

ПРЕДВЕСТНИКОВАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВИЗАЦИЯ ПЕРЕД ТРЕЩИННЫМ ТОЛБАЧИНСКИМ ИЗВЕРЖЕНИЕМ 2012-2013 гг.

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

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

Активность зоны шлаковых конусов Толбачинского Дола тесно связана с процессами, происходящими на вулкане Плоский Толбачик. Достоверно известно несколько исторических извержений этой зоны ареального вулканизма: описанное С.П. Крашенинниковым извержение 1740 г. [4], прорыв 1941 г. [4, 7], Большое трещинное Толбачинское извержение 1975-1976 гг. (БТТИ) [1, 11, 12] и Трещинное Толбачинское извержение 2012-2013 гг. им.50-летия Института вулканологии (ТТИ-50) [10].

Об извержении 1740 г. нам известно немного. По словам С.П. Крашенинникова, «Толбачинская гора... загорелась ... на гребне, которым с другою горою (Острым Толбачиком?) соединяется» (цитируется по [4]). По [2, 6] извержение 1740 г. происходило из нескольких центров, к этому времени относятся прорыв Звезда в Южной части Толбачинского Дола и конус Красный, близкий к подножию вулкана Плоский Толбачик. Крашенинниковым упоминается и «... легкое землетрясение, которое было и прежде того и после» (цитируется по [4]).

Следующее пароксизмальное извержение произошло через 200 лет, 7-14 мая 1941 г. на склоне вулкана Плоский Толбачик на заключительном этапе вершинного извержения 1939-1941 гг., которое сводилось в основном к усиленному возгону клубов газа через колонну жидкой светящейся лавы, открывавшейся на дне кратера, и эпизодическим выбросам пепла, песка и волос Пеле [7]. В литературе не приводятся никакие данные о сейсмичности, возможно сопровождавшей эти события. Б.И. Пийп относит извержение 1941 г. к побочным прорывам вулкана Плоский Толбачик [7], однако продукты этого извержения по составу близки к базальтам Северного прорыва (СП) БТТИ, которое произошло в центральной части ареальной зоны [1].

БТТИ 1975-1976 гг. предвлялось не только мощной сейсмической подготовкой, но и активизацией кратера вулкана Плоский Толбачик. Активизация кратера началась примерно за неделю до БТТИ интенсивным газоотделением с выбросами пепла и твердых продуктов (обломков шлака, кристаллолапиллей плагиоклаза, вулканического песка и пр.) [1]. В ходе извержения СП весь Плоский Толбачик был охвачен сейсмичностью, а образование на его вершине новой провальной кальдеры рассматривается как одна из важнейших особенностей БТТИ [5, 12].

Масштабы БТТИ казались столь велики, что был сделан вывод о предстоящем длительном периоде покоя этой вулканической зоны – несколько сотен лет [1, 5]. Предполагалось, что изначально должна возобновиться вулканическая деятельность в вершинной кальдере Плоского Толбачика, которая со временем заполнится жидкой базальтовой лавой.

Однако события развивались иначе. В 27 ноября 2013 г. началось грандиозное лавовое базальтовое извержение – ТТИ-50. Эруптивные центры расположились вдоль проявившейся на поверхности линейной трещины длиной 5 км, которая захватила и склон вулкана Плоский Толбачик, и северную часть Толбачинского Дола [10].

Вопреки часто звучащим утверждениям, что ТТИ-50 началось совершенно неожиданно и не имело предвестников, необходимо отметить, что выявлена ярко выраженная сейсмическая подготовка извержения, проявившаяся в сейсмическом пробуждении недр под вулканом Плоский Толбачик [9]. При этом кратер Плоского Толбачика остался безучастен к ТТИ-50: как при подготовке извержения, так и в ходе него не наблюдалось ни появления лавы в кальдере, ни термальной аномалии.

В работе [9] путем анализа потока землетрясений и выделившейся при этом энергии нами было показано, что ТТИ-50 предвлялось сейсмической активизацией низкого энергетического уровня (преимущественно $K_s = 4-6$). Длительность активизации составляет более 4 месяцев. Последние три недели перед трещинным прорывом сейсмичность анализируемого сейсмоактивного объема находилась на экстремально высоком уровне по шкале СОУС-09 [8], что соответствует многократному увеличению числа землетрясений и выделившейся сейсмической энергии.

