



УДК 550.34:551.21

Ю. А. Кугаенко¹, В. А. Салтыков¹, И. Ф. Абкадыров²,
П. В. Воропаев¹, А. А. Коновалова¹

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

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: aifgf@mail.ru

Результаты исследований сейсмичности района Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по данным временной локальной сети

Представлены результаты временных сейсмологических наблюдений, проведённых в январе–октябре 2013 г. в Южной части Ключевской группы вулканов с целью исследования сейсмичности, сопровождавшей Трещинное Толбачинское извержение. По результатам обработки составлен каталог из более чем 700 землетрясения с $M_L = 0 - 3,5$ ($K_S = 1,5 - 8,5$). Обнаружено, что сейсмичность в районе вулкана Плоский Толбачик неравномерна. Выявлены пространственно разнесённые кластеры землетрясений на периферии вулкана Плоский Толбачик, в районе вулканического массива Зимина и Толудской эпицентральной зоне, а также непосредственно в районе извержения. Область предварявшей извержение малоглубинной сейсмической активизации под вулканом Плоский Толбачик в ходе извержения активность не проявляла.

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) [2, 9]. Это одно из крупнейших базальтовых извержений, отмеченных в последние десятилетия на территории России. 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 вулкана Плоский Толбачик и прилегающий к нему северный край Толбачинского Дола (южной ветви Толбачинской зоны ареального вулканизма). Извержение в основном закончилось в конце августа 2013 г.

В представленной статье рассматриваются результаты детальных исследований сейсмичности, сопровождавшей ТТИ-50, по данным дополнительных временных наблюдений (январь–октябрь 2013 г.).

Организация наблюдений

Камчатская региональная сеть сейсмических станций [15] в районе Ключевской группы вулканов неравномерна (рис. 1). В её южной части (южнее вулканов Острый и Плоский Толбачик) расположена лишь одна региональная сейсмическая станция КМН. В этой конфигурации сеть обеспечивает

уровень надёжной регистрации землетрясений Ключевской группы вулканов $K_S = 4,5 - 5,0$.

Для каталога Ключевской группы вулканов в 2010–2013 гг. (когда для обработки землетрясений стала использоваться DIMAS [4]) ошибки определения составляют для эпицентра $3,5 \pm 2,0$, для глубины $3,1 \pm 1,6$.

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 (рис. 1, табл. 1). Наблюдения были организованы в начале января 2013 г. силами Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН) при поддержке Президиума РАН. Временная сеть состояла из широкополосных трехкомпонентных сейсмометров Guralp CMG-6TD. К началу ТТИ-50 сейсмические станции региональной сети в районе извержения были оснащены сейсмометрами СМ-3 с периодом собственных колебаний $T_c = 2$ с и, в некоторых случаях, их более высокочастотной модификацией СМ-3 вч. На врезке к рис. 1 для сравнения возможностей регистрации сейсмических сигналов проиллюстрированы технические характеристики аппаратуры региональной и временной сетей.

