

УДК [551.24+550.34]:551.21

АНАЛИЗ ПОДГОТОВКИ ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ 2012–2013 гг. В ПАРАМЕТРАХ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА АКТИВНОСТИ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ

© 2015 г. Ю. А. Кугаенко, Н. Н. Титков, В. А. Салтыков, П. В. Воропаев

Камчатский филиал Геофизической службы РАН

683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9, e-mail: ku@emsd.ru

Поступила в редакцию 04.08.2014 г.

Проанализированы смещения земной поверхности и сейсмичность перед Трещинным Толбачинским извержением, которое началось на Камчатке 27 ноября 2012 г. По сейсмическим и GPS данным выявлены синхронные, предвещающие извержение аномалии деформаций земной коры и сейсмического режима длительностью около 4 месяцев (апрель–ноябрь 2012 г.). Сейсмическая аномалия представляет собой статистически значимую сейсмическую активизацию низкого энергетического уровня (преимущественно $K_S = 4–6$) под постройкой вулкана Плоский Толбачик на глубине до 5 км. В последние 2–3 недели перед извержением среднесуточные (2000–2011 гг.) скорости потока сейсмических событий и выделения сейсмической энергии были превышены ~ в 40 раз. Деформационные аномалии проявились в перемещении центральной части Ключевской группы вулканов: зарегистрировано сжатие в радиальном по отношению к извержению направлении и растяжение в тангенциальном. К началу извержения относительные деформации достигли $\sim 10^{-7}$. Сопоставимая длительность сейсмической и деформационной аномалий (~4 месяца до извержения) свидетельствует об их общей генетической природе и позволяет отнести их к единому временному масштабу предвестников (согласно принятой терминологии – среднесрочному).

DOI: 10.7868/S0203030615040057

ВВЕДЕНИЕ

27 ноября 2012 г. на Камчатке началось одно из крупнейших извержений, отмеченных в последние десятилетия на территории России, – Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг. им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50) – объем излившейся лавы которого оценивается ~ в 0.55 км^3 [Самойленко и др., 2012; Белоусов, Белоусова, 2013; Волюнец и др., 2013; Гордеев и др., 2013а; Двигало и др., 2014; Ермаков и др., 2014; Edwards et al., 2013]. Это грандиозное, преимущественно лавовое извержение произошло в Южной части Ключевской группы вулканов (рис. 1, рис. 2). ТТИ-50 является ярким примером извержения гавайского типа: в начальной фазе оно сопровождалось умеренными пепловыми выбросами, а в течение всего извержения наблюдались мощные фонтаны лавы и интенсивное излияние жидких лавовых потоков, которые остановились только в конце августа 2013 г.

Начало извержения было оперативно идентифицировано по сейсмическим данным в Камчатском региональном информационно-обрабатывающем центре ГС РАН [Гордеев и др., 2013а; Edwards et al., 2013]. ТТИ-50 началось 27 ноября 2012 г. в 17:15 местного времени (05:15 UTC) с об-

разования поверхностного разлома субмеридионального простирания, вдоль которого впоследствии сосредоточились эруптивные центры извержения. Длина разломной зоны ТТИ-50 составила ~6 км в диапазоне высот от 1500 до 2200 м. Она вспорола как склон вулкана Плоский Толбачик, так и прилегающий к нему северный край Толбачинского Дола (южной ветви Толбачинской зоны ареального вулканизма). Также по сейсмическим данным установлено, что фонтанирование лавы и излияние лавовых потоков началось примерно через три часа после начала формирования разломной зоны [Гордеев и др., 2013а].

ТТИ-50 продолжило ряд голоценовых трещинных извержений Толбачинского Дола, последнее из которых – многоцентровое Большое трещинное Толбачинское извержение 1975–1976 гг. (БТТИ) – было всесторонне изучено камчатскими вулканологами под руководством академика РАН С.А. Федотова [Бюллетень..., 1979; Геологические..., 1978; Большое..., 1984; Федотов, 2003; Федотов и др., 2010, 2011; и др.].

Одним из основных направлений изучения вулканов Камчатки является исследование предвестников извержений [Токарев, 1967, 1976, 1985, 1988; Широков, 1985; Иванов, 2003, 2013; Горельчик и др., 2004; Сторчеус, 2007; Федотов, Жари-

нов, 2007; Широков, Серафимова, 2008; Кугаенко и др., 2009; Гирина, 2012; Сеньюков, 2013; Ji et al., 2013; и др.]. Ключевская группа вулканов всегда являлась объектом пристального внимания ученых из-за высокой эруптивной активности и вулканической опасности. Как показали многолетние работы в этом направлении исследований, сценарии подготовки извержений вулканов Ключевской группы могут быть различны:

— ярко выраженные сейсмические предвестники характерны для эксплозивных извержений вулкана Безымянный [Горшков, 1961; Чубарова и др., 1983; Сеньюков, 2013, Thelen et al., 2010; West, 2013; и др.];

— имеется опыт успешного своевременного выявления предвестниковых ситуаций и прогноза вершинных и побочных извержений вулкана Ключевской, основанных на сейсмических данных и зафиксированных спутниками термоаномалиях [Токарев, 1985, 1988; Сеньюков, 2013; и др.];

— широко известен пример яркой сейсмической активизации в центральной части Толбачинского Дола в 1975 г. перед образованием Северного прорыва БТТИ, что позволило своевременно спрогнозировать это извержение [Токарев, 1976; Большое..., 1984 и др.].

В последние десятилетия в мире появилось большое количество публикаций о различных *инструментально* зафиксированных предвестниковых явлениях перед извержениями вулканов, например, обзорные работы [McNutt, 1996, 2005; Dvorak, Dzurisin, 1997; Passarelli, Brodsky, 2012; Complex..., 2013; Spark, Aspinall, 2013; и др.]. Одной из причин получения обнадеживающих результатов по этой тематике является развитие технической базы наблюдений: организация малоапертурных локальных сейсмологических сетей, развитие систем газового и акустического мониторинга, использование спутниковых технологий для изучения вулканов (систем спутникового позиционирования, космических радаров с синтезированной апертурой — SAR, различных радиометров — AVHRR, ASTER, MODIS) и пр. К сожалению, на настоящий момент исследования российских ученых занимают лишь малую часть в мировом потоке работ на эту тему. Представленная публикация является шагом в этом направлении.

В статье проанализированы смещения земной поверхности и сейсмичность перед ТТИ-50 и выявлены синхронные аномалии, предвещавшие это извержение и длившиеся ~4 месяца. Показано, что сейсмическая подготовка ТТИ-50 отличалась от БТТИ: она была значительно более слабой, но более длительной и охватывала не сам район эруптивной активности ТТИ-50, а сконцентрировалась под постройкой вулкана Плоский Толбачик. Впервые в России по GPS данным получены непрерывные ряды записей деформаций земной коры, отражающие подготовку и процесс извержения вулкана.

СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ

В настоящее время мониторинг вулканов Камчатки ведется с разной степенью детальности с привлечением как наземных данных, так и спутниковых технологий. Однако мировой опыт и современные тенденции развития наблюдательных сетей требуют расширения частотного и динамического диапазона наблюдательных систем и комплексного подхода с привлечением для слежения за вулканами акустических, деформационных, спутниковых, видео и других видов наблюдений.

Для вулканов Ключевской группы основным видом наблюдений до недавнего времени являлся сейсмический мониторинг. Первая сейсмическая станция, предназначенная для исследования сейсмичности этого объекта, была открыта в пос. Ключи в 1946 г. Вопросы развития сейсмологических наблюдений за вулканами Камчатки отражены в работах [Викулин и др., 2000; Горельчик, 2001; Федотов, 1987, 2002; Федотов и др., 1987; Сейсмологические..., 2012; Гордеев и др., 2013б; Чебров и др., 2013]. В настоящее время в районе Ключевской группы вулканов работают 12 сейсмостанций Камчатской региональной сети (см. рис. 1), обеспечен доступ к сейсмическим записям в режиме реального времени, обработка землетрясений ведется на компьютере в интерактивном режиме, что позволяет достаточно оперативно оценивать сейсмическую обстановку на вулканах [Сейсмологические..., 2012; Сеньюков, 2013; и др.].

В начале 1970-ых годов XX века на вулканах Камчатки были развернуты геодезические работы по исследованию современных движений земной коры (СДЗК), связанных с проявлениями вулканической активности [Федотов, Энман, 1973; Левин и др., 2006; и др.]. Были детально исследованы СДЗК района БТТИ [Большое..., 1984; Магуськин и др., 2003, 2013; и др.], Карымского вулканического центра [Федотов и др., 2002; Zolin et al., 2003; Магуськин и др., 1997, 2008; и др.], Ключевского вулкана [Федотов, Жаринов, 2007; Широков и др., 2009; Жаринов, Демянчук, 2009; Федотов и др., 2010 и др.] и др. С середины 1990-х годов на Камчатке стали использовать методы космической геодезии. Первые GPS измерения выполнены в 1995 г., а в 1996 г., с открытием первых пунктов непрерывной регистрации, начато развитие региональной сети непрерывных GPS наблюдений [Левин и др., 2002, 2006; Левин, 2009]. Одна из первых постоянных камчатских GPS-станций была установлена в 1996 г. в районе Ключевской группы вулканов в пос. Ключи (KLUC). Важным этапом в исследованиях деформаций этого вулканического района стала организация в 2006–2007 гг. локальной сети непрерывных GPS наблюдений в окрестностях вулкана Безымянный [Grapenthin et al., 2013].

В последние годы для повышения эффективности оценки вулканической опасности и оператив-

ности прогнозов извержений на Камчатке создается система комплексного мониторинга вулканов (СКМВ) [Чебров и др., 2012]. СКМВ ориентирована на организацию цифровой регистрации параметров физических полей, в которых проявляются различные происходящие на вулканах природные явления, создание системы сбора данных в режиме реального времени, применение методов и алгоритмов автоматической и автоматизированной вероятностной оценки состояния и развития активности вулканов. Базовые элементы СКМВ:

- специализированные пункты наблюдений за вулканической деятельностью (ПНВ), оснащенные техническими и программными средствами каналов связи для передачи данных наблюдений в реальном масштабе времени;

- региональные сейсмические станции;

- информационно-обрабатывающие центры данных комплексных наблюдений с коммуникационной системой сбора информации в реальном масштабе времени.

Недооценка вулканической активности района ТТИ-50 привела к неравномерности развития сетей инструментальных наблюдений на Ключевской группе вулканов. Масштабы БТТИ казались столь велики, что был сделан вывод о предстоящем длительном периоде покоя этой вулканической зоны – несколько сотен лет [Большое..., 1984; Двига-ло и др., 1991]. Предполагалось, что изначально должна возобновиться вулканическая деятельность в вершинной кальдере Плоского Толбачика [Двига-ло и др., 1984], которая со временем заполнится жидкой базальтовой лавой. ТТИ-50 продемонстрировало ошибочность этих предположений.

Во время ТТИ-50 и его подготовки СКМВ на Ключевской группе вулканов включала региональные сейсмические станции ГС РАН, несколько автономных GPS-пунктов и специализированных ПНВ. ПНВ организованы на базе имеющихся сейсмостанций путем внедрения унифицированных широкополосных сейсмометрических каналов и оборудования для GPS, наклонных,

акустических, электромагнитных и видео наблюдений (см. рис. 1). В южной части Ключевской группы (южнее вулканов Острый и Плоский Толбачик) расположена лишь одна региональная сейсмическая станция, а GPS-пункты и ПНВ вообще отсутствуют. Сеть GPS располагается по отношению к зоне ТТИ-50 в северном секторе с углом примерно 90°. В состав сети входит три опорных пункта в поселках Ключи, Козыревск и Майское на расстоянии ~50–60 км от ТТИ-50 и группа из пяти пунктов в окрестностях вулкана Безымянный, удаленных от ТТИ-50 на расстояние ~20–25 км (см. рис. 16). На последних зарегистрированы максимальные перемещения, предвалявшие и сопровождавшие ТТИ-50.

