

**РЕЗУЛЬТАТЫ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ
СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В РАЙОНЕ
ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ 2012-2013 гг.**

Ю. А. Кугаенко¹, В. А. Салтыков¹, И. Ф. Абкадыров², П. В. Воронаев¹, А.А. Коновалова¹

¹ Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, e-mail: ku@emsd.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

С 27 ноября 2012 г. по конец августа 2013 г. в Южной части Ключевской группы вулканов на Камчатке наблюдалось сильное базальтовое извержение, названное Трещинным Толбачинским извержением им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50) [2]. Шестикилометровая трещинная зона субмеридионального простираения, вдоль которой впоследствии сосредоточились эруптивные центры извержения, прошла по южному склону вулкана Плоский Толбачик и прилегающей к нему северной части Толбачинского Дола (южной ветви Толбачинской зоны ареального вулканизма). За 9 месяцев извержения на поверхность поступило около 0.55 км^3 магмы. Перед ТТИ-50 сеть деформационного и сейсмического мониторинга позволила впервые в России выявить длительные синхронные предвещающие извержение аномалии деформаций земной коры и параметров сейсмического режима, связанные с пробуждением вулкана. Их длительность оказалась сопоставима и составляет не менее 4 месяцев (август-ноябрь 2012 г.) [4].

Для исследования сейсмичности, сопровождавшей Трещинное Толбачинское извержение, в январе-октябре 2013 г. в Южной части Ключевской группы вулканов были организованы наблюдения дополнительными сейсмическими станциями (рис. 1). Использовались широкополосные (0.033–100 Гц) трехкомпонентные цифровые сейсмометры Guralp CMG-6TD. Временная сеть обеспечила получение информации о землетрясениях на более низком энергетическом уровне, чем это позволяет региональная сеть сейсмических станций Камчатки. Наблюдения проводились силами Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН). Камчатская региональная сеть сейсмических станций в районе Ключевской группы вулканов неравномерна (рис.1). В ее южной части (южнее вулканов Острый и Плоский Толбачик) расположена лишь одна региональная сейсмическая станция KMN. В этой конфигурации сеть обеспечивает уровень надежной регистрации землетрясений Ключевской группы вулканов $K_s=4.5-5.0$, для района ТТИ-50 – $K_s=4.9$.

ТТИ-50 сопровождалось интенсивным вулканическим дрожанием, затруднявшим выделение землетрясений на сейсмической записи. Сопоставление спектров сейсмических сигналов, зарегистрированных в исследуемом районе в ходе извержения и в другое время позволило оценить полосу частот вулканического дрожания: 0.5–20 Гц, максимум соответствует частоте 1–2 Гц [5]. На некоторых временных станциях (Т04, Т05) превышение уровня сигнала в спектре достигает 60 дБ, что соответствует увеличению амплитуды $\sim$ в 10^3 раз. Поэтому для выделения сейсмических событий активно использовалась фильтрация (преимущественно полосовой фильтр Баттерворта второго порядка в полосе частот 8–16 Гц, рис. 3).

Обработка записей дополнительных временных станций была выполнена в лаборатории сейсмического мониторинга КФ ГС РАН. Для локализации землетрясений использовалась интерактивная программа DIMAS [3] и локальный годограф на базе эмпирической скоростной модели, описанной в работе [6].

Результаты первого этапа обработки, в ходе которого был проведен перерасчет гипоцентров землетрясений, зарегистрированных региональной сетью в Толбачинской вулканической зоне, с привлечением дополнительных данных, полученных временными станциями, представлен на рис. 4. Невязки определения координат этих землетрясений для региональной и временной сети в виде гистограмм и функций распределения приведены на рис. 5. Невязки определения положения событий составили: для региональной сети: по эпицентру 3.8 ± 1.7 , по глубине 3.3 ± 1.7 ; с привлечением временной сети: по эпицентру 1.8 ± 1.6 , по глубине 1.7 ± 1.3 (доверительный интервал соответствует среднеквадратичному отклонению).

В ходе второго этапа обработки были определены гипоцентры и энергетический класс K_s всех остальных локальных землетрясений, зарегистрированных временными станциями. При необходимости в обработку включались записи ближайших к извержению региональных сейсмостанций.