В настоящее время имеющаяся система сейсмического мониторинга в районе Ключевской группы вулканов позволяет оперативно контролировать происходящие здесь сейсмические процессы достаточно низкого энергетического уровня: так уровень представительной регистрации для Толбачинской вулканической зоны для каталога 1999-2012 гг. составляет $K_{min} = 4.5$ [13]. Проблема заключается в организации работы по оперативной оценке текущей ситуации на том или ином действующем вулкане с помощью обоснованных информативных параметров.

Ниже представлена имитация мониторинга сейсмичности вулкана Плоский Толбачик в режиме реального времени в последние месяцы перед ТТИ-50 с использованием методики статистической оценки уровня сейсмичности заданной пространственно-временной области СОУС'09 [8] и простейших параметров сейсмического режима (рис. 1, 2).

Шкала СОУС'09 привязана к статистической функции распределения выделившейся сейсмической энергии (ФР) как к параметру, характеризующему уровень сейсмичности заданного пространственного объекта в определенный временной интервал. Этот подход вносит терминологическую определенность в описание состояния сейсмичности отдельных территорий и формализует понятие «сейсмический фон». Согласно шкале СОУС'09, 95% времени мониторинга сейсмичность находится на обычном, нормальном, фоновом уровне, 4% - на высоком либо низком уровне, и лишь 1% времени отводится на аномалию как отклонение от нормы (экстремально высокий или экстремально низкий уровень сейсмичности). При имитации применения методики в реальном времени ФР рассчитывается на заданную дату окончания каталога.

Для повышения оперативности построения ФР, расчетов и определения уровня сейсмичности разработана специализированная программа [3]. Возможность ее использования позволит ускорить внедрение методики СОУС'09 для широкого круга сейсмоактивных областей, в том числе активных вулканов.

В работе [9] подробно представлена ФР для области радиусом 10 км от вершины вулкана Плоский Толбачик до глубины 30 км (каталог Ключевской группы вулканов). Подавляющее большинство землетрясений (более 80%) зафиксированы здесь на глубине до 5 км. Низкий и экстремально низкий уровни сейсмичности для рассматриваемого массива данных статистически не определены. Фоновый пониженный уровень имеет смысл рассматривать во временных окнах более 100 суток, а фоновый средний – более 10 суток. Временные окна менее 5 суток для данного объекта по используемой методике не могут быть проанализированы. Эти ограничения статистических оценок связаны с тем, что имеются продолжительные временные интервалы, в которых в рассматриваемой области не были зарегистрированы землетрясения представительного класса.