ПРЕДВЕСТНИКОВЫЕ ВАРИАЦИИ СЕЙСМИЧНОСТИ ПЕРЕД ТТИ-50

Аномалии в параметрах сейсмического режима

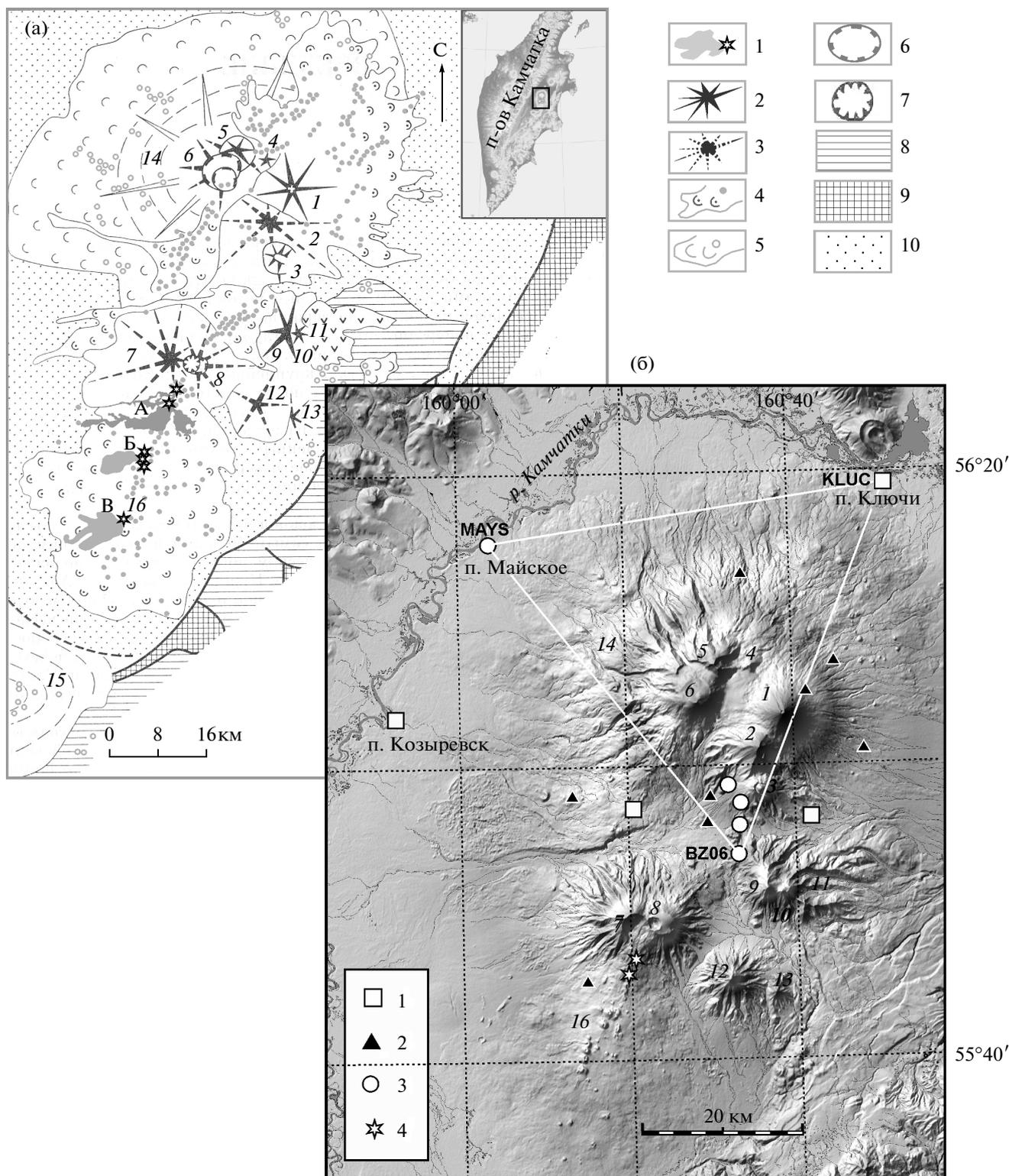
В настоящее время детально исследованы аномалии сейсмического режима, предвалявшие БТТИ [Большое..., 1984] и ТТИ-50 [Салтыков и др., 2012]. Интенсивная сейсмическая подготовка ($K_S = 8-11$, где K_S – энергетический класс по [Федотов, 1972]), которая фиксировалась в течение 9 суток перед образованием Северного прорыва (СП) БТТИ, позволила сделать успешный прогноз этого извержения по сейсмическим данным. Перед ТТИ-50 наблюдалась другая ситуация: очевидная сейсмическая активизация стала проявляться лишь в последние сутки перед прорывом, а относительно сильные землетрясения с $K_S = 10-11$ перед ТТИ-50 не наблюдались вообще. Однако технические характеристики современной системы мониторинга сейсмической активности Ключевской группы вулканов позволили исследовать процессы подготовки ТТИ-50 на более низком, чем в 1975 г., энергетическом уровне (рис. 3). Так перед БТТИ, в 1975 г., уровень надежной регистрации землетрясений (уровень представительности каталога) для района “вулкан Плоский Толбачик – Толбачинский

Рис. 1. Ключевская группа вулканов.

а – схематическая карта вулканических образований по [Большое..., 1984; Мелекесцев и др., 1991; Федотов и др., 1991] с добавлением ТТИ-50: 1 – эруптивные центры и лавовые потоки ТТИ-50 (А), Северного (Б) и Южного (В) прорывов БТТИ; 2 – крупные голоценовые стратовулканы; 3 – крупные позднеплейстоцен-голоценовые стратовулканы; 4 – голоценовые шлаковые конусы и их лавовые потоки; 5 – позднеплейстоценовые шлаковые конусы и их лавовые потоки; 6 – голоценовые кальдеры обрушения на вершинах вулканов Плоский Толбачик и Ушковский; 7 – кальдера обрушения на вершине Плоского Толбачика, образовавшаяся в 1975 г. в ходе БТТИ; 8 – лавовые плато; 9 – дочетвертичные породы складчатого фундамента; 10 – флювиогляциальные и вулканогенно-пролювиальные отложения, аккумулятивные равнины. 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 Зимица (П), 10 – Острая Зимица (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 – щитовой вулкан Николка (П), 16 – Толбачинский Дол (активная зона шлаковых конусов). б – система комплексного инструментального мониторинга Ключевской группы вулканов: 1 – специализированные пункты комплексных наблюдений за вулканами; 2 – сейсмические станции Камчатской региональной сети; 3 – автономные пункты GPS наблюдений. Номера вулканов те же. Треугольником KLUC-BZ06-MAYS отмечена область определения тензоров горизонтальных деформаций

Дол” по данным регионального каталога можно оценить только как $K_{пред} = 8.5$, а для каталога

Ключевской группы вулканов 1999–2012 гг. указанный параметр составляет уже $K_{пред} = 4.0$.



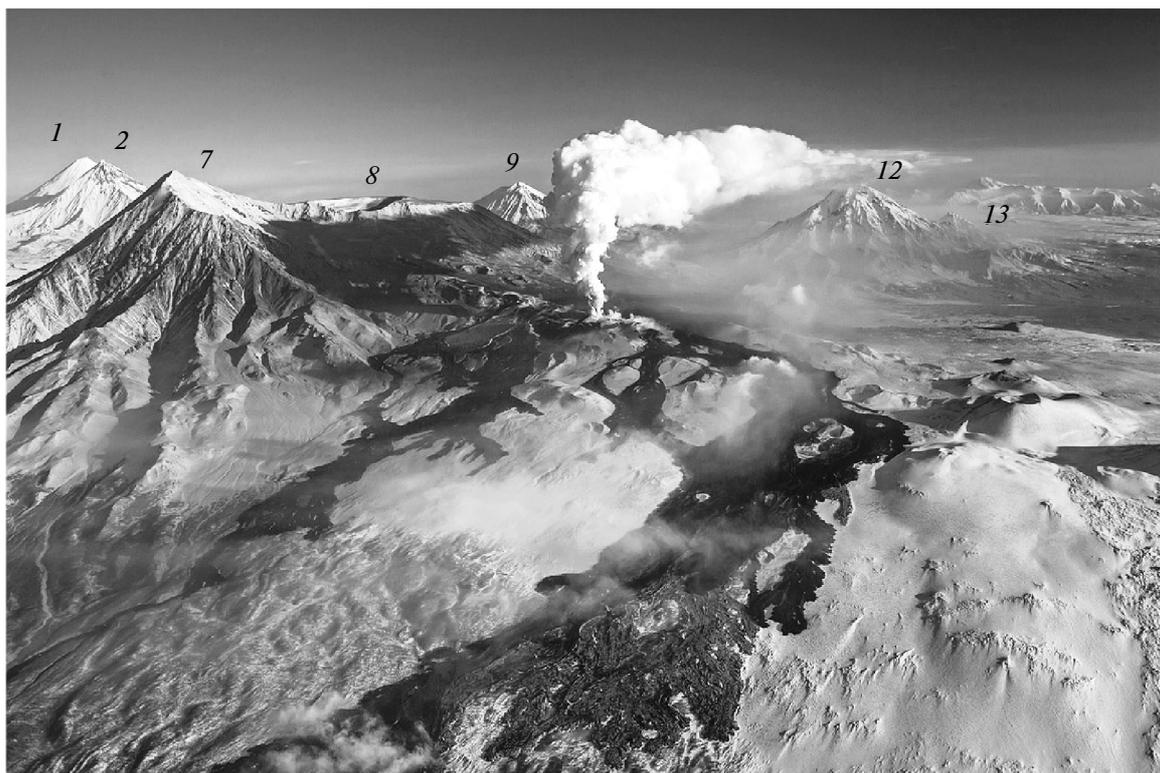


Рис. 2. Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия ИВиС, вид с юго-запада. На переднем плане — лавовые поля по состоянию на 13.12.2012. Снимок Н. Ушакова. Номера вулканов Ключевой группы соответствуют рис. 1.

Для обнаружения возможных аномалий, предшествовавших ТТИ-50, был проведен анализ сейсмичности района извержения по каталогу Ключевой группы вулканов 1999–2012 гг. Рассматривались сейсмические события, зарегистрированные в радиусе 10 км от вершины вулкана Плоский Толба-

чик в диапазоне глубин до 30 км и соответствующие уровню надежной регистрации (рис. 4). Подавляющее большинство этих землетрясений (более 80%) зафиксированы на глубине до 5 км; максимальные энергетические классы $K_S = 7-9$ отмечены для сейсмических событий 27 ноября 2012 г., которые произошли в течение последних часов перед извержением и связываются с его начальной фазой. При анализе параметров сейсмического процесса учитывались только землетрясения, произошедшие до начала извержения.

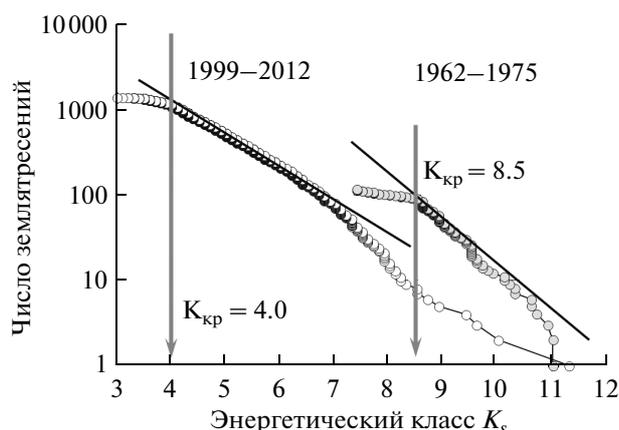


Рис. 3. Кумулятивные графики повторяемости землетрясений для района “вулкан Плоский Толбачик—Толбачинский Дол” (см. рис. 4) за 1962–1975 гг. — по данным регионального каталога, за 1999–2012 гг. — по данным каталога Ключевой группы вулканов.