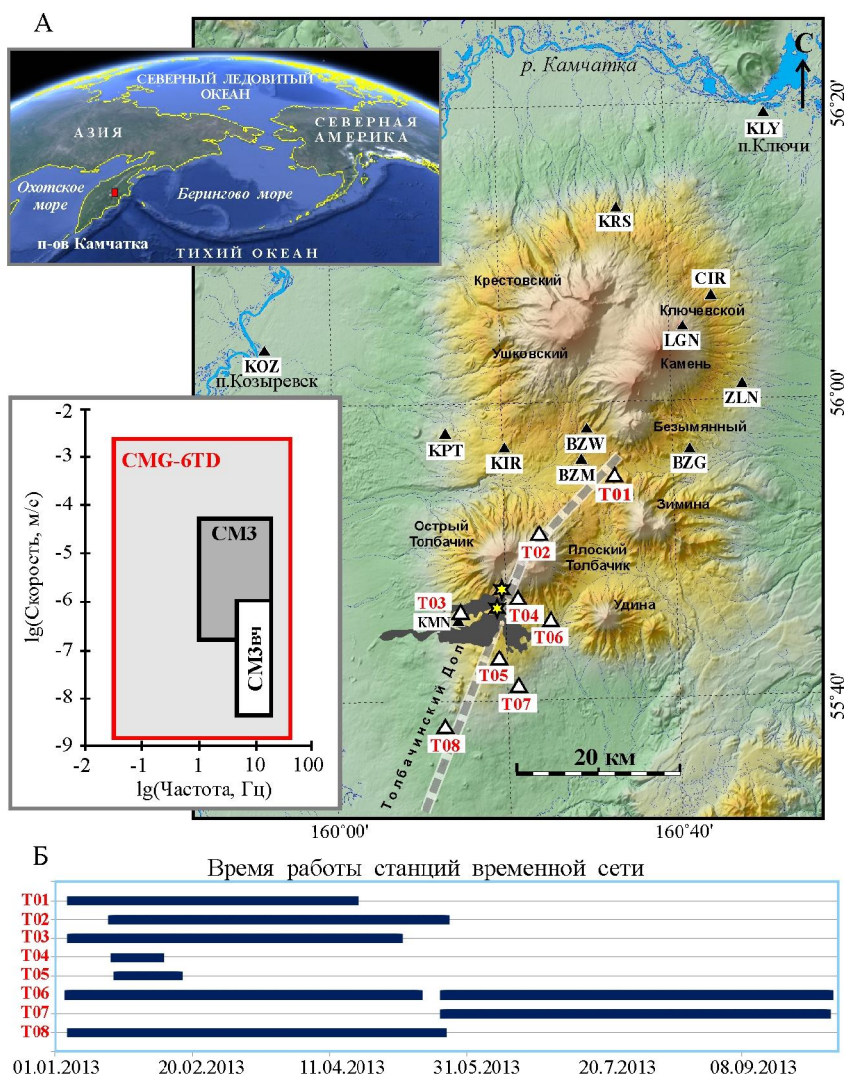


Рис. 1. Сейсмические станции в районе Ключевской группы вулканов (А) Темными и светлыми треугольниками обозначены соответственно региональные и временные сейсмические станции. Диапазоны регистрируемых ими сейсмических сигналов представлены на нижней врезке. На схему нанесены лавовые поля ТТИ-50 и основные эруптивные центры извержения (звезды). Б – схема времени работы станций временной сети.

По результатам обработки составлен каталог из более чем 700 землетрясения с $M_L=0-3.5$ ($K_S=1.5-8.5$), что на порядок превышает число событий, зарегистрированных региональной сетью. Примеры записей локальных землетрясений представлены на рис. 2, 3.

По данным временной сети выделены компактные области пространственной концентрации эпицентров (группы I – IV, рис. 5).

Группа I пространственно совпадает с эруптивным центром ТТИ-50. Основная масса событий – слабые поверхностные землетрясения $K_S=3-4$, $h < 2$ км. Большинство из них были зарегистрированы в период работы станций T04 и T05, установленных на непродолжительное время в непосредственной близости к извержению, в конце января – начале февраля 2013 г.

