

## ВРЕМЕННЫЕ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ В РАЙОНЕ ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ 2012–2013 гг. И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2017 г. Ю. А. Кугаенко<sup>1\*</sup>, В. А. Салтыков<sup>1</sup>,  
И. Ф. Абкадыров<sup>2</sup>, П. В. Воропаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН  
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9

<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9

\*e-mail: ku@emsd.ru

Поступила в редакцию 25.08.2015 г.

Для исследования сейсмичности, сопровождавшей Трещинное Толбачинское извержение, в январе-октябре 2013 г. в южной части Ключевской группы вулканов были организованы наблюдения дополнительными сейсмическими станциями. Использовались широкополосные (0.033–50 Гц) трехкомпонентные цифровые сейсмометры Guralp SMG-6TD. Временная сеть обеспечила получение информации о сейсмичности на более низком энергетическом уровне, чем это позволяет региональная сеть сейсмических станций Камчатки. По результатам обработки полученных цифровых записей составлен каталог из более чем 700 землетрясений с  $M_L = 0-3.5$  ( $K_S = 1.5-8.5$ ), что на порядок превышает число событий, локализованных региональной сетью за тот же период времени. Обнаружено, что в ходе извержения сейсмичность в районе вулкана Плоский Толбачик в основном концентрировалась в пространственно разнесенных группах. Основные обособленные кластеры землетрясений выявлены как непосредственно в районе извержения, так и на периферии вулкана Плоский Толбачик, в районе вулканического массива Зимины и в Толудской эпицентральной зоне, при этом зона извержения не является доминирующей. Область предвещающей извержение малоглубинной сейсмической активизации под вулканом Плоский Толбачик во время работы временной сети повышенной активности не проявляла, то есть в начале извержения произошла инверсия сейсмичности. Обсуждается возможная природа обнаруженных сейсмогенерирующих структур.

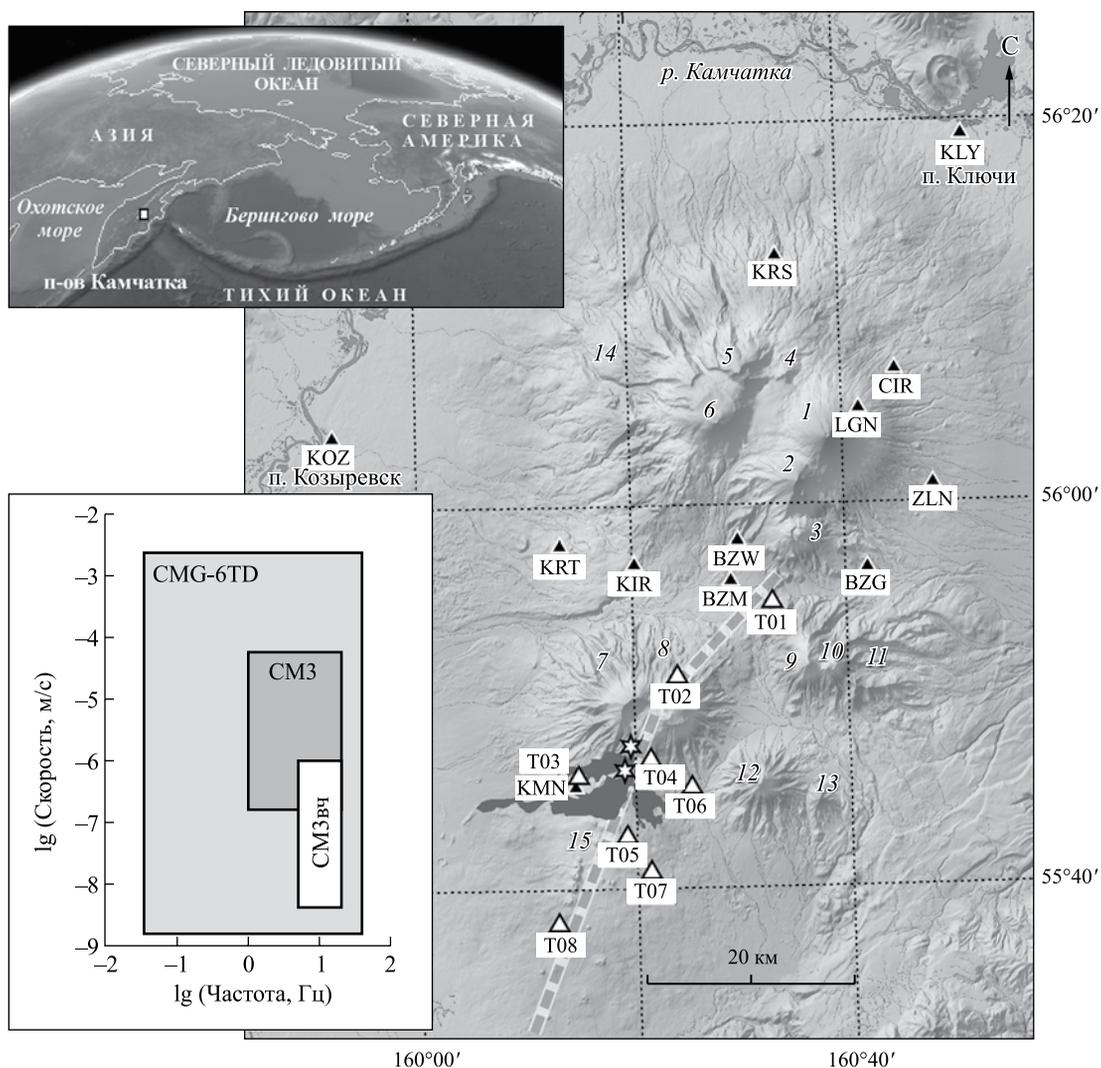
DOI: 10.7868/S0203030617040058

### ВВЕДЕНИЕ

В 2012–2013 гг. на Камчатке в южной части Ключевской группы вулканов произошло Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50) [Самойленко, 2012; Гордеев и др., 2013]. Это одно из крупнейших базальтовых извержений, отмеченных в последние десятилетия на территории России. В начальной фазе оно сопровождалось умеренными пепловыми выбросами, а в течение всего извержения наблюдались мощные фонтаны лавы и интенсивное излияние жидких лавовых потоков, покрывших площадь около 36 км<sup>2</sup>; объем поступившей на поверхность магмы оценивается в 0.55 км<sup>3</sup> [Двигало и др., 2014; Velousov et al., 2015]. Извержение в основном закончилось в конце августа 2013 г.

ТТИ-50 началось 27 ноября 2012 г. с образования прерывистой поверхностной разломной зоны субмеридионального простирания длиной

~ 6 км в диапазоне высот от 1500 до 2200 м, вдоль которой впоследствии сосредоточились эруптивные центры извержения (рис. 1). Трещинная зона вскрыла южный склон стратовулкана Плоский Толбачик и прилегающий к нему северный край Толбачинского Дола (южной ветви Толбачинской зоны ареального вулканизма). Полоса ареального вулканизма пересекает вулкан Плоский Толбачик, образуя две ветви: северо-восточную и юг-юго-западную, длина которых ~20 км и 40 км соответственно. Они представляют собой протяженные зоны моногенных шлаколавовых образований голоценового возраста и отражают выход на поверхность глубинного магмопроводящего разлома. Вулканическая деятельность в ареальных зонах и кальдере стратовулкана сопоставима по времени возникновения (голоцен), составу лав и направлению развития, что позволяет обсуждать генетическую связь между ареальным вулканизмом



**Рис. 1.** Сейсмические станции в районе Ключевской группы вулканов.

На верхней врезке положение рассматриваемого района отмечено белым прямоугольником. Темными и светлыми треугольниками обозначены, соответственно, региональные и временные сейсмические станции. Диапазоны регистрируемых ими сейсмических сигналов представлены на нижней врезке (комментарии в тексте).

Номерами обозначены действующие (Д) и потухшие (П) вулканы: 1 – Ключевской (Д), 2 – Камень (П), 3 – Безымянный (Д), 4 – Средний (П), 5 – Крестовский (П), 6 – Ушковский (Д), 7 – Острый Толбачик (П), 8 – Плоский Толбачик (Д), 9 – Овальная Зимина (П), 10 – Острая Зимина (П), 11 – Горный Зуб (реликт плейстоценового вулкана); 12 – Большая Удина (П), 13 – Малая Удина (П), 14 – щитовой вулкан в основании Ушковского и Крестовского вулканов (П); 15 – Толбачинский Дол (активная зона шлаковых конусов). Штриховым пунктиром обозначена осевая линия зоны глубинного разлома. На схему нанесены основные эруптивные центры извержения (звезды) и лавовые поля ТТИ-50 (темная заливка).

