



УДК 550.34:550.21

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

Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683 006, chikoli@emsd.ru

Вариации уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 2000–2012 гг. (статистическая оценка)

Представлена работа по первому применению методики статистической оценки уровня сейсмической активности СОУС'09 для Ключевского вулкана. Оценки рассчитываются на основе использования функций распределения сейсмической энергии, выделившейся в различных временных окнах. Проанализирована динамика сейсмичности 2000–2012 гг. для двух наиболее сейсмоактивных объёмов среды под Ключевским вулканом: областью близповерхностного магматического очага (глубина до 5 км) и областью промежуточного магматического очага в коромантийном слое (диапазон глубин от 20 до 35 км). Представленные вариации уровня сейсмичности соотнесены с различными эпизодами зафиксированной эруптивной деятельности Ключевского вулкана, в том числе с процессом подготовки извержений.

Введение

Исследованиями предыдущих лет установлены пространственно-временные закономерности сейсмического процесса в земной коре на разных стадиях активности Ключевского вулкана [4–6 и др.]. С 1995 по 2002 гг. в активности Ключевского вулкана отмечалось почти полное затишье, наблюдалась лишь слабая фумарольная деятельность, изредка чередовавшаяся с пепловыми выбросами. С 2003 г. на Ключевском вулкане развивается новая серия вершинных извержений, которая началась с эксплозивного извержения (№ 1, март 2003 г. — февраль 2004 г.), когда вулканическая активность проявлялась, в основном, в форме выбросов пепла из центрального кратера. Далее последовали четыре терминальных эксплозивно-эффузивных извержения (№ 2, январь — апрель 2005 г.; № 3, декабрь 2006 г. — июль 2007 г.; № 4, июнь 2008 г. — февраль 2009 г.; № 5, июль 2009 г. — декабрь 2010 г.). С середины октября 2012 г. по конец января 2013 г. Ключевской вулкан находился в состоянии эксплозивного извержения (№ 6).

Информация о текущем состоянии сейсмичности, связанной с потенциально опасными вулканами, является востребованной структурами, по своему роду деятельности связанными с мониторингом природной среды и оценкой природных опасностей. Как следствие, весьма актуальна разработка и применение новых методов оценки уровня сейсмичности различных сейсмоактивных территорий и природных объектов, в том числе активных вулканов.

Методика оценки уровня сейсмичности

В Камчатском филиале ГС РАН для описания уровня сейсмичности разработана и внедрена шкала,

привязанная к статистической функции распределения сейсмической энергии в качестве параметра, характеризующего уровень сейсмичности заданного пространственного объекта в определённый временной интервал [3] ($F(K) = P(\lg E < K)$, где E — сейсмическая энергия, выделившаяся за определённый временной интервал). Учитывая статистический характер базового параметра, предлагаемая методика получила название Статистическая Оценка Уровня Сейсмичности — СОУС'09. Интервалы между квантилями функции распределения выделившейся сейсмической энергии формируют шкалу, включающую 8 уровней сейсмичности:

- экстремально высокий: $F(0,995) < \lg E$,
- высокий: $F(0,975) < \lg E < F(0,995)$,
- фоновый повышенный: $F(0,85) < \lg E < F(0,975)$,
- фоновый средний: $F(0,15) < \lg E < F(0,85)$,
- фоновый пониженный: $F(0,025) < \lg E < F(0,15)$,
- низкий: $F(0,005) < \lg E < F(0,025)$,
- экстремально низкий: $\lg E < F(0,005)$.

Методика СОУС'09 программно реализована: разработана система вычисления уровня сейсмичности произвольного региона в виде компьютерной программы, исполняемой в семействе операционных систем MS Windows [1].

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 вулканотектонических землетрясений до глубины 40 км.