Группа II – наиболее многочисленный кластер зарегистрированных землетрясений, расположенный к югу от вулкана Плоский Толбачик на восточном склоне Толбачинского Дола. Землетрясения из этой зоны регистрировались в течение всего времени работы дополнительной сети, в том числе и после прекращения извержения. Их энергетический класс K_S достигает значений 6–6.5, глубина, в основном, до 2 км. Единичные сейсмические события имеют глубину от 10 до 20 км, но они произошли уже после завершения ТТИ-50. Вероятно, эта сейсмичность связана с внедрением и распространением в южном направлении не вышедшей на поверхность магмы (не реализовавшийся прорыв извержения). Другой возможной причиной выявленной сейсмической активности может являться изменение регионального поля напряжений. Выявление зоны компактно расположенной сейсмичности, не связанной непосредственно с зоной эруптивной активности, является неожиданным и важным результатом работы временных станций. Достоверность существования группы II подтверждается полученным сейсмологическим материалом: станцией T06, расположенной в верховьях реки Толуд, в течение всего времени ее работы фиксировались землетрясения с $T_{S-P} \sim 1$ с и менее, относящиеся к кластеру II. Примеры таких событий приведены на рис. 2.

Группа III – сгущение эпицентров на северо-восточном склоне вулкана Плоский Толбачик. Прорабатывается диапазон глубин до 17 км. Максимальный зарегистрированный класс $K_S=6.2$. Группа III соответствует пересечению Плоского Толбачика глубинным разломом.

Группа IV относится к западной части недействующего вулканического массива Зимина. Отметим, что локализованное по данным региональной сети облако землетрясений, рассеянных между вулканами Плоский Толбачик, Удина и Зимина, после добавления в обработку временных

станций компактизировалось и переместилось под западную часть вулканического массива Зимина. Интересно, что этот кластер землетрясений (*IV*) имеет структуру, близкую к кольцевой.

Глубина сейсмических событий варьируется от приповерхностных до заглубленных до 15–17 км. В рассматриваемый период времени на глубине 17 км произошло сильнейшее зарегистрированное под вулканом Зимина землетрясение с $K_S = 8.5$.

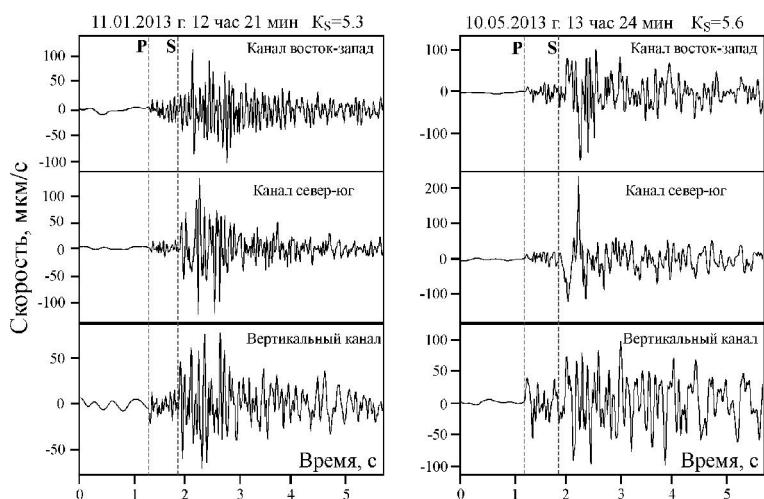


Рис. 2. Примеры записей временной сейсмической станцией T06 не локализованных региональной сетью землетрясений ($T_{S-P} < 1$ с).

Представлен исходный сигнал без фильтрации. Отмечены времена вступления продольной (P) и поперечной (S) волн.

