

УДК 550.34, 551.21

ВАРИАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ПО ШКАЛЕ СОУС'09: ВУЛКАН БЕЗЫМЯННЫЙ (КАМЧАТКА)

© 2015 Ю.А. Кугаенко, П.В. Воропаев

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: ku@emsd.ru*

Для исследования вариаций сейсмичности вулкана Безымянный применена методика СОУС'09, в которой для оценки уровня сейсмичности заданного пространственного объекта в определенный временной интервал используется функция распределения сейсмической энергии. Построена номограмма уровня сейсмичности, позволяющая дать статистически обоснованную характеристику текущей сейсмической обстановки на вулкане Безымянный в качественных терминах. Понятие «сейсмический фон» для вулкана Безымянный формализовано на основе количественного анализа имеющихся многолетних сейсмологических данных. Проанализирована динамика уровня сейсмичности перед извержениями 1999-2012 гг. Выявлены характерные предвещающие извержения вариации параметра, имеющие предвестниковый характер.

Ключевые слова: уровень сейсмичности, вулкан Безымянный, шкала СОУС'09, предвестник извержения.

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития науки выдвигает повышенные требования к оценкам опасности природных катастроф, в том числе сейсмичности и извержений вулканов. Технологии цифровой регистрации и сбора данных, повышение качества получаемой информации, компьютеризация, быстрый доступ к большим объемам результатов массовой обработки первичного материала позволяют перейти от качественного описания наблюдаемых процессов к их количественным, статистически обоснованным параметрам.

Исследователями сейсмичности на различных вулканах мира установлено, что усиление сейсмической активности во многих случаях предвещает и сопровождает вулканические извержения (Diefenbach et al., 2009; Phillipson et al., 2013). Таким образом, состояние сейсмичности является одним из параметров, позволяющих судить о вулканической активности и прогнозировать ее дальнейшее развитие. При этом для одного вулкана появление землетрясений некоторого энергетического диапазона свидетельствует о начале извержения, а для другого – такие же сейсмические события являются

ординарными. Зачастую требуется дать оценку текущей сейсмичности в качественных терминах, указав, например, что она находится на низком (или фоновом, или очень высоком) уровне. Такие оценки могут быть востребованы, например, территориальной администрацией, МЧС и службами авиации. Имеющиеся в Камчатском филиале (КФ) Геофизической службы (ГС) РАН регулярно пополняемые сейсмические каталоги дают возможность обосновать качественное описание наблюдаемых сейсмических процессов на базе использования количественных, статистически обоснованных параметров, позволяющих в перспективе перейти к автоматизированной оценке активности вулканов.

В представленной работе для исследования вариаций сейсмичности вулкана Безымянный применена методика СОУС'09 (Салтыков, 2011), в которой в качестве параметра, характеризующего уровень сейсмичности заданного пространственного объекта в определенный временной интервал, используется значение статистической функции распределения сейсмической энергии. По каталогу Ключевской группы вулканов проанализирована динамика сейсмичности вулкана Безымянный перед извержениями 1999-2012 гг. Выявлены характерные вариации уровня сейс-

мичности, предварявшие извержения, имеющие предвестниковый характер.

МЕТОДИКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ СЕЙСМИЧНОСТИ

Методика СОУС'09, подробно описанная в работе (Салтыков, 2011), позволяет статистически обоснованно производить оценки уровня сейсмичности различных пространственно-временных областей в качественных терминах с помощью формализованной шкалы. Для характеристики уровня сейсмичности конкретной пространственно-временной области используется эмпирическая функция распределения суммарной выделившейся сейсмической энергии E : $F(K) = P(\lg E \leq K)$. Задав шкалу в пороговых значениях F и зная выделившуюся энергию E , мы можем сделать заключение о повышенной либо пониженной сейсмической активности региона. Выбор сейсмической энергии в качестве исходного параметра обусловлен ее высокой устойчивостью по отношению к качеству каталога, так как практически вся выделившаяся энергия определяется наиболее сильными землетрясениями. Таким образом, мы можем применять данный подход даже в том случае, когда уровень надежной регистрации

достаточно низок, но имеются предпосылки того, что сильнейшие из произошедших событий все-таки регистрируются. В дальнейшем при анализе уровня сейсмичности используются только землетрясения представительного класса.

Понятие «фона» ассоциируется со значением «обычный, наиболее распространенный, наиболее часто встречающийся», в противоположность «аномалии», которая наблюдается достаточно редко. Учитывая это, выбраны следующие пороговые значения функции распределения F : $F = 0.995, 0.975, 0.85, 0.15, 0.025, 0.005$. Для шкалы описания состояния сейсмичности введены основные уровни: экстремально высокий, высокий, фоновый, низкий и экстремально низкий. Исходя из такого разбиения, 95% времени мониторинга сейсмичность пребывает на фоновом уровне, по 2% времени отводятся на высокий и низкий и по 0.5% на экстремально высокий и экстремально низкий уровни сейсмичности. Для повышения детальности фоновый уровень разделяется на три подуровня: фоновый средний, на который отводится 70% времени мониторинга, а также фоновый повышенный и фоновый пониженный, на каждый из которых приходится по 12.5% времени мониторинга. Для облегчения восприятия шкала СОУС'09 визуализирована на рис. 1.

