

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ СЕЙСМИЧНОСТИ КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА ПО ШКАЛЕ СОУС'09 (2000-2012 ГГ.)

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

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, chicoli@emsd.ru,
salt@emsd.ru, ku@emsd.ru

Введение

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 методов оценки уровня сейсмичности различных сейсмоактивных территорий и природных объектов.

Ключевской вулкан – гигантский базальтовый стратовулкан центрального типа, осложненный многочисленными шлаковыми конусами. Это один из наиболее активных и продуктивных вулканов мира и самый высокий действующий вулкан Евразии. Высота его вершины, меняющаяся в ходе извержений, колеблется около 4750 м, а возраст оценивается всего лишь в 7000 лет[8].

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 (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, сентябрь 2009 – декабрь 2010 г.). С середины октября 2012 г. по конец января 2013 г. Ключевской вулкан находился в состоянии эксплозивного извержения (№ 6) [5-7]. Очередное извержение началось 15 августа 2013 г. (№ 7).

Методика оценки уровня сейсмичности

В Камчатском филиале ГС РАН для описания уровня сейсмичности разработана методика, получившая название Статистическая Оценка Уровня Сейсмичности – “СОУС'09” [3, 4].

В основе шкалы методики СОУС'09 лежит статистическая функция распределения логарифма выделившейся сейсмической энергии в качестве параметра, характеризующего уровень сейсмичности заданного пространственного объекта в определенный временной интервал. Такая шкала позволяет формализовать такие понятия как “сейсмический фон” и “аномалии”, определяя их в границах величины базового параметра (квантилей функции распределения F) логарифма выделившейся сейсмической энергии $\lg E$ для заданного временного окна ΔT .

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 (№ государственной регистрации 2012615123) [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 вулкано-тектонических землетрясений до глубины 40 км.

При выборе анализируемых сейсмоактивных объемов учитывались выявленные ранее особенности поведения сейсмичности под Ключевским вулканом и элементы его магматической питающей системы. Для построения оценок уровня сейсмичности из каталога Ключевской группы вулканов были взяты два набора данных: 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, $K_{\min}=5.0$) под Ключевским вулканом.

Построение и анализ функций распределения выделившейся сейсмической энергии

Для каждой подобласти НД1 и НД2 были построены функции распределения выделившейся сейсмической энергии во временных окнах 7, 15, 30 и 90 суток. Отмечено, что графики полученных наборов функций распределения для НД1 и НД2 отличаются по своему характеру. С помощью критерия согласия Колмогорова-Смирнова [2] проведено сравнение полученных функций распределения сейсмоактивных объемов НД1 и НД2 построенных для временных окон 7, 15, 30 суток, так как они дают достаточную статистику. В результате с высоким уровнем значимости (5%) было установлено их различие, что дает основание рассматривать сейсмичность выбранных элементов магматической питающей системы Ключевского вулкана независимо друг от друга.

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

Фоновый уровень сейсмичности находится в границах IgE (Дж) НД1: для окна 7 суток – от 4.0 до 7.9, для окна 15 суток – от 4.0 до 8.3; НД2: для окна 7 суток – от 5.0 до 7.2, для окна 15 суток – от 5.0 до 7.5. Фоновый средний уровень сейсмичности находится в границах IgE (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 7.0.

Отмеченные особенности и закономерности в вариациях уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 1999-2013 гг.

Анализ временного хода уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 1999-2013 гг. показывает, что новая серия извержений, начавшаяся в 2003 г., предварялась статистически значимым повышением сейсмической активности в НД2 до экстремально высокого уровня (рис. 1-6). 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 предваряют извержения с упреждением до 1 года. Наиболее ярко рост уровня сейсмичности проявился перед извержениями №1, №3 и №7 с выходом на высокий и экстремально высокий уровни (рис. 1, 3, 6).