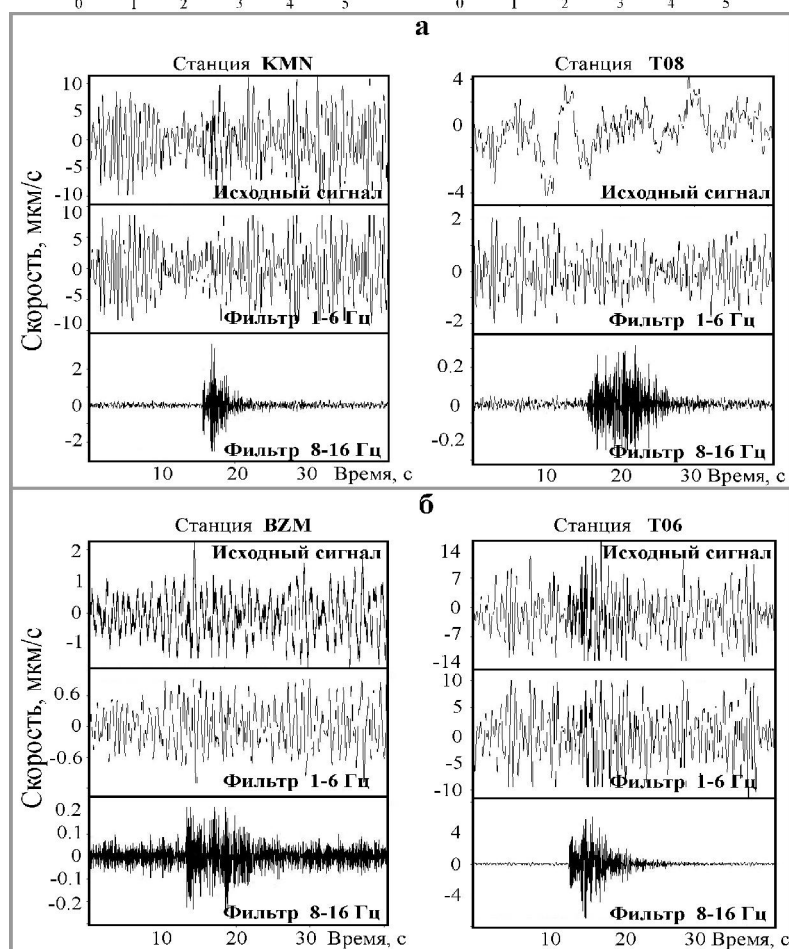


Рис. 3. Примеры записей не локализованных региональной сетью землетрясений в различных частотных диапазонах. а - локальное землетрясение из зоны извержения 07.02.2013 г. 11:13 UTC $K_S=5.0$; б - локальное землетрясение под северо-восточным склоном вулкана Плоский Толбачик 12.02.2013 г. 15:50 UTC $K_S=5.6$. Приведены записи вертикальных каналов станций региональной (слева) и временной сети (справа).

На рис. 6 номером *И* выделена еще одна интересная в сейсмическом отношении область – район так называемой Толудской эпицентральной зоны (ТЭЗ). ТЭЗ обсуждалась ранее в ходе исследований сейсмичности Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. (БТТИ), ее сейсмическая активность в 1975 г. связывается с оттоком базальтов на малых глубинах из-под вулкана Плоский Толбачик [1]. Новым результатом, полученным по данным временной сети, является ярко выраженная группируемость землетрясений в ТЭЗ. Причем кластеры

землетрясений очерчивают дугообразные структуры. Под северо-восточным склоном вулкана Большая Удина зафиксирована небольшая компактная группа слабых землетрясений, что говорит о сейсмической активности и этого андезитового вулкана. Обратим внимание на выделенную эллипсом на рис. 6 область Толудской серии землетрясений, сопровождавшей начало ТТИ-50: наиболее сильные землетрясения ТЭЗ с глубиной очагов больше 10 км произошли именно в области этого кластера.

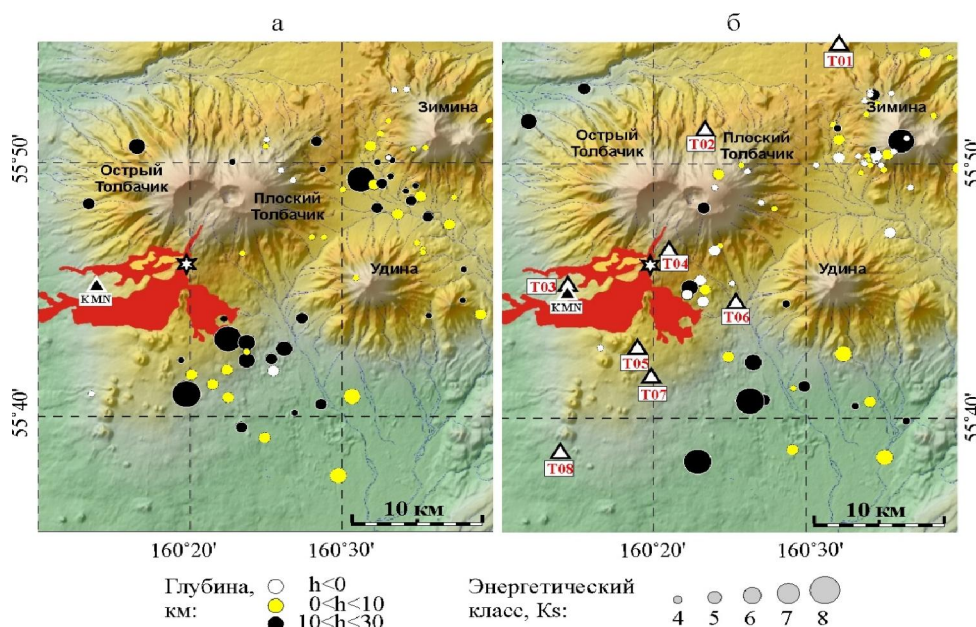


Рис. 4. Эпицентры землетрясений в районе вулканического массива Толбачик и Толбачинского Дола с 06.01.2013 г. по 10.10.2013 г. а - по данным региональной сети сейсмических станций (каталог КФ ГС РАН для Ключевской группы вулканов), б – те же землетрясения при дополнении региональной сети временными станциями.

