

КОМПЛЕКСНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ЭКСПЕДИЦИЯ В РАЙОН ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ 2012-2013 гг. (КАМЧАТКА)

В августе 2013 г. Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) была организована комплексная геофизическая экспедиция в Северную часть Толбачинского Дола в район Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50).

Целью полевых работ являлось проведение инструментальных наблюдений для исследования физики вулканического процесса и выявления особенностей глубинного строения района извержения. В ходе экспедиции была выполнена микросейсмическая съемка вдоль профиля, пересекающего основную питающую трещину ТТИ-50, и обеспечена работа комплекса, позволившего вести мониторинг некоторых параметров процессов сопровождавших извержение. Проводилась регистрация акустического (микрофоны) и сейсмического излучений (сейсмические станции), а также объемной активности радона (радиометр) (рис. 1, 2).

Полевые работы совпали с завершающей стадией ТТИ-50, которое, в основном, закончилось 23 августа 2013 г.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ТТИ-50 В АВГУСТЕ 2013 г.

Во время полевых работ в августе 2013 г. умеренная эруптивная активность была сосредоточена в северном шлаковом конусе прорыва им. С.И. Набоко (ПН), где наблюдалась эксплозивно-эффузивная деятельность (рис. 1). В этот период действующий шлаковый конус имел два основных кратера, причем активен был преимущественно большой кратер, на дне которого плескалось озеро жидкой лавы, охваченной интенсивным движением и бурным отделением летучих из базальтовой магмы (росли и взрывались огромные лавовые пузыри, образовывались лавовые фонтаны, на стены и кромку кратера выбрасывались бесформенные куски вспененной лавы). Бомбы вылетали на высоту нескольких десятков метров над кратером. Эксплозивная деятельность была неравномерной, с усилениями и ослаблениями интенсивности взрывов и выбросов. Единичные слабые выбросы лавы из малого кратера наблюдались лишь эпизодически.

Отток лавы из района действующего шлакового конуса осуществлялся по системе лавовых

труб преимущественно в юго-восточном направлении. Через «окна» и провалы в лавовом поле на глубине несколько метров можно было наблюдать движение лавы со скоростью 1-2 м/с. Выжимание лавы можно было обнаружить на расстояниях до 6 км от ПН на фронте лавового потока и местами на поверхности ранее образованных лавовых покровов. В ночное время наблюдалось живописное свечение в восточной части лавового поля, где на поверхность выходили свежие порции раскаленного вещества. В результате скрытого перераспределения лавы под образовавшимися ранее и уже затвердевшими лавовыми полями, происходило их разрушение (растрескивание). Отдельные эпизоды этого процесса были слышны как сухие щелчки, напоминающие выстрел, на расстоянии около двух км от кромки лавовых потоков ТТИ-50. Эти приповерхностные события осложнили общую картину сейсмичности в районе извержения.

Уровень лавового озера в действующем шлаковом конусе значительно понизился 23 августа 2013 г., одновременно прекратились взрывы и выбросы бомб. Замедлилось, а потом и остановилось движение подземных лавовых рек. Исчезло ночное свечение лавового потока. Кратковременное появление лавы в кратере отмечалось 28-29 августа, а затем активность ПН перешла в стадию парогазовой деятельности.

СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ И АППАРАТУРА

Локальная сейсмичность района ТТИ-50 регистрировалась тремя временными широкополосными сейсмическими станциями GURALP CMG-6TD (с/с «Прорыв», с/с «Толуд» и с/с «База-1») и региональной с/с «Каменистая» (рис. 1). Велосиметры GURALP CMG-6TD сочетают функции сейсмического датчика и цифрового регистратора. Основные технические характеристики GURALP CMG-6TD: частотный диапазон от 0.03 до 100 Гц; чувствительность 2×1200 В/м/с; 3-канальный 24-разрядный АЦП; частота оцифровки до 200 отсчетов/сек.; встроенная флэш-карта 2-16 Гб. Цифровые данные, полученные на выходе трехкомпонентного блока сейсмоприемников, передаются во внешнюю систему регистрации или сохраняются на встроенной флэш-карте памяти. Точная временная привязка информации обеспечивается благодаря