и активностью в терминальном кратере (кальдере) [Ермаков, Важеевская, 1973; Большое ..., 1984; Ермаков и др., 2014; Флеров и др., 2015]. Установлено, что вулкан Плоский Толбачик к началу голоцена потерял активность, затем был захвачен трещинной зоной ареального вулканизма, которая унаследовала его питающие каналы, и в течение последних примерно двух тысяч лет работал как подчиненная структура – один из эруптивных центров региональной зоны шлаковых конусов Толбачинского Дола [Большое...,

1984; Флеров, Мелекесцев, 2014; Флеров и др., 2015].

Основная трещина ТТИ-50 по простиранию соответствует разрывным нарушениям, вдоль которых формировались эруптивные центры бывших извержений. В то же время близость эруптивных центров ТТИ-50 к терминальному кратеру Плоского Толбачика может свидетельствовать о прямой связи ТТИ-50 с элементами питающей системы этого стратовулкана, при этом, по мнению В.А. Ермакова



классификации [Федотов, 1972]) (см. рис. 2а), которая развивалась с уменьшением глубины и ускорением в течение не менее 4 месяцев [Салтыков и др., 2012]. Анализ сейсмичности был ориентирован на сопоставление средне-голетних (2000–2011 гг.) параметров с их текущими (2012 г.) значениями. Так, в 2012 г. наблюдалось отклонение скорости сейсмического потока и скорости выделения сейсмической энергии в сторону увеличения от средних величин. Наиболее уверенно активизация проявилась в параметрах сейсмического режима в августе–ноябре 2012 г. В последние 2–3 недели перед извержением среднеголетние скорости потока сейсмических событий и сейсмической энергии были превышены ~ в 40 раз. Предварявшая извержение сейсмичность была мелкофокусной и концентрировалась в диапазоне глубин до 5 км. По мнению С.А. Федотова [Федотов и др., 2010, 2011], примерно на этой глубине под Плоским Толбачиком должен находиться периферический магматический очаг. Длительность фазы пробуждения, выявленной по сейсмическим данным, соответствует результатам GPS-мониторинга. Деформационные аномалии перед ТТИ-50 проявились в перемещении всей центральной части Ключевской группы вулканов. Выявленные по GPS-данным смещения GPS-пунктов, отдаленных на 20–25 км от прорывов ТТИ-50, начались ~ за 4 месяца до извержения, в августе 2012 г. [Кугаенко и др., 2015б]. Сопоставимая длительность сейсмической и деформационной аномалий (~4 месяца до извержения) свидетельствует об их общей генетической природе.

Отметим выявленные по сейсмическим данным интересные особенности начальной фазы извержения:

- резкое изменение конфигурации облака землетрясений и формирование двух пространственно разобщенных кластеров предположительно во время образования трещинной зоны [Сенюков и др., 2013];

- сейсмическая активизация “структурного вее-ра” (системы радиальных трещин на склонах стратовулкана на высотах от 1500 м до 3000 м) [Ермаков и др., 2013, 2014];

- достаточно кратковременное (только между 5 ч и 7 ч UTC 27.11.2012 г.) проявление относительно сильных ( $K_S \sim 8-9$ ) сейсмических событий на вулкане Плоский Толбачик (см. рис. 2б);

- неравномерность пространственного расположения эпицентров землетрясений района ТТИ-50 [Дрознин, Дрознина, 2013];

- два последовательных эпизода миграции магмы, выделенные по результатам анализа сейсмических записей методом SARA [Taisne et al., 2011] на начальной стадии извержения, причем

в ходе первого эпизода начальная вертикальная миграция магмы сменилась горизонтальной [Caudron et al., 2015]; вертикальная миграция шла под северо-восточной ветвью зоны ареального вулканизма, под северо-восточным склоном вулкана Плоский Толбачик; второй эпизод миграции соответствует началу Толудской серии землетрясений;

- Толудская серия землетрясений 28.11–07.12.2012 г. (см. рис. 2б), включающая одно из сильнейших на Ключевской группе вулканов сейсмическое событие с  $K_S = 11.3$  ( $M_c = 5.3$ ) [Кугаенко и др., 2015а]. В целом энергия Толудских землетрясений примерно в 50 раз превышает сейсмическую энергию, выделившуюся в 2012 г. непосредственно из района вулкана Плоский Толбачик и ТТИ-50. Вероятна связь этой вспышки сейсмичности с интрузивной активностью [Ермаков и др., 2014] и перемещением магм в начале ТТИ-50 [Caudron et al., 2015].

Представленная статья продолжает ряд публикаций, посвященных ТТИ-50. В ней рассматриваются результаты детальных исследований сейсмичности, сопровождавшей извержение, по данным дополнительных временных наблюдений (январь–октябрь 2013 г.). В статье также использованы каталоги землетрясений Северной группы вулканов, получаемые в Камчатском филиале Геофизической службы (КФ ГС) РАН и публикуемые в ежегодниках “Землетрясения Северной Евразии” и “Землетрясения России”, а также материалы фактографической базы данных КФ ГС РАН “Активность вулканов Камчатки”<sup>1</sup>.

## ОРГАНИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ

Камчатская региональная сеть сейсмических станций [Чебров и др., 2013] в районе Ключевской группы вулканов неравномерна (см. 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 усиления региональной системы сейсмологических наблюдений в районе ТТИ-50 и получения новых данных о сейсмичности на более низком энергетическом уровне, чем это позволяет камчатская региональная сеть, в южной части Ключевской группы вулканов была развернута временная сеть автономных сейсмических станций (см. рис. 1, таблица). Временная сеть обеспечила значительно лучший азимутальный охват сейсмических событий Толбачинской вулканической зоны. Наблюдения были организованы в начале

<sup>1</sup> <http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>

Сейсмические станции временной локальной сети, работавшие в районе ТТИ-50 в январе-октябре 2013 г. (см. рис. 1)

Код станции, расстояние до извержения	Время работы	Координаты, высота	Описание места установки станции
<b>T01</b> 22 км	07.01.2013– 20.04.2013	55.9118° 160.5382° 1633 м	Толбачинский перевал (Центральная часть Ключевской группы вулканов). Постановка в специализированный бункер на сейсмопостамент. Антенна GPS выведена на поверхность.
<b>T02</b> 12 км	22.01.2013– 23.05.2013	55.8718 160.3671° 1596 м	Северный склон вулкана Плоский Толбачик. Постановка в мерзлый шлак на металлический диск. Заглубление около 30 см.
<b>T03</b> 4.5 км	07.01.2013– 06.05.2013	55.7566° 160.2474° 1053 м	Северо-западная часть Толбачинского Дола. Постановка в специализированный бункер на сейсмопостамент региональной станции КМН. Антенна GPS выведена на поверхность.
<b>T04</b> 1.5 км	23.01.2013– 08.02.2013	55.7768° 160.3451° 1757 м	Район извержения. Мощность снежного покрова около 120 см. Постановка поверхностная в мерзлый шлак на стальной диск. Станция накрыта защитным термоизолирующим пенопластовым коробом и засыпана снегом.
<b>T05</b> 4.5 км	24.01.2013– 15.02.2013	55.7248° 160.3199° 1280 м	Район извержения. Снежный покров отсутствует. Постановка в мерзлый шлак на стальной диск. Заглубление около 40 см.
<b>T06</b> 7 км	06.01.2013– 14.05.2013 23.05.2013– 10.10.2013	55.7499° 160.4220° 988 м	Долина реки Толуд. Снежный покров отсутствует. Постановка в мерзлый почвенно-пирокластический чехол на металлический диск. Заглубление 30–40 см.
<b>T07</b> 8 км	23.05.2013– 10.10.2013	55.6930° 160.3080° 1032 м	Восточный склон Толбачинского дола. Шлаковое поле. Сейсмометр установлен на шлакоблок в яму глубиной около 50 см.
<b>T08</b> 15 км	07.01.2013– 23.05.2013	55.6416° 160.2170° 651 м	Южная часть Толбачинского Дола. Лавовая пещера в голоценовом конусе Звезда. Сейсмометр установлен на дно лавовой трубы в ответвлении большого грота пещеры. Антенна GPS выведена на борт кратера.

января 2013 г. силами КФ ГС РАН и Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН при поддержке Президиума РАН. Временная сеть состояла из широкополосных трехкомпонентных сейсмометров Guralp CMG-6TD (частотный диапазон 0.033–50 Гц), сочетающих функции датчика и цифрового регистратора и обеспечивающих достаточный срок автономной регистрации (4–5 месяцев непрерывной работы при частоте оцифровки 100 отсчетов в секунду).