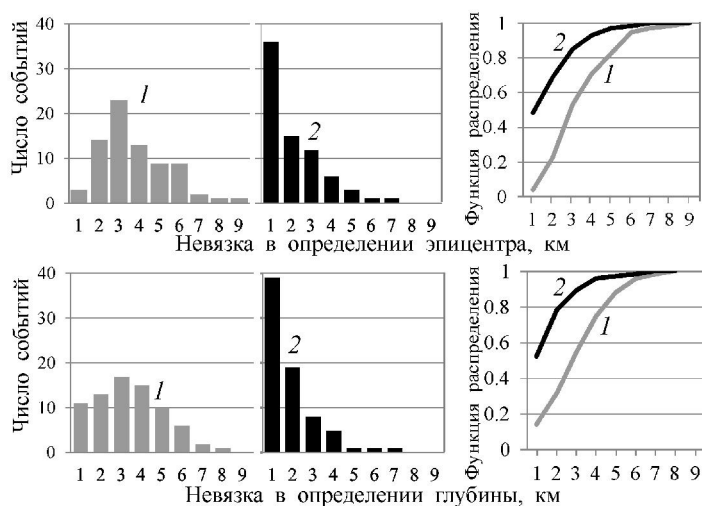


Рис. 5. Гистограммы и функции распределения невязок определения положения землетрясений, представленных на рис. 4, по результатам работы региональной (1) и временной (2) сетей сейсмических станций.

Следовательно, для рассматриваемого района представительность региональной сети значительно завышена и не отражает реальные возможности системы сейсмического мониторинга.

Обобщим основные результаты выполненных работ:

- были организованы и проведены долговременные (9 месяцев) дополнительные временные наблюдения за локальной сейсмичностью в районе ТТИ-50;
- по результатам обработки составлен каталог слабых локальных землетрясений, не зарегистрированных камчатской региональной сетью, с $M_L=0-3.5$;
- обнаружена неравномерность сейсмичности и группируемость землетрясений Толбачинской вулканической зоны и вулканического массива Зимина;
- показано, что сейсмичность в области эруптивной трещины извержения в январе-октябре 2013 г. не являлась доминирующей;
- оказалось, что для района ТТИ-50 и вулкана Плоский Толбачик представительность региональной сети завышена, а гипоцентры землетрясений значительно смещаются при включении в обработку временных станций;
- получен обширный экспериментальный материал для методических работ, направленных на оптимизацию существующей наблюдательной сети и улучшение точности определяемых параметров землетрясений.

На рис. 6 приведены кумулятивные графики числа землетрясений, локализованных временной и региональной сетями. В связи с тем, что конфигурация временной системы наблюдений менялась, полученный материал не является однородным и не позволяет корректно определить ее уровень надежной регистрации. Однако можно оценить соотношение числа событий, зарегистрированных временной и региональной сетями. График, отражающий результаты детального мониторинга зоны извержения, уже с $K_S=6.5$ проходит выше кривой, построенной для региональной сети. С уменьшением K_S разрыв между графиками увеличивается.