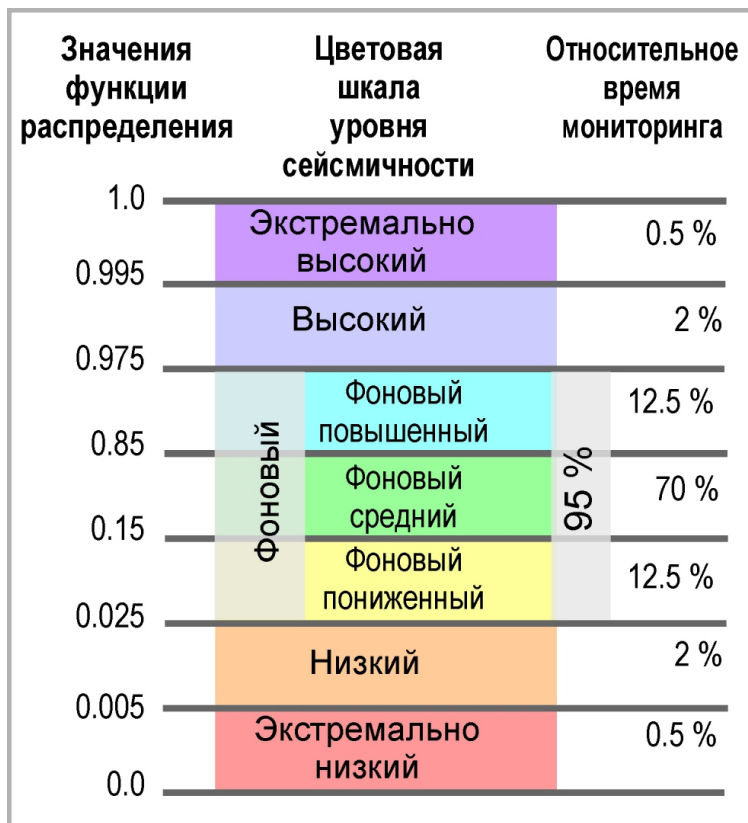


Рис. 1. Шкала статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 с указанием пороговых значений функции распределения и относительного времени мониторинга, соответствующих каждому введенному уровню сейсмичности.

Чтобы использовать эту шкалу на практике, необходимо рассчитать квантили распределения сейсмической энергии, соответствующие пороговым значениям вероятности F , для различных временных интервалов. В качестве опорных квантилей используются $K(0.995)$, $K(0.975)$, $K(0.85)$, $K(0.15)$, $K(0.025)$, $K(0.005)$. По набору функций распределения $F(K)$ для различных временных интервалов ΔT можно получить зависимость любого квантиля распределения энергии $K(F)$ от временного окна ΔT . Рассчитанные значения квантилей для набора значений ΔT аппроксимируются монотонной кривой. Представленные на едином графике аппроксимации формируют номограмму, которая позволяет дать качественную оценку сейсмического режима в любой конкретный отрезок времени.

Формализованная шкала уровня сейсмичности вносит терминологическую определенность во встречающиеся описания состояния сейсмичности отдельных территорий и позволяет избежать ряда неоднозначностей при оценке и сравнении сейсмического режима различных пространственно-временных объемов. В частности, формализуется понятие «сейсмический фон».

Описанный статистический подход к оценке сейсмичности программно реализован (Воропаев, Салтыков, 2013), что обеспечивает оперативность его применения. В настоящее время методика СОУС'09 внедрена и используется в ГС РАН для ежегодной оценки уровня сейсмичности регионов России (Землетрясения ..., 2009-2014) и еженедельного мониторинга Камчатской сейсмоактивной зоны (Салтыков и др., 2013). В работе (Кугаенко и др., 2013) продемонстрировано ее применение для Ключевского вулкана. Оценка уровня сейсмической активности по шкале СОУС'09 наглядно продемонстрировала свою информативность при определении значимости сейсмической активизации, предвещавшей начало Толбачинского извержения в 2012 г. (Салтыков и др., 2012). Непрерывно пополняемая база сейсмологических данных КФ ГС РАН позволяет применять данную методику и для других вулканических объектов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ: ВУЛКАН БЕЗЫМЯННЫЙ

Вулкан Безымянный расположен в центральной части Ключевской группы вулканов на Камчатке, его возраст оценивается в 5-5.5 тыс. лет (Богоявленская и др., 1991). Еще в середине 20 века он относился к недействующим вулканам. Более чем 1000-летний период покоя Безымянного закончился катастрофическим из-

вержением 1955-1956 гг., кульминация которого связана с направленным взрывом 30.03.1956 г., уничтожившим часть постройки вулкана (Богоявленская и др., 1991, Богоявленская, Кирсанов, 1981; Горшков, 1961; Малышев, 1997; Belousov et al., 2007 и др.). При этом эруптивное облако пепла поднялось на высоту 35-40 км, а образовавшиеся пирокластические потоки распространились на расстояния до 18 км. Затем в образовавшемся кратере начал выжиматься купол вязкой лавы, формирование которого продолжается.

