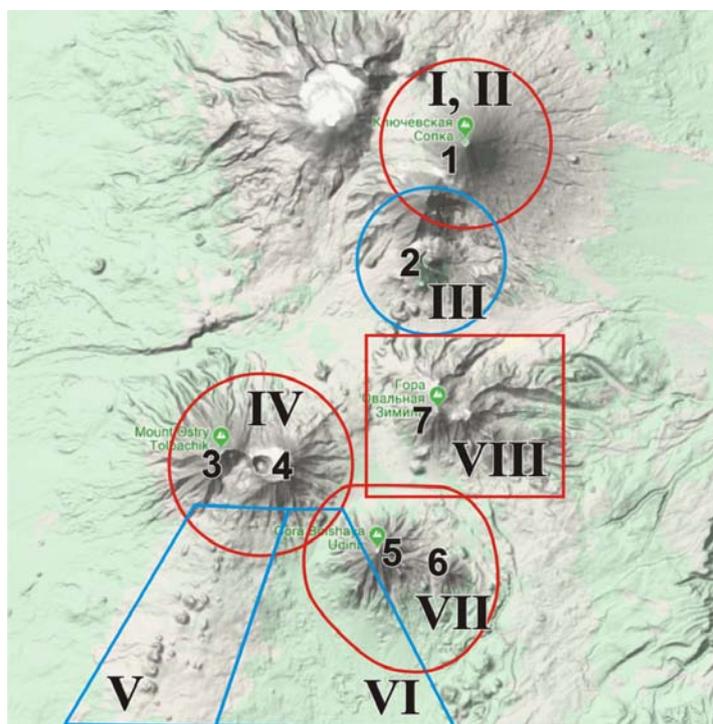


Рис. 1. Сейсмоактивные области, в которых ведется мониторинг сейсмичности по методике (СОУС'09), на схеме Ключевской группы вулканов. Вулканы: 1 – Ключевской; 2 – Безымянный; 3 – Острый Толбачик; 4 – Плоский Толбачик; 5 – Большая Удина; 6 – Малая Удина; 7 – вулканический массив Зимины. Контролируемые области: I – VIII в соответствии с Табл. 1

В работе использован каталог Ключевской группы вулканов в 2000–2019 гг., полученный по данным радиотелеметрических сейсмических станций Камчатской региональной сети, расположенных в районе данной вулканической структуры. Каталог содержит сведения об основных параметрах локальных тектонических и вулкано-тектонических землетрясений до глубины 40 км. Для каждой рассматриваемой области анализируются выборки землетрясений (Табл. 1).

В течение 2017–2019 гг. уровень сейсмичности вулканов Ключевской, Толбачик, Зимины (зоны I, II, VI, VIII) находился в рамках фоновых значений. В зоне вулканов Большая и Малая Удина (зона VII) наблюдается сейсмическая активизация [6], начавшаяся в октябре 2017 г. и продолжающаяся по настоящее время (рис. 2).

Вулканы Большая и Малая Удина считаются потухшими. За период наблюдения с начала 2000 г. по сентябрь 2017 г. в данной области фиксировалась слабая сейсмическая активность. С октября 2017 г. в рассматриваемой области наблюдается сейсмическая активизация. В течение 2018–2019 гг. данная активизация продолжает свое развитие. С 01.01.2018 по 28.08.2019 было

зафиксировано 2485 землетрясений, из них 947 надежного уровня регистрации. Максимальный энергетический класс  $K_s$  10.1. Сейсмическая энергия, выделившаяся с момента начала сейсмической активизации по конец 28.08.2019 г, составила  $1.46 \cdot 10^{10}$  Дж.

Таблица 1. Характеристики массивов данных сейсмоактивных зон Ключевой группы вулканов с 01.01.2000 г по 30.08.2019 г.