Анализ сейсмичности был ориентирован на сопоставление среднесуточных параметров с их текущими значениями (2012 г.). Если рассматриваемый параметр выходил за пределы своего среднесуточного тренда (превышал его), ситуация рассматривалась как активизация сейсмичности (рис. 5).

В 2012 г. наблюдается отклонение от средних за 2000–2011 гг. скорости сейсмического потока и скорости выделения сейсмической энергии в сторону увеличения (см. рис. 5а, 5б). В июле-августе 2012 г. произошло превышение максимальной за 2000–2011 гг. величины скорости сейсмического потока и скорости выделения сейсмической энергии во временных окнах 1–6 месяцев (см. рис. 5в, 5г). Это свидетельствует об активизации сейсмичности, пространственно связанной с областью малоглу-

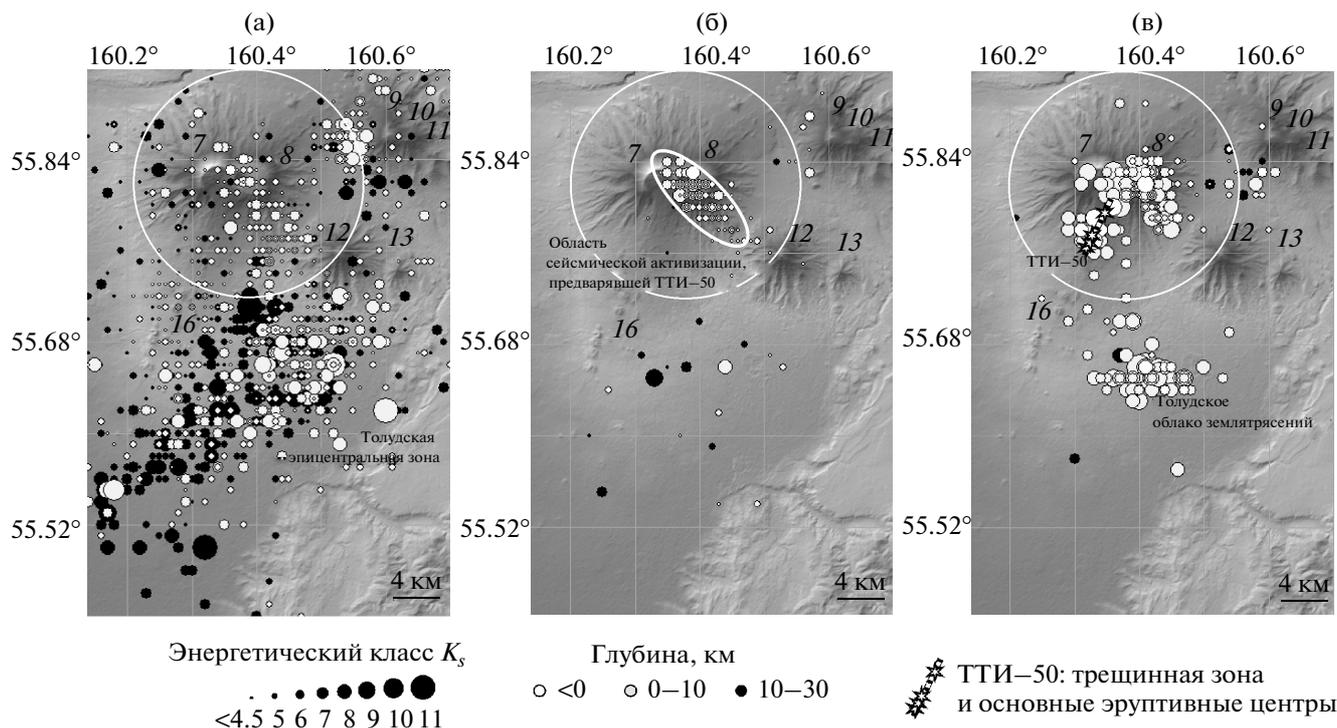


Рис. 4. Карты эпицентров землетрясений района ТТИ-50 (Южная часть Ключевской группы вулканов, глубина гипоцентров менее 30 км) для различных временных интервалов: январь 1999 г.—июнь 2012 г. (а); сейсмическая активизация, июль 2012 г.—26 ноября 2012 г. (б); начальная фаза извержения, 27 ноября 2012 г.—31 декабря 2012 г. (в). Номера вулканов соответствуют рис. 1. Окружность — граница области анализа сейсмичности. Эллипсом оконтурена сейсмическая активизация вулкана Плоский Толбачик перед ТТИ-50.

бинного магматического очага вулкана Плоский Толбачик, описанного, в частности, в работе [Федотов и др., 2011]. Сейсмический процесс в течение нескольких месяцев развивался не равномерно, а с ускорением, что иллюстрирует возрастающее деструктивное воздействие на среду под Плоским Толбачиком.

Статистическая оценка сейсмической активизации

Для того, чтобы статистически оценить и охарактеризовать выявленную сейсмическую активизацию, использована шкала уровня сейсмичности СОУС'09, которая предложена в работе [Салтыков, 2011]. Шкала СОУС'09 привязана к статистической функции распределения сейсмической энергии как к параметру, характеризующему уровень сейсмичности заданного пространственного объекта в определенный временной интервал. Использовалась программная реализация методики СОУС'09 [Воропаев, Салтыков, 2013]. На рис. 6 представлены функции распределения выделенной в исследуемом сейсмоактивном объеме сейсмической энергии для различных временных окон и номограмма, позволяющая на качественном уровне оценить сейсмическую активность района

действующего вулкана Плоский Толбачик по каталогу Ключевской группы вулканов (для области радиусом 10 км от вершины вулкана Плоский Толбачик до глубины 30 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. Эти ограничения статистических оценок связаны с тем, что имеются продолжительные временные интервалы, в которых отсутствовали землетрясения представительного класса. Для временного окна 10 суток уровень сейсмичности является *фоновым средним* при выделенной сейсмической энергии до $\Sigma E = \sim 4.0 \times 10^4$ Дж, *фоновым повышенным* — в диапазоне $\Sigma E = \sim 4.0 \times 10^4 - 6.3 \times 10^5$ Дж.

Временной ход уровня сейсмичности вулкана Плоский Толбачик в течение полутора лет перед ТТИ-50 представлен на рис. 7. Расчеты проводились с временным шагом 7 суток, каждая точка на графике совпадает с окончанием соответствующего временного окна. Выявлен статистически значимый переход уровня сейсмичности с *фонового* на *высокий*, а затем на *экстремально высокий* уровень, что соответствует многократному увели-

чению числа землетрясений и выделившейся сейсмической энергии в августе–ноябре 2012 г. Последние три недели перед трещинным прорывом 2012 г. сейсмичность анализируемого сейсмоактивного объема находилась на *экстремально высоком* уровне. При этом среднемноголетняя (2000–2011 гг.) скорость потока сейсмических событий была превышена ~ в 37 раз, а скорость выделения сейсмической энергии ~ в 43 раза.

В данном случае уровень сейсмической активности выступает как самостоятельный параметр, который может использоваться в прогностических целях при мониторинге вулканической активности. Перед ТТИ-50 длительность аномалии (сейсмической активизации) параметра “уровень сейсмической активности по СОУС’09” составляет ~4 мес.

Этапы сейсмической активизации

Сейсмическую аномалию (активизацию) в районе вулкана Плоский Толбачик перед ТТИ-50 можно разделить на несколько этапов:

– июль–октябрь 2012 г.: статистически значимая сейсмическая активизация низкого энергетического уровня ($K_S = 4-6$) длительностью ~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; на карте эпицентров активизация охватывает постройку вулкана Плоский Толбачик;

– ноябрь 2012 г. (последние три недели перед извержением): устойчивый выход уровня сейсмичности на *экстремально высокий* уровень при сохранении преобладающих классов землетрясений в диапазоне $K_S = 4-6$; активизация по-прежнему охватывает постройку вулкана Плоский Толбачик;

– последние часы перед началом извержения, когда стали регистрироваться наиболее сильные землетрясения ($K_S = 7-9$); на этом этапе произошло изменение распределения эпицентров (см. рис. 4в): сформировались две пространственно разнесенные группы землетрясений, первая из которых осталась

связанной с вулканом Плоский Толбачик, а вторая образовалась в зоне начавшегося ТТИ-50.

В работе [Ермаков и др., 2014] представлен сценарий подготовки ТТИ-50, и указанные периоды сейсмической активизации связываются с динамикой магматических источников извержения. Предполагается, что за несколько месяцев до ТТИ-50 стала наблюдаться активизация глубинного магмоподводящего разлома. Сейсмичность последних трех недель перед началом извержения связывается авторами указанной публикации с образованием и пополнением приповерхностных магматических очагов под вулканом Плоский Толбачик на глубинах в первые км от поверхности, а последние часы перед извержением – с подъемом магмы в вулканический канал Плоского Толбачика и формированием пластовых магматических внедрений непосредственно в разрастающейся постройке стратовулкана, в результате чего произошел боковой разрыв с выходом магмы на поверхность и началось ТТИ-50.

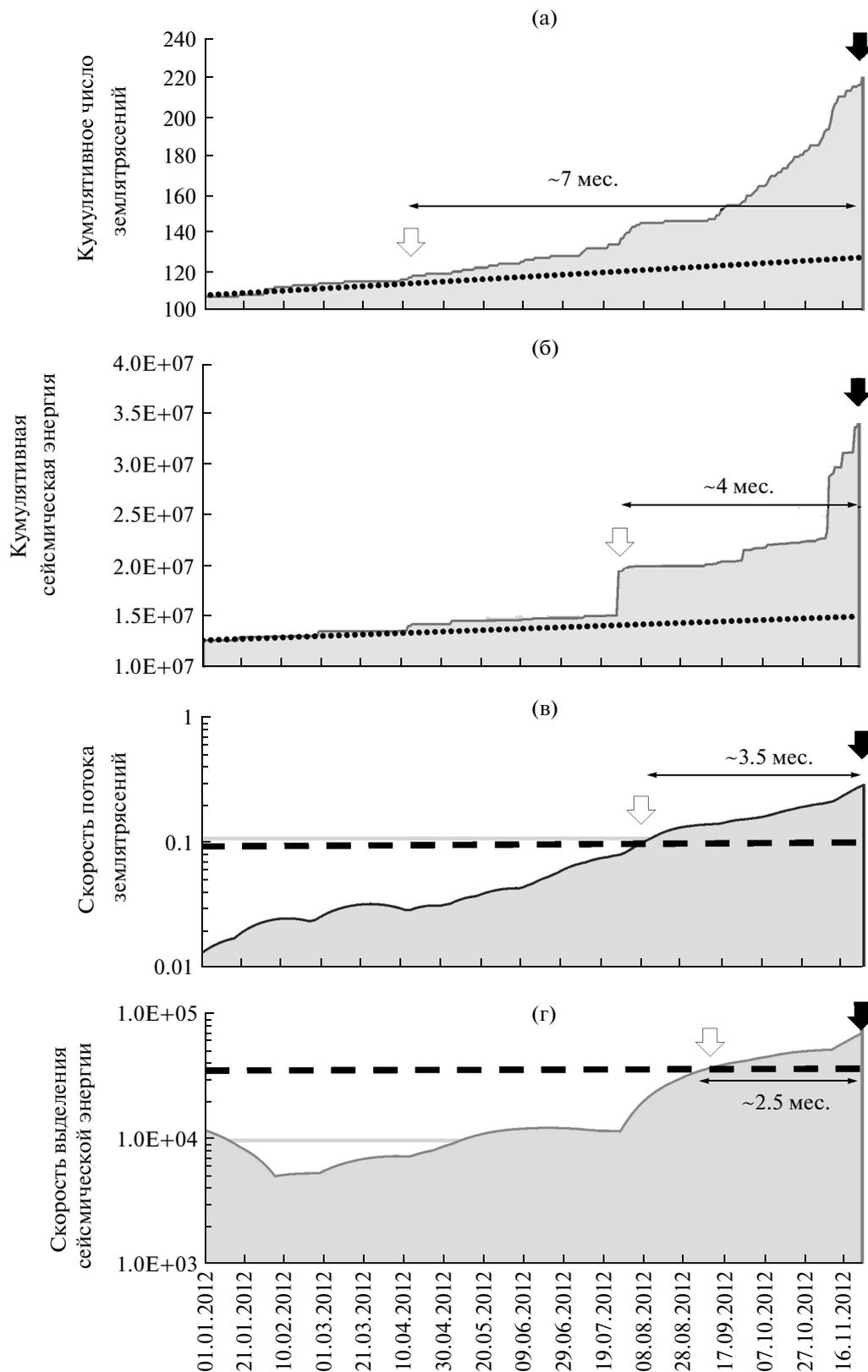
Таким образом, выделенные нами этапы сейсмической активизации перед ТТИ-50 имеют обособленную физическую природу. Первый из этапов является среднесрочным предвестником извержения. Второй и третий этапы – его краткосрочные (длительностью менее 1 месяца) предвестники.