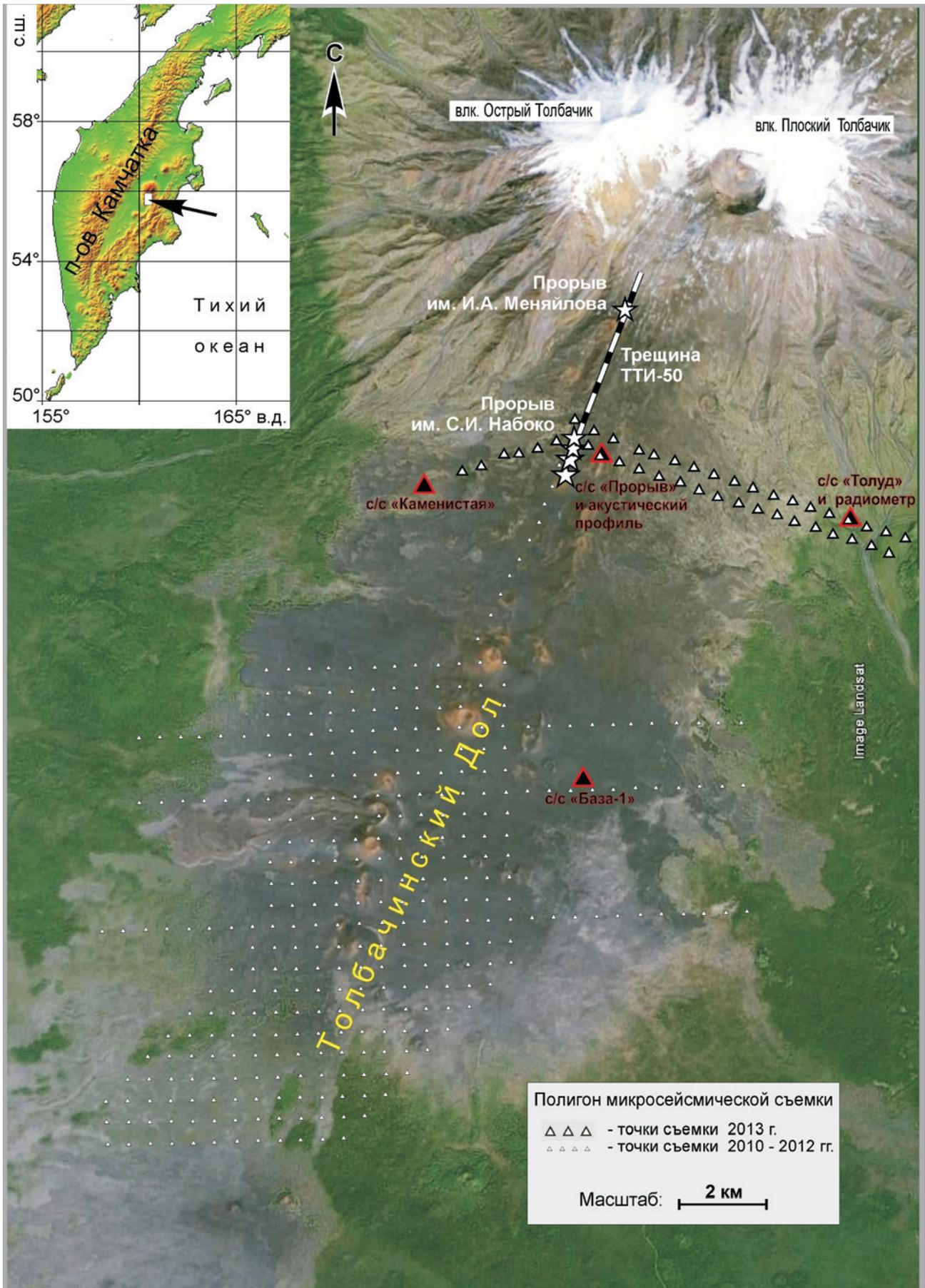


Рис. 1. Схема района проведения комплексной геофизической экспедиции.