Сейсмоактивная зона	$K_s$	$N$	$N_s$	$\lg E$ (Дж)	$K_{\max}$	Год
Малоглубинный магматический очаг Ключевского вулкана, I	4.5	21 336	11 502	9.83	7.9	2012
Промежуточный магматический очаг Ключевского вулкана, II	5.0	53 454	12 914	9.61	7.9	2012
Вулкан Безымянный, III	4.0	4015	1522	8.93	8.8	2013
Вулканы Плоский и Острый Толбачик, IV	4.5	1463	404	9.7	9.4	2013
Толбачинский дол, V	5.0	430	131	9.2	8.7	2013
Толудская зона, VI	5.0	2800	745	11.4	11.3	2013
Вулканы Большая и Малая Удина, VII	4.2	3361	1445	10.3	10.1	2017
Вулканический массив Зимина, VIII	5.0	438	122	8.9	8.5	2013

$K_s$  – уровень надежной регистрации землетрясений;  $N$  – Общее число землетрясений;  
 $N_s$  – число землетрясений представительного класса;  $E$  – суммарная выделившаяся сейсмическая энергия;  
 $K_{\max}$  – максимальный класс землетрясений; Год – год начала мониторинга.

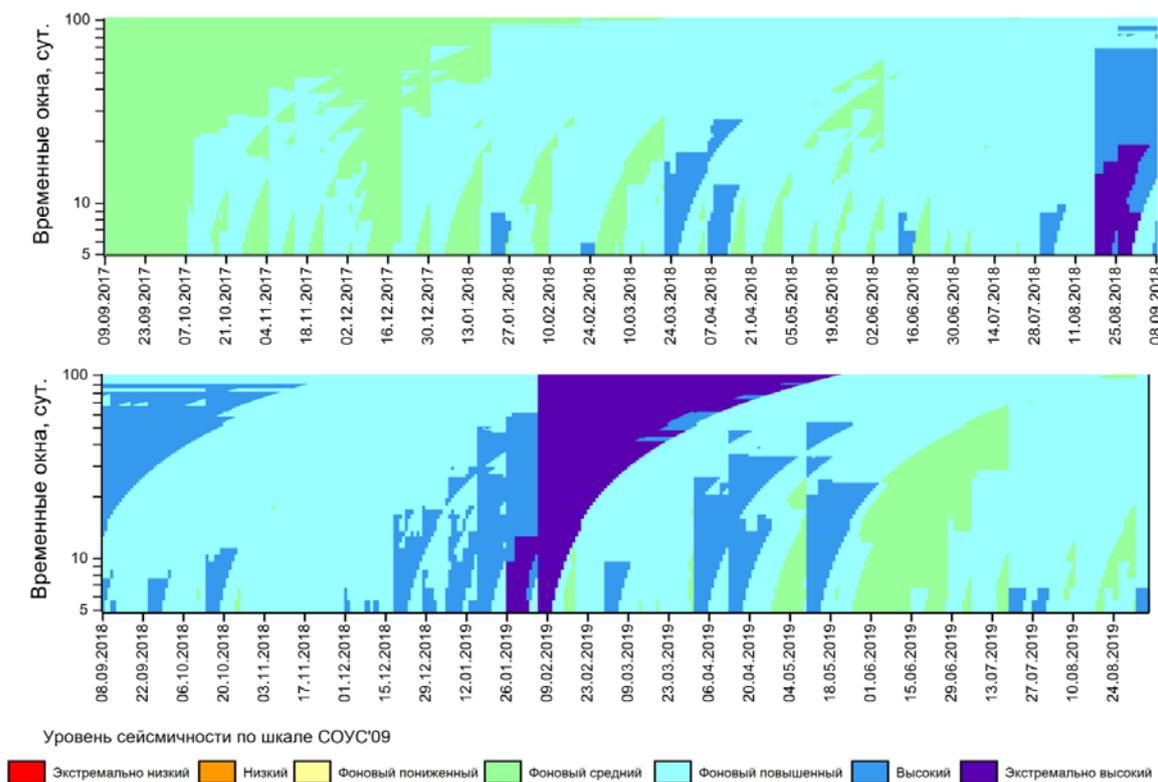


Рис. 2. Вариации уровня сейсмичности вулканов Большая и малая Удина во временных окнах 5-100 суток с сентября 2017 г. по август 2019 г.

Мониторинг сейсмической активности вулкана Безымянный по методике СОУС'09 осуществляется в скользящем временном окне 5 суток с шагом в 1 сутки. При построении функции распределения из анализа исключались временные интервалы, когда сейсмический мониторинг вулкана Безымянный был невозможен из-за сильного вулканического дрожания при активизациях Ключевского вулкана, а также в периоды пропуска данных по техническим причинам. Основываясь на ранее выявленных особенностях сейсмичности вулкана Безымянный [3], с использованием статистической оценки уровня сейсмичности была создана методика прогноза извержений вулкана Безымянный [5]. Основными элементами данной методики являются: формализованный предвестник

извержения, параметр вероятности реализации прогноза, формализованная процедура снятия состояния тревоги.