Рой землетрясений в Толудской эпицентральной зоне

Важным событием, связанным с началом ТТИ-50, является последовательность землетрясений из района так называемой Толудской эпицентральной зоны (ТЭС), (см. рис. 4). ТЭС была выявлена ранее в ходе исследований сейсмичности БТТИ, ее сейсмическая активность в 1975 г. связывается с оттоком базальтов на малых глубинах изпод вулкана Плоский Толбачик [Большое..., 1984]. В период с 30 ноября по 7 декабря 2012 г. в ТЭС было локализовано около 70 сейсмических событий с $K_S = 5.2-11.3$, $\Sigma E = \sim 2.1 \times 10^{11}$ Дж. Три наиболее сильных землетрясения с $K_S = 11.3$, $K_S = 9.6$ и $K_S = 10.0$ произошли 30 ноября 2012 г. в течение около двух часов в диапазоне глубин 4.5–6.5 км. Последовавший за ними сейсмический процесс шел с затуханием и в основном закончился 5–6 декабря 2012 г. В целом Толудское облако землетрясений

Рис. 5. Аномалия сейсмического режима перед началом ТТИ-50 в параметрах сейсмичности.

а – кумулятивный график числа землетрясений, б – кумулятивный график выделившейся сейсмической энергии (точечные пунктиры на (а) и (б) моделируют накопление числа землетрясений и выделившейся энергии со средней скоростью, определенной за интервал 1999–2011 гг.); в – скорость сейсмического потока для временного окна 120 суток, штриховой пунктир – максимальная скорость сейсмического потока, наблюдавшаяся по данным 1999–2011 гг. во временном окне 120 суток; г – скорость выделения сейсмической энергии для временного окна 120 суток, штриховой пунктир – максимальная скорость выделения сейсмической энергии, наблюдавшаяся по данным 1999–2011 гг. во временном окне 120 суток. Темной стрелкой отмечено начало извержения. Светлая стрелка – начало аномалии по соответствующему параметру.



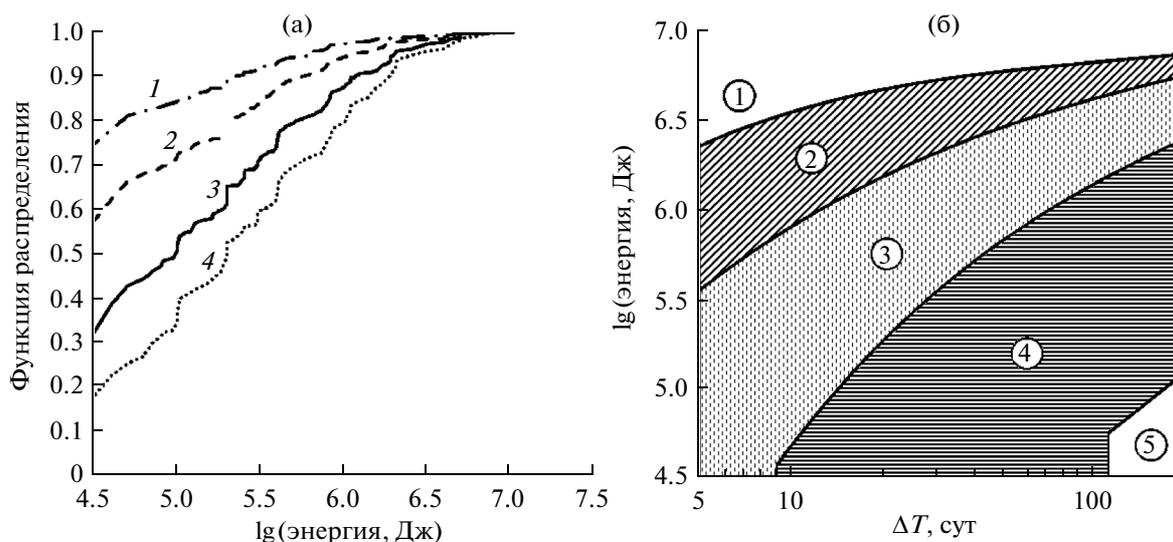


Рис. 6. Функция распределения выделившейся сейсмической энергии (а) для набора данных с 01.01.1999 по 25.11.2012 в области радиусом 10 км от вершины вулкана Плоский Толбачик в диапазоне глубин до 30 км в различных временных окнах (1 – 15 суток, 2 – 30 суток, 3 – 60 суток, 4 – 90 суток). Номограмма уровня сейсмической активности СОУС'09 для вулкана Плоский Толбачик (б). Уровни сейсмической активности: 1 – экстремально высокий, 2 – высокий, 3 – фоновый повышенный, 4 – фоновый средний, 5 – фоновый пониженный.

(ТОЗ, см. рис. 4в) может рассматриваться как группа из трех указанных выше наиболее сильных событий, предварявшихся единичными форшоками, и афтершокового процесса. Землетрясение роя с $K_S = 11.3$ ($M_L = 4.9$, $M_C = 5.4$), которое произошло 30 ноября 2012 г. в 11:00 UTC на глубине 6.5 км, входит в число пяти сильнейших сейсмических событий с $K_S > 11.0$, зарегистрированных на глубине до 10 км под Ключевской группой вулканов за годы детальных сейсмологических наблюдений (1961–2012 гг.). В целом энергия ТОЗ в ~50 раз превышает выделившуюся в 2012 г. сейсмическую энергию непосредственно из района вулкана Плоский Толбачик и ТТИ-50. Отметим, что в 1975 г. БТТИ также предварялось землетрясениями с энергетическими характеристиками, сходными с ТОЗ ($K_S \leq 11.3$). По нашему мнению, ТОЗ может рассматриваться как проявление скрытой интрузивной активности ТТИ-50 без поверхностных признаков вулканической деятельности – потенциальный (нереализовавшийся) прорыв ТТИ-50.

ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ПРЕДВАРЯВШИЕ И СОПРОВОЖДАВШИЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ

Перемещения земной поверхности, инструментально зарегистрированные во время извержений вулканов на расстояниях в десятки километров от них, зачастую находятся в сантиметровом диапазоне [Большое..., 1984; Магуськин и др., 1997; Miura et al. 2000; Segall et al., 2001 и др.].

ТТИ-50 не явилось исключением. К окончанию извержения на пунктах GPS сети были зарегистрированы перемещения от 1.7 см (расстояние ~60 км) до 10.5 см (расстояние ~20 км). Эти перемещения значимы, они на порядок превышают ошибки геодезических измерений двухчастотными GPS приемниками, используемыми на Ключевской группе вулканов.

Но аномалии, предшествующие извержению, особенно в начале их проявления, имеют существенно меньшую величину и близки к ошибкам метода. Аномалии могут искажаться или теряться на фоне сезонных деформаций земной поверхности с амплитудами в первые миллиметры. Сезонные деформации в первом приближении аппроксимировались годовой и полугодовой гармониками, параметры которых находились по рядам наблюдений с конца 2006 г.

На протяжении всего этого временного интервала координаты пунктов необходимо было определить в единой системе отчета. Формирование стабильной локальной системы отчета по пунктам GPS сети на Ключевской группе вулканов оказалось невозможным по следующим причинам:

- станции работали с перерывами, и поэтому не удалось выбрать постоянный набор опорных GPS пунктов для каждого дня наблюдений;
- в ходе ТТИ-50 все GPS пункты сети оказались в зоне деформации.

Поэтому для задания системы отчета использовались наблюдения 175 опорных пунктов глобальной сети IGS. Координаты опорных пунктов взяты из отсчетной основы ITRF2010.

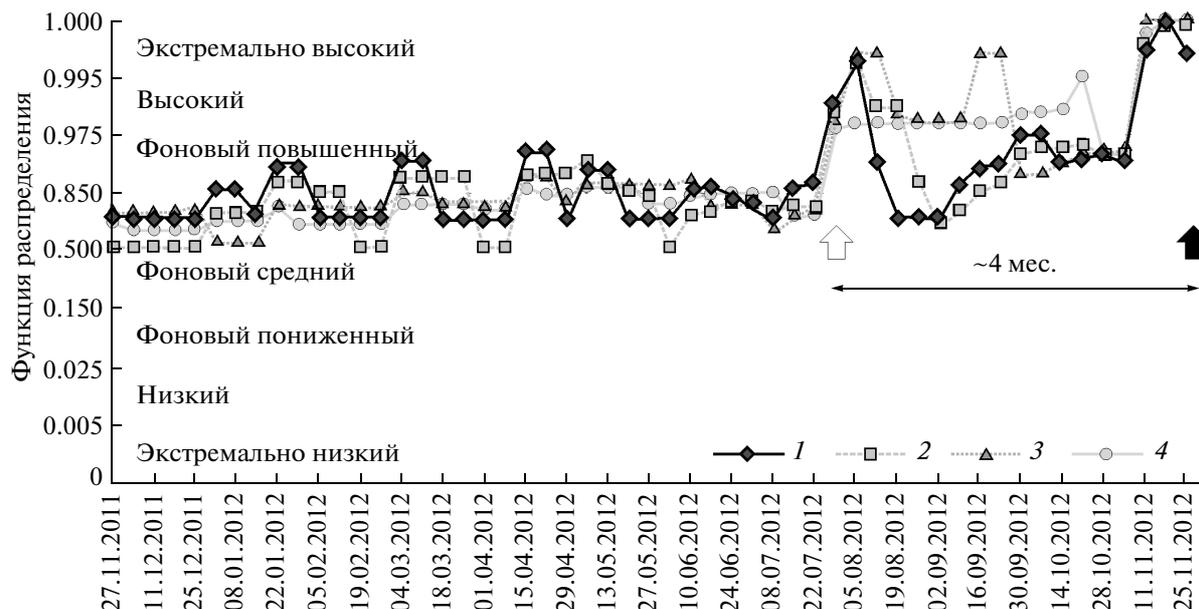


Рис. 7. Временной ход уровня сейсмичности в различных временных окнах (1 — 15 суток, 2 — 30 суток, 3 — 60 суток, 4 — 90 суток) с 15.05.2011 по 25.11.2012. Темная стрелка — начало извержения. Светлой стрелкой отмечен выход уровня сейсмичности на высокий уровень, что соответствует началу статистически значимой аномалии.

Обработка GPS наблюдений, привязка к внешней сети, совместное уравнивание сетей, формирование системы отчета (отсчетная основа в виде таблицы с координатами и скоростями опорных пунктов) и определение относительно нее координат пунктов локальной сети выполнены пакетом программ GAMIT/GLOBK [Herring et al., 2010a, 2010b]. В результате были получены временные ряды среднесуточных координат пунктов в отчетной основе ITRF2010 с ошибками определения 1.5–2 мм в плане и 4–6 мм по высоте.