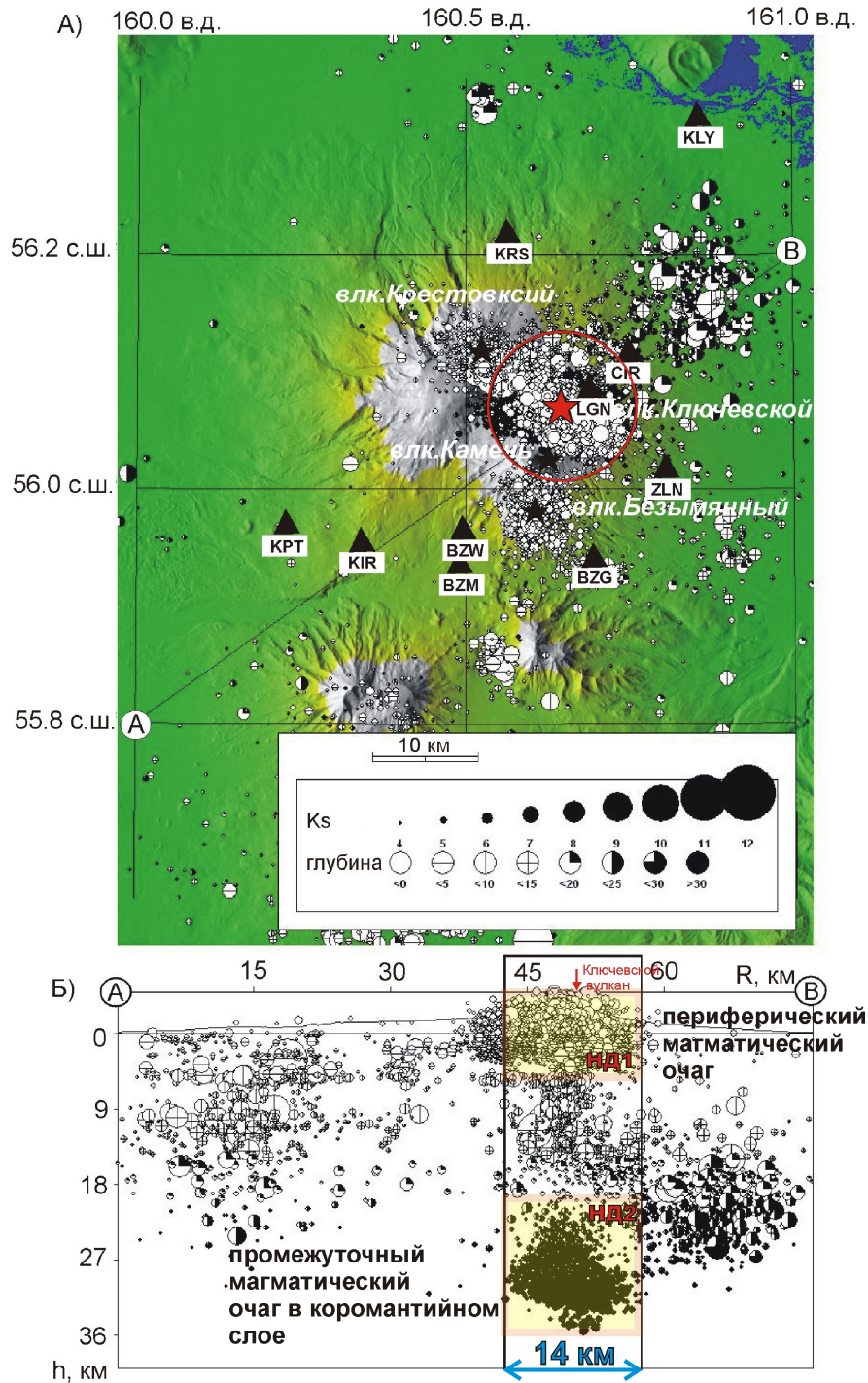


Рис. 1. Сейсмичность Ключевской группы вулканов в 1999–2010 гг. а – карта эпицентров; б – проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии АБ. Выделены пространственные области, соответствующие анализируемым наборам данных НД1 и НД2

При выборе анализируемых сейсмоактивных объёмов учитывались выявленные ранее особенности поведения сейсмичности под Ключевским вулканом и элементы его магматической питающей системы [4–6]. Для построения оценок уровня сейсмичности из каталога были взяты два набора данных в радиусе 7 км от вулкана (рис. 1):

- набор данных 1 (НД1) – область малоглубинного магматического очага (глубина до 5 км, уровень надежной регистрации землетрясений $K_{\min} = 4,0$);
- набор данных 2 (НД2) – область промежуточного магматического очага в коромантийном слое (диапазон глубин от 20 до 35 км, $K_{\min} = 5,0$).