В последние десятилетия на вулкане Безымянный происходит в среднем одно-два кратковременных, но сильных эксплозивно-эффузивных извержения в год (рис. 2) (Богоявленская, Гирина, 2006; Малышев, 2006; Сенюков и др., 2013, Girina, 2013, Thelen et al., 2010; West, 2013 и др.). Так с 1977 г. по сентябрь 2012 г. было зафиксировано 42 извержения, при которых высота пепловых облаков достигала 10-15 км, а длина пепловых шлейфов – нескольких сотен километров, что представляло значительную опасность для авиации. В течение этого временного интервала для вулкана Безымянный была характерна слабая мелкофокусная сейсмичность, которая, в основном, носила спорадический характер: появление землетрясений было связано непосредственно с извержениями или предшествовало им. С сентября 2012 г. по настоящее время (апрель 2015 г.) вулкан Безымянный находится в состоянии парогазовой и фумарольной активности, эксплозий не наблюдается.

По аналогии с предыдущими периодами активизации вулкана Безымянный и исходя из оценок их длительности, предполагается, что современный эруптивный цикл вулкана продлится еще не менее 100-200 лет (Богоявленская, Гирина, 2006; West, 2013). В настоящее время имеется значительный опыт выявления различных предвестников извержений вулкана Безымянный, а также ряд успешных прогнозов его эруптивной деятельности (Гирина, 2012; Гирина и др., 2014, Иванов, 2013; Сенюков и др., 2012; Сенюков, 2013; Ramsey, Dehn, 2004; West, 2013 и др.). Анализ результатов этих исследований показал, что наиболее информативными предвестниками извержений вулкана Безымянного являются активизация сейсмичности и развитие термальной аномалии, отслеживаемой по спутниковым данным. Однако погода в районе Ключевской группы вулканов часто бывает неблагоприятна как для прямых визуальных наблюдений за вулканами, так и для спутникового мониторинга. В этом случае приходится полагаться на сети сейсмических станций. Такая ситуация ярко проявилась в ноябре 2012 г. перед Толбачинским извержением, начало которого

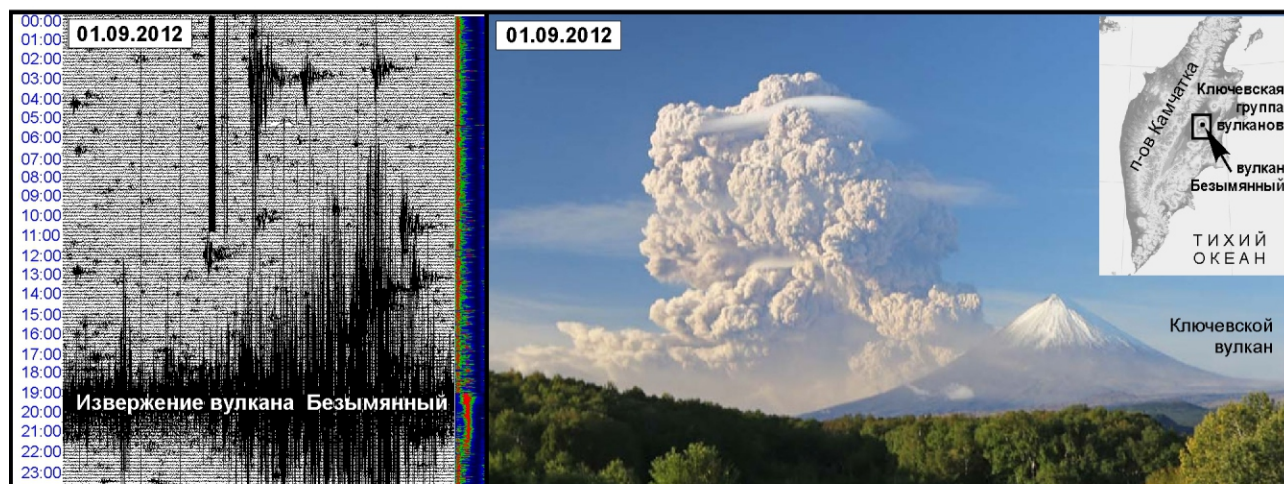


Рис. 2. Извержение вулкана Безымянный 01.09.2012 г. Слева представлена суточная сейсмограмма сейсмостанции «Безымянный» с записью этого извержения и предварающих его землетрясений. Справа — взрывчатая фаза извержения: эруптивное пепловое облако вулкана Безымянный, поднимающееся на высоту 10-12 км из-за постройки Ключевского вулкана. (Фото Ю. Демянчука).

при плохой погоде было идентифицировано только по сейсмическим данным (Сенюков и др., 2013). Поэтому именно сейсмичность, по мнению авторов, остается наиболее надежным источником информации при выявлении потенциальной предвестниковой ситуации для вулкана Безымянный. Таким образом, поиск дополнительных предвестников извержений в параметрах сейсмического режима по-прежнему является актуальным.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В работе использован каталог Ключевской группы вулканов с 2000 по 2012 гг., полученный по данным радиотелеметрических сейсмических станций Камчатской региональной сети, расположенных в районе этой вулканической структуры. Каталог содержит данные об основных параметрах локальных тектонических и вулcano-тектонических землетрясений до глубины 40 км.