В 2017–2019 гг, группой KVERT<sup>1</sup> было зафиксировано пять извержений вулкана Безымянный, из них три в 2017 г. и два (20 января, 15-16 марта) в 2019 г. Данные извержения предварялись повышением сейсмичности (рис. 3), что согласно рассматриваемой методике является фактором роста вероятности извержения вулкана Безымянный (рис. 4) [7]. Приведенный на рис. 4 параметр (контрастность) показывает, во сколько раз увеличивается вероятность прогнозируемого события при появлении предвестника по сравнению с ситуацией, когда предвестник отсутствует.

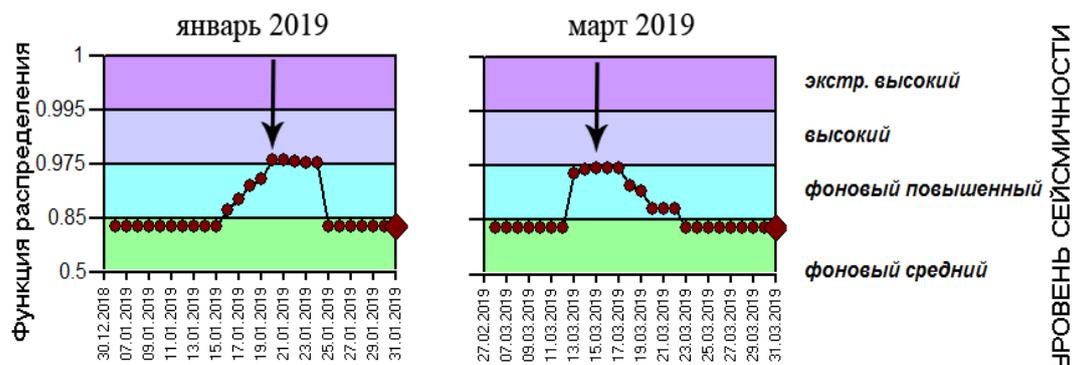


Рис. 3. Вариации уровня сейсмичности сейсмоактивного объема вулкана Безымянный во временном окне 5 суток с шагом 1 сутки в январе и марте 2019 года. Стрелками обозначен момент начала извержения вулкана Безымянный.