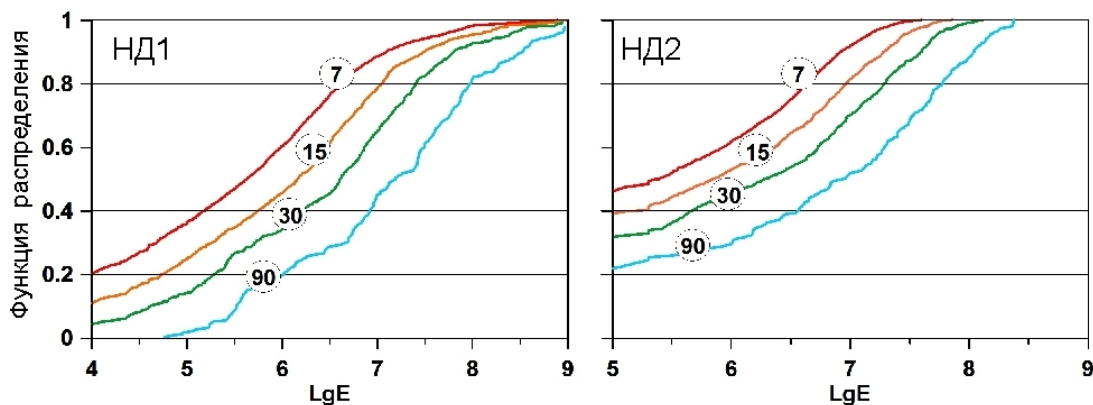


Рис. 2. Функции распределения сейсмической энергии, выделившейся во временных окнах 7, 15, 30 и 90 суток, для наборов данных НД1 и НД2.

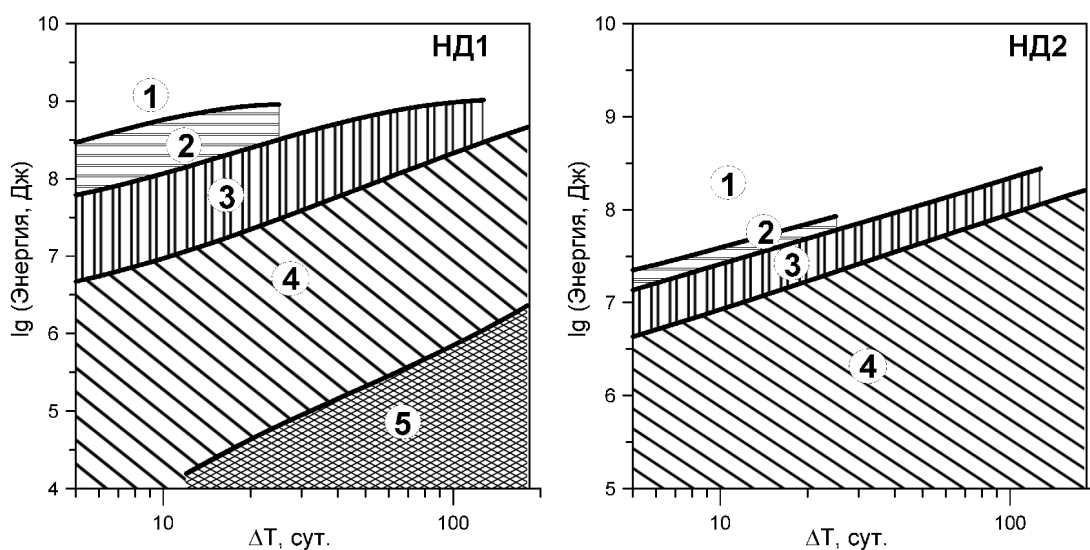


Рис. 3. Номограммы СОУС'09 для наборов данных НД1 и НД2. Различной штриховкой обозначены зоны, соответствующие различным уровням сейсмичности. 1 – экстремально высокий, 2 – высокий, 3 – фоновый повышенный, 4 – фоновый средний, 5 – фоновый пониженный.

Построение функций распределения выделившейся сейсмической энергии

Для утверждения состоятельности разбиения рассматриваемого сейсмоактивного объема под Ключевским вулканом на подобласти НД1 и НД2, были построены функции распределения выделившейся сейсмической энергии, во временных окнах 7, 15, 30 и 90 дней (рис. 2) и проведено их сравнение с помощью критерия согласия Колмогорова-Смирнова [2]. Данный статистический критерий используется для определения того, подчиняются ли два эмпирических распределения единому закону. Критерий Колмогорова-Смирнова о проверке гипотезы об однородности двух эмпирических законов распределения является одним из основных и наиболее широко используемых непараметрических критериев, так как достаточно чувствителен к различиям в исследуемых выборках. Нулевая гипотеза H_0 : «Функции распределения для двух анализируемых выборок совпадают». Проведём сравнение для окон

7, 15 и 30 суток, так как они дают достаточную статистику. Число независимых временных интервалов во временном окне 7 суток составляет 730, 15 суток – 340, 30 суток – 170.