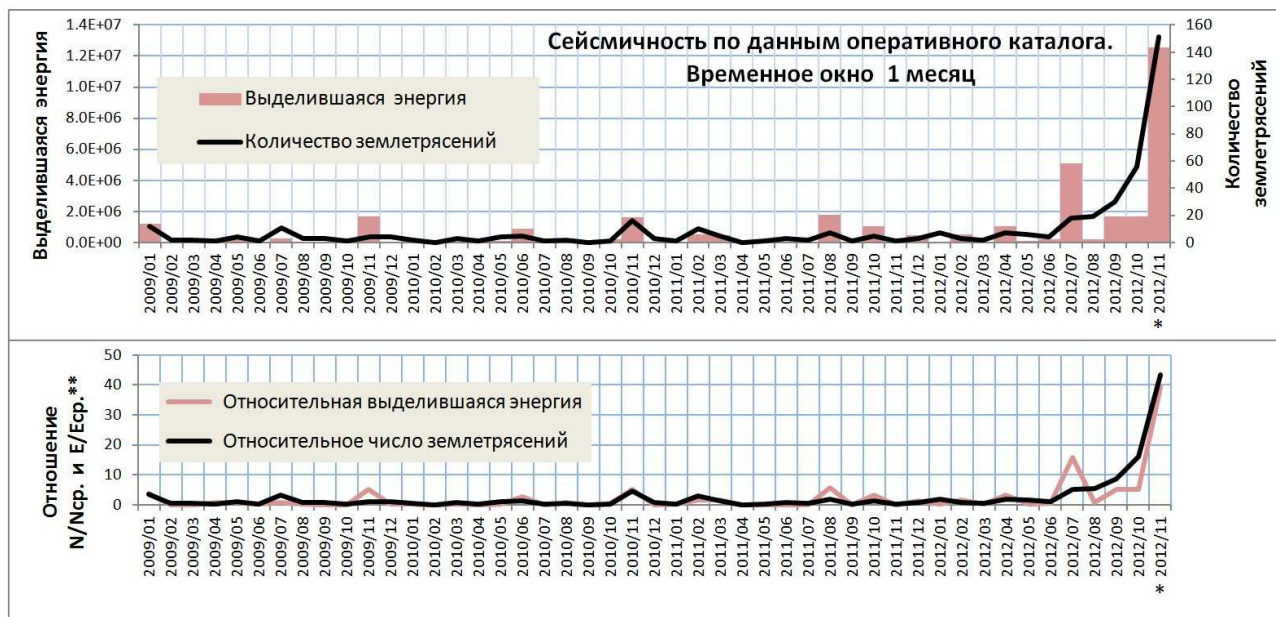


Рис. 1. Временной ход числа землетрясений и выделившейся сейсмической энергии по каталогу Ключевской группы вулканов в течение ~ 4 лет перед ТТИ-50. Абсолютные и относительные величины. Осреднение во временном окне 1 месяц. * - данные за ноябрь 2012 г. взяты по 25.11.2012 г. включительно, чтобы не рассматривать усиление сейсмичности в последние сутки перед извержением. ** - среднемесячное количество землетрясений $N_{ср.}$ и среднемесячная выделившаяся сейсмическая энергия $E_{ср.}$ вычислены по данным за 2009-2011 гг.

