

**СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ 2012-2013 гг.****Кузнецов Ю.А.***Камчатский филиал ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, ku@emsd.ru*

С 27 ноября 2012 г. по конец августа 2013 г. на Камчатке происходило Трещинное Толбачинское извержение. Это извержение предварялось сейсмической активизацией в течение 4-5 месяцев, его начало было идентифицировано по сейсмическим данным, а для получения дополнительной информации была проведена микросейсмическая съемка и организованы наблюдения временной сетью сейсмических станций. В публикации представлен обзор основных предварительных результатов сейсмологических работ, направленных на всестороннее изучение нового Трещинного Толбачинского извержения.

Введение

В 2012–2013 гг. ученым посчастливилось наблюдать и исследовать одно из крупнейших базальтовых извержений, отмеченных в последние десятилетия на территории России - Трещинное Толбачинское извержение им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ТТИ-50), которое происходило на Камчатке в Южной части Ключевской группы вулканов. В начальной фазе оно сопровождалось умеренными пепловыми выбросами, а в течение всего извержения наблюдались мощные фонтаны лавы и интенсивное излияние жидких лавовых потоков, покрывших площадь около 36 км²; объем поступившей на поверхность магмы оценивается в 0.55 км³. [4, 22] Извержение в основном закончилось в конце августа 2013 г.

ТТИ-50 началось 27 ноября 2012 г. с образования прерывистой поверхностной разломной зоны субмеридионального простирания длиной ~ 6 км в диапазоне высот от 1500 до 2200 м, вдоль которой впоследствии сосредоточились эруптивные центры. Трещинная зона вскрыла южный склон вулкана Плоский Толбачик и прилегающий к нему северный край Толбачинского Дола (южной ветви Толбачинской зоны ареального вулканизма). Полоса ареального вулканизма пересекает вулкан Плоский Толбачик, образуя две ветви: северо-восточную и юг-юго-западную, длина которых ~ 20 км и 40 км соответственно. Они представляют собой протяженные зоны моногенных шлаколавовых образований голоценового возраста и отражают выход на поверхность глубинного магмопроводящего разлома. Предполагается, что в голоцене Плоский Толбачик уже не был активен, а проявления его вулканизма связаны с рифтом ареальной зоны, которая унаследовала питающие каналы стратовулкана [1, 21]. Таким образом, основная трещина ТТИ-50 является одним из многочисленных разрывных нарушений Толбачинской зоны ареального вулканизма.

Основные источники сейсмологической информации о районе ТТИ-50

1. Постоянные наблюдения: станции Камчатской региональной сети в районе Ключевской группы вулканов (каталоги, цифровые записи).
2. Временные наблюдения дополнительными сейсмическими станциями в ходе извержения проводились КФ ГС РАН и ИВиС ДВО РАН в январе-октябре 2013 г. В 2014 г. и в 2015 г. были начаты работы для исследования структуры земной коры под всей Ключевской группой вулканов по проектам *KISS (Klyuchevskoy Investigation: Seismic Structure of Extraordinary Volcanic System)* под руководством Н.Шапира и И.Кулакова при участии КФ ГС РАН и ИВиС ДВО РАН.
3. Микросейсмическая съемка (регистрация естественного фонового сейсмического сигнала широкополосной аппаратурой в заранее определенных фиксированных точках полигона). В районе Толбачинского Дола съемка проводилась в 2010-2015 гг. В 2010-2012 гг. эти работы были ориентированы на центральную часть Толбачинского Дола и основной магмоподводящий разлом; в 2013-2015 гг. – на исследование района нового извержения. Используется метод низкочастотного микросейсмического зондирования (ММЗ, автор А.В. Горбатилов [3]).

В южной части Ключевской группы вулканов глубина землетрясений, зафиксированных Камчатской региональной сетью сейсмических станций, в основном не превышает 30 км, причем 90 % событий локализованы в диапазоне глубин до 15 км. В каталоге Ключевской группы вулканов 2010-2013 гг., когда для обработки землетрясений стала использоваться программа DIMAS [6], для этого района невязки определения координат составляют для эпицентров 3.5 ± 2.0 км, для глубины 3.1 ± 1.6 км (доверительный интервал соответствует среднеквадратичному отклонению).

