

**Мониторинг Ключевской группы вулканов с использованием СОУС'09
(Статистической Оценки Уровня Сейсмичности)**

П. В. Воронаев, В. А. Салтыков, Ю. А. Кугаенко

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, e-mail: chicoli@emsd.ru

Обеспечен мониторинг уровня сейсмической активности ряда сейсмоактивных областей на территории Ключевской группы вулканов, включая вулканы Ключевской, Безымянный, Толбачик, Удина, Зимины. Используется методика статистической оценки уровня сейсмичности (СОУС'09) и ее программная реализация. Сделаны успешные прогнозы извержений вулкана Безымянный (2016-2017 гг.). Контролируется текущая сейсмическая активизация вулкана Удина, начавшаяся в октябре 2017 г.

С 2012 года в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН начат и развивается мониторинг сейсмичности вулканов Ключевской группы с использованием методики Статистической Оценки Уровня Сейсмичности (СОУС'09) [5]. Мониторинг осуществляется для 8 сейсмоактивных областей, включая вулканы Ключевской, Безымянный, Толбачик, Удина, Зимины (рис. 1). Расчеты проводятся программно [1]. Для каждой сейсмоактивной области с заданной периодичностью вычисляются функции распределения выделившейся сейсмической энергии в различных временных окнах, строятся номограммы СОУС'09, на основании которых определяется текущий уровень сейсмичности по шкале СОУС'09 [5].

Результаты мониторинга оформляются в виде экспертных заключений о сейсмической обстановке и передаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС).

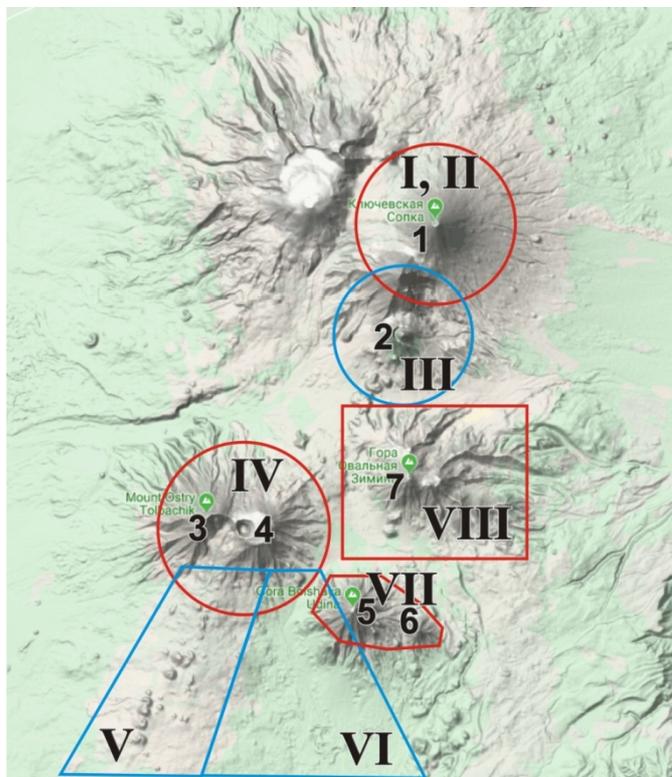


Рис. 1. Сейсмоактивные области, в которых ведется мониторинг сейсмичности по методике (СОУС'09), на схеме Ключевской группы вулканов.

Вулканы:

1 – Ключевской; 2 – Безымянный; 3 – Острый Толбачик; 4 – Плоский Толбачик; 5 – Большая Удина; 6 – Малая Удина; 7 – вулканический массив Зимины.

Контролируемые области:

I, II – малоглубинный и промежуточный магматические очаги Ключевского вулкана (цилиндр с радиусом $R=7$ км от вершины вулкана); III – вул. Безымянный (цилиндр, $R=6$ км); IV – вул. Толбачик (цилиндр, $R=8$ км); V – Толбачинский дол (полигон); VI – Толудская зона (полигон); VII – вул. Удина (полигон); VIII – вул. Зимины (полигон).