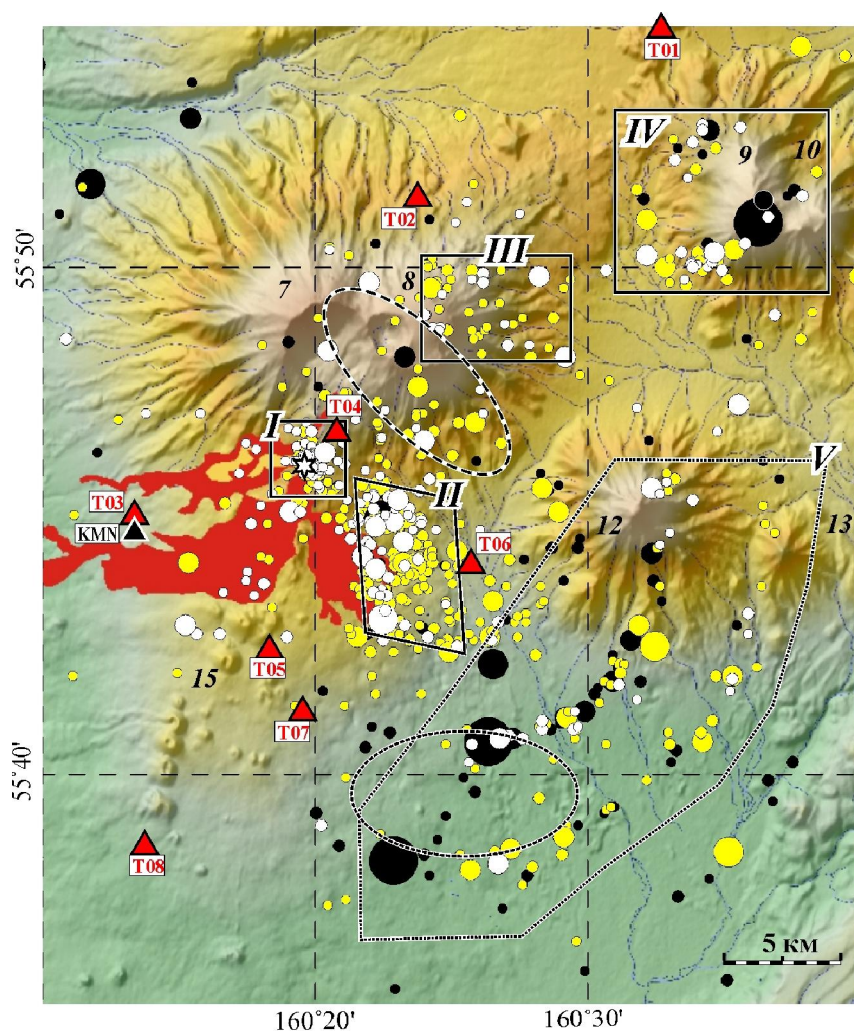


Рис. 6. Результаты дополнительных локальных сейсмологических наблюдений в районе Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. Эпицентры землетрясений, сопровождавших ТТИ-50 в период работы временной сети сейсмических станций, с 06.01.2013 г. по 10.10.2013 г. Невязки определения положения этих событий по эпицентру составляют 1.4 ± 1.8 км, по глубине 1.2 ± 1.2 км. Эллипсами выделены область сейсмической активизации, предвавшей ТТИ-50 в августе-ноябре 2012 г., и область Толудской серии землетрясений 29.11.2012 - 07.12.2012 г. Зоны I-V обсуждаются в тексте.

Организация дополнительных сейсмологических наблюдений в районе ТТИ-50 стала возможной благодаря финансовой поддержке Президиума РАН. Обслуживание временной сети и исследования сейсмичности поддержаны научными проектами РФФИ 13-05-10033, 13-05-00117.

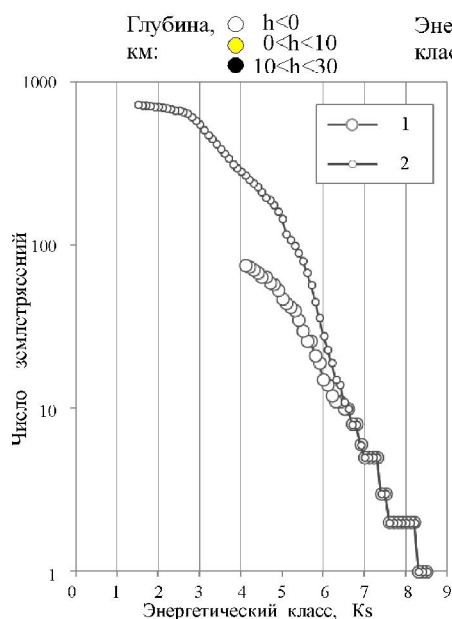


Рис. 7. Кумулятивные графики числа землетрясений, зарегистрированных региональной (1) и временной (2) сетями с 06.01.2013 г. по 10.10.2013 г.

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. М.:Наука, 1984. 637 с.
2. Гордеев Е.И., Муравьев Я.Д., Самойленко С.Б. и др. Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг. Первые результаты // ДАН. 2013. Т. 452. № 5. С. 562–566.
3. Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.
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., Кугаенко Ю.А., Коновалова А.А., Абкадыров И.Ф., Воропаев П.В. Первые результаты исследований сейсмичности района трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. по данным временной локальной сети // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 98-102.
6. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.