Результаты применения критерия Колмогорова-Смирнова показывают, что для НД1 и НД2 функции распределения выделившейся сейсмической энергии отличается с высоким уровнем значимости (5%). Это является основанием рассматривать сейсмичность выбранных элементов магматической питающей системы Ключевского вулкана независимо друг от друга.

Номограммы распределения сейсмической энергии для разных временных интервалов

Для НД1 и НД2 были построены номограммы СОУС'09 (рис. 3). Данные номограммы позволяют провести анализ сейсмичности каждого сейсмоактивного объема и формализовать понятие «сейсмический фон».

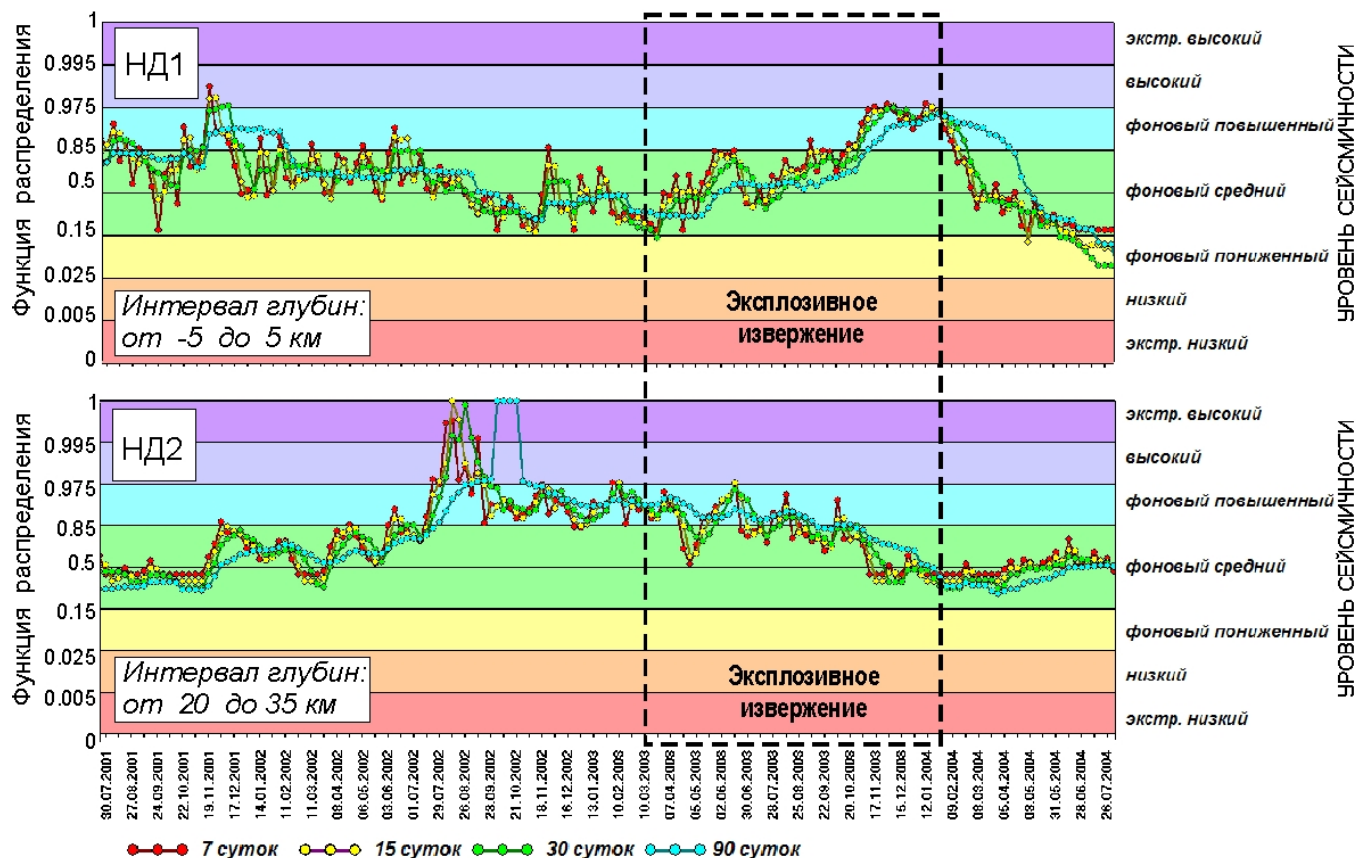


Рис. 4. Вариации уровня сейсмичности Ключевского вулкана с июля 2001 г. по июль 2004 г., включая эксплозивное извержение № 1 (март 2003 г. — февраль 2004 г.)

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

НД1: для окна 7 суток — от 4,0 до 6,8; для окна 15 суток — от 4,4 до 7,2

НД2: для окна 7 суток — от 5,0 до 6,8; для окна 15 суток — от 5,0 до 7,8

Отмеченные особенности и закономерности в вариациях уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 1999–2012 гг.

Анализ временного хода уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 1999–2012 гг. показывает, что новая серия извержений, начавшаяся в 2003 г., предворялась статистически значимым повышением сейсмической активности в НД2 до экстремально высокого уровня (рис. 4).