Для построения оценок уровня сейсмичности из каталога были выбраны землетрясения, зафиксированные в радиусе 6 км от вершины вулкана Безымянный (рис. 3). Отметим, что ~98% сейсмических событий приходится на диапазон глубин до 5 км. Анализируемый массив данных имеет следующие характеристики:

- уровень надежной регистрации $K_s = 4$, где K_s энергетический класс по (Федотов, 1972);
- общее число землетрясений 2610;
- число землетрясений надежной регистрации 1213;
- логарифм суммарной выделившейся сейсмической энергии $\lg E = 8.89$;
- максимальный класс землетрясений $K_s = 8.8$.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И НОМОГРАММЫ УРОВНЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ

Для оценки состояния сейсмичности исследуемого сейсмоактивного объема построены эмпирические функции распределения выделившейся сейсмической энергии во временных окнах 5, 7, 15, 30 и 90 суток и номограмма СОУС'09, которые представлены на рис. 4, 5. Таким образом, для любого значения сейсмической энергии, выделившейся в заданном временном окне ΔT , определено, с какой вероятностью в пространственно-временной области мониторинга выделяется энергия меньше или равная рассматриваемой. При построении функций распределения из анализа исключались временные интервалы, когда сейсмический мониторинг вулкана Безымянный был невозможен из-за сильного вулканического дрожания при активизациях Ключевского вулкана, а также периоды пропуска данных по техническим причинам.

В соответствии с номограммой СОУС'09 (рис. 5) низкий, экстремально низкий и фоновый пониженный уровни сейсмичности для рассматриваемого массива данных статистически не определены. Фоновый средний уровень имеет смысл рассматривать во временных окнах от 5 суток, временные окна меньшей длительности для данного объекта по используемой методике не могут быть проанализированы. Эти ограничения статистических оценок связаны с тем, что имеются продолжительные временные интервалы, в которых не были зарегистрированы землетрясения представительного класса.

Данная номограмма формализует понятие «сейсмический фон» для вулкана Безымянный.

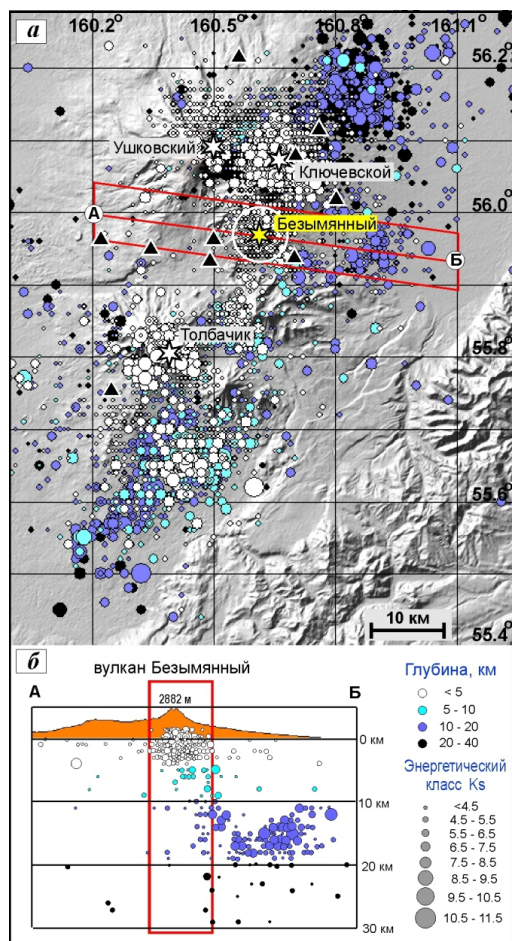


Рис. 3. Сейсмичность Ключевской группы вулканов в 2000-2012 гг.: *а* – карта эпицентров; *б* – проекция гипоцентров, ограниченных четырехугольником на карте, на вертикальную плоскость по линии АБ. Выделена пространственная цилиндрическая область под вулканом Безымянный, соответствующая анализируемому набору данных.

Фоновый уровень сейсмичности находится в границах $\lg E$ (Дж):

для окна 5 суток – до 5.9; для окна 10 суток – до 6.3;

Фоновый средний уровень сейсмичности находится в границах $\lg E$ (Дж):

для окна 5 суток – до 4.5; для окна 10 суток – до 4.7.

Следует отметить, что отсутствие землетрясений представительного класса ($E=0$ Дж) также соответствует фоновому уровню сейсмичности вулкана Безымянный.

Более детально номограмма для временных окон от 5 до 10 суток представлена на рис. 6. Энергетический класс землетрясения K_s связан с выделившейся сейсмической энергией E соотношением $K_s = \lg E$. Согласно номограмме единичное сейсмическое событие энергетического класса $K_s = 5.0$ переводит уровень сейсмичности во временных окнах 5-10 суток на фоновый повышенный уровень. В случае землетрясения с $K_s = 6.0$ уровень сейсмичности поднимается до

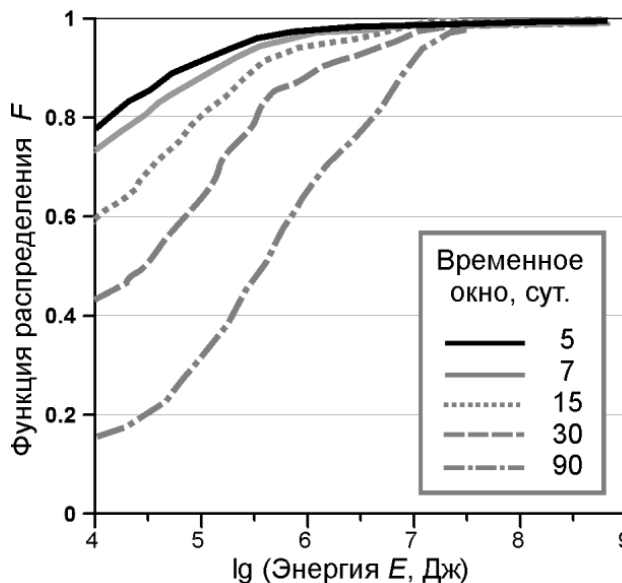


Рис. 4. Функции распределения выделившейся сейсмической энергии для вулкана Безымянный во временных окнах 5, 7, 15, 30 и 90 суток.