Дополнительные сейсмические станции работали с начала января до начала октября 2013 г., при этом их количество и конфигурация сети менялись (см. таблицу). Наибольшее количество (семь) станций одновременно работало в январе-

феврале, в июне-октябре регистрация осуществлялась двумя временными станциями. Поэтому для исследования временных особенностей развития сейсмичности в исследуемом районе полученный каталог локальных землетрясений не использовался.

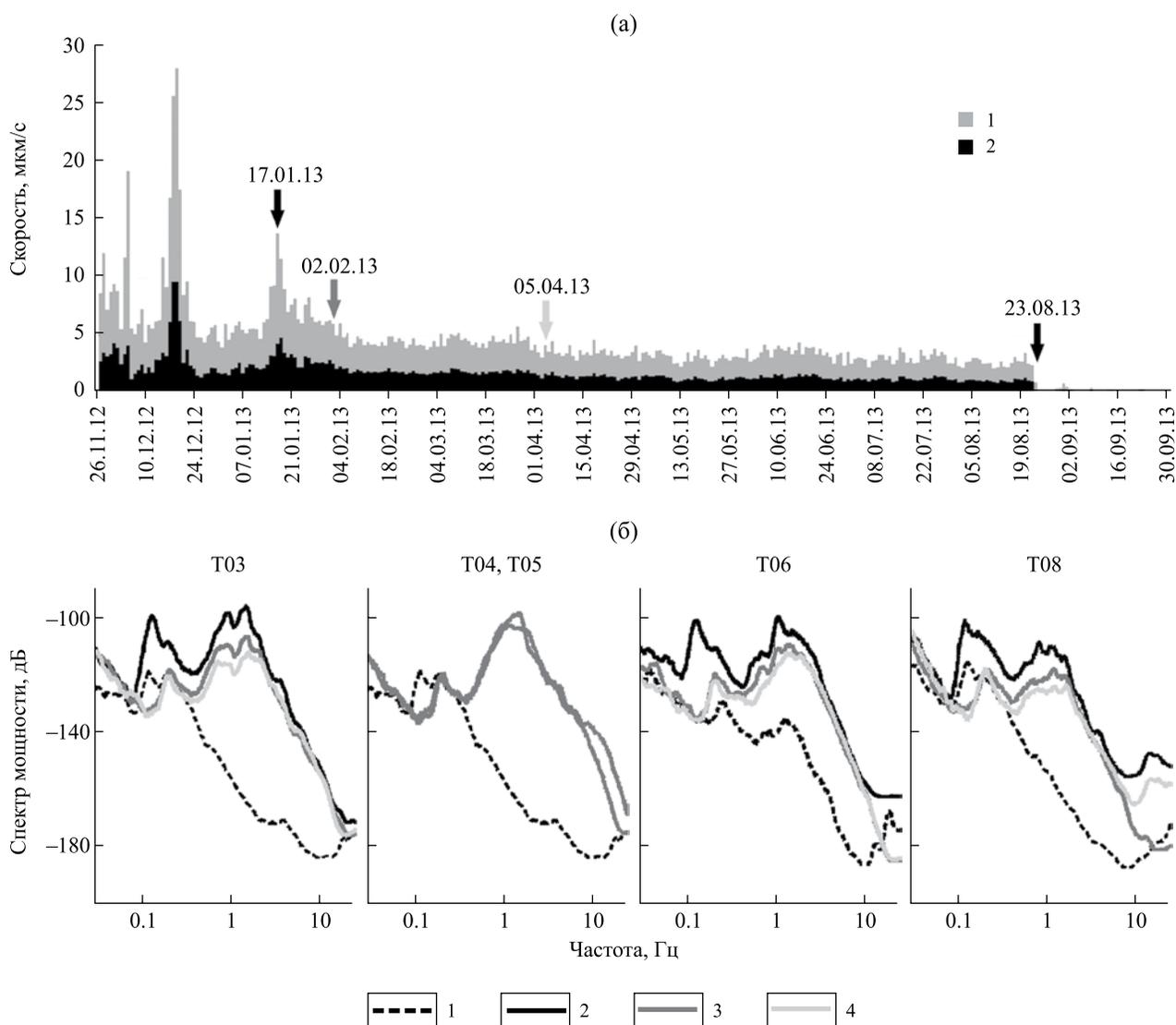
К началу ТТИ-50 сейсмические станции региональной сети в районе извержения были оснащены сейсмометрами СМ-3 с периодом собственных колебаний  $T_c = 1.2$  с и, в некоторых случаях, их более высокочастотной модификацией СМ-3вч. На врезке к рис. 1 для сравнения возможностей регистрации сейсмических сигналов проиллюстрированы технические характеристики аппаратуры региональной и временной сетей.

### ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

ТТИ-50 сопровождалось интенсивным вулканическим дрожанием, затруднявшим выделение землетрясений из сейсмической записи. Вулканическое дрожание фиксировалось на протяжении всего времени извержения (рис. 3а). На рис. 3б показаны спектры сейсмических сигналов, зарегистрированных в исследуемом районе в ходе извержения и в другое время, без вулканического дрожания. Сопоставление спектров позволило оценить полосу частот вулканического дрожания: 0.5–20 Гц, максимум соответствует частоте 1–2 Гц.

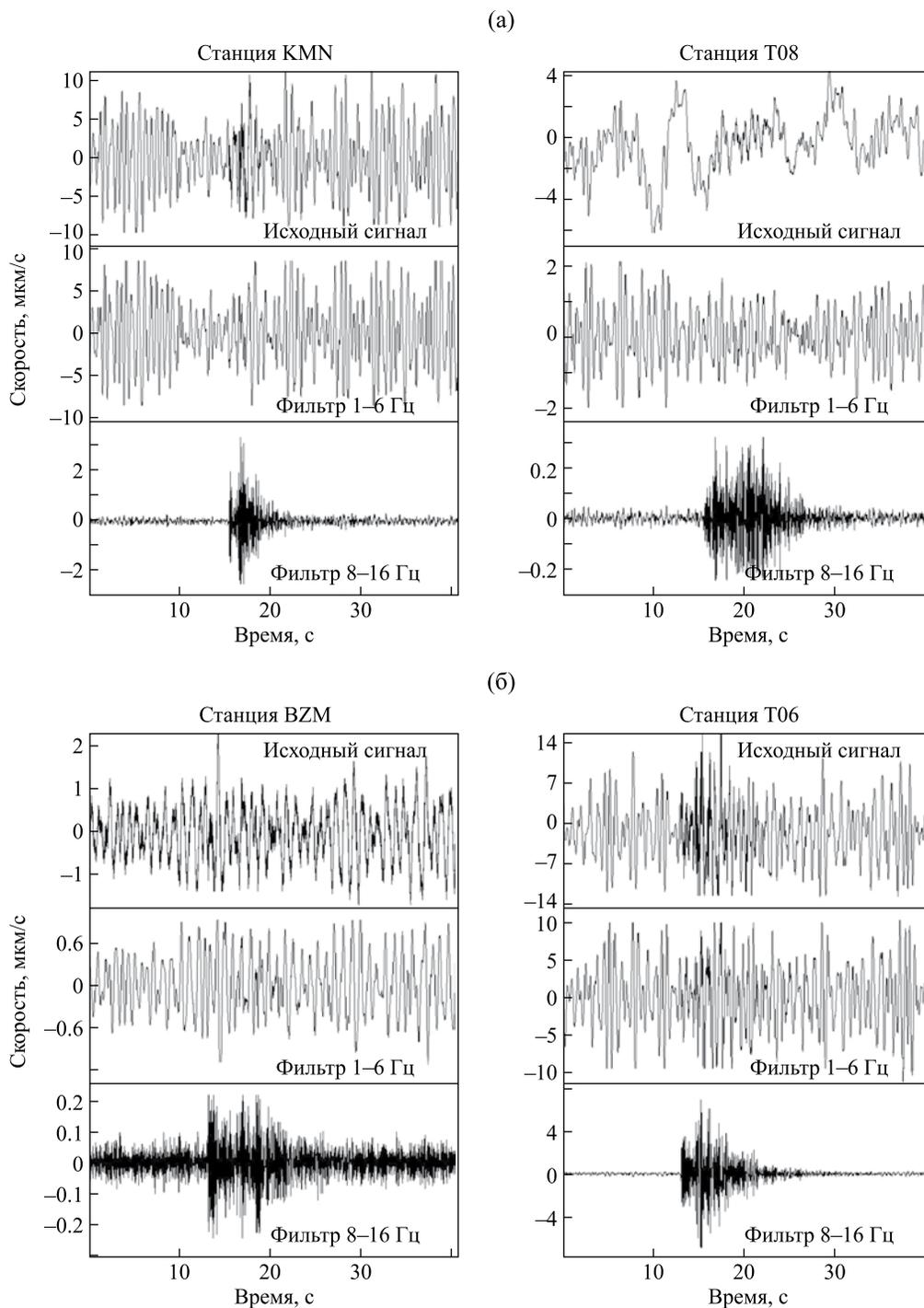
На некоторых станциях (Т04, Т05) превышение уровня сигнала в спектре на частоте 1–2 Гц достигает 60 дБ, что соответствует отношению амплитуд  $\sim 10^3$ . Исходя из этого нами был выбран частотный диапазон обработки локальных землетрясений: для выделения сейсмических событий в данной работе использовался полосовой фильтр Баттерворта второго порядка преимущественно в полосе частот 8–16 Гц.