Вариации уровня сейсмичности НД1 и НД2 развивались в противофазе. Максимумы активности НД1 наблюдались в ходе извержений и соответствуют эксплозивной фазе извержений или фазе заполнения кратера лавой (для № 1). Исключение составляет извержение № 5, не сопровождавшееся выходом сейсмичности за пределы фонового среднего уровня.

Максимумы сейсмичности НД2 предворяют извержения с упреждением до 1 года. Наиболее яркое проявление уровня сейсмичности проявилось перед извер-

жениями № 1 и № 3 с выходом на высокий и экстремально высокий уровни (рис. 4, 5).

Рис. 5 отражает вариации уровня сейсмичности в промежутке времени, захватывающий эксплозивно-эффузивное извержение Ключевского вулкана, происходившее с декабря 2006 г. по июль 2007 г. (№ 3). Наблюдается повышение сейсмической активности НД2 примерно за год до начала извержения с выходом сейсмичности на экстремально высокий уровень. Активность НД1 плавно нарастает и достигает экстремально высокого уровня в эффузивной фазе извержения, когда началось излияние лавовых потоков.

Приведённые примеры (рис. 4, 5) ярко демонстрирует противофазную динамику сейсмической активности в НД1 и НД2 в ходе развития вулканического процесса.

Заключение

Проведён ретроспективный анализ вариаций уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 2000–2012 гг. Продемонстрировано применение методики статистической оценки уровня сейсмической активности СОУС'09 [4] для вулканической области. Оценки сделаны на основе использования функций распределения сейсмической энергии, выделившейся в различных временных окнах, по данным каталога Ключевской группы вулканов, полученного