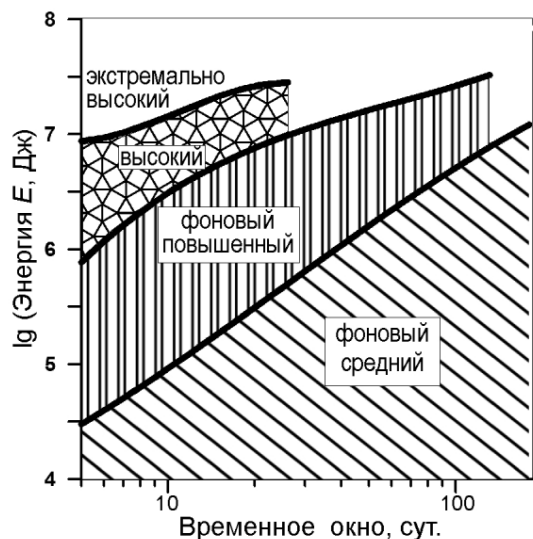


Рис. 5. Номограмма СОУС'09 для вулкана Безымянный. На номограмме выделены зоны, соответствующие различным уровням сейсмичности.

высокого во временных окнах 5-6 суток и достигает фонового повышенного в более длинных окнах 7-10 суток. Единичное землетрясение с $K_s = 7.0$ соответствует для вулкана Безымянный экстремально высокому уровню сейсмичности во временных окнах 5-7 суток и выводит этот параметр практически на границу между высоким и экстремально высоким уровнем во временных окнах 8-10 суток.

АКТИВИЗАЦИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ ПЕРЕД ИЗВЕРЖЕНИЯМИ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ В ПАРАМЕТРАХ СОУС'09

Временной ход уровня сейсмичности рассчитывался в скользящем временном окне с шагом

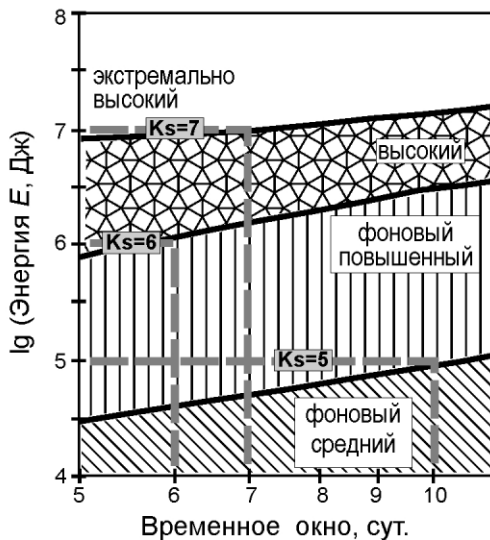


Рис. 6. Фрагмент номограммы СОУС'09 для вулкана Безымянный, построенной для коротких временных окон (5-10 суток). Проиллюстрировано, как землетрясения с энергетическим классом $K_s = 5.0$, $K_s = 6.0$ и $K_s = 7.0$ влияют на уровень сейсмичности исследуемой области. Пояснения в тексте.

1 сутки. Этим имитировалась возможность ежедневного мониторинга состояния сейсмичности. Величина временного окна варьировалась.

Выявлены переходы сейсмичности с фонового среднего на фоновый повышенный, а затем на высокий (экстремально высокий) уровень перед большинством извержений вулкана Безымянного в 2000-2012 гг. Примеры временного хода перед извержениями представлены на рис. 7 для временных окон 5, 7 и 10 суток.

Рассмотрим эти примеры подробнее.

Извержение 18.05.2006 г.: взрывная фаза по сейсмическим данным длилась ~40 мин. с высотой пепловых выбросов ~8 км над уровнем моря. Возмущения уровня сейсмичности наблюдались с апреля 2004 г. Выход уровня сейсмичности на фоновый повышенный уровень отмечен за 8 дней до извержения. В последние 3 дня уровень сейсмичности был на высоком уровне. Перед извержением наблюдалась устойчивая тенденция роста уровня сейсмичности.

Извержение 09.05.2006 г.: взрывная фаза по сейсмическим данным длилась ~25 мин., пепловые облака поднимались до 10-15 км над уровнем моря. Возмущения уровня сейсмичности наблюдались с марта 2006 г. Выход уровня сейсмичности на фоновый повышенный уровень отмечен за 28 дней, на высокий — за 7 дней, на экстремально высокий — броском за два дня до извержения.