Исходные данные

В работе использован каталог Ключевской группы вулканов с 2000 по 2017 г., 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, основные характеристики которых представлены в Таблице.

Таблица. Характеристики массивов данных сейсмоактивных зон Ключевской группы вулканов с 01.01.2000 по 31.12.2017.

| Сейсмоактивная зона | K_c | N | N_c | $\lg E$ (Дж) | K_{\max} | Год |
|--|-------|--------|--------|--------------|------------|------|
| Малоглубинный магматический очаг Ключевского вулкана, I | 4,5 | 19 602 | 10 813 | 9,83 | 7,9 | 2012 |
| Промежуточный магматический очаг Ключевского вулкана, II | 5,0 | 46 421 | 11 746 | 9,57 | 7,9 | 2012 |
| Вулкан Безымянный, III | 4,0 | 3797 | 1485 | 8,93 | 8,8 | 2013 |
| Вулкан Толбачик, IV | 4,5 | 1356 | 442 | 9,7 | 9,4 | 2013 |
| Толбачинский дол, V | 5,0 | 382 | 123 | 9,2 | 8,7 | 2013 |
| Толудская зона, VI | 5,0 | 1640 | 497 | 11,4 | 11,3 | 2013 |
| Вулкан Удина, VII | 4,2 | 171 | 84 | 7,4 | 6,6 | 2017 |
| Вулкан Зимины, VIII | 5,0 | 325 | 117 | 8,9 | 8,9 | 2013 |

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

Ретроспективный анализ

Вулкан Ключевской (зоны I, II). Вариации уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 2000-2012 гг. представлены в [2]. Был проведен анализ сейсмичности для двух различных участков питающей магматической системы Ключевского вулкана: области промежуточного магматического очага (диапазон глубин от 20 до 35 км) и области малоглубинного периферического магматического очага (глубина до 5 км). Статистически доказано, что сейсмичность выбранных сейсмоактивных объемов можно рассматривать и анализировать независимо друг от друга. Показано, что представленные вариации уровня сейсмичности 2000-2012 гг. могут быть соотнесены с теми или иными эпизодами зафиксированной эруптивной деятельности Ключевского вулкана, в том числе с процессом подготовки извержений. Последняя сейсмическая активизация на Ключевском вулкане произошла в 2013 году. В дальнейшем сейсмичность находилась в пределах фонового уровня по шкале СОУС'09.

Вулкан Безымянный (зона III). Анализ динамики уровня сейсмичности вулкана Безымянный перед извержениями 1999-2012 гг. выявил характерные особенности поведения сейсмичности, имеющие предвестниковый характер [3]. В большинстве случаев (15 из 18) извержения 1999-2012 гг. предварялись статистически значимым повышением уровня сейсмичности с заблаговременностью до 40 суток, при этом в 9 случаях сейсмичность затем выходила на высокий уровень и в трех – на экстремально высокий. Выполнены оценки достоверности и надежности предвестника. На основании полученных результатов разработана методика вероятностного прогнозирования (МВП) извержений вулкана Безымянный [6].

Вулкан Толбачик (зона IV). Ярким примером сейсмической подготовки извержения является активизация перед Трещинным Толбачинским извержением 2012-2013 гг. Наиболее уверенно она проявилась в параметрах сейсмического режима в августе-ноябре 2012 г. и сопровождалась возмущениями уровня сейсмичности до *высокого – экстремально высокого* уровня, значительным увеличением числа зарегистрированных землетрясений, ростом их выделившейся энергии и ускорением сейсмического потока [4]. После окончания извержения наблюдались единичные кратковременные всплески сейсмичности до *высокого* уровня с последующим возвратом на *фоновый* уровень.