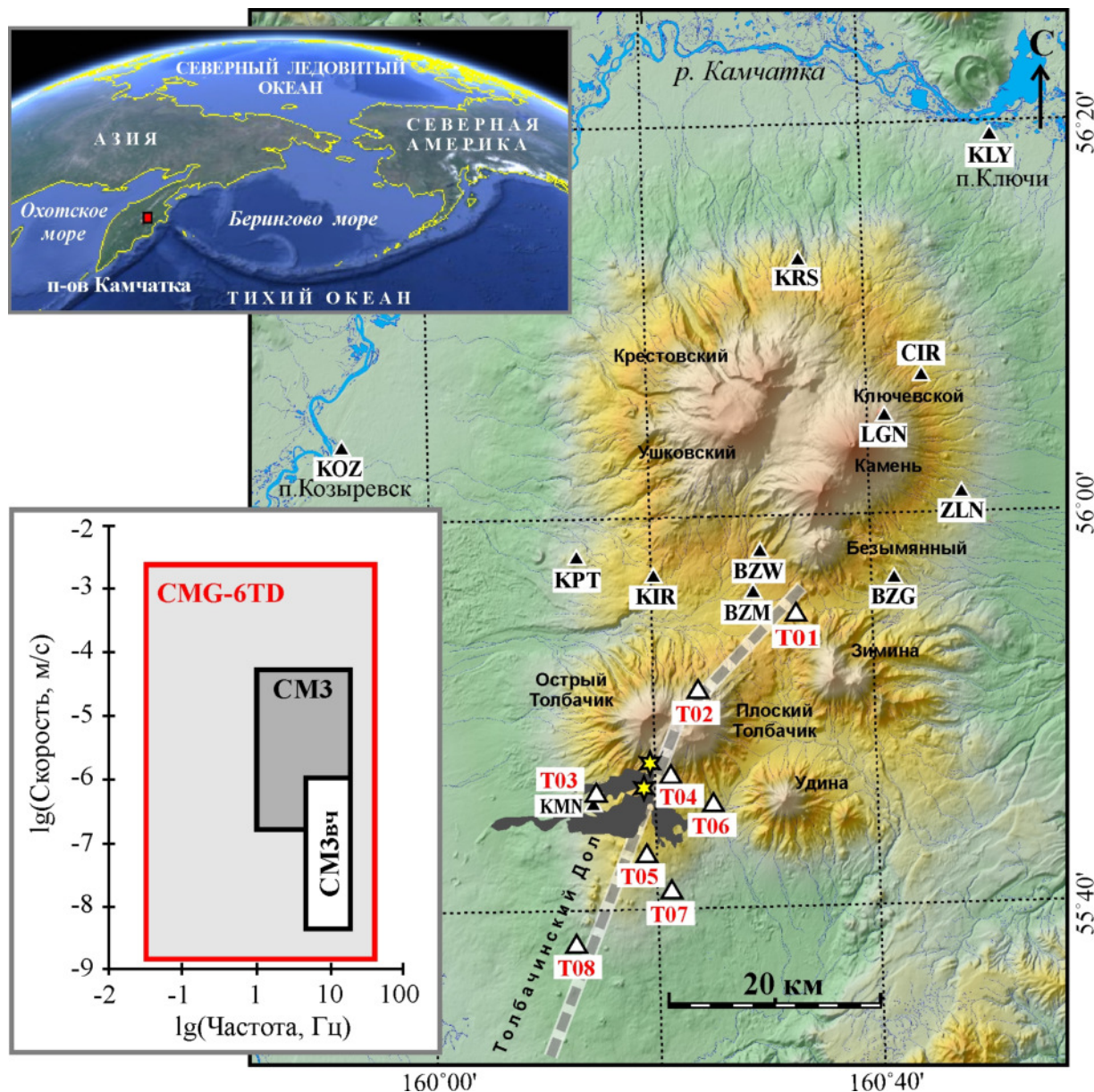


Рис. 1. Сейсмические станции в районе Ключевской группы вулканов. На верхней врезке положение рассматриваемого района отмечено белым прямоугольником. Тёмными и светлыми треугольниками обозначены соответственно региональные и временные сейсмические станции. Диапазоны регистрируемых ими сейсмических сигналов 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). Эллипсом выделена область сейсмической активизации, предварявшей ТТИ-50 в августе-ноябре 2012 г.

Особенности организации обработки землетрясений

ТТИ-50 сопровождалось интенсивным вулканическим дрожанием, затруднявшим выделение землетрясений из сейсмической записи. Вулканическое дрожание фиксировалось на протяжении всего времени извержения (рис. 2а). На рис. 2б показа-

ны 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 достигает 60 дБ, что соответствует увели-