Извержение 01.09.2012 г.: взрывная фаза по сейсмическим данным длилась ~30 мин., высота пеплового облака 10-12 км над уровнем моря (рис. 1). Первое кратковременное (соответствующее длине временного окна) возмущение сейс-

мичности отмечено в конце июля 2012 г. Выход на фоновый повышенный уровень произошел за 8 суток до извержения, а в последние четверо суток сейсмичность вышла на *высокий* уровень. Экстремально высокий уровень сейсмичности был достигнут только в день извержения.

Результаты исследования активизаций сейсмичности перед извержениями вулкана Безымянный при применении методики СОУС'09 приведены в таблице. В 2000-2012 гг. произошло 20 извержений. В двух случаях мониторинг вулкана Безымянный был затруднен или невозможен из-за высокого уровня вулканического дрожания, связанного с активностью Ключевского вулкана (это извержения, начавшиеся 11.05.2007 г. и 31.05.2010 г.). Поэтому только для 18 случаев имеется каталог, пригодный для статистического анализа. Для этих извержений в таблице представлены интервалы времени заблаговременного достижения сейсмичностью фонового повышенного — высокого — экстремально высокого уровня.

Обобщим результаты исследования вариации статистической оценки уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 перед извержениями вулкана Безымянный в 2000-2012 гг., для которых каталог пригоден для статистического анализа.

В 15 случаях из 18 наблюдался переход уровня сейсмичности с фонового среднего на фоновый повышенный с заблаговременностью до 40 дней.

При этом в 9 случаях из 18 сейсмичность затем выходила на высокий уровень за 1-22 дня до извержения. Выявлен лишь один случай выхода сейсмичности на высокий уровень, который не закончился извержением.

Трижды перед извержениями был достигнут экстремально высокий уровень сейсмичности с заблаговременностью 1, 2 и 14 дней (№ 1, 9, 11 в табл. 1). Случаев, когда выход сейсмичности на экстремально высокий уровень не закончился бы извержением, не выявлено.

Только в трех случаях из 18 непосредственно перед извержениями не выявлено статистически значимое повышение уровня сейсмичности (№ 13, 16, 17 в табл. 1).

Можно утверждать, что для вулкана Безымянный выход уровня сейсмичности на высокий и экстремально высокий уровень носит характер предвестника извержения со значительной вероятностью, а уровни сейсмичности в различных временных окнах можно рассматривать как дополнительные прогностические параметры, обоснованные статистически. Сложнее обстоит дело с прогностической информативностью ситуации, когда сейсмичность выходит на фоновый повышенный уровень, так как имеется ряд случаев, когда такие вариации наблюдались

ВАРИАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ

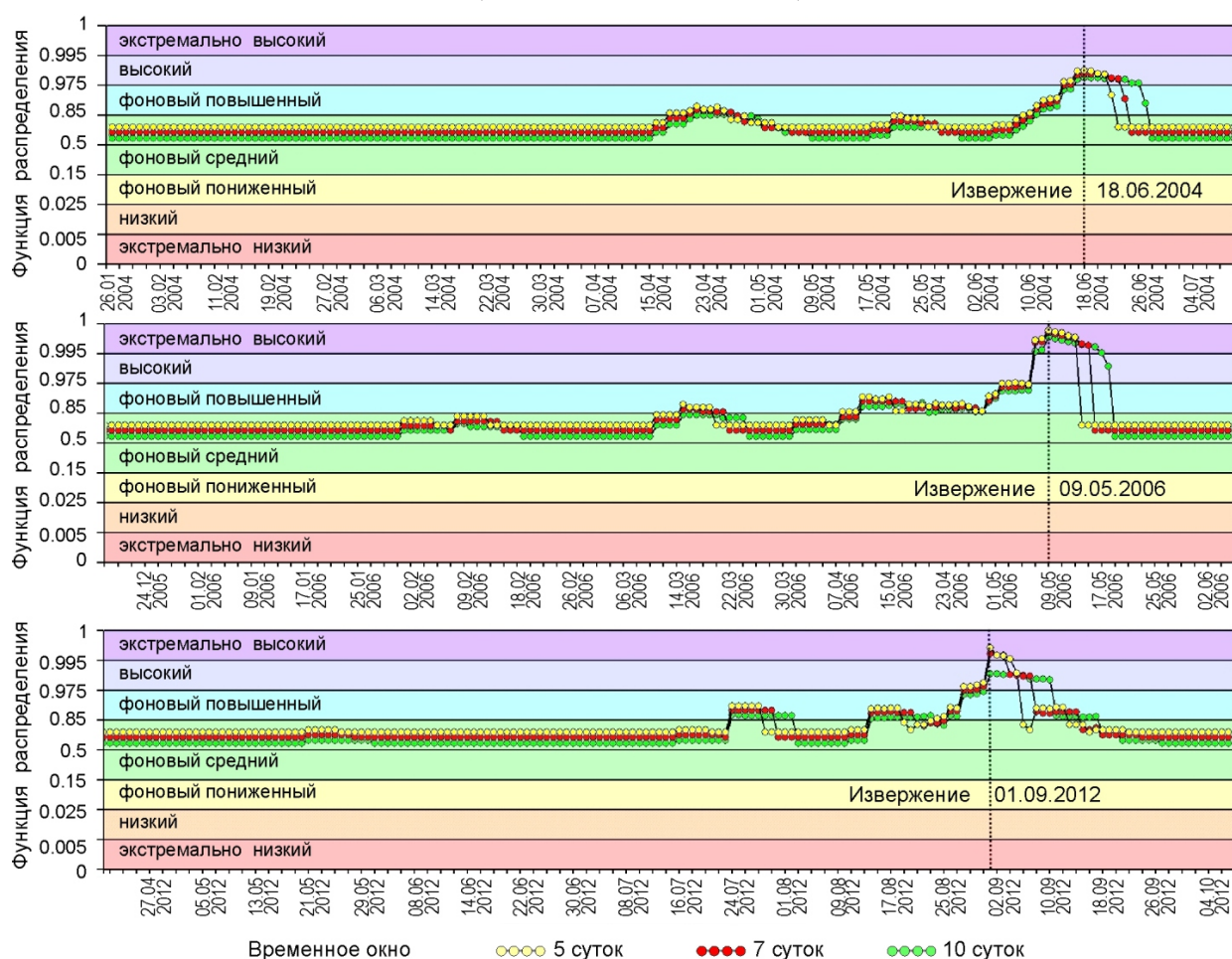


Рис. 7. Примеры вариаций уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 перед извержениями вулкана Безымянный 18.06.2004 г., 09.05.2006 г. и 01.09.2012 г. Приведены оценки для временных окон 5, 7 и 10 суток с шагом 1 сутки.

вне связи с извержениями. Работа в этом направлении продолжается с целью формализовать предвестник и оценить его прогностическую эффективность.

На данном этапе исследований можно рассчитать надежность предвестника R и достоверность предвестника V .

Надежность предвестника R определяется как отношение числа извержений N_+ , для которых был выделен предвестник, к числу всех анализируемых извержений N : $R = N_+/N$.

Для вулкана Безымянный надежность предвестникового эффекта при выходе сейсмичности на фоновый повышенный уровень составляет $R = 15/18 \approx 0.83$, на высокий – $R = 9/18 = 0.5$, на экстремально высокий уровень – $R = 3/18 \approx 0.17$.

Достоверность предвестника V определяется как отношение числа предвестниковых аномалий N_{A+} (в нашем случае это выход сейсмичности перед извержением на заданный уровень) к общему числу таких повышений уровня сейсмичности в течение всего исследуемого отрезка времени N_A : $V = N_{A+}/N_A$.

Для исследованного интервала времени достоверность предвестникового эффекта при

выходе сейсмичности на высокий уровень составляет $V = 9/18 = 0.5$, на экстремально высокий – $V = 3/3 = 1$. Достоверность достижения уровня сейсмичности фоновый повышенный уровень в качестве предвестника извержения не оценивалась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вулкан Безымянный можно рассматривать как эталонный объект для исследования предвестников извержений по сейсмическим данным. В представленной работе проанализированы активизации сейсмичности перед извержениями вулкана Безымянный 2000–2012 гг. Для этого применена методика статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 (Салтыков, 2011). Оценки сделаны на основе использования функций распределения сейсмической энергии, выделившейся в различных временных окнах, по данным каталога Ключевской группы вулканов. Построена номограмма уровня сейсмичности.

Проведенная работа имеет два аспекта: информационный и прогностический.

В информационном аспекте номограмма

Заблаговременность проявления предвестника (уровня сейсмичности во временном окне 5 суток) перед извержениями вулкана Безымянный в 2000-2012 гг.

№	Дата начала извержения	Заблаговременность выхода сейсмичности на заданный уровень: (количество суток)		
		Фоновый повышенный	Высокий	Экстремально высокий
1	13.03.2000	29	22	15
2	30.10.2000	12	-	-
3	06.08.2001	17	-	-
4	15.12.2001	24	2	-
5	25.12.2002	9	-	-
6	26.07.2003	3	-	-
7	13.01.2004	4	2	-
8	18.06.2004	8	3	-
9	11.01.2005	17	4	1
10	30.11.2005	12	1	-
11	09.05.2006	28	7	2
12	24.12.2006	29	-	-
13	14.10.2007	-	-	-
14	19.08.2008	40	-	-
15	16.12.2009	15	6	-
16	13.04.2011	-	-	-
17	08.03.2012	-	-	-
18	01.09.2012	18	4	-
Итого:		15	9	3
Длительность		3-40	1-22	1-15
11.05.2007		Сейсмический мониторинг был затруднен в связи с дрожанием Ключевского вулкана		
31.05.2010				

уровня сейсмичности СОУС'09 позволяет дать статистически обоснованную оценку текущей сейсмической обстановки на вулкане Безымянный в качественных терминах. Понятие «сейсмический фон» для вулкана Безымянный формализовано на основе количественного анализа имеющихся многолетних сейсмологических данных. У исследователя, готовящего официальное информационное сообщение о состоянии вулкана, отпадает необходимость ориентироваться на собственные интуитивные представления о степени его текущей сейсмической активности.

В прогностических целях вариации уровня сейсмичности сопоставлены с извержениями вулкана Безымянный, которые произошли в 2000-2012 гг. Показано, что в большинстве случаев (15 из 18) извержения 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. Таким образом, уровень сейсмичности по шкале СОУС'09 для вулкана Безымянный может рассматриваться как самостоятельный прогностический параметр. Выполнены оценки его достоверности и надежности. Целью дальнейших исследований является формализация

предвестника и оценка его прогностической эффективности.