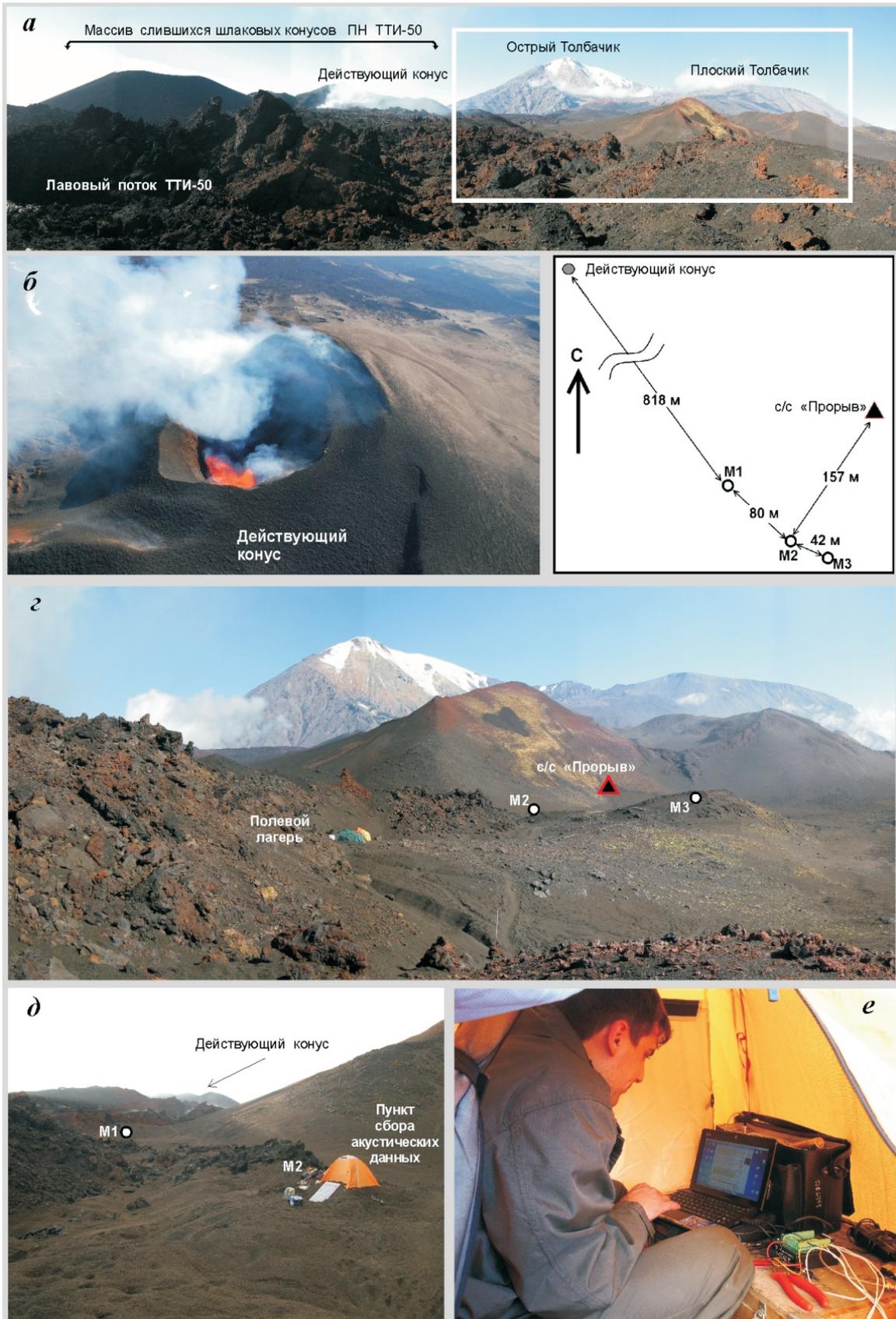


Рис. 2. Проведения полевых работ в районе действующего конуса ТТИ-50: *а* – панорамный снимок района прорыва им. С.И. Набоко и действующего конуса; *б* – состояние действующего конуса в августе 2013 г.; *в* – схема расположения микрофонов и сейсмической станции вблизи действующего кратера; *г* – фотография участка, отмеченного прямоугольником на рис. 2*а*; *д* – расположение микрофонов относительно действующего конуса; *е* – оперативная обработка акустических данных в полевых условиях.

GPS-приемнику, связанному с CMG-6TD через коммутационный блок. Управление сейсмометром ведется с помощью портативного компьютера. Характеристики станций Камчатской региональной сети приведены в (Чебров и др., 2013).