По полученным временным рядам 2006–2011 гг. находились параметры длиннопериодного тренда как суммы линейного тренда и сезонной составляющей (годовой и полугодовой гармоник). Тренды экстраполировались на 2012–2013 гг. и вычитались из временных рядов. На рис. 8 представлены временные ряды перемещений с удаленными трендами.

По скорректированным таким образом координатам GPS-пунктов определялись тензоры плоских деформаций. Отметим, что непрерывные наблюдения в 2012 г. имеются на ближних GPS-пунктах BZ01, BZ03, BZ04, BZ06 (рис. 9), вытянутых в линию и попадающих в сектор $\sim 20^\circ$ по отношению к ТТИ-50, а также на опорных пунктах MAYS и KLUC. Опорный пункт KOZS был введен в эксплуатацию только в конце августа 2012 г. Таким образом, надежное определение предваряющих деформаций возможно только для сектора в 70° к северу от извержения. Для обнаружения возможных деформационных аномалий, предшествовавших ТТИ-50, проведен расчет и

анализ тензоров плоской деформации для треугольника KLUC-BZ06-MAYS (см. рис. 9) на временном интервале с февраля 2011 г. по май 2013 г.

Координаты пунктов проецировались на касательную плоскость с полюсом в центре тяжести треугольника KLUC-BZ06-MAYS. Для каждого временного отчета составлялась система линейных уравнений, описывающая аффинное преобразование начальных координат. Решением системы уравнений является вектор поступательного перемещения центра тяжести треугольника и квадратная матрица $[2 \times 2]$. Используя полярное разложение, квадратная матрица преобразовывалась в произведение симметричной матрицы (тензор плоской деформации) на ортогональную (матрицу поворота). Для тензора плоской деформации находились собственные векторы (направления главных деформаций) и соответствующие им собственные значения (главные деформации). На рис. 10 представлены временные ряды главных деформаций в соответствии с направлением на извержение (рис. 11).

Отметим, что направление от центра тяжести треугольника KLUC-BZ06-MAYS на ТТИ-50 совпадает с направлением на вулкан Плоский Толбачик. Поэтому далее при рассмотрении относительных деформаций мы будем говорить только о направлении на извержение.

На рядах горизонтальных перемещений ближайших к ТТИ-50 GPS пунктов BZ01, BZ03, BZ04, BZ06, BZ07 (см. рис. 8) видна аномалия, проявившаяся примерно за 4 месяца до начала извержения

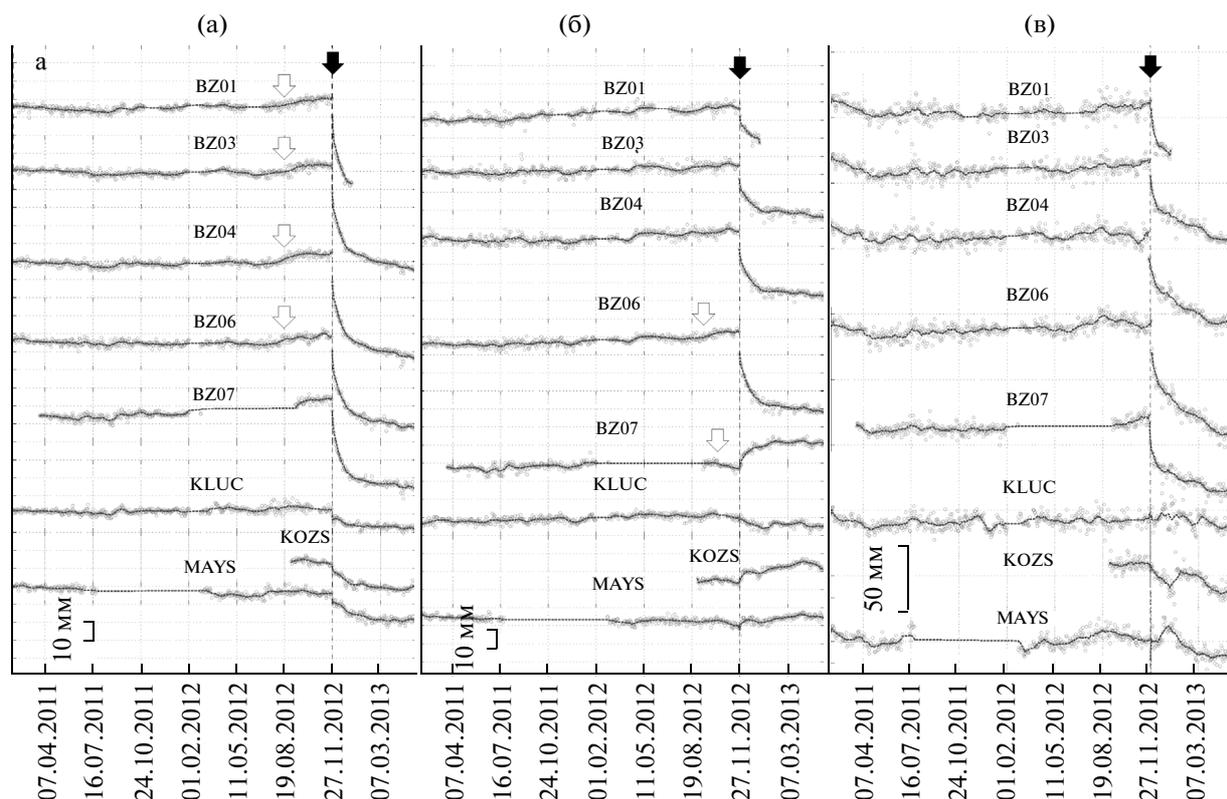


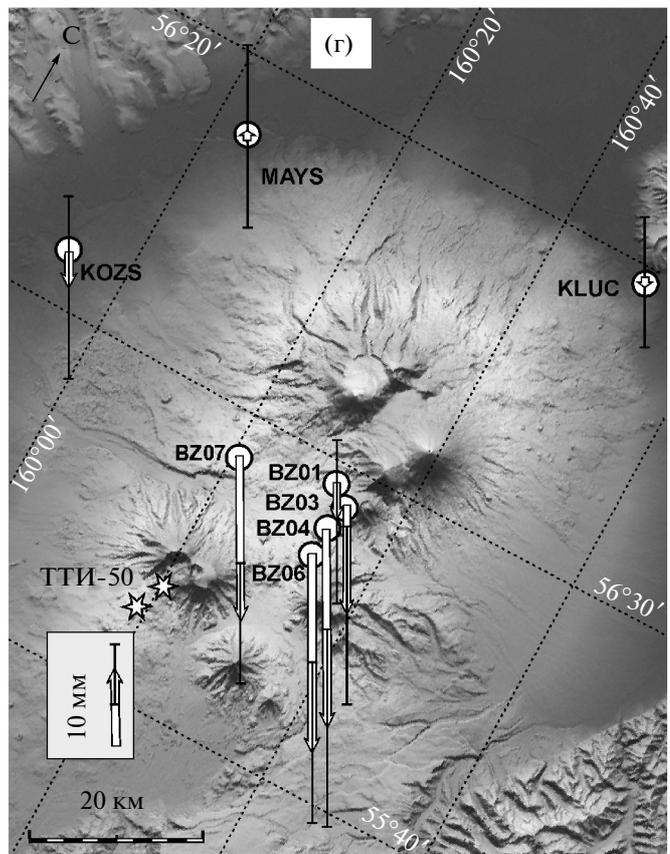
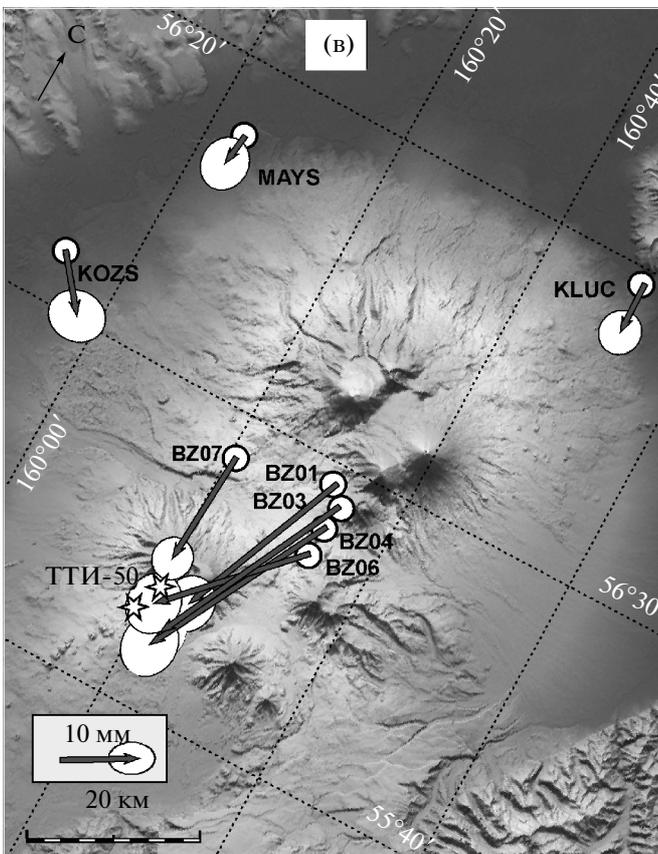
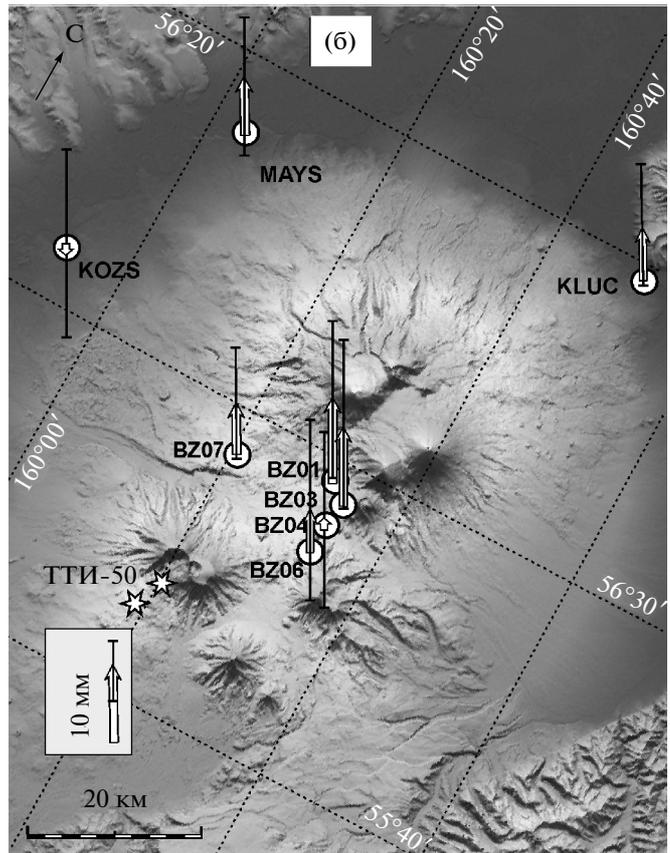
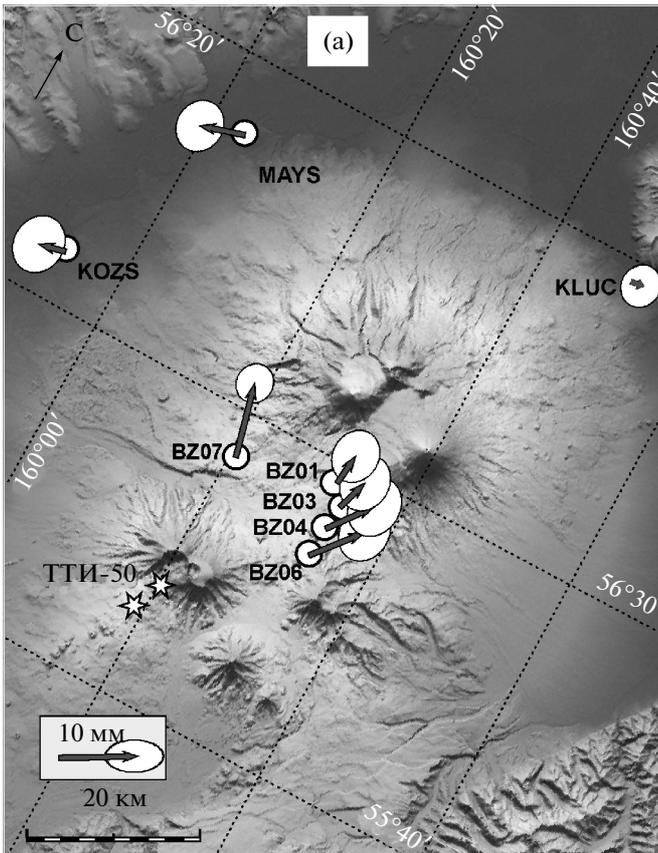
Рис. 8. Временные ряды смещений GPS-пунктов, сглаженные скользящим средним с временным окном шириной 20 дней: по горизонтальным компонентам север (а), восток (б) и вертикальной компоненте (в). Долговременные тренды удалены. Сглаживание производилось отдельно для двух интервалов времени: до и после начала извержения. Момент начала извержения отмечен черной стрелкой. Светлой стрелкой отмечено начало аномальных перемещений, предшествовавших извержению. Названия GPS-пунктов соответствуют схеме на рис. 9.