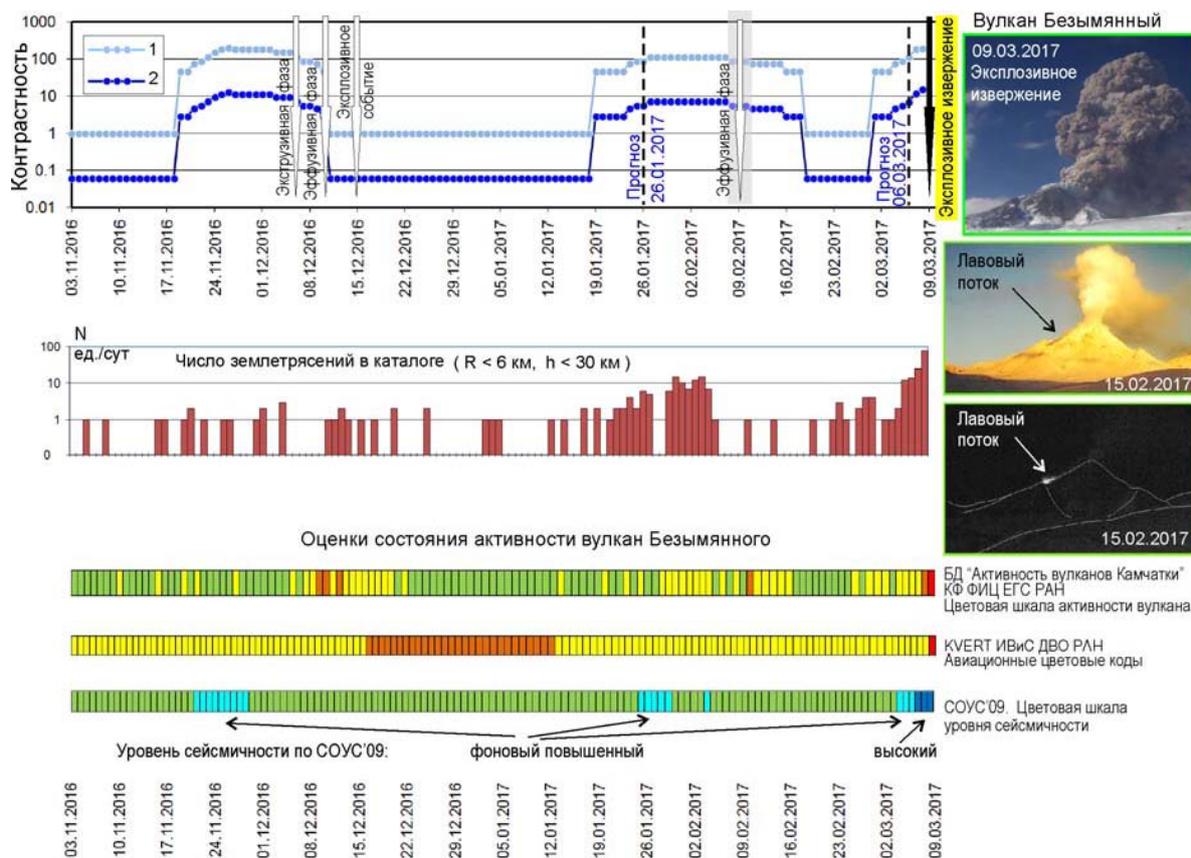


Рис. 4. Контрастность: 1 – отношение вероятности извержения вулкана Безымянного при появлении предвестника к вероятности извержения без предвестника; 2 – отношение вероятности извержения при появлении предвестника к среднеегодулетней вероятности извержения. Дополнительно на рисунок нанесены эруптивные события, оценки активности вулкана разными коллективами исследователей и фотографии (видеоданные КФ ФИЦ ЕГС РАН)

<sup>1</sup> Камчатская группа реагирования на вулканические извержения, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/index.php>

Имеющиеся методические и программные разработки (шкала СОУС'09, ее модификация и программная реализация) позволяют обеспечить оперативные оценки уровня сейсмической активности вулканов Ключевской группы.

В течение 2017–2019 гг. использование рассматриваемой методики в режиме, близком к реальному времени, для вулканов Безымянный и Удина дало яркие результаты. Выявлена сейсмическая активизация в районе Удинских вулканов, начавшаяся в октябре 2017 года и продолжающаяся по настоящее время, проиллюстрирован ее пульсирующий характер. Успешно предсказаны все пять извержений (эпизодов эруптивной активизации) вулкана Безымянный.

Показано, что уровень сейсмичности Ключевского вулкана в 2017–2019 гг. колебался в пределах фонового среднего – фонового повышенного уровня. Однако в отличие от этапа 2000-2010 гг. [2], когда вариации уровня сейсмичности хорошо соотносились с эпизодами эруптивной деятельности и подготовки извержений Ключевского вулкана, характер связи сейсмичности с извержениями изменился и проявлялся нечетко, что не позволяло использовать методику для оперативного прогноза извержений.

Результаты мониторинга сейсмичности вулканов Ключевской группы по методике СОУС'09 еженедельно передаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) и используются МЧС для оценки текущего состояния действующих вулканов.

Исследования частично поддержаны РФФИ (грант 19-05-00204).

### Список литературы

1. Воропаев П.В., Салтыков В. А. Вычислительная система оценки уровня сейсмичности // Геология и Геофизика Юга России. 2013. № 2. С 18–25.
2. Воропаев П. В., Салтыков В. А., Кугаенко Ю. А., Коновалова А. А. Ретроспективная оценка вариаций уровня сейсмичности Ключевского вулкана по шкале СОУС'09 (2000-2012 гг.) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Обнинск: КФ ГС РАН, 2013. С. 31–35.
3. Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В. Вариации статистической оценки уровня сейсмичности по шкале СОУС'09: вулкан Безымянный (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 1. Вып. 25. С. 31–40.
4. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
5. Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования 2016. Т. 17, №. 3. С.45–59.
6. Салтыков В.А., Воропаев П.В., Кугаенко Ю.А., Чебров Д.В. Удинская сейсмическая активизация 2017 - 2018 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. №. 1. Вып. 37. С. 5–7.
7. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В. Первое применение в реальном времени методики СОУС'09 для прогноза извержений вулкана Безымянного // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XX конференции, посвящённой Дню вулканолога. ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 78–81.