Имеющиеся наработки позволяют организовать оценку текущего уровня сейсмичности вулкана Безымянный как в автоматизированном, так и автоматическом режиме.

Авторы благодарят В.А. Салтыкова за консультации в ходе подготовки публикации и А.А. Коновалову за помощь в работе с исходными данными.

Список литературы

- Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др.* Вулкан Безымянный. Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. Москва: Наука, 1991. С. 168-194.
- Богоявленская Г.Е., Гурина О.А.* Вулкан Безымянный: 50 лет активности // Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный) / Отв. ред. Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С.11-17.
- Богоявленская Г.Е., Кирсанов И.Т.* Двадцать пять лет вулканической активности вулкана Безымянного // Вулканология и сейсмология. 1981. № 2. С. 3-13.

- Воропаев П.В., Салтыков В.А.* Вычислительная система оценки уровня сейсмичности // Геология и геофизика Юга России. 2013. № 2. С. 18-25.
- Гурина О.А.* О предвестнике извержений вулканов Камчатки, основанном на данных спутникового мониторинга // Вулканология и сейсмология. 2012. № 3. С. 14-22.
- Гурина О.А., Демянчук Ю.В., Давыдова В.О., Плечов П.Ю.* Извержение вулкана Безымянный 1 сентября 2012 г., его прогноз и продукты // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2013 г. / Отв. ред. Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 30-35.
- Горшков Г.С.* О связи вулканических и сейсмических явлений при извержении вулкана Безымянного (1955-1956 гг.) // Бюл. вулканол. станций. 1961. № 31. С. 32-37.
- Землетрясения России. Ежегодник. Обнинск: ГС РАН, 2009-2014.
- Иванов В.В.* Средне- и краткосрочные прогнозы извержений вулканов на Камчатке (1956-2012 гг.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. Вып. 22. № 2. С. 98-119.
- Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В., Коновалова А.А.* Статистическая оценка вариаций уровня сейсмичности Ключевского вулкана по шкале СОУС'09: ретроспективный анализ и современное состояние // Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» / Отв. ред. А.А. Маловичко. Геленджик, 22-28 сентября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 184-189.
- Мальшев А.И.* Жизнь вулкана. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2000. 262 с.
- Мальшев А.И.* Направленный взрыв вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (вопросы интерпретации) // Вулканология и сейсмология. 1997. № 3. С. 46-53.
- Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53-59.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М., Кугаенко Ю.А., Коновалова А.А.* Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 65-84.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.* Об аномалии сейсмического режима, предварающей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. 2012. № 2. Вып. 20. С. 16-19.
- Сенюков С.Л.* Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013. 152 с.
- Сенюков С.Л., Дроздина С.Я., Кожевникова Т.Ю. и др.* Прогноз извержения вулкана Безымянный 8 марта 2012 г. по сейсмологическим данным // Материалы региональной конференции, «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29 - 30 марта 2012 г. / Отв. ред. Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 144-149.
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дроздина С.Я. и др.* Сейсмичность района вулкана Плоский Толбачик в 2000-2013 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября - 5 октября 2013 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 103-107.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Belousov A., Voight B., Belousova M.* Directed blasts and blast-currents: a comparison of the Bezymianny 1956, Mount St Helens 1980, and Soufriere Hills, Montserrat 1997 eruptions and deposits // Bulletin of Volcanology. 2007. V. 69. № 7. P. 701-740.
- Diefenbach A., Guffanti M., Ewert J.* Chronology and references of volcanic eruptions and selected unrest in the United States, 1980–2008. Open-File Report 2009–1118. U.S. Geological Survey. 2009. 85 p.
- Girina O.A.* Chronology of Bezymianny volcano activity, 1956-2010 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 22-41.
- Phillipson G., Sobradelo R., Gottsmann J.* Global volcanic unrest in the 21st century: An analysis of the first decade // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 264. P. 183-196.
- Ramsey M., Dehn J.* Spaceborne observations of the 2000 Bezymianny, Kamchatka eruption: the integration of high-resolution ASTER data into near real-time monitoring using AVHRR // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2004. V. 135. № 1-2. P. 127-146.
- Thelen W., West M., Senyukov S.* Seismic characterization of the fall 2007 eruptive sequence at Bezymianny Volcano, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010. V. 194. № 4. P. 201-213. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.05.010
- West M.E.* Recent eruptions at Bezymianny volcano – a seismological comparison // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 42-57.

**SEISMICITY LEVEL VARIATIONS ESTIMATED STATISTICALLY USING SESL'09
TECHNIQUE: APPLICATION FOR BEZYMIANNY VOLCANO (KAMCHATKA)**

Yu.A. Kugaenko, P.V. Voropaev

*Kamchatkan Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006; e-mail: ku@emsd.ru*

We use SESL'09 technique for a unified estimation of seismicity level in a given space-time regions. The application of the distribution function of radiated seismic energy permits the formalization of qualitative description of seismicity. We present the results from statistical estimations of seismicity level before the 2000-2012 Bezymianny Volcano eruptions. The state of seismicity was describes by the monogram, constructed according the SESL'09 technique. By processing the Klyuchevskoy volcano group seismic catalog, we estimated variations of seismicity and detected background level. Statistically significant variations of the seismicity level preceded the eruptions were detected and discussed.

Keywords: seismicity level, Bezymianny Volcano, scale SESL'09, eruption precursor.