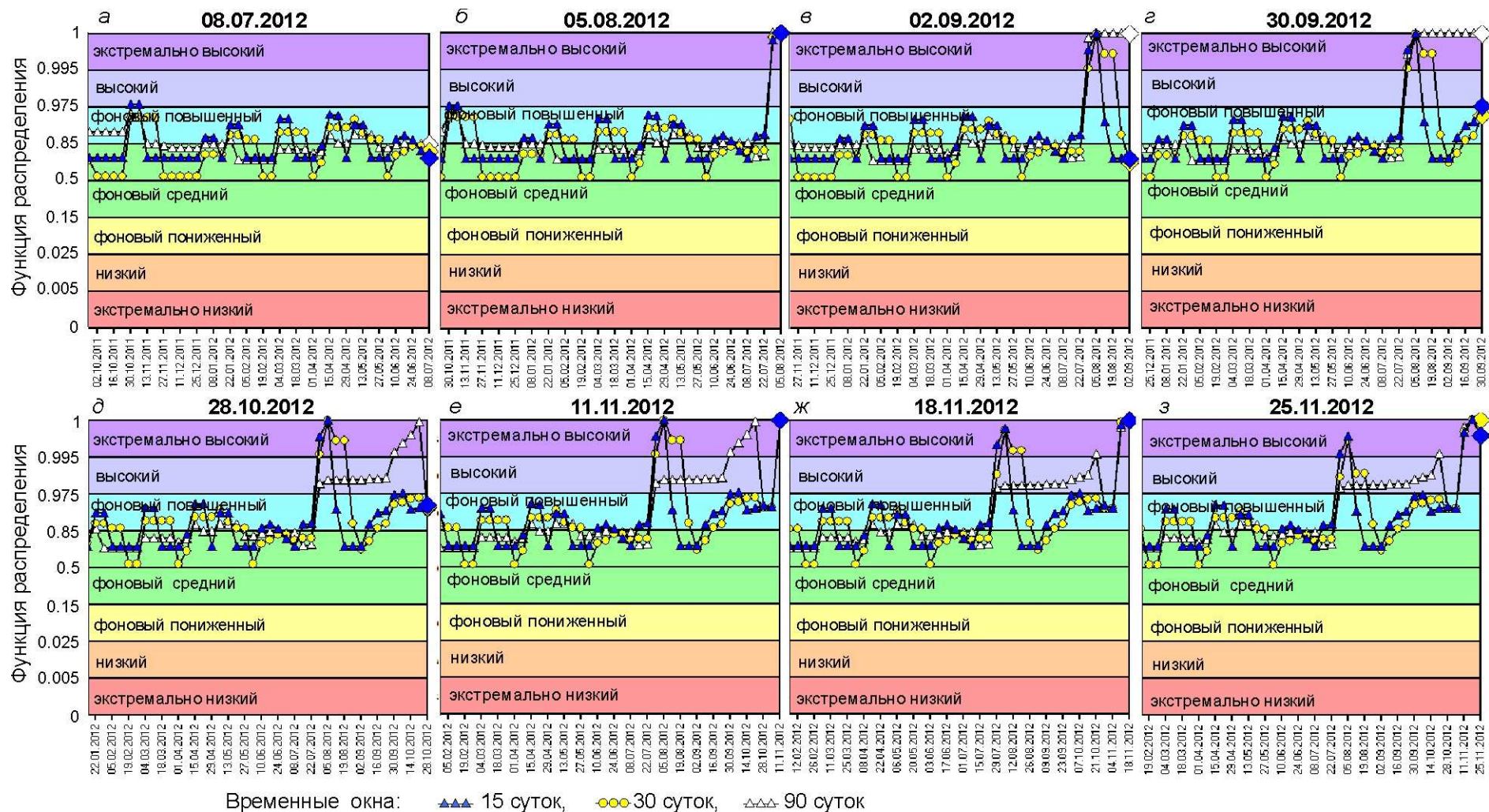


Рис.2. Временной ход уровня сейсмичности по шкале СОУС'09 [8] в различных временных окнах по каталогу Ключевской группы вулканов. Имитация мониторинга в режиме реального времени в течение последних месяцев перед ТТИ-50. Исследуемый объем: область радиусом 10 км от вершины вулкана Плоский Толбачик до глубины 30 км. Представительный класс $K_{min} = 4.5$. Для каждого графика приведена дата окончания каталога. Пояснения приведены в тексте.

Выполняя ретроспективный анализ сейсмичности перед ТТИ-50, мы ограничили каталог 25 ноября 2012 г.

В последние сутки перед извержением, 26-27 ноября 2012 г., зафиксировано резкое усиление сейсмичности, и начало извержения было идентифицировано по сейсмическим данным (05:15 UTC 27.11.2012 г.). Этот предшествовавший извержению короткий временной интервал в данной работе не рассматривается.

Рассмотрим уровень сейсмичности и другие параметры сейсмического режима под вулканом Плоский Толбачик по рис. 1, 2 и [9].

Конец июня 2012 г. Уровень сейсмичности на среднем фоновом уровне (рис.2-а).

Конец июля 2012 г. Уровень сейсмичности – *экстремально высокий* во всех временных окнах (рис.2-б). Выделившаяся в июле 2012 г. сейсмическая энергия превышает среднемесячную (за 2009-2011 гг.) в 16 раз, а зарегистрированное число землетрясений возросло в 5 раз.

Конец августа 2012 г. Уровень сейсмичности на *фоновом среднем* уровне для окон 15 и 30 суток и на *экстремально высоком* в окне 90 суток (рис.2-в). В августе число зарегистрированных событий продолжает расти, $N/N_{\text{ср.}} \sim 5.5$ (где – N – число землетрясений в анализируемой области за текущий месяц, $N_{\text{ср.}}$ – среднемесячное число землетрясений в 2009-2011 гг.).

Конец сентября 2012 г. Уровень сейсмичности *высокий* в окне 15 суток, *фоновый повышенный* в окне 30 суток и *экстремально высокий* в окне 90 суток (рис.2-г). В сентябре $N/N_{\text{ср.}} \sim 9$, $E/E_{\text{ср.}} \sim 5$ (где – E – сейсмическая энергия, выделившаяся в анализируемой области за текущий месяц, $E_{\text{ср.}}$ – среднемесячная сейсмическая энергия в 2009-2011 гг.). Растет скорость сейсмического потока [9].

Конец октября 2012 г. Уровень сейсмичности – *фоновый повышенный* во всех временных окнах (рис.2-д). В сентябре $N/N_{\text{ср.}} \sim 16$, $E/E_{\text{ср.}} \sim 5$. Продолжается рост скорости сейсмического потока [9].

11.11.2012 г. Уровень сейсмичности на *экстремально высоком* уровне во всех временных окнах (рис.2-е).

18.11.2012 г. Уровень сейсмичности на *экстремально высоком* уровне во всех временных окнах (рис.2-ж).

25.11.2012 г. Уровень сейсмичности на *экстремально высоком* уровне во всех временных окнах (рис.2-з). С 1 по 25 ноября 2012 г. выделившаяся сейсмическая энергия превысила среднемесячную (за 2009-2011 гг.) ~ в 40 раз, а зарегистрированное число землетрясений превысило свое среднемесячное (за 2009-2011 гг.) значение ~в 44 раза.