На расстоянии ~ 1 км к юго-востоку от действующего шлакового конуса в комплексе с сейсмологическими наблюдениями (вблизи с/с «Прорыв») была развернута регистрация волновых возмущений в атмосфере, сопровождавших эксплозивные процессы в активном кратере. С целью выделения среди акустических сигналов слабых воздушных ударных волн был развернут близкий к радиальному относительно кратера акустический профиль, состоящий из трех микрофонов М1, М2, и М3 (рис. 2). В качестве датчиков использовались компактные конденсаторные микрофоны SI 102/103, с чувствительностью 1.25 и 0.27 мВ/Па. Микрофоны имеют столбчатую АЧХ в полосе пропускания от 0.001 до 1000 Гц и широкий динамический диапазон по входу, позволяющий регистрировать избыточное давления от десятых долей до сотен Паскаль.

Полевой аппаратурно-программный комплекс, разработанный в КФ ГС РАН для работы вблизи активных вулканов, позволял проводить непрерывную регистрацию волновых возмущений в атмосфере в течение 15 суток. Сигнал от микрофонов с помощью аналого-цифрового преобразователя Zetlab 220 подавался на портативный компьютер Netbook Asus EE PC с малым потреблением энергии. Этот комплект аппаратуры проработал с 12 по 20 августа 2013 г. Дополнительно 16 августа в течение часа работал микрофон, установленный в 60 м от кромки кратера, позволявший регистрировать акустический сигнал в непосредственной близости от источника.

Объемная активность радона в почвенном воздухе регистрировалась в районе с/с «Толуд» с помощью радиометра FemtoTECH RS-410, который измеряет $OA Rn$ электростатическим методом по α -излучению с частотой дискретизации один час. Измерения проводились при непрерывной прокачке почвенного воздуха через измерительную камеру радиометра. Почвенный воздух с помощью вакуумного насоса принудительным способом закачивался в измерительную камеру с глубины 0.5 м через металлический заборник диаметром 15 мм. Автономность прибора позволяла вести непрерывную регистрацию в течение трех суток. Радиометр работал с 14 по 27 августа 2013 г.

МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ

Микросейсмическая съемка выполнялась в рамках начатых в 2010 г. исследований вну-

треннего строения Толбачинского Дола методом низкочастотного микросейсмического зондирования (рис. 1). Эта методика описана в работе (Горбатиков и др., 2008), а некоторые результаты исследований представлены в работах (Кугаенко и др., 2013). Технология микросейсмического зондирования предусматривает последовательное измерение естественного фонового сейсмического сигнала в широком диапазоне частот в выбранных точках полигона или профиля.

В ходе полевых работ 2013 г. пройден микросейсмический профиль, который пересек основную трещину ТТИ-50 в районе действующего конуса (рис. 1). Цель работы – исследование подводных каналов магматической питающей системы ТТИ-50.

Длина профиля 12 км, шаг съемки (расстояние между ближайшими пунктами съемки) 500 м. Время регистрации в каждой точке составляло ≥ 3 часов, что определялось необходимостью достижения статистической устойчивости спектральных характеристик. Запись проводилась с частотой дискретизации 100 отсчетов/сек. Электропитание осуществлялось от портативного аккумулятора.

Профиль был размечен с помощью цифровых карт на этапе подготовки полевых работ с занесением координат точек наблюдения в портативные GPS-навигаторы. Такой подход обеспечил линейность профиля и равномерность реперов регистрации. Съемка была выполнена в ходе пешеходных маршрутов.

Предполагается продолжить работы по исследованию внутреннего строения прорывов ТТИ-50 в ближайшие годы.

ПРИМЕРЫ ЗАПИСЕЙ

Заключительная стадия ТТИ-50 ярко проявилась в снижении интенсивности вулканического дрожания. На рис. 3 приведен фрагмент записи сейсмостанции «Толуд» 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, амплитуда, соответственно, в 14-18 раз. Процесс угасания дрожания занял ~ 12 часов.