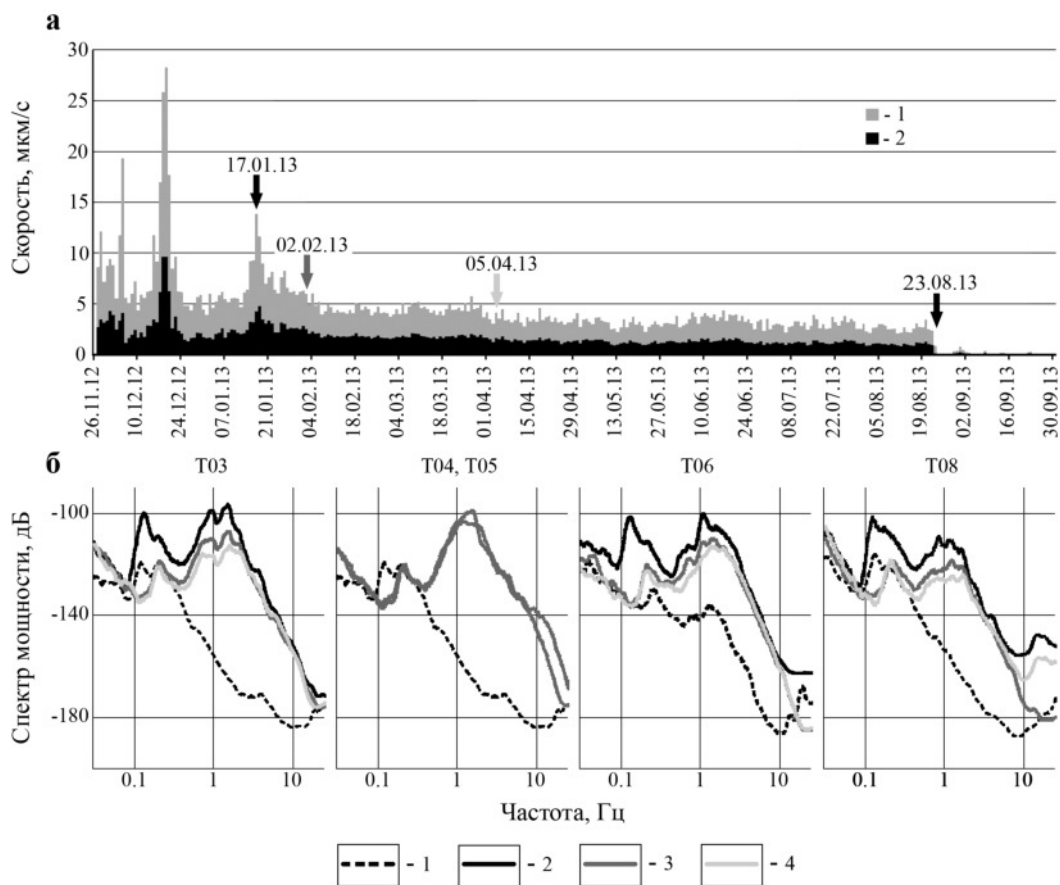


Рис. 2. Вулканическое дрожание ТТИ-50. а — изменение интенсивности дрожания в ходе ТТИ-50 по данным региональной станции КМН: максимальная (1) и средняя (2) амплитуда в течение суток; б — примеры спектров сейсмических записей на станциях временной сети: 1 — без дрожания, 2, 3 и 4 — 17 января 2013 г., 2 февраля 2013 г. и 5 апреля 2013 г. соответственно (эти дни отмечены стрелками на рис. 2а). Также стрелкой отмечено 23 августа 2013 г., когда ТТИ-50 в основном прекратилось.

Таблица 1. Сведения о сейсмических станциях временной локальной сети в районе Трещинного Толбачинского извержения в 2013 г.

Код станции	Координаты и высота н. у. м.			Период работы		Расстояние до извержения, км
	φ, ° N	λ, ° E	h, м	начало	конец	
T01	55,912	160,538	1633	07.01.2013 г.	20.04.2013 г.	22
T02	55,872	160,367	1596	22.01.2013 г.	23.05.2013 г.	12
T03	55,757	160,248	1053	07.01.2013 г.	06.05.2013 г.	4,5
T04	55,777	160,345	1757	23.01.2013 г.	08.02.2013 г.	1,5
T05	55,725	160,320	1280	24.01.2013 г.	15.02.2013 г.	4,5
T06	55,750	160,422	988	06.01.2013 г.	10.10.2013 г.	7
T07	55,693	160,308	1032	23.05.2013 г.	09.10.2013 г.	8
T08	55,642	160,217	651	07.01.2013 г.	23.05.2013 г.	15

чению амплитуды \sim в 10^3 раз. Исходя из этого был выбран частотный диапазон обработки локальных землетрясений. Для выделения сейсмических событий применялся полосовой фильтр Баттерворта второго порядка в полосе частот 8–16 Гц. Отметим, что при оперативной обработке землетрясений в КФ ГС РАН используется фильтрация 1–6 Гц. На рис. 3 приведены примеры выделения записей

локальных землетрясений в условиях интенсивного вулканического дрожания. Продемонстрирована эффективность применения более высокочастотного фильтра (8–16 Гц), чем это принято при оперативной обработке землетрясений (1–6 Гц).

В остальном обработка соответствовала методике, применяющейся в КФ ГС РАН для обработки землетрясений Ключевской группы вулканов: ис-