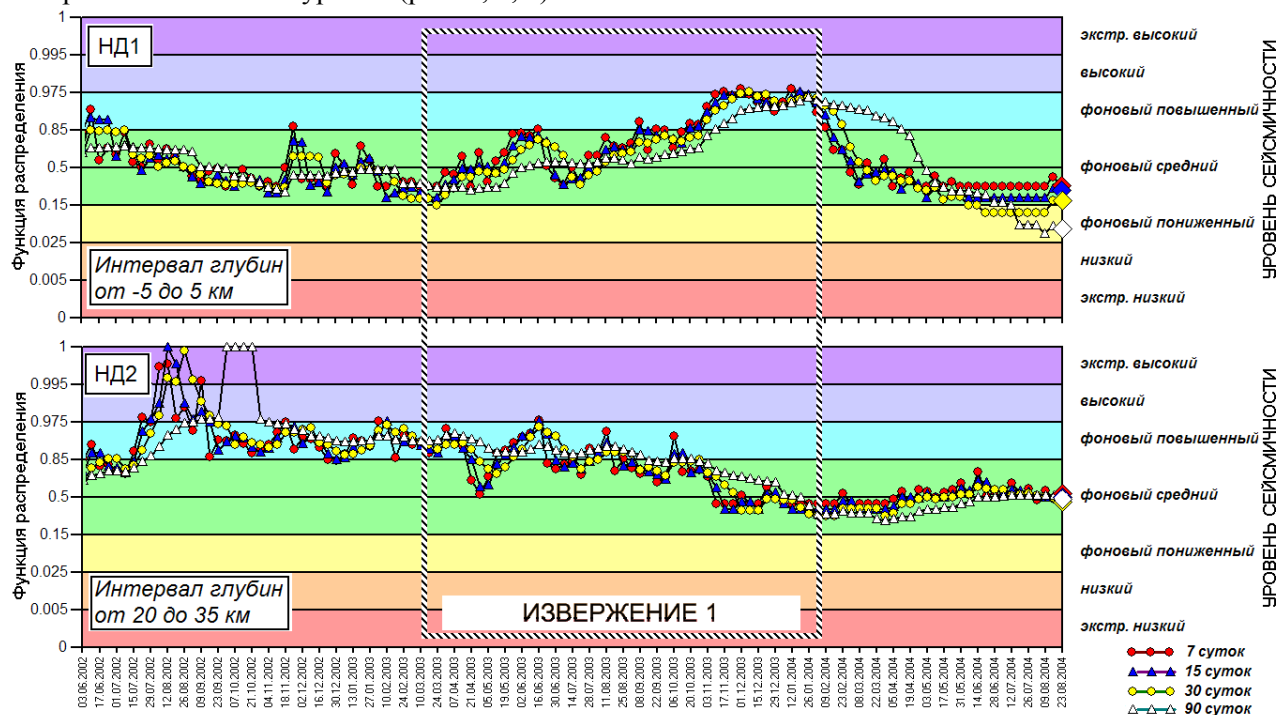


Рис. 1. Временной ход уровня сейсмичности в сейсмоактивных объемах НД1 и НД2 под Ключевским вулканом, включающий в себя период извержения № 1, март 2003 г. - февраль 2004 г. Наблюдается противофазное движение уровня сейсмичности в НД1 и НД2. Извержение №1 предваряется выходом уровня сейсмичности в НД2 на экстремально высокий уровень в окнах 7, 15, 30 суток за 7 месяцев, в окне 90 суток за 6 месяцев до его начала.