(для более удаленных пунктов KLUC, KOZS и MAYS этот эффект выявить не удалось). В августе 2012 г. пункты BZ01, BZ03, BZ04, BZ06, BZ07 начали смещаться от зоны ТТИ-50. Начало аномалии приходится на середину августа 2012 г. Учитывая, что каждая точка на графике является результатом осреднения во временном окне за предыдущие 20 суток, мы можем утверждать, что длительность аномалии перед ТТИ-50 достигает ~4 месяцев. На рис. 9а эти движения показаны в виде векторов изменений горизонтальных координат по состоянию на 24 ноября 2012 г. Тогда же, в августе 2012 г., можно отметить и начало установившихся трендов деформаций (см. рис. 10): в радиальном по отношению ТТИ-50 направлении появляется преобладающее сжатие (минимальная главная деформация), а в тангенциальном — растяжение (максимальная главная деформация). С приближением к моменту извержения горизонтальные смещения и деформации земной поверхности продолжают уве-

личиваться. Амплитуды горизонтальных смещений и появившийся на ряде пунктов подъем земной поверхности (см. рис. 9б) перед началом извержения (26 ноября 2012 г.) достигли ~1 см, а относительная деформация сжатия возросла до 1.5×10^{-7} . Одновременно происходила стабилизация направления главных осей деформаций. Направленность деформаций (см. рис. 11а) и перемещений (см. рис. 9а, 9б), отмеченная в этот период, а также динамика изменения их величин могут быть объяснены ростом давления в источнике магмы под вулканом Плоский Толбачик.

Обнаруженные аномалии деформаций земной коры и сейсмичности перед ТТИ-50 имеют сопоставимую длительность ~4 мес., что, с одной стороны, подчеркивает их общую генетическую природу, с другой — позволяет отнести их к одному временному масштабу предвестников (согласно принятой терминологии — среднесрочному).

Рис. 9. Проекция векторов смещений GPS-пунктов на эллипсоид WGS84 перед ТТИ-50 (вверху) и в начале извержения (внизу). Горизонтальные (а) и вертикальные (б) смещения перед извержением, 24.11.2012. Горизонтальные (в) и вертикальные (г) смещения в начале извержения, 30.11.2012. Эллипс ошибок равен стандартному среднеквадратичному отклонению.



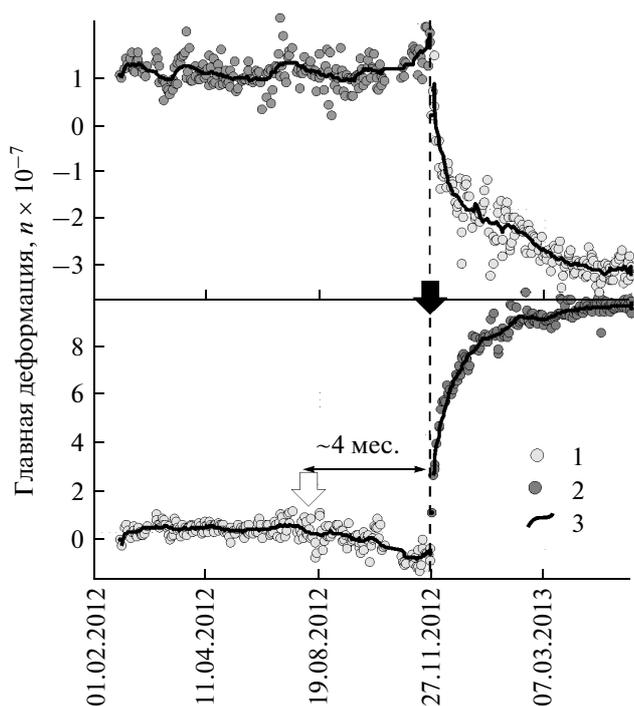


Рис. 10. Временные ряды главных относительных деформаций треугольника KLUC–BZ06–MAYS, представленного на рис. 16, в соответствии с их направлением на извержение. Верхний график – главные деформации в тангенциальном направлении. Нижний график – главные деформации в радиальном направлении.

1 – минимальная деформация; 2 – максимальная деформация; 3 – скользящее среднее с временным окном шириной 20 дней. Направление деформаций на извержение показано на рис. 11. Темной стрелкой отмечено начало извержения, светлой – начало изменения тренда деформации.

Кратко остановимся на движениях земной коры, наблюдавшихся в ходе ТТИ-50. С началом активной фазы извержения (с 27 ноября 2012 г.) были зарегистрированы смещения земной поверхности в радиусе 60 км от эруптивных центров. Все пункты локальной GPS сети в районе Ключевской группы вулканов попали в область деформаций. В первые же сутки извержения перемещения пунктов резко меняют свои направления на противоположные (см. рис. 9в, 9г). Главные деформации сохраняют ориентацию на область ТТИ-50, но меняют знаки (см. рис. 10, 11б). В радиальном направлении начинается растяжение (максимальная главная деформация), а в тангенциальном – сжатие (минимальная главная деформация). Быстрый процесс разгрузки очага до марта 2013 г. сопровождается экспоненциальным увеличением деформаций и перемещений ближайших к ТТИ-50 пунктов (см. рис. 8, 10). К концу активной фазы ТТИ-50 ближние пункты сместились в сторону извержения с одновременным опусканием в

среднем на 5 см, что в 5 раз превышает их перемещения, предварявшие ТТИ-50. Относительное растяжение в радиальном направлении к концу мая 2013 г. достигло 10^{-6} и на порядок превышает предваряющие деформации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ В АСПЕКТЕ СВЯЗИ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНА ПЛОСКИЙ ТОЛБАЧИК С ИСТОРИЧЕСКИМИ ТРЕЩИННЫМИ ИЗВЕРЖЕНИЯМИ ТОЛБАЧИНСКОГО ДОЛА

Благодаря особенностям проявлений эруптивной активности в перечень действующих и потенциально активных вулканических образований Камчатки в качестве самостоятельных объектов включены вулкан Плоский Толбачик и Толбачинская региональная зона шлаковых конусов [Мелекесцев, 2006]. С другой стороны, по [Мелекесцев и др., 2001] вершинная часть вулкана Плоский Толбачик может рассматриваться как один из ее самостоятельных эруптивных центров.

Достоверно известно четыре исторических извержения этой зоны ареального вулканизма: описанное С.П. Крашенинниковым извержение 1740 г. [Крашенинников, 2013], прорыв 1941 г. [Пийп, 1946; Двигало и др., 1991], БТТИ 1975–1976 гг. и ТТИ-50 2012–2013 гг. Рассмотрим их связь с активностью вулкана Плоский Толбачик, эруптивная деятельность которого в позднеголоценовое время сводилась к терминальным и относительно редким побочным латеральным извержениям.

Извержение 1740 г. Об этом извержении известно немного. Предполагается, что оно происходило из нескольких эруптивных центров [Брайцева и др., 1984; Новейший..., 2005]. По геологическим данным к этому времени относятся прорывы Звезда в Южной части Толбачинского Дола и Красный, близкий к подножию вулкана Плоский Толбачик, расстояние между прорывами ~14 км. Интересно, что С.П. Крашенинниковым упоминается и “... легкое землетрясение, которое было и прежде того и после”, то есть имела место сейсмическая активность; однако нет возможности установить, была ли она связана непосредственно с Толбачинским извержением. Считается, что обсуждаемое извержение произошло в конце 1740 г., а приведенная в некоторых записях С.П. Крашенинникова дата – январь 1739 г. – ошибочна. В недавней публикации [Быкасов, 2014] на основе детального анализа архивных документов предложена новая интерпретация исторических свидетельств о проявлениях вулканической активности в этом временном интервале. Автор аргументировано доказывает, что имели место два последовательных эруптивных события: вершинное извержение вулкана Плоский Толбачик в начале 1739 г. и извержение из двух трещинных цен-

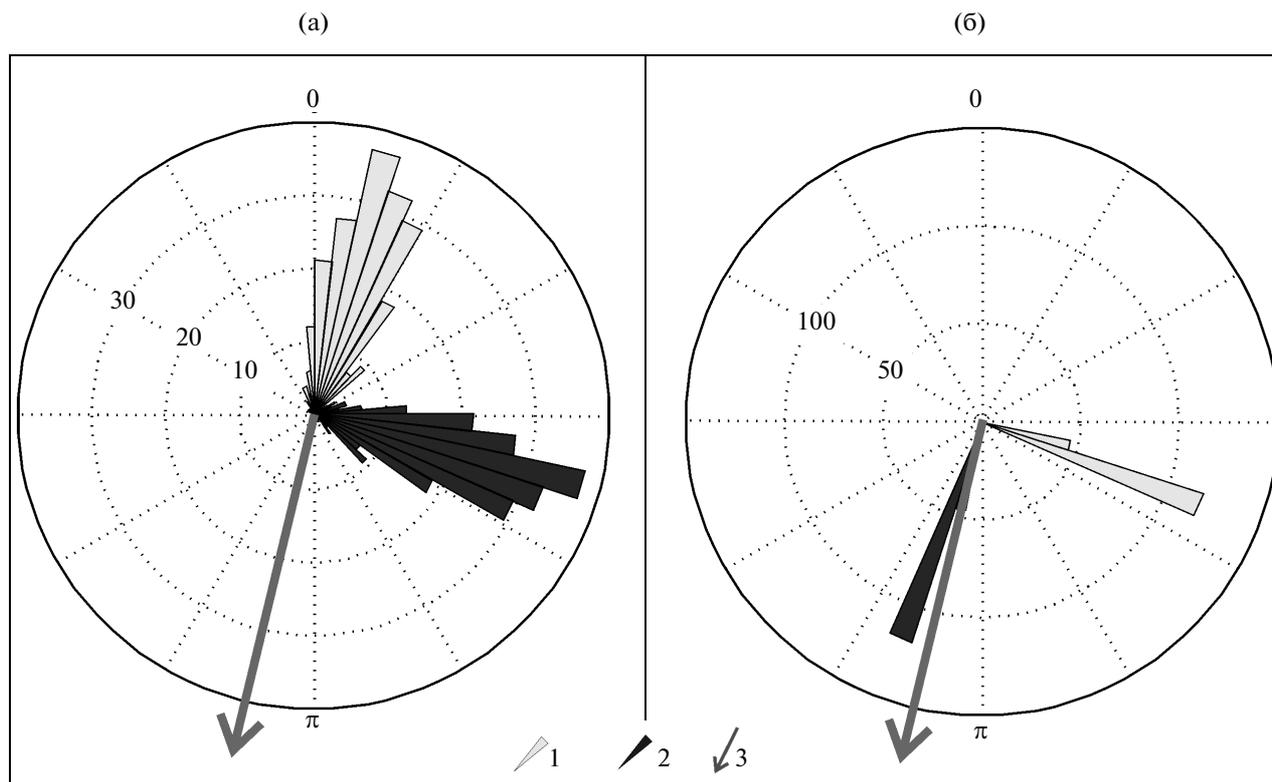


Рис. 11. Круговые гистограммы направлений осей главных деформаций треугольника KLUC–BZ06–MAYS, представленного на рис. 16, до извержения (а) и после начала извержения (б) в соответствии с рис. 10.