На рис. 4 представлена запись поверхностного сейсмического события, предположительно связанного с разрушением уже затвердевшей части лавового поля под действием новых поступающих по лавоводам порций магмы. Участники экспедиции зафиксировали время звукового сигнала со стороны лавового потока, оно совпадает с моментом указанного сейсмического события. По форме записи сейсмический сигнал

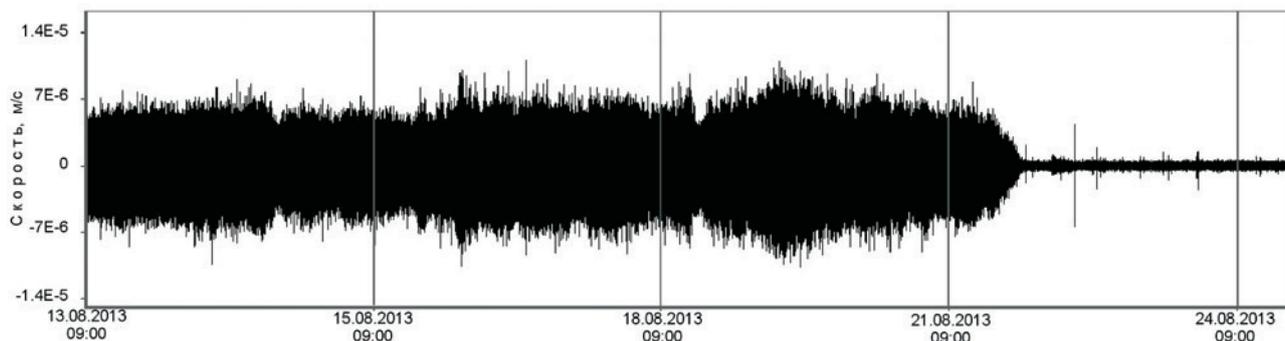


Рис. 3. Сейсмическая запись с сейсмостанции «Толуд», соответствующая прекращению ТТИ-50 (вертикальный канал, частотный диапазон 0.5-2.0 Гц).

соответствует тектоническому землетрясению. Положение его эпицентра было оценено по данным с/с «Толуд» (по поляризации первого вступления Р-волны и Ts-p). Энергетический класс землетрясения $K_s = 4.0$.

Интенсивность акустических сигналов (АС), сопровождавших эффузивную деятельность ТТИ-50 в августе 2013 г., была слабее по сравнению с февралем 2013 г. (Фирстов и др., 2013). При этом регистрировались как слабые воздушные ударные волны, сопровождавшие разрушения больших лавовых пузырей на поверхности лавового озера, так и инфразвуковые волны от небольших пузырей и «лавовых фонтанов». Инфразвуковые волны представляли собой как отдельные импульсы, так и цуги («акустическое дрожание») длительностью в несколько секунд с периодом 0.7-1.0 с (рис. 5а). На графиках спектральной плотности мощности для двух участков записи АС длительностью 20 с за 18 августа, четко выделяется спектральный максимум 0.7-1.3 Гц, левая граница которого определяется скважностью возникновения отдельных импульсов, а правая периодом импульсных АС (рис. 5б).

Проводилось сравнение вулканического дрожания, зарегистрированного на с/с «Прорыв», и инфразвукового сигнала, записанного микрофоном М1 (рис. 6). Для этих целей строились огибающие обоих сигналов по следующей схеме: исходный сигнал, имеющий частоту дискретизации 100 Гц, подвергался децимации 1:10, а затем отфильтровывался от низкочастотных помех фильтром Баттерворта высоких частот с граничной частотой 0.1 Гц, после чего центрировался, а затем строилась огибающая в скользящем получасовом окне.

Рис. 5. Образец записи акустического сигнала длительностью 20 с 18 августа 2013 г. на расстоянии 820 м от действующего кратера ТТИ-50 (а); спектральная плотность мощности акустического сигнала (б). 1 – 17 августа, 2 – 18 августа 2013 г.