Отметим интересные особенности пространственного распределения сейсмических событий, отражающие анизотропию проявления мелкофокусной сейсмической активности Толбачинского Дола [12]: (1) землетрясения сконцентрированы преимущественно в его восточной части, граница облака гипоцентров совпадает с осевой разломной структурой Дола; и (2) облако землетрясений задевает магноподводящий разлом лишь своим южным краем.

Основные направления сейсмологических исследований ТТИ-50

- Построение пространственно-временных распределений землетрясений по данным региональной сети станций [5, 8, 17, 19];
- Анализ параметров сейсмического режима [9, 16];
- Изучение тонкой структуры сейсмичности по данным дополнительных наблюдений [13];
- Исследование глубинной структуры методом микросейсмического зондирования [11];
- Томографические методы (материалы находятся в стадии обработки и получения новых данных);
- Анализ волновых форм землетрясений [9];
- Анализ волновых форм сейсмических записей [23];
- Комплексирование сейсмологических и других данных [2, 7, 10, 14, 15, 24].

Основные предварительные результаты

Региональные сейсмологические наблюдения и анализ зафиксированных в районе Толбачика землетрясений привнесли в исследования ТТИ-50 ряд важных результатов.

Начало извержения было идентифицировано по сейсмическим данным [17], что позволило своевременно проинформировать о нем заинтересованные организации.

Ретроспективный анализ сейсмичности, предвзявшей извержение, выявил под постройкой вулкана Плоский Толбачик статистически значимую активизацию низкого энергетического уровня с $K_s = 4-6$, которая развивалась с ускорением и уменьшением глубины в течение не менее 4 месяцев [16]. Анализ сейсмичности был ориентирован на сопоставление среднесуточных (2000–2011 гг.) параметров с их текущими (2012 г.) значениями. Так в 2012 г. наблюдалось отклонение скорости сейсмического потока и скорости выделения сейсмической энергии в сторону увеличения от средних величин. Наиболее уверенно активизация проявилась в параметрах сейсмического режима в августе–ноябре 2012 г. В последние 2–3 недели перед извержением среднесуточные скорости потока сейсмических событий и сейсмической энергии были превышены ~ в 40 раз. Сейсмичность была сконцентрирована в диапазоне глубин до 5 км, что примерно соответствует периферическому магматическому очагу под Плоским Толбачиком [18, 20]. Длительность пробуждения, выявленного по сейсмическим данным, соответствует результатам GPS-мониторинга. Деформационные аномалии перед ТТИ-50 проявились в перемещении центральной части Ключевской группы вулканов. Предваряющие перемещения GPS станций, отдаленных на 20–25 км от прорывов ТТИ-50, начались ~ за 4 месяца до извержения, в августе 2012 г. [14]. Сопоставляя длительность сейсмической и деформационной аномалий (~ 4–5 месяцев до извержения) свидетельствует об их общей генетической природе.

Исследования сейсмической активности всей Северной группы вулканов в период подготовки и развития ТТИ-50 [19] подтвердили основные особенности расположения питающих магматических каналов и очагов под группой в соответствии с геофизической моделью [18].

Отметим выявленные по сейсмическим данным интересные особенности начальной фазы извержения:

- резкое изменение конфигурации облака землетрясений и формирование двух пространственно разобщенных кластеров предположительно во время образования трещинной зоны [17];
- сейсмическая активизация «структурного веера», расходящегося от периферического очага под вулканом Плоский Толбачик (системы радиальных трещин на склонах стратовулкана на высотах от 1500м до 3000м) [7];
- достаточно кратковременное (только между 5 час. и 7 час. UTC 27.11.2012 г.) проявление относительно сильных ($K_s \sim 8-9$) сейсмических событий на вулкане Плоский Толбачик;
- неравномерность пространственного расположения эпицентров землетрясений Толбачинской вулканической зоны в ходе ТТИ-50 [5, 13];
- по результатам анализа сейсмических записей методом SARA [23] на начальной стадии извержения выделено два эпизода миграции, причем в ходе первого эпизода начальная вертикальная миграция магмы сменилась горизонтальной. Вертикальная миграция шла под северо-восточным

склоном вулкана Плоский Толбачик (возможно – под северо-восточной ветвью зоны ареального вулканизма). Эта область проявила себя в ходе извержения: в самом его начале (27.11.2012, между 7 и 8 часами UT) и позднее, по данным временной сети. Второй эпизод миграции, длившийся примерно с 17 час 28.11.2012 г. до 2 час 29.11.2012 г., соответствует началу Толудской серии землетрясений [9];