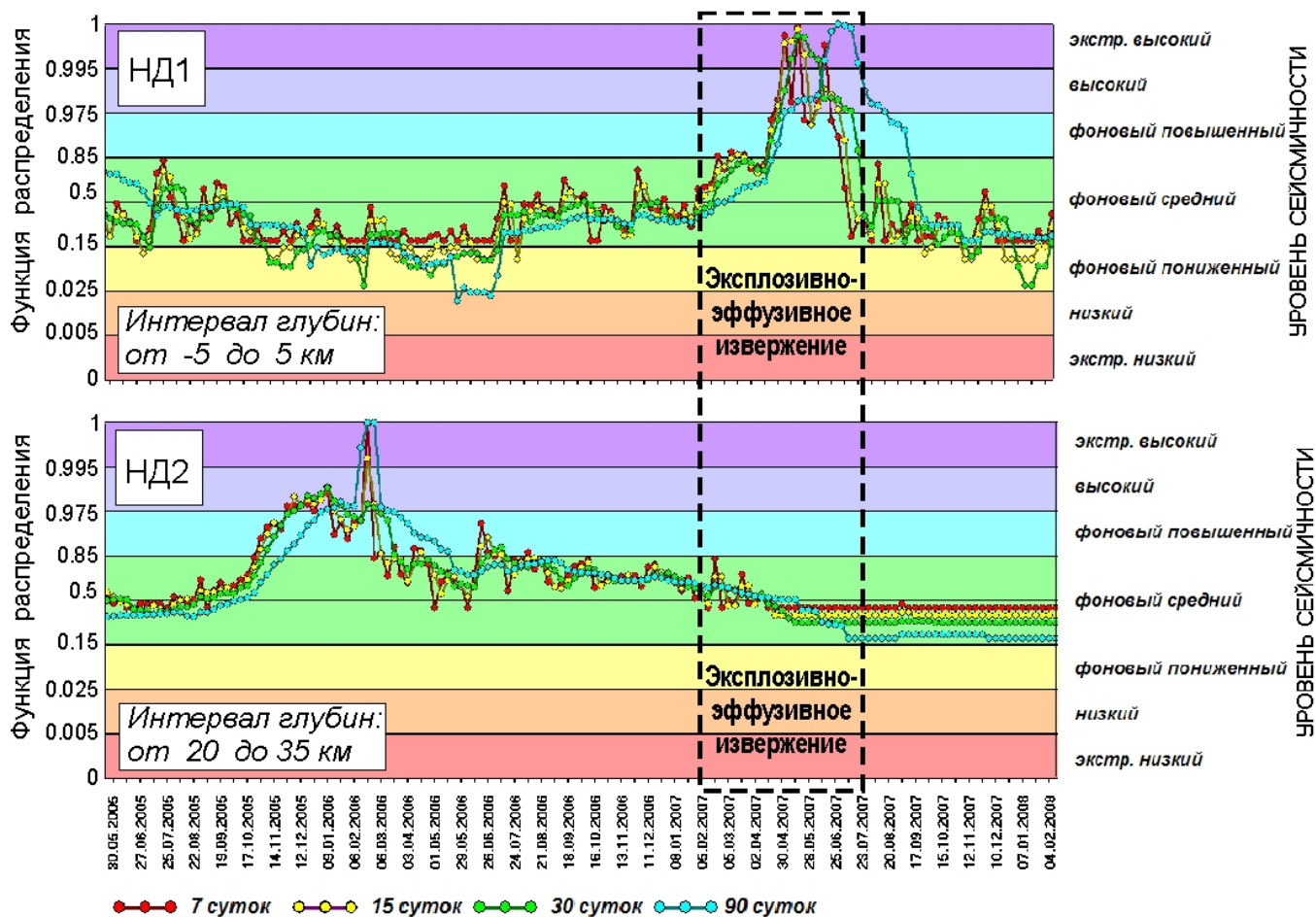


Рис. 5. Вариации уровня сейсмичности Ключевского вулкана с мая 2005 г. по февраль 2008 г., включая эксплозивно-эффузивное извержение № 3 (декабрь 2006 г. — июль 2007 г.)

КФ ГС РАН в 2000–2012 гг. Расчёты выполнены для двух различных участков питающей магматической системы Ключевского вулкана: области промежуточного и области периферического магматического очага. Статистически доказано, что сейсмичность выбранных сейсмоактивных объёмов можно рассматривать и анализировать независимо друг от друга. Построены функции распределения и номограммы уровня сейсмичности для двух указанных элементов питающей магматической системы Ключевского вулкана. Статистически обосновано и формализовано понятие «сейсмический фон». Показано, что представленные вариации уровня сейсмичности 2000–2012 гг. могут быть соотнесены с различными эпизодами зафиксированной эруптивной деятельности Ключевского вулкана, в том числе с процессом подготовки извержений.

Список литературы

1. Воронаев П. В. Программная реализация оценки уровня сейсмичности по методике СОУС'09 / Материалы X региональной молодёжной научной конференции 28–29 ноября 2012 г. — Петропавловск-Камчатский. ИВиС ДВО РАН. 2012. С. 101–113.
2. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
3. Салтыков В. А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
4. Сеньков С. Л., Дроздина С. Я., Нуржидина И. Н., Гарбузова В. Т., Кожевникова Т. Ю. Исследования активности вулкана Ключевской стационарными методами с 1 января 2001 г. по 31 июля 2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 50–59.
5. Федотов С. А., Жаринов Н. А. Об извержениях, деформациях, сейсмичности Ключевского вулкана (Камчатка) в 1986–2005 гг. и механизме его деятельности // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 3–31.
6. Федотов С. А., Жаринов Н. А., Гонтовая Л. И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об её извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.