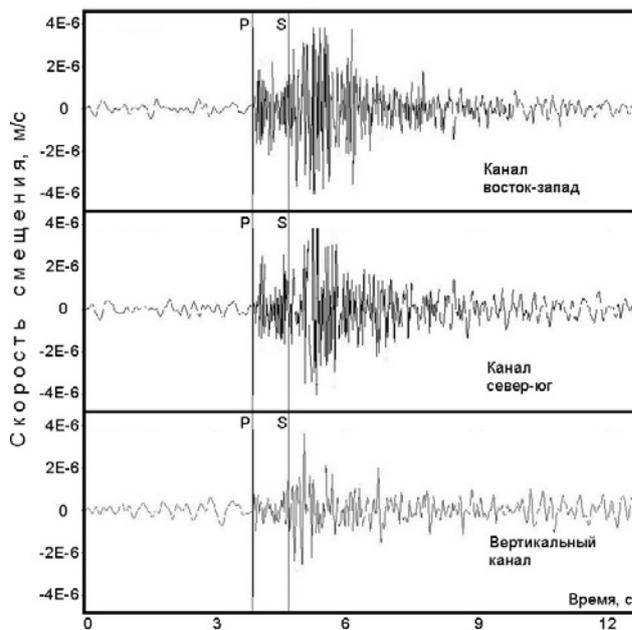
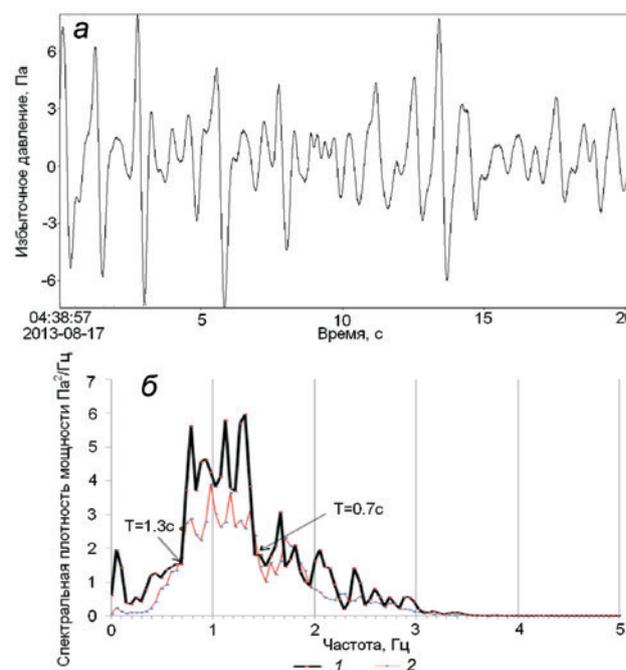


Рис. 4. Сейсмическое событие, предположительно связанное с разрушением затвердевших лавовых покровов. Запись с/с «Толуд». Частотный диапазон 4-16 Гц.