Отметим, что при массовой оперативной обработке землетрясений в КФ ГС РАН используется фильтрация 1–6 Гц, что обусловлено многолетним опытом наблюдений и необходимостью разумно унифицировать рутинную работу. Очевидно, что при сильном вулканическом дрожании работа с записями



**Рис. 3.** Вулканическое дрожание ТТИ-50.

а – изменение интенсивности дрожания в ходе ТТИ-50 по данным региональной станции КМН: максимальная (1) и средняя (2) амплитуда в течение суток (по базе данных КФ ГС РАН “Активность вулканов Камчатки”); б – примеры спектров сейсмических записей на станциях временной сети: 1 – без дрожания, 2, 3, 4 – 17.01.2013 г., 02.02.2013 г., 05.04.2013 г., соответственно (эти дни отмечены стрелками на рис. 2а). Также стрелкой отмечено 23.08.2013 г., когда ТТИ-50 в основном прекратилось.

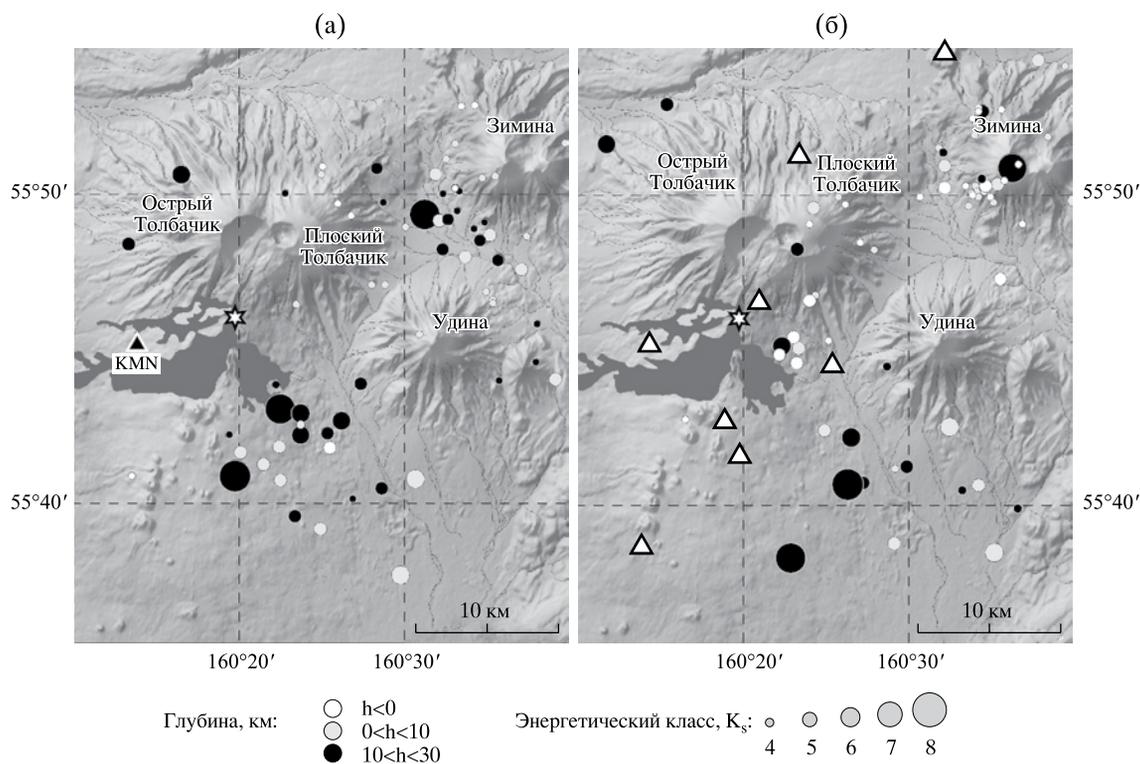


**Рис. 4.** Примеры сейсмических записей не зарегистрированных региональной сетью локальных землетрясений в различных частотных диапазонах.

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).

землетрясений в этом частотном диапазоне невозможна. Но при организации дополнительных временных наблюдений перед исследователями ставится задача получить новые знания и оценить сейсмическую обстановку по имеющемуся не всегда идеальному исходному материалу, поэтому обработка ведется

в разведочном поисковом режиме, а оператор принимает решение об алгоритме обработки землетрясения на основе своих знаний и опыта. Поэтому, по мнению авторов, целесообразно широко использовать имеющиеся возможности цифровой фильтрации сейсмических записей, что и было сделано при работе



**Рис. 5.** 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 Ключевой группы вулканов); б – те же землетрясения при дополнении региональной сети временными станциями. Номера вулканов и временные сейсмические станции (треугольники) соответствуют рис. 1. На схему нанесены лавовые поля ТТИ-50 (темная заливка) и эруптивный центр извержения, сохранявший активность во время работы временной сети (звезда).

с материалами временной сети. Результаты, полученные нами в ходе исследований локальной сейсмичности района ТТИ-50, полностью оправдывают этот подход.

В остальном обработка соответствовала методике, применяющейся в КФ ГС РАН для обработки землетрясений Ключевой группы вулканов: использовалась многофункциональная интерактивная программа DIMAS [Дроздин, Дроздина, 2010] и локальный годограф на базе эмпирической скоростной модели, описанной в работе [Сенюков, 2006]. На рис. 4 продемонстрированы возможности цифровой обработки сигналов программой DIMAS и эффективность применения высокочастотного фильтра (8–16 Гц) для выделения локальных землетрясений на фоне интенсивного вулканического дрожания.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

Обработка производилась в два этапа.

В ходе первого этапа был проведен перерасчет гипоцентров землетрясений, зарегистрированных региональной сетью в Толбачинской вулканической зоне, с привлечением дополнительных данных, полученных временными станциями (рис. 5). Перерасчет был выполнен для 75 событий с энергетическим

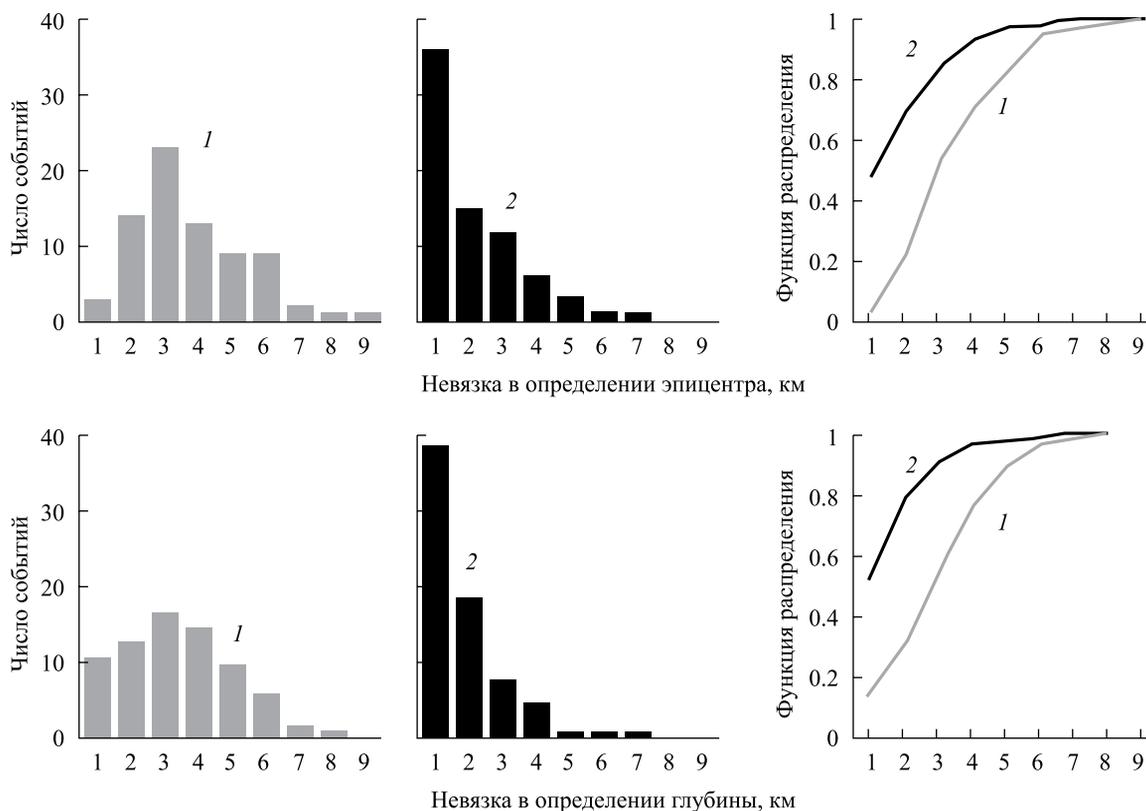
классом  $K_5 = 4.2–8.5$ , которые были зафиксированы в районе, представленном на рис. 5, в диапазоне глубин до 30 км. Энергетический класс этих событий не переопределялся. При релокации гипоцентров использовались данные временных станций с привлечением (при необходимости) только ближайших станций региональной сети.