Примеры текущего мониторинга

Вулкан Безымянный (зона III). Методика вероятностного прогнозирования (МВП) извержений вулкана Безымянный [5], разработанная на базе методики СОУС'09 [2, 6], позволила сделать успешные предсказания извержений в начале 2017 г. [7].

Следующий эпизод эруптивной активности с выбросом пепла на высоту 12 км был зафиксирован в июне 2017 г. Усиление сейсмической активности в постройке вулкана началось во второй половине мая. Уровень сейсмичности вулкана (во временном окне 5 суток) вышел на *фоновый повышенный* уровень 28.05.2017 г. и перешел на *высокий* уровень 11.06.2017 г. (рис. 2). В соответствии с МВП 28-29.05.2017 г. вероятность извержения превышала среднемноголетнюю в ~6-8 раз, в последующие дни она монотонно возрастала. 15.06.2017 г. уровень сейсмичности достиг *экстремально высокого уровня*, а вероятность извержения вулкана Безымянный составила 0.65 на ближайшие 7 дней, что превышает среднемноголетнее значение в 20 раз, при этом вероятность извержения по сравнению с вероятностью в отсутствие предвестника возросла в 350 раз. Прогностическое заключение было передано в КФ РЭС 16.06.2017 г. Через несколько часов прогноз реализовался эксплозивным извержением вулкана Безымянного.

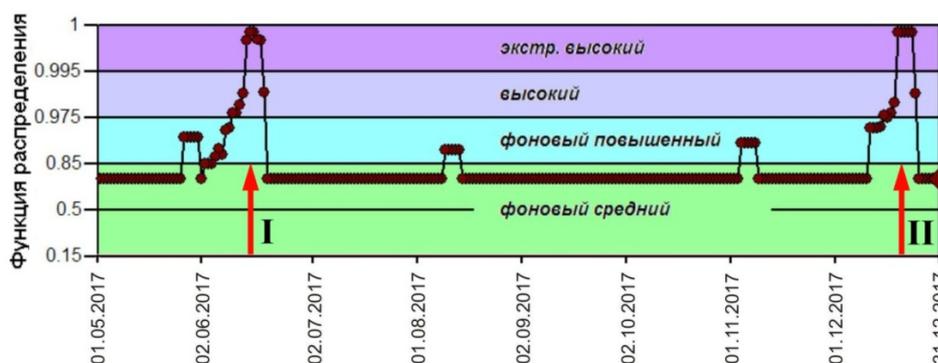


Рис. 2. Вариации уровня сейсмичности вулкана Безымянный во временном окне 5 суток с мая по декабрь 2017 г. Стрелками обозначены извержения вулкана Безымянный. I - 16.06.2017 г., II - 20.12.2017 г.

20 декабря 2017 г. произошло очередное пароксизмальное извержение с выбросом пеплового столба на 15 км над уровнем моря. Данное извержение предварялось усилением сейсмической активности в постройке вулкана. Уровень сейсмичности вышел на *фоновый повышенный* уровень 11.12.2017 г. и перешел на *высокий* уровень 15.12.2017 г. (рис. 2). В соответствии с МВП вероятность извержения возросла по сравнению с фоновой - в 20 раз, а по сравнению с вероятностью в отсутствие предвестника - в 300 раз. Прогностическое заключение было передано в КФ РЭС 18.12.2017 г. 19.12.2017 г. уровень сейсмичности достиг *экстремально высокого уровня*, и 20.12.2017 произошло эксплозивное извержение вулкана Безымянного.

Вулкан Удина (зона VII). Для анализа сейсмичности вулкана Удина использована выборка землетрясений в интервале глубин до 40 км. Вулканы Большая и Малая Удина считаются потухшими. С начала 2000 г. по сентябрь 2017 г. в данной области фиксировалась слабая сейсмическая активность.