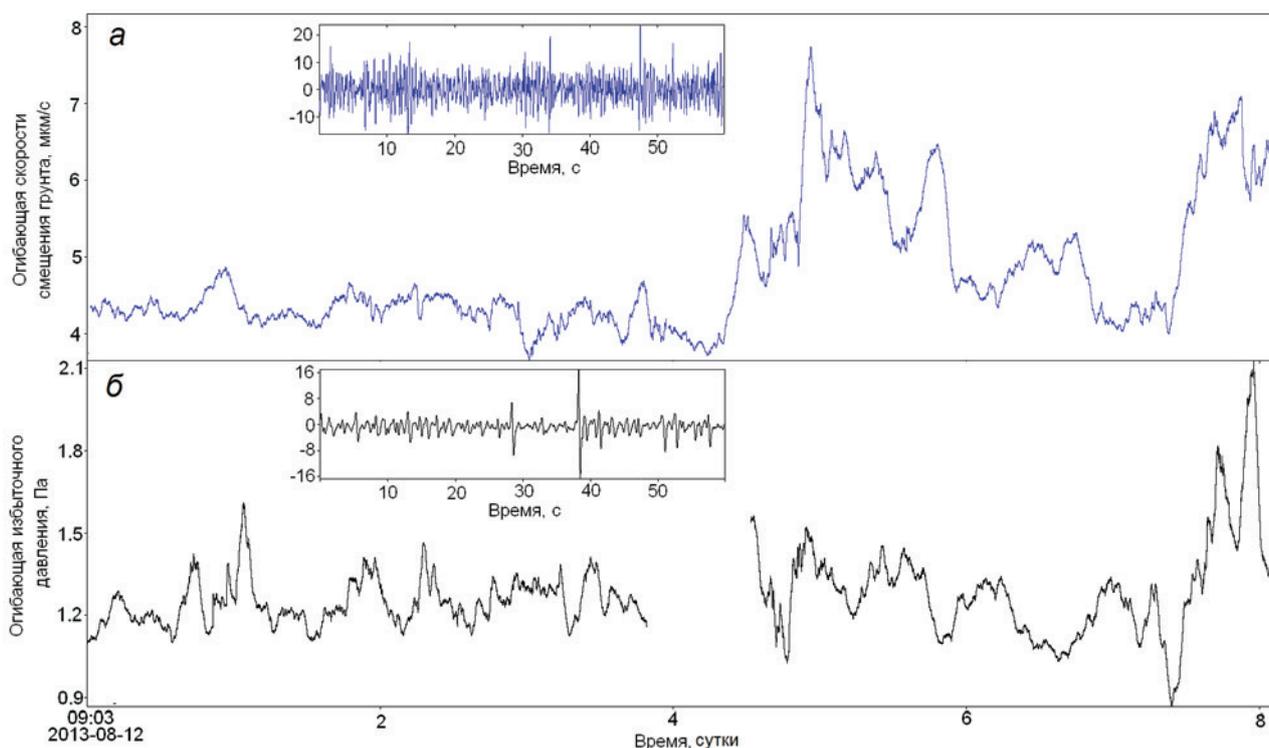


Рис. 6. Огибающая сейсмического сигнала (Z канал), записанного на с/с «Прорыв» (а), и огибающая инфразвуковых волн, зарегистрированных микрофоном М1 (б). На врезках приведены фрагменты записи сигналов длительностью одна минута.

Сравнение уровней интенсивности обеих огибающих (рис. 6) не дает однозначного ответа на их взаимосвязь, хотя выделяется участок одновременного усиления интенсивности акустического сигнала и вулканического дрожания (19–20 августа). Визуально наблюдаемое повышение интенсивности вулканического дрожания 16–18 августа на с/с «Прорыв» не отмечается на с/с «Толуд» (рис. 7). Это дает основание предполагать, что на с/с «Прорыв», расположенной вблизи активного конуса (рис. 1), вулканическое дрожание генерировалось не только движением и дегазацией лавы в активном конусе, но, возможно, также и скрытым ее стоком.

Для построения графика ОА Rn на с/с «Толуд» были использованы исходные данные, один замер в час (обозначены точками на рис. 7а) и выполнено осреднение скользящим средним по 13 точек (0.5 суток) с целью выявления суточных вариаций, которые, как правило, присутствуют в поле почвенного радона. Для исследования динамики ОА Rn на более длинном интервале производилось осреднение скользящим средним по 43 точкам.

В период 14–23 августа уровень огибающей ВД варьировал в пределах 1.4–2.3 мкм/с, и в то же время наблюдалось монотонное снижение ОА Rn с 90 до 60 Бк/м³. После окончания извержения через двое суток ОА Rn возросла до 75 Бк/м³ (рис. 7). Так как ОА Rn в почвенном воздухе отражает состояние геосреды (Рудаков,

2009), то не исключено, что поведение динамики ОА радона связано с перестройкой поля напряжений исследуемого района после прекращения извержения. В дальнейшем этот вопрос будет рассмотрен более детально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспедиции получены новые инструментальные данные для исследования геодинамических процессов, сопровождавших ТТИ-50.

Особенностью полученных материалов являются комплексность примененных геофизических методов с длительностью синхронных записей до 13 суток, позволяющих исследовать динамику и взаимосвязь различных процессов в процессе окончания уникального извержения ТТИ-50.

Сеть временных широкополосных сейсмических станций зарегистрирован процесс завершения наиболее активной стадии извержения.

Впервые непосредственно в районе действующего эруптивного центра эффузивно-эксплозивной активности получены исходные материалы, ориентированные на применение метода низкочастотного микросейсмического зондирования для исследования питающих «корней» текущего извержения.

Полевые работы выполнены при частичной поддержке научных проектов РФФИ 13-05-10033, 13-05-00117, 12-05-31319.