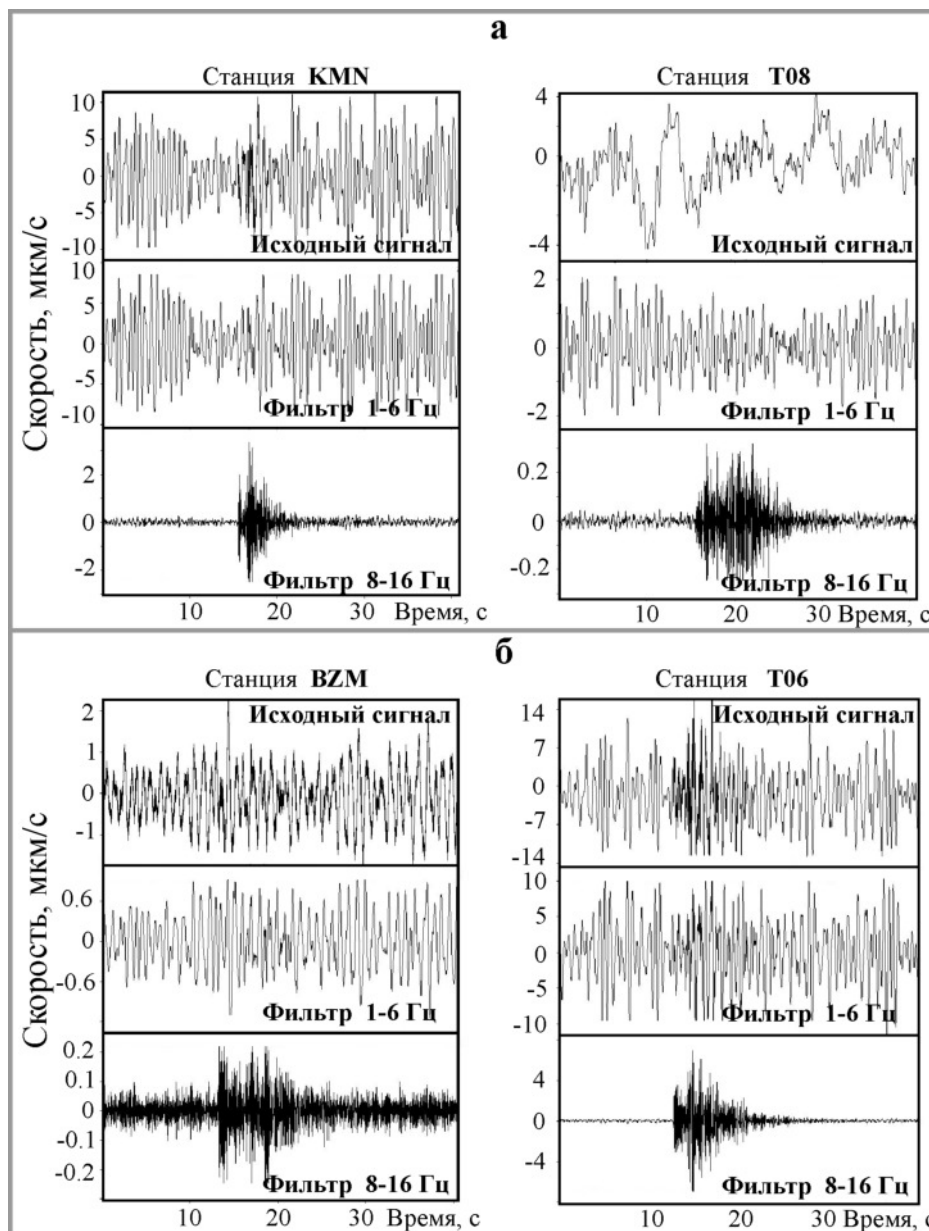


Рис. 3. Примеры сейсмических записей не локализованных региональной сетью землетрясений в различных частотных диапазонах. а — локальное землетрясение из зоны извержения 7 февраля 2012 г. 11:13 UTC $K_S = 5,0$; — б — локальное землетрясение под северо-восточным склоном вулкана Плоский Толбачик 12 февраля 2012 г. 15:50 UTC $K_S = 5,6$. Приведены записи вертикальных каналов станций региональной (слева) и временной сети (справа).

пользовалась интерактивная программа DIMAS [4] и локальный годограф на базе эмпирической скоростной модели, описанной в работе [10].

Результаты обработки

Обработка производилась в два этапа.

1 этап. Результаты первого этапа, в ходе которого был проведён перерасчет гипоцентров землетрясений, зарегистрированных региональной сетью в Толбачинской вулканической зоне, с привлечением дополнительных данных, полученных временными станциями, представлен на рис. 4. Для указанного промежутка времени для района, представленно-

го на рис. 4, в диапазоне глубин до 30 км из каталога Ключевской группы вулканов выделено 75 событий с энергетическим классом $K_S = 4,2 - 8,5$. Энергетический класс этих событий не переопределялся. Сходной чертой обеих карт и важной особенностью трещинного Толбачинского извержения (в период с января по август 2013 г.) является отсутствие землетрясений $K_S = 5 - 8$, 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. Возможные