С октября 2017 г. в районе Удины наблюдается сейсмическая активизация. С 01.10.2017 по 28.02.2018 было зафиксировано 250 землетрясений, из них 90 надежного уровня регистрации $K_c=4,2$. Максимальный энергетический класс $K_5=7,0$. Сейсмическая энергия, выделившаяся в этом интервале времени, составила $4,45 \cdot 10^7$ Дж. В октябре 2017 г. зафиксирован рост сейсмичности с выходом на *высокий* уровень с последующим достижением *экстремально высокого уровня* в ноябре во всех рассматриваемых временных окнах (рис. 3). В конце февраля 2018 г. сейсмичность в

области вулкана Удина во временных окнах 15, 30, 90 суток находилась на *экстремально высоком* уровне. На момент написания статьи активизация продолжается. Расчеты уровня сейсмичности для этой зоны проводятся ежедневно.

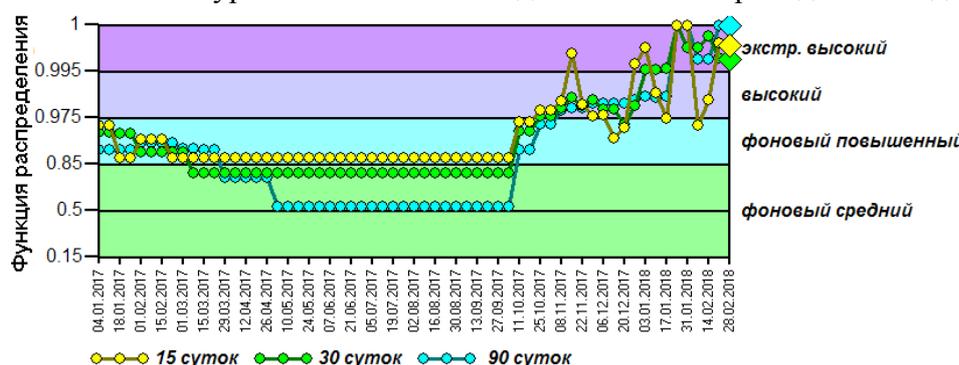


Рис. 3. Вариации во времени уровня сейсмичности сейсмоактивного объема вулкана Удина с января 2017 г. по февраль 2018 г. во временных окнах 15, 30, 90 суток.

Заключение

Обеспечен мониторинг уровня сейсмичности вулканов Ключевской группы по методике СОУС'09. Применение методики СОУС'09 и ее модификации МВП позволяет дать статистически обоснованную оценку текущей сейсмической обстановки. Результаты мониторинга еженедельно передаются КФ РЭС.

На вулкане Удина выявлена и контролируется сейсмическая активизация, не имеющая аналогов в практике сейсмологических наблюдений за этим вулканом: уровень сейсмичности в течение ~5 месяцев пребывает на *высоком – экстремально высоком* уровне (октябрь 2017 г. – февраль 2018 г.).

В 2017 году по результатам мониторинга уровня сейсмичности обнаружены сейсмические активизации и сделаны вероятностные прогнозы извержений вулкана Безымянного. Прогнозы четырех эпизодов активизации вулкана Безымянного признаны в КФ РЭС успешными.

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. и др. Ретроспективная оценка вариаций уровня сейсмичности Ключевского вулкана по шкале СОУС'09 (2000-2012 гг.) // Материалы IV научно-технической конференции "Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России". Петропавловск-Камчатский, 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. Кугаенко Ю.А., Титков Н.Н., Салтыков В.А., Воропаев П.В. Анализ подготовки Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. в параметрах сейсмичности и деформаций земной коры по данным системы комплексного мониторинга активности вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 40-58.
5. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53-59.
6. Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. 2016. № 3. С. 45-59.
7. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В. Первое применение в реальном времени методики СОУС'09 для прогноза извержений вулкана Безымянного // Материалы XX региональной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. 2017. Петропавловск-Камчатский. С. 78-81.