1 – направление минимальных деформаций; 2 – направление максимальных деформаций, 3 – направление на извержение от центра тяжести треугольника KLUC–BZ06–MAYS.

тров Толбачинского Дола (прорывов Звезда и Красный) в конце 1740 г.

Прорыв 1941 г. Следующее пароксизмальное извержение произошло на склоне вулкана Плоский Толбачик 7–14 мая 1941 г. на заключительном этапе его вершинного извержения 1939–1941 гг., то есть только через 200 лет после событий, упомянутых С.П. Крашенинниковым. Вершинное извержение Плоского Толбачика в 1939–1941 гг. 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 [Двигало и др., 1984, 1991]. Сейсмические наблюдения в районе Ключевской группы вулканов в то время еще не проводились, поэтому нет никаких данных о сейсмичности, сопровождавшей эти события. Б.И. Пийп относит извержение 1941 г. к побочным прорывам вулкана Плоский Толбачик [Пийп, 1946]. Однако продукты этого прорыва по составу не соответствуют веществу сопутствовавшего вершинного извержения, но близки к базальтам Северного прорыва БТТИ, которое произошло в центральной части ареальной зоны [Брайцева и др., 1984; Двигало и др., 1991]. Поэтому прорыв 1941 г., несмотря на его

расположение на склоне стратовулкана, относят к проявлениям активности Толбачинской зоны шлаковых конусов.

БТТИ, 1975–1976 гг. БТТИ является еще одним примером многоцентрового извержения Толбачинского Дола. Северный прорыв (СП) произошел на удалении 16 км от вулкана Плоский Толбачик, Южный прорыв – еще на ~10 км южнее. БТТИ предвлялось не только мощной сейсмической подготовкой ($K_S = 8–11$) в районе его первого, Северного прорыва, но и асейсмичной (во всяком случае на уровне представительного класса $K_{пред} = 8.5$ Камчатской региональной сети в 1975 г.) активизацией кратера вулкана Плоский Толбачик. Активизация кратера началась примерно за неделю до БТТИ интенсивным газоотделением с выбросами пепла и твердых продуктов: обломков шлака, кристаллолапилл плагноклаза, вулканического песка и пр. [Двигало и др., 1984, 1991]. Затем, в ходе извержения СП, весь Плоский Толбачик был охвачен сейсмичностью, и на его вершине образовалась новая провальная кальдера. Ее образование является одним из важнейших эпизодов БТТИ: провал кратера связывается с оттоком базальтов из вершинной кальдеры и проме-

жуточного магматического очага Плоского Толбачика, предположительно, в южном направлении, где впоследствии произошел Южный прорыв БТТИ [Большое..., 1984; Федотов и др., 2011]. Провал кратера рассматривается как свидетельство активности этой части Плоского Толбачика в качестве одного из центров эруптивной деятельности БТТИ и, следовательно, как самостоятельного эруптивного центра региональной зоны ареального вулканизма [Мелекесцев и др., 2001].

ТТИ-50, 2012–2013 гг. Трещина ТТИ-50 имела длину ~6 км и захватила нижнюю часть склона вулкана Плоский Толбачик и прилегающий к нему северный край Толбачинского Дола. Как при подготовке, так и в процессе этого извержения кратер Плоского Толбачика остался безучастен к ТТИ-50: не наблюдалось ни появления лавы в кальдере, ни вершинной термальной аномалии. Наша работа демонстрирует два инструментально зафиксированных процесса, свидетельствующих о пробуждении недр под вулканом Плоский Толбачик за ~4 месяца до извержения: локальную сейсмическую активизацию низкого энергетического уровня ($K_S = 4–6$) в диапазоне глубин до 5 км и деформации земной коры по GPS наблюдениям.

Нельзя утверждать, что БТТИ не сопровождалось аналогичной ТТИ-50 длительной сейсмической подготовкой, так как в 1975 г. сейсмическая сеть Ключевской группы вулканов просто не могла дать исследователям информацию о сейсмическом процессе на столь низком энергетическом уровне — слабые землетрясения $K_S = 4–6$ не регистрировались и в каталоге отсутствуют (см. рис. 3).

Обобщим сказанное выше: известные на настоящий момент исторические трещинные извержения Толбачинского Дола предварялись активизацией вулкана Плоский Толбачик. А в 1941 г. и 1975 г. Плоский Толбачик проявлял эруптивную вершинную активность и во время трещинных извержений. В 2012 г. инструментально обнаруженный отклик вулкана Плоский Толбачик на подготовку ТТИ-50 свелся только к глубинным процессам, без внешних проявлений вулканизма: к сейсмической активизации и деформациям земной коры, вызванным внедрением магмы под постройкой вулкана.

Отметим, что для трех последних трещинных извержений в Толбачинской вулканической зоне (1941–2012 гг.) сопутствующая активность Плоского Толбачика от извержения к извержению проявлялась все более слабо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2012–2013 гг. на Камчатке наблюдалось мощное преимущественно эффузивное трещинное извержение, которое произошло в Толбачинской вулканической зоне, в южной части Ключевской группы вулканов.

По инструментальным данным системы комплексного мониторинга вулканической деятельности были исследованы сейсмичность и современные движения земной коры, предварявшие ТТИ-50.

Впервые на территории России по сейсмическим и GPS данным выявлены предварявшие извержение синхронные аномалии деформаций земной коры и параметров сейсмического режима длительностью ~4 месяцев.

ТТИ-50 предварялось сейсмической активизацией низкого энергетического уровня (преимущественно $K_S = 4–6$). Сейсмической подготовкой в течение не менее 4 месяцев была охвачена вся постройка вулкана Плоский Толбачик. Последние три недели перед трещинным прорывом сейсмичность анализируемого сейсмоактивного объема устойчиво находилась на экстремально высоком уровне по шкале СОУС-09 [Салтыков, 2011], что соответствует многократному увеличению числа землетрясений и выделившейся сейсмической энергии: среднемноголетняя (2000–2011 гг.) скорость потока сейсмических событий была превышена ~ в 37 раз, а скорость выделения сейсмической энергии ~ в 43 раза.

Деформационные аномалии перед ТТИ-50 проявились в перемещении центральной части Ключевской группы вулканов в радиальном по отношению к извержению направлении. Предваряющие перемещения GPS станций, удаленных на 20–25 км от прорывов ТТИ-50, начались ~ за 4 месяца до извержения, в августе 2012 г. К началу активной фазы ТТИ-50 их величины достигли сантиметрового уровня. Рассчитанные для этого периода (август–ноябрь 2012 г.) относительные деформации показали сжатие в радиальном по отношению к извержению направлении и растяжение в тангенциальном. Их величины достигали к началу ТТИ-50 ~ 10^{-7} .

Если обсуждать выявленные эффекты в контексте предвестниковых признаков извержения, то подготовку ТТИ-50 можно разделить на три этапа: первый этап ~4 месяца, второй — ~ три недели и третий — несколько часов до начала извержения. Длившиеся ~4 месяца синхронные аномалии деформаций земной коры и сейсмического режима (август–ноябрь 2012 г.) являются среднесрочным предвестником ТТИ-50. Выход уровня сейсмичности за три недели до извержения на экстремально высокий уровень при сохранении преобладающих классов землетрясений в диапазоне $K_S = 4–6$ и последние часы перед началом ТТИ-50, когда стали регистрироваться сейсмические события с $K_S = 7–9$ и в районе вулкана Плоский Толбачик и ТТИ-50 сформировались два пространственно разнесенные облака землетрясений, можно рассматривать как краткосрочные (длительностью менее 1 месяца) предвестники извержения.

Для повышения эффективности оценки вулканической опасности и оперативности прогнозов извержений представляется целесообразным дополнить регламент оценки активности вулканов Камчатки расчетом количественных величин, проведение которого необходимо обеспечить в режиме реального времени: уровня сейсмичности по шкале СОУС'09, скорости сейсмического потока, скорости выделения сейсмической энергии и пр.

На примере исторических трещинных извержений региональной зоны ареального вулканизма, которые произошли в пределах Толбачинского Дола в 1740 г., 1941 г., 1975–1976 гг. и 2012–2013 гг., показано, что каждое из них предварялось теми или иными проявлениями активности стратовулкана Плоский Толбачик. В том числе и инструментально обнаруженный отклик вулкана Плоский Толбачик на подготовку ТТИ-50, который свелся только к глубинным процессам, отразившимся в локальной сейсмичности и движениях земной коры, без внешних проявлений вулканизма. Отмеченная по четырем эруптивным событиям закономерность может быть использована при разработке сценариев подготовки трещинных извержений Толбачинского Дола.

Данные о выявленных предвестниковых аномалиях, предварявших ТТИ-50, и их длительности необходимо учитывать при разработке моделей и механизма этого извержения. Следующим этапом в исследованиях механизма ТТИ-50 должно стать моделирование источника деформаций. Однако из-за геометрических особенностей GPS сети проведение таких расчетов будет затруднено и даст большую ошибку в меридиональном направлении. ТТИ-50 продемонстрировало необходимость развития системы комплексного мониторинга активности Ключевской группы вулканов в ее южном секторе.

Исследование выполнено при поддержке научного проекта РФФИ 13-05-00117.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Вулкан Толбачик: гавайские извержения на Камчатке // *Природа*. 2013. № 10. С. 59–67.

Большое трещинное Толбачинское извержение / Отв. ред. Федотов С.А. М.: Наука, 1984. 683 с.

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.

Быкасов В.Е. Извержения 1739 и 1740 годов в районе вулкана Плоский Толбачик // *Вулканизм и связанные с ним процессы*. Матер. регион. конф., посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 26–28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 14–21.

Бюллетень вулканологических станций. № 56 / Отв. ред. Федотов С.А., Балеста С.Т. М.: Наука, 1979. 192 с.

Викулин А.В., Степанов В.В., Токарев Е.П. Хроника образования и развития инструментальной сейсмологии на Камчатке // *Проблемы сейсмичности Дальнего Востока*. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2000. С. 282–303.

Вольнец А.О., Мельников Д.В., Якушев А.И. Первые данные о составе продуктов Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС (Камчатка) // *ДАН*. 2013. Т. 452. № 3. С. 303–307.

Воропаев П.В., Салтыков В. А. Вычислительная система оценки уровня сейсмичности // *Геология и геофизика Юга России*. 2013. № 2. С. 18–25.

Геологические и геофизические данные о Большом Толбачинском извержении 1975–1976 гг. М.: Наука, 1978. 256 с.

Гирина О.А. О предвестнике извержений вулканов Камчатки, основанном на данных спутникового мониторинга // *Вулканология и сейсмология*. 2012. № 3. С. 14–22.

Гордеев Е. И., Муравьев Я. Д., Самойленко С. Б. и др. Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг. Первые результаты // *ДАН*. 2013а. Т. 452. № 5. С. 562–566.