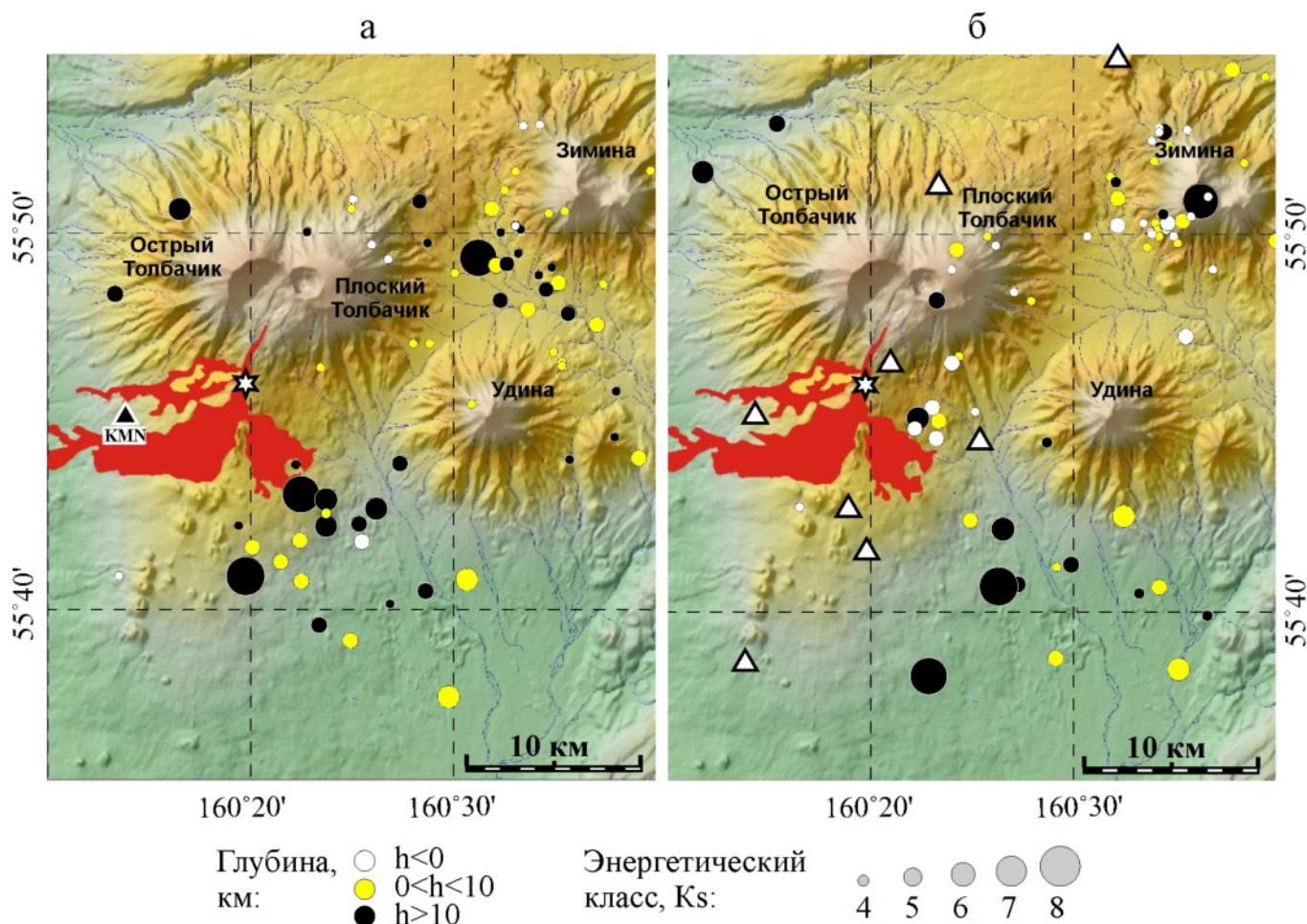


Рис. 4. Рис. 4. Эпицентры землетрясений в районе вулканического массива Толбачик и Толбачинского Дола с 6 января 2013 г. по 10 октября 2013 г. а — по данным региональной сети сейсмических станций (каталог КФ ГС РАН для Ключевой группы вулканов), б — те же землетрясения при дополнении региональной сети 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).

причины несовпадения гипоцентрии: неравномерность региональной сети сейсмических станций и недостаточное знание скоростных особенностей среды в Южной части Ключевой группы вулканов.

Для наборов данных, исследовавшихся в ходе I этапа и представленных на рис. 4, ошибки определения составили:

– для региональной сети: по эпицентру $3,8 \pm 1,7$, по глубине $3,3 \pm 1,7$;

– с привлечением временной сети: по эпицентру $1,8 \pm 1,6$, по глубине $1,7 \pm 1,3$.

II этап. В ходе второго этапа обработки были определены гипоцентры и энергетический класс K_S всех остальных локальных землетрясений, зарегистрированных временными станциями. В ряде случаев при необходимости в обработку включались записи ближайших к извержению региональных сейсмостанций. Во временном интервале с 6 января 2013 г. по 10 октября 2013 г. локализо-

вано более 700 землетрясений, что на порядок превышает число сейсмических событий, зарегистрированных региональной сетью. Причиной обнаружения большего числа событий явилось использование полосовой фильтрации в частотном диапазоне 8–16 Гц, в стороне от спектрального максимума вулканического дрожания. На рис. 5 представлена карта эпицентров землетрясений по данным временной сети. Ошибки определения составляют по эпицентру $1,4 \pm 1,8$, по глубине $1,2 \pm 1,2$.