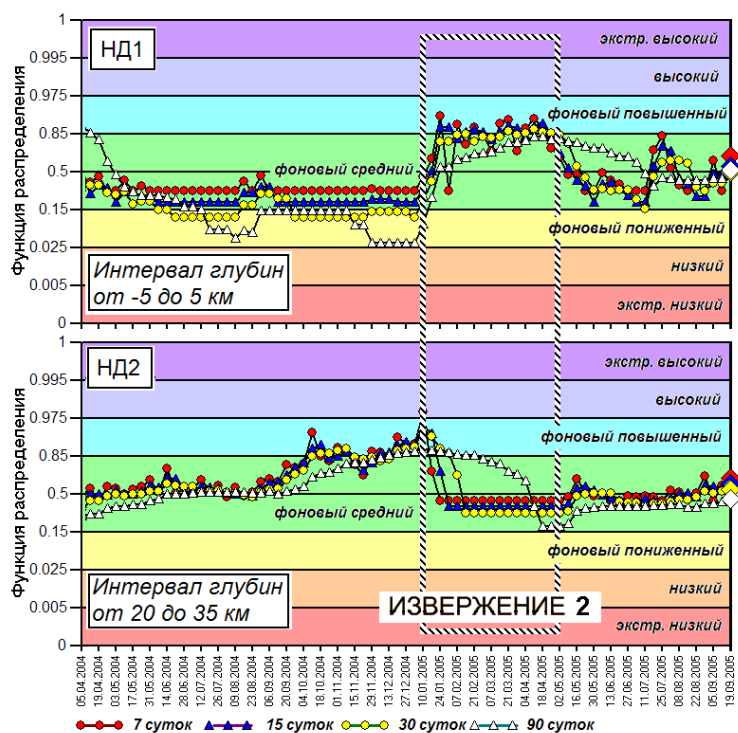


Рис. 2. Временной ход уровня сейсмичности в сейсмоактивных объемах НД1 и НД2 под Ключевским вулканом, включающий в себя период извержения № 2, январь – апрель 2005 г. Наблюдается противофазное движение уровня сейсмичности в НД1 и НД2. Извержение №2 предваряется плавным ростом сейсмичности во всех временных окнах НД2 с выходом на фоновый повышенный уровень с последующим падением в процессе извержения. Сейсмичность в НД1 скачкообразно растет сразу после начала извержения, достигая фоновый повышенного уровня с последующим выходом на фоновый средний после окончания активной деятельности вулкана.

Во время извержения №6 и последующий период (февраль-июнь 2013 г.) отмечено синхронное изменение уровня сейсмичности в трех сейсмоактивных объемах: НД1,

промежуточная зона 5-20 км, НД2. Подобная синхронизация за период наблюдения 1999-2012 гг. не происходила.

Заключение

Проведен ретроспективный анализ вариаций уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 2000-2012 гг. Продемонстрировано применение методики статистической оценки уровня сейсмической активности СОУС'09 [3, 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 КФ ГС РАН в 2000-2012 гг.