Сходной чертой обеих карт и важной особенностью Трещинного Толбачинского извержения (в период с января по август 2013 г.) является отсутствие землетрясений  $K_5 = 5–8$ , пространственно связанных с районом прорыва. Однако в записях ближайших к извержению временных станций выделены более слабые события, в том числе серии квазипериодических локальных землетрясений. В остальном карты существенно различаются между собой.

Для землетрясений, представленных на рис. 5, рассчитанные по программе DIMAS невязки определения положения событий составили:

– для региональной сети по эпицентру 3.8 км с  $\sigma = 1.7$  км, по глубине 3.3 км с  $\sigma = 1.7$  км (по каталогу Северной группы вулканов<sup>2</sup>);

<sup>2</sup> Нуждина И.Н. (отв. сост.), Кожевникова Т.Ю., Толочкова С.Л., Напылова О.А., Напылова Н.А., Демянчук М.В.,



**Рис. 6.** Гистограммы и функции распределения невязок определения положения землетрясений, представленных на рис. 5, по результатам работы региональной (1) и временной (2) сетей сейсмических станций. Невязки рассчитаны программой DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2011].

– с привлечением временной сети по эпицентру 1.8 км с  $\sigma = 1.6$  км, по глубине 1.7 км с  $\sigma = 1.3$  км (по каталогу района ТТИ-50<sup>3</sup>).

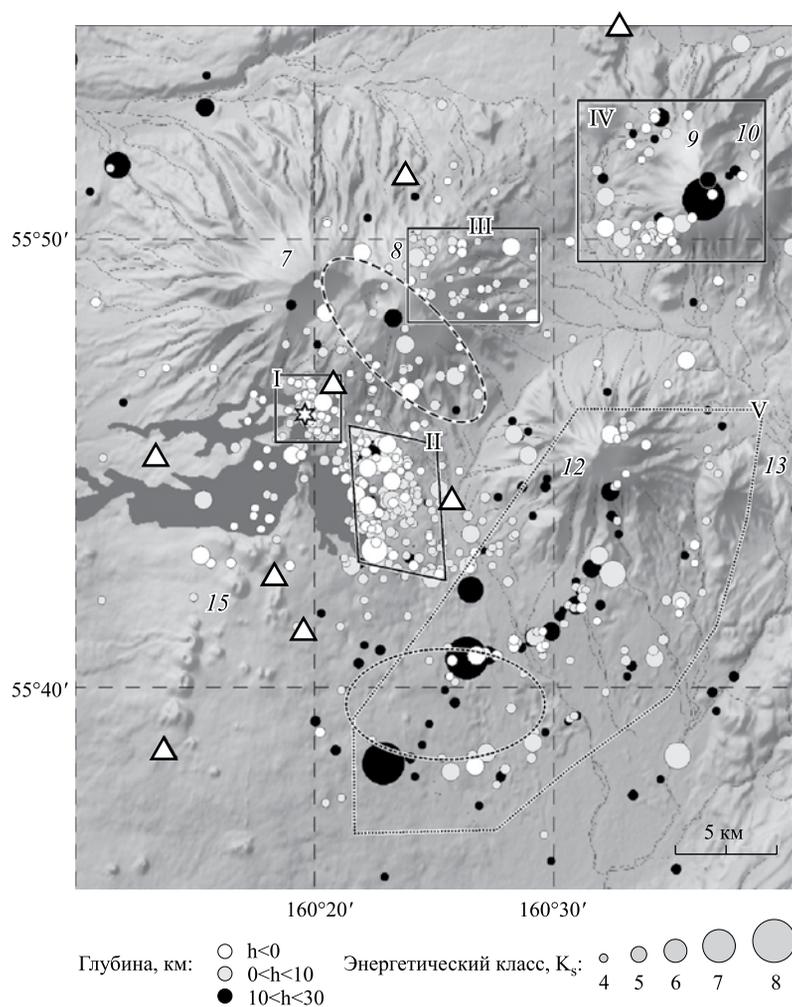
Невязки определения координат для региональной и временной сети приведены на рис. 6. Они представлены в виде гистограмм и функций распределения.

Причины несовпадения гипоцентрии сейсмических событий (см. рис. 5) объективны. Одной из основных причин неустойчивости решений является недостаточное знание скоростных особенностей среды в южной части Ключевской группы вулканов. Так, например, скоростные параметры верхней части разреза для модели [Сенюков, 2006], используемой при массовой обработке, отличаются от значений, определенных непосредственно для

Толбачинского Дола [Большое ..., 1984; Гонтовая и др., 2015]. Кроме того, как показывают исследования последних лет [Хубуная и др., 2007; Федотов и др., 2010; Славина и др., 2012; Nizkous et al., 2007; Koulov et al., 2013 и др.], для Ключевской группы вулканов характерны значительные латеральные вариации скоростных характеристик, обусловленные конфигурацией магматической питающей системы, которые трудно учесть при построении годографов. Неравномерность региональной сети (см. рис. 1) также затрудняет достоверное определение гипоцентров. Не улучшает ситуацию и привлечение для рутинной обработки данных более удаленных региональных станций, обеспечивающих более равномерный азимутальный охват толбачинских землетрясений, так как для удаленных станций некорректно использовать локальный годограф Ключевской группы вулканов. По этой причине при пересчете гипоцентров по сети, дополненной временными станциями, данные сейсмостанций, расположенных за пределами Ключевской группы вулканов, нами не использовались. Таким образом, в условиях неопределенности скоростного строения и при использовании в обработке разного набора станций лучевые картины,

Назарова З.А. Каталог землетрясений Северной группы вулканов за 2013 г. // Приложение к сборнику “Землетрясения России в 2013 г.” на CD-диске, 2015.

<sup>3</sup> Кугаенко Ю.А. (отв. сост.), Коновалова А.А. Каталог “Район Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. за период с 7 января по 10 октября 2013 г. (по данным временной сети станций)” // Приложение к сборнику “Землетрясения России в 2013 г.” на CD-диске, 2015.



**Рис. 7.** Эпицентры землетрясений, сопровождавших ТТИ-50 в период работы временной сети сейсмических станций с 06.01.2013 г. по 10.10.2013 г.

Номера вулканов и временные сейсмические станции (треугольники) соответствуют рис. 1. На схему нанесены лавовые поля ТТИ-50 (темная заливка) и эруптивный центр извержения, сохранявший активность во время работы временной сети (звезда). Эллипсами выделены область сейсмической активизации, предвалявшей ТТИ-50 в августе-ноябре 2012 г., и Толудский рой землетрясений (см. рис. 2). Зоны I–V обсуждаются в тексте.

соответствующие решению задачи гипоцентрии, существенно разнятся. Более углубленное изучение этого вопроса выходит за рамки представленной работы.

В ходе второго этапа обработки были определены гипоцентры и энергетический класс  $K_s$  всех остальных локальных землетрясений, зарегистрированных временными станциями. В результате проведенных работ во временном интервале с 06.01.2013 г. по 10.10.2013 г. локализовано более 700 землетрясений, что на порядок превышает число сейсмических событий, занесенных в каталог Северной группы вулканов за этот отрезок времени. Причиной обнаружения большего числа событий явилась работа с записями в высокочастотном диапазоне спектра, в стороне от спектрального максимума вулканического дрожания.