Области пространственной концентрации землетрясений

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, установ-

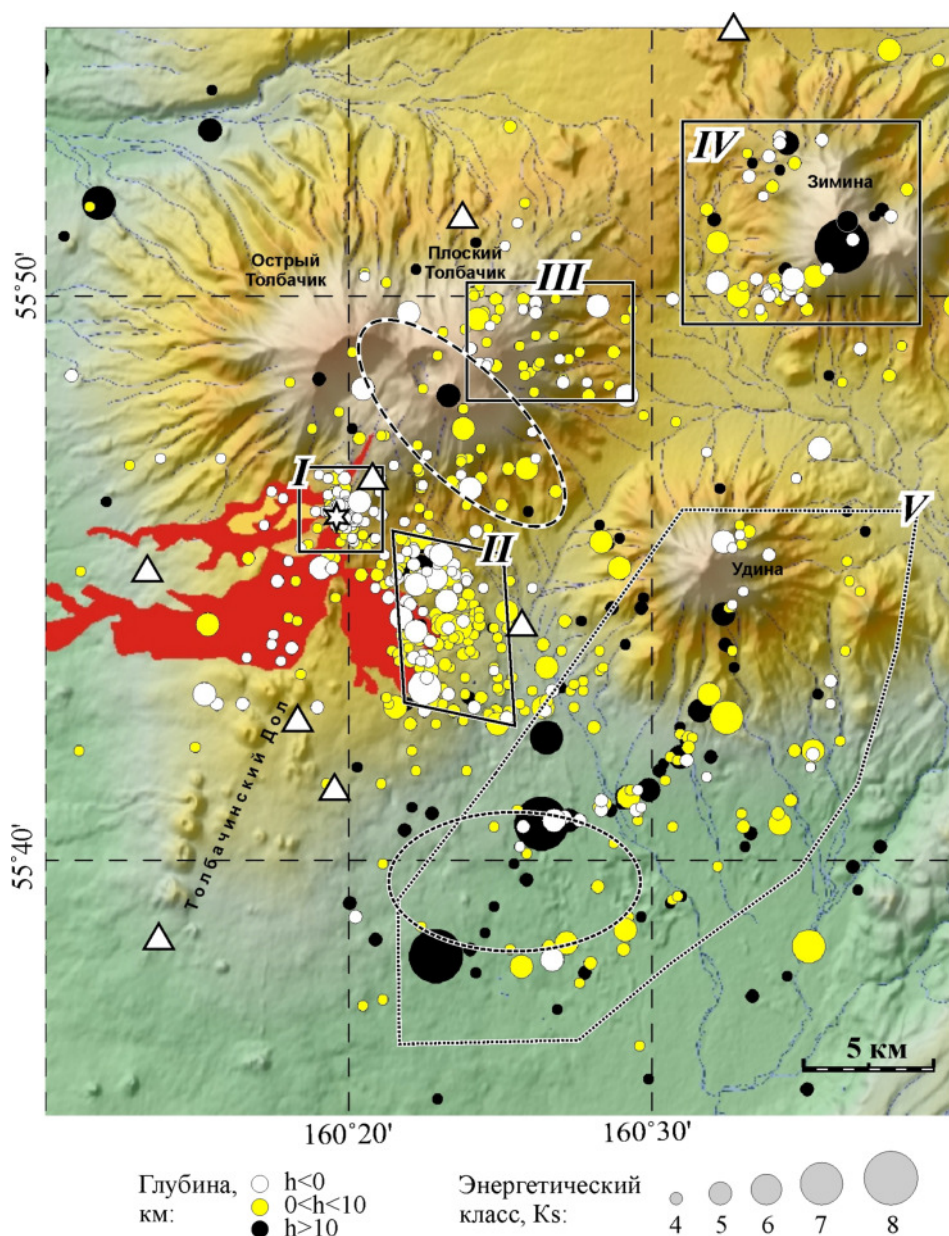


Рис. 5. Эпицентры землетрясений, сопровождавших ТТИ-50 в период работы временной сети сейсмических станций, с 6 января 2013 г. по 10 октября 2013 г. Номера вулканов и временные сейсмические станции (треугольники) соответствуют рис. 1. На схему нанесены лавовые поля ТТИ-50 (темная заливка) и эруптивный центр извержения, сохранявший активность во время работы временной сети (звезда). Эллипсами выделены область сейсмической активизации, предворявшей ТТИ-50 в августе–ноябре 2012 г., и Толудский рой землетрясений (рис. 1). Зоны **I–V** обсуждаются в тексте.