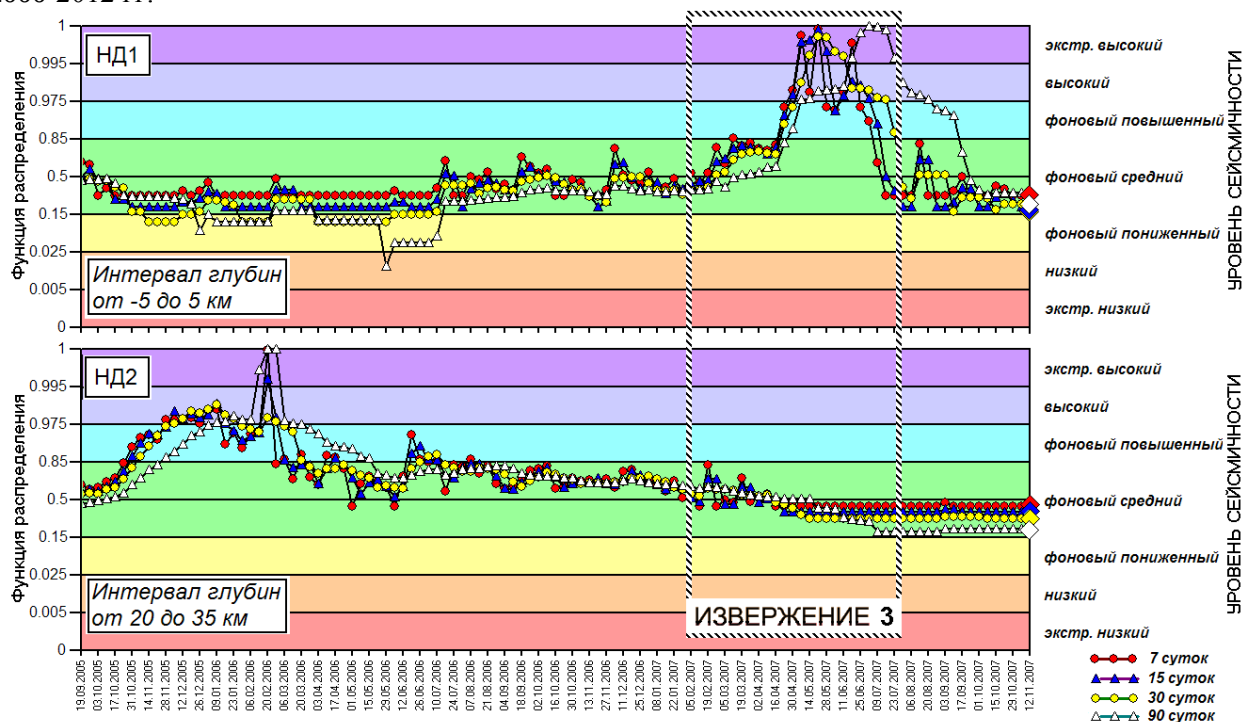


Рис. 3. Временной ход уровня сейсмичности в сейсмоактивных объемах НД1 и НД2 под Ключевским вулканом, включающий в себя период извержения № 3, декабрь 2006 г. – июль 2007 г. Извержение №3 предваряется выходом уровня сейсмичности в НД2 на экстремально высокий уровень во всех временных окнах за год до его начала. После достижения максимума уровень сейсмичности НД2 плавно возвращается на фоновый средний уровень и принимает минимальные значения к моменту окончания извержения №3. Сейсмичность НД1 выходит на экстремально высокий уровень к середине извержения №3.

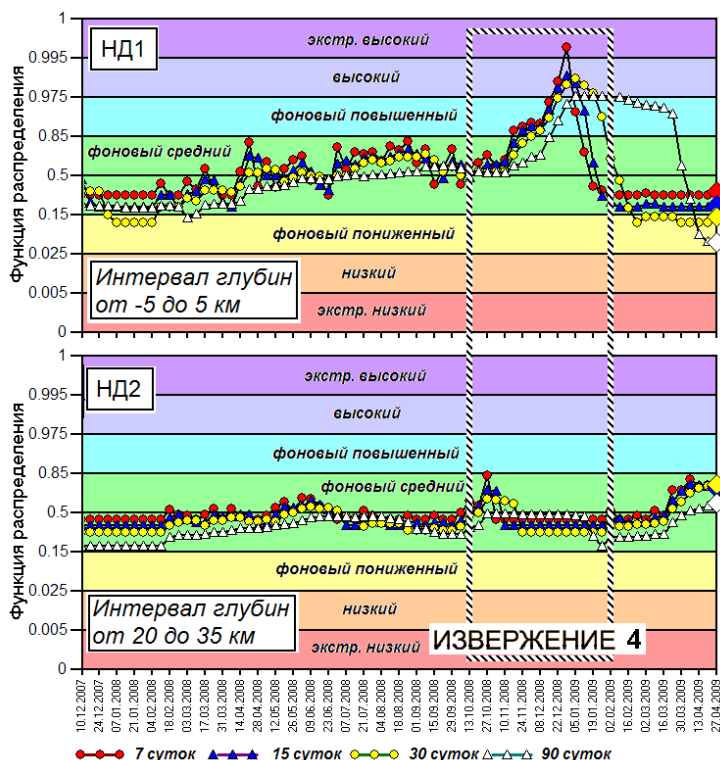


Рис. 4. Временной ход уровня сейсмичности в сейсмоактивных объемах НД1 и НД2 под Ключевским вулканом, включающий в себя период извержения № 4, июнь 2008 г. – февраль 2009 г. Извержение №4 не предваряется изменениями уровня сейсмичности НД2. Уровень сейсмичности НД1 перед извержением плавно повышается и достигает экстремально высокого уровня во временном окне 7 суток в процессе извержения. После достижения максимума происходит понижение уровня сейсмичности НД1 во всех временных окнах с выходом на фоновый средний (окна 7, 15 суток) и фоновый пониженный (окна 30, 90 суток).

Проведен анализ для двух различных участков питающей магматической системы Ключевского вулкана: области промежуточного и области периферического магматического очага. Статистически доказано, что сейсмичность выбранных

сейсмоактивных объемов можно рассматривать и анализировать независимо друг от друга.

Построены функции распределения 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 теми или иными эпизодами зафиксированной эруптивной деятельности Ключевского вулкана, в том числе с процессом подготовки извержений.

Представленная работа может рассматриваться как первый шаг к использованию методики для оценки сейсмичности, связанной с вулканами.

С 2013 г. оценки уровня сейсмичности Ключевского вулкана еженедельно передаются в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений.