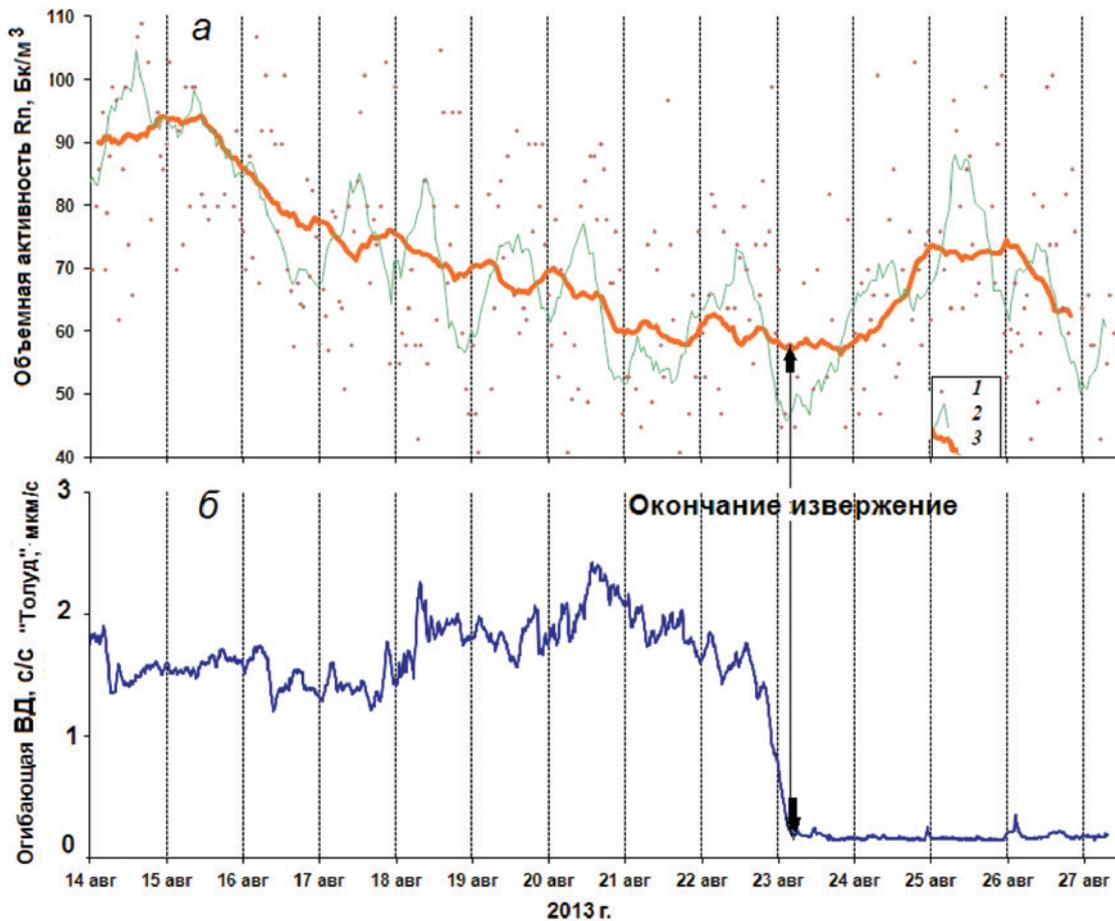


Рис. 7. Объемная активность R_p в почвенном воздухе (а) и огибающая сейсмического сигнала (Z канал), записанного на с/с «Толуд» (б). 1 – исходные данные, 2 – осредненные по 13 точкам, 3 – осредненные по 43 точкам.

Список литературы

- Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66-84.
- Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов 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., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Предварительная 3D-модель глубинного строения Толбачинского Дола по данным микросейсмического зондирования // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 30 сентября – 4 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 466-470.
- Рудаков В.П. Эманиационный мониторинг геосред и процессов. М.: Научный мир, 2009. 175 с.
- Фирстов П.П., Белоусов А.Б., Махмудов Е.Р. и др. Оценка количества взрывчатого газа, во время извержения трещинного Толбачинского извержения имени 50 Института вулканологии в январе-феврале 2013 г. // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 115-121.
- 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.

Ю.А. Кугаенко,
уч. секретарь КФ ГС РАН, к.ф.-м.н.;
П.П. Фирстов,
зав. лаб. КФ ГС РАН, д.ф.-м.н.;
П.В. Воропаев, м.н.с. КФ ГС РАН;
Е.Р. Махмудов, м.н.с. КФ ГС РАН;
Е.О. Макаров, м.н.с. КФ ГС РАН;
А.А. Коновалова, м.н.с. КФ ГС РАН