ленных 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. Энергетический класс K_S достигает значений 6 – 6,5, заглубление, в основном, до 2 км. Единичные землетрясения имеют глубину от 10 до 20 км, но они произошли уже после завершения ТТИ-50. Группа **II** пространственно тянется от вулкана Плоский Тол-

бачик к области Толудского роя землетрясений, произошедшего в первые дни ТТИ-50 [7]. Вероятно, эта сейсмичность связана с внедрением и распространением не вышедшей на поверхность магмы (не реализовавшийся прорыв извержения) по лучам «структурного веера» [Ермаков и др., 2014].

Группа **III** – сгущение эпицентров на северо-восточном склоне вулкана Плоский Толбачик. Прорабатывается диапазон глубин до 17 км. Максимальный зарегистрированный класс $K_S = 6,2$. Отметим, что этот сектор постройки вулкана Плоский Толбачик проявил активность в период формирова-

ния двух пространственно разобщенных облаков землетрясений в начале ТТИ-50. Отметим, что группа **III** соответствует пересечению Плоского Толбачика глубинным разломом. Возможно, это тоже проявление «структурного веера».

Группа **IV** относится к западной части недействующего вулканического массива Зими́на. Отметим, что локализованное по данным региональной сети облако землетрясений, рассеянных между вулканами Плоский Толбачик, Удина и Зими́на (рис. 4а), после добавления в обработку временных станций компактизировалось и переместилось под западную часть вулканического массива Зими́на (рис. 4б, 5). Поэтому мы предлагаем рассматривать события, ранее зарегистрированные в указанной области региональной сетью, относящимися не к Плоскому Толбачику, а к вулканическому массиву Зими́на. 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 Зими́на землетрясение с $K_S = 8,5$.

Вулкан Зими́на требует обратить на себя более пристальное внимание в контексте оценки вулканоопасности. Это малоизученный массив из трёх стратовулканов (рис. 1), который условно разделяют на восточную часть (разрушенный реликт плейстоценового вулкана) и более молодую западную структуру времён позднего плейстоцена – голоцена, постройки двух её стратовулканов осложнены экзотризиями 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 достаточного большого диапазона глубин, что может быть связано с активизацией магматических каналов массива Зими́на, инициированных теми же глубинными процессами, которые привели к ТТИ-50.

На рис. 5 эллипсом отмечена область сейсмической активизации, предварявшей извержение в течение нескольких месяцев, в июле–ноябре 2012 г. на глубине до 5 км под вулканом Плоский Толбачик [8]. 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 миграцией магмы.

На рис. 5 номером **V** выделена ещё 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., её сейсмическая активность в 1975 г. связывается с оттоком базальтов на малых глубинах из-под вулкана Плоский Толбачик [1]. ТЭЗ занимает юго-восточный сектор Ключевской группы вулканов и пространственно соответствует обширной долине реки Толуд, где отсутствуют поверхностные проявления современного вулканизма, однако регистрируются землетрясения с глубиной до 20–30 км. (Отметим, что в [1] под ТЭЗ подразумевалась более обширная зона). Новым результатом, полученным по данным временной сети, является ярко выраженная группируемость землетрясений в ТЭЗ. Причём кластеры землетрясений очерчивают дугообразные структуры. Такая особенность требует специально спланированных исследований сейсмичности и глубинного строения. 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. 5 область Толудского роя: наиболее сильные землетрясения ТЭЗ с глубиной очагов больше 10 км произошли именно в эпицентральной области роя.

Соотношение числа событий, зарегистрированных временной и региональной сетями

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 её уровень надежной регистрации. Однако можно оценить соотношение числа событий, зарегистрированных временной и региональной сетями. Согласно фактографической базе данных КФ ГС РАН «Активность вулканов Камчатки» 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. С уменьшением K_S разрыв между графиками увеличивается. Следовательно, для рассматриваемого района представительность региональной сети значительно завышена и не отражает реальные возможности системы сейсмического мониторинга. Встает вопрос о пересмотре методики определения этого параметра для Южной части Ключевской группы вулканов.