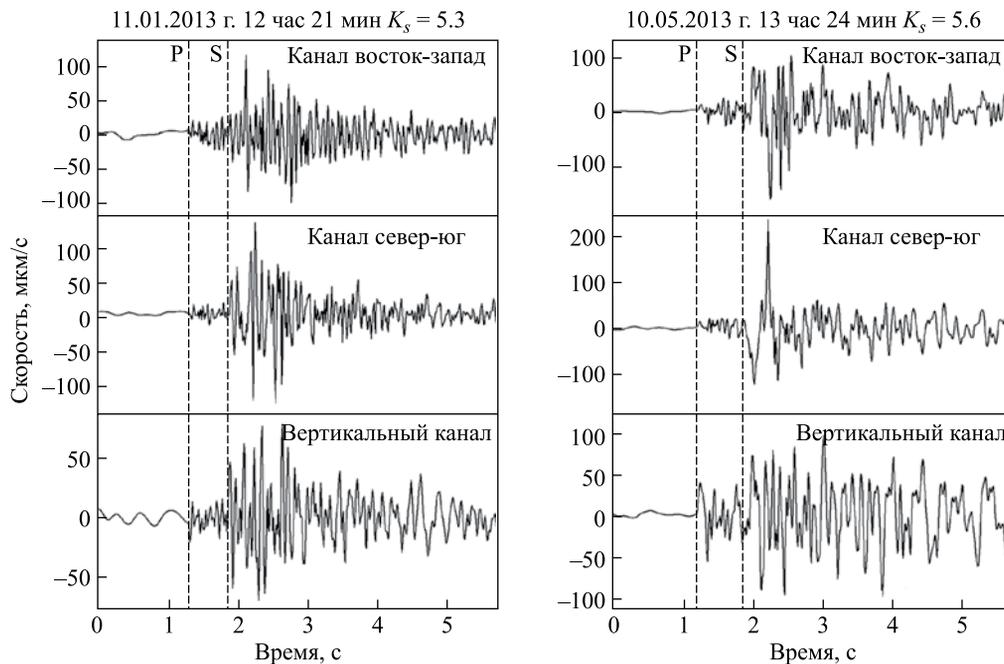
На рис. 7 представлена итоговая карта эпицентров землетрясений. Невязки определения положения этих событий по эпицентру 1.4 км с  $\sigma = 1.8$  км, по глубине 1.2 км с  $\sigma = 1.2$  км.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### Области пространственной концентрации землетрясений

По данным временной сети выделены компактные области пространственной концентрации эпицентров (группы I–IV, см. рис. 7).

Группа I пространственно совпадает с эруптивным центром ТТИ-50. В основном это слабые поверхностные землетрясения  $K_s = 3–4$ ,  $h < 2$  км,



**Рис. 8.** Примеры записей землетрясений группы *II*, зарегистрированных временной станцией Т06.

Представлен исходный сигнал без фильтрации. Отмечены времена вступления продольной (P) и поперечной (S) волн ( $T_{S-P} < 1$  с).

в том числе серии квазипериодических событий. Большинство из них были зарегистрированы в период работы станций Т04 и Т05, установленных на непродолжительное время в непосредственной близости к извержению, в конце января – начале февраля 2013 г. В дальнейшем из этой зоны регистрировались лишь единичные землетрясения.

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, заглубление, в основном, до 2 км. Единичные сейсмические события имеют глубину от 10 до 20 км, но они произошли уже после завершения ТТИ-50. Группа *II* тянется от вулкана Плоский Толбачик к эпицентральной области Толудских землетрясений, зафиксированных в первые дни ТТИ-50 [Кугаенко и др., 2015a]. Вероятно, эта сейсмичность связана с внедрением и распространением в южном направлении не вышедшей на поверхность магмы. Возможность такой миграции подтверждена анализом сейсмических записей начала ТТИ-50 [Caudron et al., 2015]. Это предположение созвучно с интерпретацией сейсмичности, наблюдавшейся примерно в этой же зоне в ходе Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. (БТТИ) при развитии провала в вершинной

кальдере Плоского Толбачика, вызванного оттоком магмы [Большое ..., 1984]. Другой возможной причиной выявленной сейсмической активности может являться изменение локального поля напряжений в результате извержения. 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 Т06, 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. 8. Оба представленных события имеют энергетический класс  $K_S > 5$ , амплитуда их колебаний превышает уровень вулканического дрожания, и поэтому землетрясения выделяются без применения фильтра. Такие малые значения  $T_{S-P}$  означают, что землетрясения удалены от станции Т06 на расстояние 3–4 км, что  $\sim$  в 2 раза меньше расстояния до эруптивной трещины. Для этих событий станция Т06 являлась ближайшей к эпицентру и, соответственно, определяющей при расчете координат и времени в очаге. Поэтому нет оснований сомневаться в существовании рассматриваемого кластера. Кроме локализованных в зоне *II* событий в записях станции Т06 присутствует значительное количество аналогичных, но более слабых землетрясений, определить положение которых было невозможно. Однако, учитывая схожесть

волновых форм, можно утверждать, что и эти совсем слабые события скорее всего тоже относятся к группе *II*. К сожалению, начало ТТИ-50 (конец ноября 2012 г. – начало января 2013 г.) в аспекте организации дополнительных сейсмологических наблюдений было упущено, поэтому сейчас нельзя ничего сказать о процессе формирования и поведении сейсмогенерирующей структуры *II* в самый интересный период времени – в начале эруптивного процесса.

Группа *III* – сгущение эпицентров в северо-восточной части вулкана Плоский Толбачик. Прорабатывается диапазон глубин до 17 км. Максимальный зарегистрированный класс  $K_S = 6.2$ . Группа *III* соответствует пересечению стратовулкана глубинным разломом. В работе [Caudron et al., 2015] показано, что примерно на 20 часов раньше объявленного момента извержения севернее вулкана Плоский Толбачик началась вертикальная миграция магмы, которая затем сменилась сублатеральной миграцией в южном направлении. Затем этот сектор постройки вулкана Плоский Толбачик проявил сейсмическую активность в начале ТТИ-50 (см. рис. 2б). По нашему мнению, временная сеть, возможно, выявила сейсмогенерирующую структуру *III*, маркирующую область внедрения глубинных базальтов под постройку вулкана Плоский Толбачик.

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 (см. рис. 5а), после добавления в обработку временных станций компактизировалось и переместилось под западную часть вулканического массива Зимина (см. рис. 5б, рис. 7). Поэтому мы предлагаем рассматривать события, ранее зарегистрированные в указанной области региональной сетью, относящимися не к Плоскому Толбачику, а к вулканическому массиву 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  $K_S = 8.5$ .

Вулкан Зимина требует обратить на себя более пристальное внимание в контексте оценки вулканоопасности. Это малоизученный массив из трех стратовулканов (см. рис. 1), который условно разделяют на восточную часть (разрушенный реликт плейстоценового вулкана) и более молодую западную структуру времён позднего плейстоцена – голоцена, постройки двух ее стратовулканов осложнены экструзиями андезидацитов и дацитов. Предыдущая кратковременная сейсмическая

активизация имела место в августе–сентябре 2006 г. (более 70 землетрясений с  $K_S = 3–8$ ). Тогда землетрясения были в основном сосредоточены на глубине 3–5 км. Активизация 2012–2013 гг. показывает сейсмическую проработку достаточно большого диапазона глубин, что может быть связано с активизацией магматических каналов массива Зимина, инициированных теми же глубинными процессами, которые привели к ТТИ-50.

На рис. 2а, рис. 7 эллипсом отмечена область сейсмической активизации, предвалявшей извержение в течение нескольких месяцев, в июле–ноябре 2012 г. на глубине до 5 км под вулканом Плоский Толбачик [Салтыков и др., 2012; Кугаенко и др., 2015б]. В январе–октябре 2013 г. сейсмичность этой области была представлена лишь отдельными разноглубинными событиями без тенденции к группированию, в то время как на периферии вулкана Плоский Толбачик мы выявили сгущения землетрясений (группы *I–III*). Можно говорить об инверсии сейсмичности, имевшей место в ходе ТТИ-50 и связанной, вероятно, с образованием локальных сейсмоактивных объемов среды, инициированных миграцией магмы.