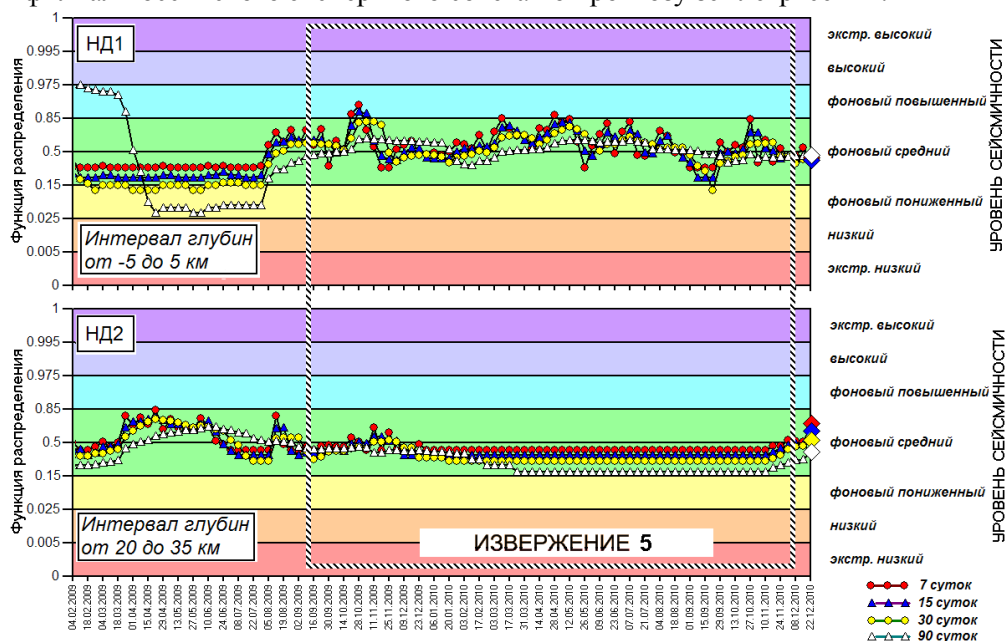


Рис. 5. Временной ход уровня сейсмичности в сейсмоактивных объемах НД1 и НД2 под Ключевским вулканом, включающий в себя период извержения № 5, сентябрь 2009 – декабрь 2010 г. Извержение №5 не сопровождается сейсмической активностью в НД2. Сейсмичность в НД1 во временных окнах 7 и 15 суток выходит на фоновый повышенный уровень в начале извержения с последующим возвратом на фоновый средний уровень.