Гордеев Е.И., Федотов С.А., Чебров В.Н. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961–2011 гг., основные результаты // *Вулканология и сейсмология*. 2013б. № 1. С. 3–17.

Горельчик В.И. К истории развития сейсмологических исследований на вулканах Камчатки // *Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островной дуги*. Петропавловск-Камчатский: ИВиГ ДВО РАН, 2001. С. 341–351.

Горельчик В.И., Гарбузова В.И., Сторчевус А.В. Глубинные вулканические процессы под Ключевским вулканом по сейсмологическим данным // *Вулканология и сейсмология*. 2004. № 6. С. 21–34.

Горшков Г.С. О связи вулканических и сейсмических явлений при извержении вулкана Безымянного (1955–1956 гг.) // *Бюл. вулканол. станций*. 1961. № 31. С. 32–37.

Двигало В.Н., Свирод 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.

Двигало В.Н., Федотов С.А., Чирков А.М. Вулкан Плоский Толбачик // *Действующие вулканы Камчатки*. В 2-х т. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 200–213.

Двигало В.Н., Чирков А.М., Федотов С.А. Новая вершинная кальдера Плоского Толбачика // *Большое трещинное Толбачинское извержение*. М.: Наука, 1984. Гл. II. С. 75–83.

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.

Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Извержение вершинного кратера вулкана Ключевской (Камчатка) в феврале–июле 2007 г. // *Вулканология и сейсмология*. 2009. № 3. С. 38–49.

- Иванов В.В.* Прогнозы крупных извержений вулканов на Камчатке и их оправдываемость // Вестник ДВО РАН. 2003. № 5. С. 97–108.
- Иванов В.В.* Средне- и краткосрочные прогнозы извержений вулканов на Камчатке (1956–2012 гг.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. Вып. 22. № 2. С. 98–119.
- Крашенинников С.П.* Описание земли Камчатки. М.: Эксмо, 2013. 475 с.
- Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Салтыков В.А.* Подготовка Карымского сейсмо-вулканического кризиса в параметрах разномасштабной сейсмичности // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 27–37.
- Левин В.Е.* GPS мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах 1997–2007 гг. // Вулканология и сейсмология. № 3. 2009. С. 60–70.
- Левин В.Е., Гордеев Е.И., Бахтиаров В.Ф., Касахара М.* Предварительные результаты GPS мониторинга на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 3–11.
- Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтиаров В.Ф. и др.* Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 54–67.
- Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф.* Деформации земной поверхности в районе Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. в период 1978–2000 гг. и их возможные причины // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 55–61.
- Магуськин М.А., Титков Н.Н., Демянчук Ю.В.* О деформациях земной поверхности в районе Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. 21. С. 147–151.
- Магуськин М.А., Федотов С.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф.* Деформация земной поверхности в связи с сейсмической и вулканической активностью в Карымском вулканическом центре в январе 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 97–112.
- Магуськин М.А., Федотов С.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф.* Деформации, связанные с сильным ($M = 6.9$) землетрясением, прорывом магм и извержениями в Карымском вулканическом центре в 1996–2005 гг. // Вулканология и сейсмология. 2008. № 5. С. 22–40.
- Мелекесцев И.В.* Действующие и потенциально активные вулканы Курило-Камчатской островной дуги в начале XXI в.: этапы исследований, определение термина “действующий вулкан”, будущие извержения и вулканическая опасность // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 1. Вып. 7. С. 15–35.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарева В.В.* Новый подход к определению понятия “действующий вулкан” // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск–Камчатский: ИВИГ ДВО РАН, 2001. С. 191–203.
- Мелекесцев И.В., Хренов А.П., Кожемяка Н.Н.* Тектоническое положение и общий очерк вулканов Северной группы и Срединного хребта // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 74–78.
- Новейший и современный вулканизм на территории России. М.: Наука, 2005. 604 с.
- Пийп Б.И.* Новый побочный кратер вулкана Толбачик // Бюлл. вулканол. станций на Камчатке. 1946. № 13. С. 10–21.
- Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.* Об аномалии сейсмического режима, предвзявшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 9–16.
- 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.
- Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2012. 484 с.
- Сенюков С.Л.* Прогноз извержений вулканов Ключевской и Безымянный на Камчатке. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2013. 152 с.
- Сторчеус А.В.* Рой длиннопериодных вулканических землетрясений, предвзявших извержение Карымского вулкана в 1996 г. // Матер. ежегодной конф., посвященной дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: Издательство ИВиС ДВО РАН, 2007. С. 75–82.
- Токарев П.И.* Гигантское извержение вулкана Шивелух 12 ноября 1964 г. и его предвестники // Физика Земли. 1967. № 9. С. 11–22.
- Токарев П.И.* Предвестники вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 108–119.
- Токарев П.И.* Предсказание места и времени начала Большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // Докл. АН СССР. 1976. Т. 229. № 2. С. 439–442.
- Токарев П.И.* Прогноз побочных извержений вулкана Ключевской // Вулканология и сейсмология. 1988. № 6. С. 47–61.
- Федотов С.А.* К 25-летию детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке и Командорских островах, X.1961–X.1986: история, развитие и задачи // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 3–10.
- Федотов С.А.* К 40-летию детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 3. С. 73–79.
- Федотов С.А.* Исследования по вулканологии и сейсмологии, их развитие и значение на Камчатке. История отечественной науки. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2003. 184 с.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А.* Об извержениях, деформациях, сейсмичности Ключевского вулкана (Камчатка) в 1986–2005 гг. и механизме его деятельности // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 3–31.

- 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., Балеста С.Т., Двигало В.Н. и др. Новые Толбачинские вулканы // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 214–274.
- Федотов С.А., Озеров А.Ю., Магуськин М.А. и др. Извержение Карымского вулкана в 1998–2000 гг., связанные с ним сейсмические, геодинамические и поствулканические процессы, их воздействие на окружающую среду // Катастрофические процессы и их влияние на природную среду М.: Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики, 2002. Т. 1. С. 117–160.
- 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.
- Федотов С.А., Феофилактов В.Д., Гордеев Е.И. и др. Развитие сейсмометрических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1987. № 6. С. 11–28.
- Федотов С.А., Энман В.Б. Программа геодезических работ по изучению современных движений земной коры на Камчатке // Совр. движения земной коры. 1973. № 5. С. 267–273.
- 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.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. и др. Развитие системы комплексного инструментального мониторинга вулканов Дальневосточного региона // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48. № 4. С. 40–54.
- Чубарова О.С., Горельчик В.И., Гарбузова В.Т. Сейсмический режим вулкана Безымянный в 1975–1979 гг. // Вулканология и сейсмология. 1983. № 3. С. 58–69.
- Широков В.А. Некоторые вопросы комплексного прогноза побочных извержений вулкана Ключевского // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 40–55.
- Широков В.А., Серафимова Ю.К. Прогноз сильных извержений вулканов Тихоокеанского тектонического пояса на ближайшие 20 лет на основе применения метода фазовых траекторий // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С. 154–163.
- Широков И.А., Жаринов Н.А., Перцев Б.П., Анохина К.М. Вариации наклонов земной поверхности на Камчатке в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 2009. № 6. С. 44–53.
- Complex Monitoring of Volcanic Activity: Methods and Results. New York: Nova Science Publishers Inc., 2013. 253 p.
- Dvorak J.J., Dzurisin D. Volcano geodesy: The search for magma reservoirs and the formation of eruptive vents // Reviews of Geophysics. 1997. V. 35. № 3. P. 343–384.
- Edwards B., Belousov A., Belousova M. et al. Another “Great Tolbachik” Eruption? // EOS, Transactions American Geophysical Union. 2013. V. 94. Is. 21. P. 189–191. DOI: 10.1002/2013EO210002.
- Grapenthin R., Freymueller J. T., Serovetnikov S.S. Surface Deformation of Bezymianny Volcano, Kamchatka, Recorded by GPS: The Eruptions from 2005–2010 and Long-term, Long-wavelength Subsidence // J. Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 58–74. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.11.012.
- Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. GAMIT: GPS Analysis at MIT. Release 10.4. Massachusetts: Institute of Technology, 2010a. 171 p.
- Herring T.A., King R.W., McClusky S.C. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.4. Massachusetts: Institute of Technology, 2010b. 95 p.
- Ji L., Lu Z., Dzurisin D., Senyukov S. Pre-eruption deformation caused by dike intrusion beneath Kizimen volcano, Kamchatka, Russia, observed by InSAR // J. Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 256. P. 87–95. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.02.011.
- McNutt S.R. A Review of Volcanic Seismology // Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences. 2005. V. 33. P. 461–491. doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122459, 2005.
- McNutt S.R. Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: a review of the state-of-the-art and case histories // Monitoring and mitigation of volcano hazards. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996. P. 100–146.
- Miura S., Ueki S., Sato T. et al. Crustal deformation associated with the 1998 seismo-volcanic crisis of Iwate volcano, Northeastern Japan, as observed by a dense GPS network // Earth Planets Space. 2000. V. 52. № 11. P. 1003–1008.
- Passarelli L., Brodsky E. The correlation between run-up and repose times of volcanic eruptions // Geophysical Journal International. 2012. V. 188. № 3. P. 1025–1045. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05298.x.
- Remote Sensing of Volcanoes and Volcanic Processes: Integrating Observation and Modeling. Oxford: GSL, 2014. 362 p.
- Segall P., Cervelli P., Owen S. et al. A. Constraints on dike propagation from continuous GPS measurements // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. № 19. P. 19301–19318.
- Sparks R., Aspinall W. Volcanic Activity: Frontiers and Challenges in Forecasting, Prediction and Risk Assessment // The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics. Washington: American Geophysical Union, 2013. P. 359–373.
- Thelen W., West M., Senyukov S. Seismic characterization of the fall 2007 eruptive sequence at Bezymianny Volcano, Russia // J. Volcanology and Geothermal Research. 2010. V. 194. P. 201–213. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.05.010.
- West M.E. Recent eruptions at Bezymianny volcano – A seismological comparison // J. Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 42–57. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.12.015.
- Zobin V.M., Levina V.I., Maguskin M.A. Seismicity and crustal deformation preceding the January 1996 eruptions at Karymsky volcanic center, Kamchatka // Bull. Volcanol. 2003. V. 65. P.477–485. doi: 10.1007/s00445-003-0275-0.

**An Analysis of Precursory Phenomena for the 2012–2013 Tolbachik Fissure Eruption:
Seismicity Parameters and Crustal Strain as Inferred from Data Supplied
by the System of Multidisciplinary Monitoring of Volcanic Activity in Kamchatka**

Yu. A. Kugaenko, N. N. Titkov, V. A. Saltykov, and P. V. Voropaev

*Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences,
bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia*

e-mail: ku@emsd.ru

Received August 4, 2014

Abstract—This paper is concerned with ground deformation and seismicity prior to the Tolbachik Fissure Eruption, which began in Kamchatka on November 27, 2012. Seismic and GPS data were analyzed to reveal synchronous precursory anomalies in crustal deformation and seismicity that lasted approximately 4 months (April to November 2012). The seismic anomaly was a statistically significant increase of seismicity with low energy (mostly $K_s = 4-6$) beneath the Ploskii Tolbachik Volcano edifice at depths of less than 5 km. The rates of seismicity and seismic energy release were exceeded by factors of approximately 40 compared with the 2000–2011 mean values during the 2 to 3 weeks immediately before the eruption. The strain anomalies were observed as movements in the middle of the Klyuchevskoi Volcanic Cluster: a radial (relative to the eruption) compression and an extension in the tangential direction. The strain had reached $\sim 10^{-7}$ by the beginning of the eruption. The durations of the seismic and strain anomalies were comparable in value (~ 4 months before the eruption), thus providing evidence of a common origin. We can classify them as belonging to the same time scale of precursors (the intermediate-term in the accepted terminology).