На рис. 7 номером *V* выделена еще одна интересная в сейсмическом отношении область – район так называемой Толудской эпицентральной зоны (ТЭЗ). ТЭЗ обсуждалась ранее в ходе исследований сейсмичности БТТИ: ее сейсмическая активность в 1975 г. связывается с оттоком базальтов на малых глубинах из-под вулкана Плоский Толбачик [Большое ..., 1984]. ТЭЗ занимает юго-восточный сектор Ключевской группы вулканов и пространственно соответствует обширной долине реки Толуд, где отсутствуют поверхностные проявления позднеголоценового вулканизма, однако регистрируются землетрясения с глубиной до 20–30 км. (Отметим, что в работе [Большое ..., 1984] под ТЭЗ подразумевалась более обширная зона.) В работе [Ермаков и др., 2014] сейсмическая активность ТЭЗ связывается с образованием не вышедших на поверхность интрузий. Новым результатом, полученным по данным временной сети, является ярко выраженная группируемость эпицентров землетрясений в ТЭЗ. Причем кластеры землетрясений очерчивают дугообразные структуры, не описанные ранее. Такая особенность ТЭЗ требует специально спланированных исследований сейсмичности и глубинного строения. Следует также отметить, что под северо-восточным склоном вулкана Большая Удина зафиксирована небольшая компактная группа слабых землетрясений, и это свидетельствует о его сейсмической активности. Обратим внимание на выделенную эллипсом на рис. 6 область Толудских землетрясений 2012 г.: наиболее сильные землетрясения ТЭЗ с глубиной очагов больше 10 км произошли именно в эпицентральной области.

**Соотношение числа событий, зарегистрированных временной и региональной сетями**

На рис. 9 приведены кумулятивные графики числа землетрясений, локализованных временной и региональной сетями, в зависимости от нижнего энергетического порога используемых событий. 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. Согласно фактографической базе данных КФ ГС РАН “Активность вулканов Камчатки” ([www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm](http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm)) уровень надежной регистрации региональной сети для района ТТИ-50 составляет  $K_S = 4.9$ .

График, отражающий результаты детального мониторинга зоны извержения, уже с  $K_S = 6.5$  проходит выше кривой, построенной для региональной сети (см. рис. 9). С уменьшением  $K_S$  разрыв между графиками увеличивается. Здесь следует отметить, что рассчитывая энергетический класс с использованием фильтрации волновых форм, мы, возможно, теряли часть полезного сигнала и в результате получали заниженные энергетические значения, которые можно рассматривать как нижние пороговые оценки  $K_S$ . С учетом этого реальный график повторяемости для временной сети на рис. 9 должен пройти еще выше. Это свидетельствует о том, что для рассматриваемого района представительность региональной сети значительно завышена. Действительно, уровень надежной регистрации этого района оценивался для спокойного периода в отсутствие извержений и поэтому не отражает реальные возможности системы сейсмического мониторинга при интенсивном вулканическом дрожании. Встает вопрос переопределения этого параметра для южной части Ключевской группы вулканов. Также необходимо поднять вопрос о более активном применении фильтрации при рутинной обработке, что позволит обнаруживать

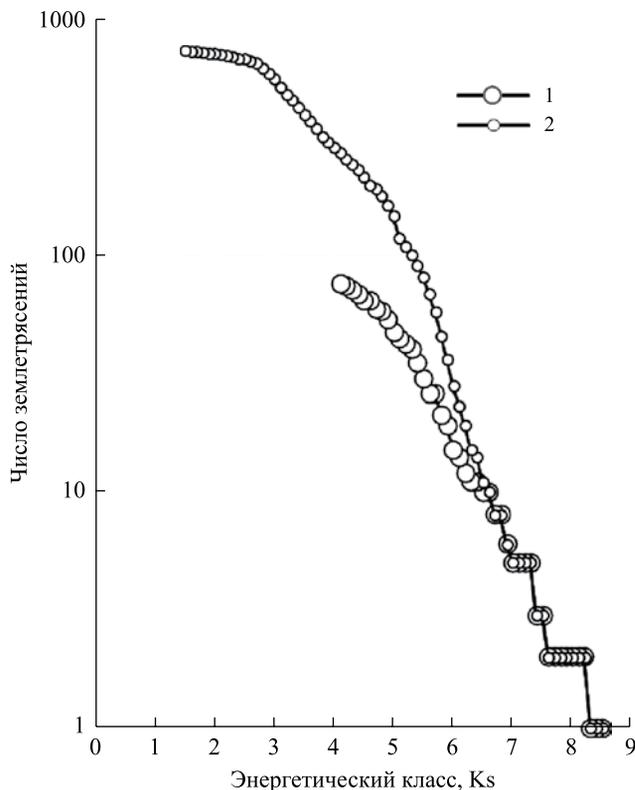


Рис. 9. Кумулятивные графики числа землетрясений, зарегистрированных региональной (1) и временной (2) сетями с 06.01.2013 г. по 10.10.2013 г.

и обрабатывать больше локальных слабых землетрясений в условиях помех. При этом следует обратить внимание на разработку новых методик по корректной оценке энергетических параметров сейсмических событий на более высоких частотах.

**Завершающий этап ТТИ-50**

Временными сейсмическими станциями записан также завершающий этап ТТИ-50.

В августе 2013 г. заключительная стадия ТТИ-50 ярко проявилась в резком снижении интенсивности вулканического дрожания. На рис. 10 приведен

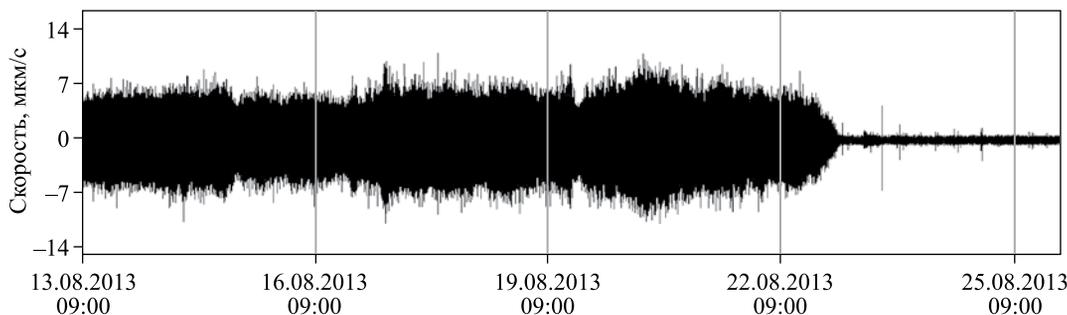


Рис. 10. Запись вулканического дрожания временной сейсмостанцией Т06, соответствующая завершению ТТИ-50 (вертикальный канал, частотный диапазон 0.5–2.0 Гц).

фрагмент записи сейсмостанции Т06 с 13 по 27 августа 2013 г. Оценка дисперсии сейсмического сигнала в полосе частот 0.5–2.0 Гц (что соответствует диапазону максимального вулканического дрожания в ходе ТТИ-50) показала, что энергия вулканического дрожания упала в 200–300 раз, а амплитуда, соответственно, в 14–18 раз. Процесс угасания дрожания занял ~12 часов, т.е. можно говорить о том, что извержение стремительно завершилось 23.08.2013 г. В августе–сентябре были вновь отмечены кратковременные эпизоды вулканического дрожания, но оно уже не возобновлялось с прежней интенсивностью (см. рис. 3а).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В январе–октябре 2013 г. в южной части Ключевской группы вулканов работала временная локальная сеть автономных сейсмических станций Guralp SMG-6TD, целью которой являлось исследование сейсмичности, сопровождавшей Трещинное Толбачинское извержение, на более низком энергетическом уровне, чем это позволяет региональная сеть.

В целях выделения слабых сейсмических событий на фоне интенсивного вулканического дрожания был оценен его частотный диапазон. Он составил 0.5–20 Гц с максимумом на частоте 1–2 Гц. Исходя из этого было признано целесообразным вести обработку локальных землетрясений в высокочастотном диапазоне спектра сейсмической записи, в стороне от спектрального максимума вулканического дрожания, с применением полосовой фильтрации, которая осуществлялась преимущественно в частотном диапазоне 8–16 Гц. В результате локализовано более 700 землетрясений, что на порядок превышает число сейсмических событий по данным региональной сети.

Результаты работы временной локальной сети указывают на то, что для района ТТИ-50 и вулкана Плоский Толбачик представительность региональной сети в условиях интенсивного вулканического дрожания завышена, а гипоцентры землетрясений во многих случаях значительно смещаются при включении в обработку временных станций. Решение этих проблем видится в проведении соответствующих методических работ и организации дополнительных постоянных сейсмических станций на юге Ключевской группы вулканов. Особой актуальностью обладает уточнение скоростной модели этой территории.