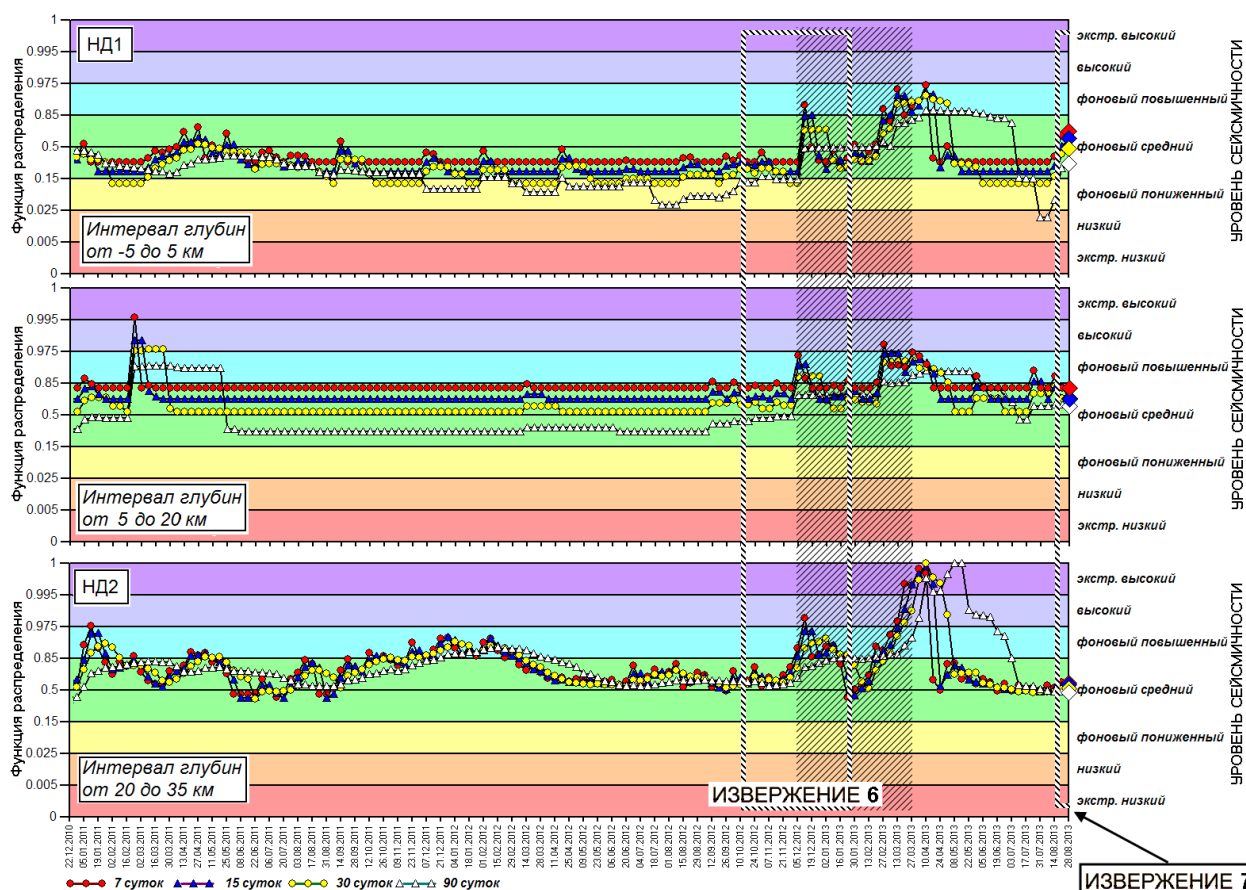


Рис. 6. Временной ход уровня сейсмичности в сейсмоактивных объемах НД1, НД2 и промежуточной зоне ($h=5-20$ км) под Ключевским вулканом, включающий в себя период извержения № 6, с середины октября 2012 г. по конец января 2013 г. и начало извержения №7 с 15.08.2013. Сплошной заштрихованной зоной обозначен период, когда сейсмический мониторинг Ключевского вулкана был затруднен в связи с сильным вулканическим дрожанием в районе Толбачинского извержения. Во время извержения № 6 во всех рассматриваемых сейсмоактивных объемах наблюдается синхронное повышение сейсмичности с выходом на фоновый повышенный (НД1, зона 5-20 км) и высокий (НД2) уровень. Такое поведение сейсмичности является уникальным для периода наблюдения 2000-2012 гг. Извержение №7 предвлялось синхронным повышением уровня сейсмичности во всех рассматриваемых сейсмоактивных объемах (НД1, зона 5-20 км, НД2) с последующим возвратом к исходным значениям. При этом в НД2 наблюдался выход уровня сейсмичности на экстремально высокий уровень во всех временных окнах за 4 месяца до начала извержения; в промежуточной зоне 5-20 км сейсмичность в окне 7 суток вышла на высокий уровень за 5 месяцев до начала извержения, также в этой зоне наблюдался выход на фоновый повышенный уровень за месяц до начала извержения; в НД1 во всех временных окнах произошел выход на фоновый повышенный уровень за 5 месяцев до начала извержения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воропаев П.В. Программная реализация оценки уровня сейсмичности по методике СОУС'09 / Материалы X региональной молодежной 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., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Коновалова А. А. Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. - 2013. № 1. С. 65-84.
4. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. - 2011. № 2. С.53-59.
5. Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т. Ю. Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами с 01.01.2001 г. по 31.07.2005 г. // Вулканология и сейсмология. – 2009. № 3. С. 50-59.
6. 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.
7. Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. – 2010. № 1. С. 3-35.
8. Хренов А.П., Двигало В.Н., Кирсанов И.Т., Федотов С.А., Горельчик В.И., Жаринов Н.А. Вулкан Ключевской // Действующие вулканы Камчатки, под ред. Федотова С.А., Т.1, М.: Наука, С. 106-145.