27.11.2012 г. началось ТТИ-50. Как было продемонстрировано выше и в работе [9], его предвестником была сейсмическая подготовка. По нашему мнению, сейсмическую аномалию (активизацию) в районе вулкана Плоский Толбачик можно разделить на несколько этапов:

- июль-октябрь 2012 г., сейсмическая активизация низкого энергетического уровня ($K_s = 4 \div 6$) длительностью около 4 месяцев, которая характеризуется возмущениями уровня сейсмичности до *высокого* – *экстремально высокого* уровня, значительным увеличением числа зарегистрированных землетрясений, ростом их выделившейся энергии и ускорением сейсмического потока;
- ноябрь 2012 г., устойчивый выход уровня сейсмичности на *экстремально высокий* уровень при сохранении преобладающих классов землетрясений в диапазоне $K_s = 4 \div 6$
- последние ~ 15 часов перед началом извержения, когда в большом количестве стали регистрироваться более сильные землетрясения ($K_s = 7 \div 9$).

Первый из этапов аномалии является среднесрочным предвестником извержения. Второй и третий этапы – его краткосрочные предвестники.

Заключение

После длившегося 200 лет периода покоя в последние несколько десятков лет (1941-2013 гг.) в Толбачинской вулканической зоне произошло три пароксизмальных трещинных извержения, каждое из которых сопровождалось сейсмическими и магматическими событиями на вулкане

Плоский Толбачик. Причем в рассмотренный промежуток времени эруптивная активность вулкана Плоский Толбачик от извержения к извержению проявлялась все более слабо.

ТТИ-50 2012-2013 гг. предвлялось предвестниковой сейсмической подготовкой, проявившейся в параметрах сейсмичности низкого энергетического уровня. Среднесрочным предвестником длительностью около 4 месяцев (июль-октябрь 2012 г.) явилась малоглубинная (до 5 км) сейсмическая активизация $K_s = 4\div 6$ под постройкой вулкана Плоский Толбачик. Краткосрочными предвестниками можно считать переход сейсмичности в этом объеме на экстремально высокий уровень примерно за три недели до извержения, в ноябре 2012 г., и рой землетрясений с $K_s = 7\div 9$, зарегистрировавшийся 26-27.11.2012 г. в течение последних 15 часов перед извержением. Не смотря на то, что в течение нескольких месяцев сейсмической активизацией был охвачен весь вулкан Плоский Толбачик, поверхностных признаков проявления магматизма в вершинной кальдере этого вулкана не наблюдалось.

На примере сейсмической активизации перед ТТИ-50 продемонстрирована возможность мониторинга развития подобного сейсмического процесса в режиме реального времени на основе функции распределения выделившейся сейсмической энергии и анализа потока землетрясений. По мнению авторов, представленный материал подтверждает возможность идентификации аномалии при работе в режиме реального времени. Рассмотренный подход целесообразно использовать для оперативной оценки сейсмичности на активных вулканах, охваченных системой сейсмического мониторинга.

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение / Отв.ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 683 с.
2. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Флеров Г.Б. и др. Голоценовый вулканизм Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов // Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. Гл. V. С. 177-222.
3. 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.
4. Двигало В.Н., Федотов С.А., Чирков А.М. Вулкан Плоский Толбачик // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т.2. М.: Наука, 1991. С. 200-213.
5. Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т.2. М.: Наука, 1991. 302 с.
6. Новейший и современный вулканизм на территории России. М.: Наука, 2005. 604 с.
7. Пийп Б.И. Новый побочный кратер вулкана Толбачик // Бюллетень вулканологической станции на Камчатке. 1946. № 13. С. 10-21.
8. Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. №2. С. 53-59.
9. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В. Об аномалии сейсмического режима, предвлявшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. 2012. № 2. Вып. 20. С. 16-19.
10. Самойленко С.Б., Мельников Д.В., Магуськин М.А., Овсянников А.А. Начало нового трещинного Толбачинского извержения в 2012 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 20-22.
11. Федотов С.А., Балеста С.Т., Двигало В.Н. и др. Новые Толбачинские вулканы // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т.2. М.: Наука, 1991. С. 214-274.
12. Федотов С.А., Уткин И.С., Уткина Л.И. Периферический магматический очаг базальтового вулкана Плоский Толбачик, Камчатка: деятельность, положение и глубина, размеры и их изменение по данным о расходе магм // Вулканология и сейсмология. 2011. № 6. С. 3-20.
13. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18-40.