Обнаружено, что сейсмичность в районе вулкана Плоский Толбачик в ходе ТТИ-50 была неравномерна. Выявлены пространственно разнесенные кластеры землетрясений по периферии вулкана Плоский Толбачик, один из которых соответствует действовавшему эруптивному центру ТТИ-50, а два других не связаны с поверхностными

проявлениями вулканизма, однако могут рассматриваться как отражение миграции не вышедшей на поверхность магмы. При этом область предварявшей ТТИ-50 интенсивной малоглубинной сейсмической активизации под вулканом Плоский Толбачик в ходе извержения потеряла активность. Наблюдаемая инверсия сейсмической активности в этой области, под стратовулканом, иллюстрирует динамику магматической питающей системы. Перед ТТИ-50 формирование малоглубинной области концентрации магмы в течение 4–5 месяцев сопровождалось предваряющими извержение деформациями земной коры и сейсмической активизацией, усилившейся в самом начале ТТИ-50 при развитии питающей извержение дайки и, возможно, других даек, внедрявшихся в постройку Плоского Толбачика. Сам же процесс многомесячного истечения магмы, напротив, не сопровождался повышенной сейсмической активностью ни в зоне предполагаемого периферического магматического очага под стратовулканом, ни в зоне извержения. Аналогичная ситуация практически асейсмичного истечения базальтов наблюдалась, например, и в ходе деятельности Южного прорыва БТТИ [Большое ..., 1984; Горельчик и др., 1987].

Зона глубинного разлома, питающего ареальные зоны к югу и северу от вулкана Плоский Толбачик, в ходе ТТИ-50 сейсмической активности не проявила. Сейсмичность непосредственно в зоне эруптивной трещины ТТИ-50 проявлялась очень слабо и не доминировала в исследуемом районе. Неожиданным результатом работы временной сети является выявление малоглубинной сейсмоактивной области, располагающейся к югу от постройки вулкана Плоский Толбачик и пространственно не связанной с районом извержения.

Сохранилось неравномерное (асимметричное) пространственное распределение сейсмических событий относительно осевой линии глубинного разлома Толбачинского Дола: землетрясения концентрируются к востоку от разлома в юго-восточном секторе Ключевской группы вулканов.

В районе вулканического массива Зимины и Толудской эпицентральной зоны выявлены необычные кластеры землетрясений кольцевой и дугообразной формы. Такая особенность распределения сейсмических событий обнаружена в районе Ключевской группы вулканов впервые и не является по данным региональной сети станций. Вероятно, землетрясения маркируют не выявленные ранее кольцевые тектонические структуры. Эта сейсмичность требует дополнительных исследований.

Группирование землетрясений в западной части вулканического массива Зимины свидетельствует об эпизоде сейсмической активизации

этой группы вулканов. В связи с тем, что сейсмичность зарегистрирована в диапазоне глубин до 17 км, можно предположить, что это — проявление активности магматической питающей системы, возможно, в связи с инъекцией глубинного вещества. Совпадение во времени этого эпизода активизации с ТТИ-50 позволяет рассматривать его как результат того же процесса в магматической питающей системе Ключевской группы вулканов, который инициировал извержение Толбачика. В особенности любопытна форма сейсмической активизации в виде кольцевого кластера, что может иллюстрировать развитие круговой дайки. Учитывая чувствительность магматической системы массива Зимина к геодинамическим процессам и состав его изверженных пород (андезиты, дациты), необходимо рассматривать Зимину как отдельную потенциально опасную структуру и обеспечить сейсмический мониторинг ее состояния наряду с другими активными вулканами.

Целью данной публикации является первое общее представление сейсмологического материала, полученного в результате организации дополнительных наблюдений за сейсмичностью ТТИ-50. По результатам обработки материалов временной сети составлен каталог из 731 землетрясения с  $K_S = 1.5-8.5$  (локальная магнитуда  $M_L = 0-3.5$ ). Применение современной цифровой аппаратуры (сейсмометров Guralp CMG-6TD с точной привязкой времени по GPS) обеспечило высокое качество сейсмических записей. Эти данные в перспективе могут быть использованы как для дальнейших исследований данного извержения и сопровождавшей его сейсмичности, так и в методических целях для выяснения качества и возможностей работы региональной сети сейсмических станций в южной части Ключевской группы вулканов.

Авторы благодарят всех, кто оказал помощь на этапе организации наблюдений и при обработке сейсмических записей: **Чеброва В.Н.**, Коновалову А.А., Чеброва Д.В., Токарева А.В., Чемарева А.С., Муравьева Я.Д., водителей: Пикуну С.И., Утешева И.А., Щеголькова А.А.

Авторы выражают признательность анонимным рецензентам, которые проявили к работе большое внимание и неформальное отношение.

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).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. 637 с.
- Гонтовая Л.И., Ермаков В.А., Сеньюков С.Л., Назарова З.А.* К вопросу о тектономагматической модели вулкана Плоский Толбачик и его ареальных зон // Вулканизм и связанные с ним процессы. XVIII ежегодная научная конференция. Петропавловск-Камчатский, 03.2015 г. Сборник тезисов докладов. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 143–145.
- Горельчик В.И., Зобин В.М., Токарев П.И.* Сейсмичность вулканов // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 61–77.
- 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.
- Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В.* Первые количественные оценки параметров Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по данным аэрофотограмметрических наблюдений // Вулканология и сейсмология. 2014. № 5. С. 3–11.
- Дрознин Д.В., Дрознина С.Я.* Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.
- Дрознин В.А., Дрознина С.Я.* Пространственно-временное распределение землетрясений при Трещинном Толбачинском извержении им. 50-летия ИВиС // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 185–193.
- Ермаков В.А., Важеевская О.А.* Вулканы Острый и Плоский Толбачик // Бюлл. вулканол. станций. 1973. № 49. С. 43–53.
- Ермаков В.А., Гонтовая Л.И., Сеньюков С.Л.* Предварительная модель нового Толбачинского извержения (50 лет ИВиС), полученная по комплексу геолого-геофизических данных // Материалы региональной научной конференции “Вулканизм и связанные с ним процессы”, посвященной Дню вулканолога, 29–30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 63–72.
- Ермаков В.А., Гонтовая Л.И., Сеньюков С.Л.* Тектонические условия и магматические источники нового Толбачинского трещинного извержения (п-ов Камчатка) // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 1. С. 5–33.
- Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Иванова Е.И. и др.* Толудская серия землетрясений 29.11–07.12.2012 г., сопровождавшая начало Трещинного Толбачинского извержения // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Пятой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 27 сентября – 3 октября 2015 г. Обнинск: ГС РАН, 2015а. С. 172–177.
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю.* Особенности глубинного строения

- района Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. по данным микросейсмического зондирования // Вулканология и сейсмология. 2013. № 5. С. 23–39.
- 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. 2015б. № 4. С. 20–40.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.* Об аномалии сейсмического режима, предвалявшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 16–19.
- 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.
- Сенюков С.Л.* Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.
- Сенюков С.Л., Нурждина И.Н., Дрознина С.Я. и др.* Сейсмичность района вулкана Плоский Толбачик в 2000–2013 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 103–108.
- Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Сенюков С.Л.* Динамика поля скоростей Северной группы вулканов Камчатки и ее связь с процессами развития вулканической активности // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 39–55.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.* Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.
- Федотов С.А., Уткин И.С., Уткина Л.И.* Периферический магматический очаг базальтового вулкана Плоский Толбачик, Камчатка: деятельность, положение и глубина, размеры и их изменения по данным о расходе магм // Вулканология и сейсмология. 2011. № 6. С. 3–20.
- Флеров Г.Б., Мелекесцев И.В.* Извержение 2012–2013 гг. как результат продолжающейся активности Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов (Ключевская группа вулканов, Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 139–144.
- Флеров Г.Б., Ананьев В.В., Пономарев Г.П.* Петрогенез пород вулканов Острога и Плоского Толбачиков и соотношение вулканических проявлений базальтовой и трахибазальтовой магм на территории Толбачинского Дола (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 15–35.
- Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Низкоус И.В.* Магматические очаги под Ключевской группой вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 32–54.
- Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.
- Belousov A., Belousova M., Edwards B. et al.* Overview of the precursors and dynamics of the 2012–13 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2015. V. 307. P. 22–37. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.04.009
- Caudron C., Taisne B., Kugaenko Yu., Saltykov V.* Magma migration at the onset of the 2012–13 Tolbachik eruption revealed by Seismic Amplitude Ratio Analyses // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2015. V. 307. P. 60–66. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.09.010
- Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L. et al.* Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2013. V. 263. P. 75–91. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.10.014.
- Nizkous I., Kissing E., Gontovaya L. et al.* Correlation of Kamchatka Lithosphere Velocity Anomalies With Subduction Processes // Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region / Eds J. Eichelberger et al. Geophysical Monograph Series 172. Washington: AGU, 2007. P. 97–106.
- Taisne B., Brenguier F., Shapiro N.M., Ferrazzini V.* Imaging the dynamics of magma propagation using radiated seismic intensity // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L04304. DOI:10.1029/2010GL046068.