Заключение

В январе–октябре 2013 г. в Южной части Ключевской группы вулканов работала временная локальная сеть автономных сейсмических станций Guralp CMG-6TD, целью которой являлось исследование сейсмичности, сопровождавшей Трещинное Толбачинское извержение, на более низком энерге-

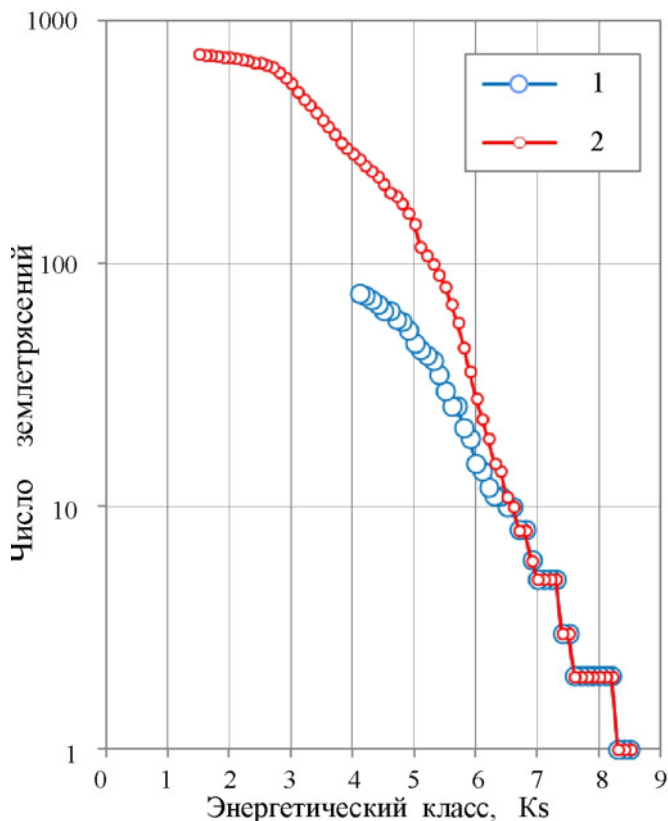


Рис. 6. Рис. 6. Кумулятивный график числа землетрясений, зарегистрированных региональной (1) и временной (2) сетями с 6 января 2013 г. по 10 октября 2013 г.

тическом уровне, чем это позволяет региональная сеть.

Был оценён диапазон вулканического дрожания: 0,5–20 Гц с максимумом на частоте 1–2 Гц. Исходя из этого для массовой обработки локальных землетрясений был выбран частотный диапазон 8–16 Гц. В результате локализовано более 700 землетрясений, что на порядок превышает число сейсмических событий, зарегистрированных региональной сетью.

Результаты работы временной локальной сети указывают на то, что для района ТТИ-50 и вулкана Плоский Толбачик представительность региональной сети завышена, а гипоцентры землетрясений значительно смещаются при включении в обработку временных станций. Решение этой проблемы видится в организации дополнительных сейсмических станций на юге Ключевской группы вулканов и уточнении скоростной модели этой территории.

Обнаружено, что сейсмичность в районе вулкана Плоский Толбачик неравномерна. Выявлены пространственно разнесенные кластеры землетрясений на 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 малоглубинной сейсмической активизации под вулканом Плоский Толбачик в ходе извержения потеряла активность. Наблюдаемая инверсия сейсмической активности иллюстрирует динамику магматической питающей системы. Зона глубинного разлома, питающего ареальные зоны к югу и северу от вулкана Плоский Толбачик, также не проявила сейсмической активности в ходе ТТИ-50.

В районе вулканического массива Зимина и Толудской эпицентральной зоны выявлены необычные кластеры землетрясений, соответствующие круговым и дугообразным структурам. Эта сейсмичность требует дополнительных исследований.

Группирование землетрясений в западной части вулканического массива Зимина свидетельствует об эпизоде сейсмической активизации этой вулканической структуры. 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. Учитывая чувствительность магматической системы массива Зимина к геодинамическим процессам и состав его изверженных пород (андезиты, дациты), необходимо при мониторинге состояния вулканов рассматривать Зимину как отдельную потенциально опасную структуру.

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 13–05–10 033, 13–05–00 117.

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 // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452. № 5. С. 562–566.
3. 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.
4. Дрознин Д. В., Дрознина С. Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.
5. Ермаков В. А., Важеевская О. А. Вулканы Острый и Плоский Толбачик // Бюл. вулк. ст. 1973. № 49. С. 43–53.

6. 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.
7. Кугаенко Ю. А., Салтыков В. А., Воропаев П. В. Анализ сейсмичности, предварявшей Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг. // Землетрясения России в 2012 г. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 82–86
8. Салтыков В. А., Кугаенко Ю. А., Воропаев П. В. Об аномалии сейсмического режима, предварявшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 16–19.
9. Самойленко С. Б., Мельников Д. В., Магуськин М. А. и др. Начало нового трещинного Толбачинского извержения в 2012 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 20–22.
10. Сеньюков С. Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.
11. Сеньюков С. Л., Нуждина 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
12. Федотов С. А. Энергетическая классификация курило-камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
13. Федотов С. А., Жаринов Н. А., Гонтовая Л. И. Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об её извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.
14. 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.
15. 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.