- исследован Толудский кластер землетрясений, зафиксированный в первые дни ТТИ-50, начавшийся одним из сильнейших на Ключевской группе вулканов сейсмическим событием с $K_s=11.3$ ($M_s=5.3$, $M_w=4.9$). В целом энергия Толудского роя землетрясений в ~50 раз превышает выделившуюся в 2012 г. сейсмическую энергию непосредственно из района вулкана Плоский Толбачик и ТТИ-50 [9, 14]. Учитывая второй зафиксированный эпизод миграции магмы [23], Толудская серия землетрясений может рассматриваться как возможный несостоявшийся прорыв ТТИ-50.

Применение ММЗ позволило наблюдать динамику магнеподводящей системы в параметрах относительных скоростей поперечных сейсмических волн и визуализировать основной разлом Толбачинского Дола. Эти исследования продолжаются.

В результате дополнительных наблюдений в ходе ТТИ выявлена группируемость и сложная мозаичная картина сейсмичности, при этом эруптивная зона не проявила себя в качестве доминирующей [13]. Выявлены круговые и дугообразные структуры, не описанные ранее. Оказалось, что для района ТТИ-50 и вулкана Плоский Толбачик представительность региональной сети завышена, а гипоцентры землетрясений значительно смещаются при включении в обработку временных станций. Получен обширный экспериментальный материал для методических работ, направленных на оптимизацию существующей наблюдательной сети и улучшение точности определяемых параметров землетрясений.

Вызывает отдельный интерес резкая остановка извержения, что нашло свое отражение в записях вулканического дрожания. Процесс угасания дрожания занял ~12 часов, т.е. можно говорить о том, что извержение стремительно завершилось 23.08.2013 г., при этом энергия вулканического дрожания упала в 200–300 раз, а амплитуда, соответственно, в 14–18 раз [13, 15].

Заключение

Сейсмологические исследования ТТИ-50 не закончены. Представленный краткий обзор демонстрирует их разноплановость. Особенностью этих исследований (по сравнению с периодом изучения Большого Трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) 1975–1976 гг.) является использование цифровых сейсмических записей, широкополосной аппаратуры и новых расчетных технологий, основанных на применении компьютеров.

Получен ряд интересных предварительных результатов, которые могут лечь в основу моделей извержения. Для этого представляется необходимым организовать комплексную интерпретацию сейсмологических результатов и данных других направлений исследований, как было сделано после БТТИ [1].

Сейсмологические исследования ТТИ-50 частично поддержаны научным проектом Российского фонда фундаментальных исследований № 13-05-00117. Организация дополнительных сейсмологических наблюдений в 2013 г. стала возможной благодаря финансовой поддержке Президиума РАН.

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. М.: Наука, 1984. 637 с.
2. Гонтовая Л.И., Ермаков В.А., Сениюков С.Л., Назарова З.А. К вопросу о тектономагматической модели вулкана Плоский Толбачик и его ареальных зон // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 143–145.
3. Горбатов 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.
4. 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.
5. Дрознин В.А., Дрознина С.Я. Пространственно-временное распределение землетрясений при трещинном Толбачинском извержении им. 50-летия ИВиС // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 185–193.
6. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34.

7. 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.
8. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, предшествующей извержению Толбачинского вулкана 27.11.2012 // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 171-172.
9. Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Иванова Е.И., Павлов В.М., Салтыков В.А. Толудская серия землетрясений 29.11.-7.12 2012 г., сопровождавшая начало Трещинного Толбачинского извержения // Статья в настоящем сборнике.
10. Кугаенко Ю.А., Вольнец А.О. Комплексирование сейсмологических и петрологических данных для развития модели магматической питающей системы извержений Толбачинского Дола // Статья в настоящем сборнике.
11. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Магматические питающие системы трещинных извержений Толбачинского Дола по данным низкочастотного микросейсмического зондирования // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 67-69.
12. 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.
13. Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Коновалова А.А. Сейсмичность, сопровождавшая Трещинное Толбачинское извержение 2012-2013 гг., по данным временной локальной сети // Землетрясения России в 2013 году. Обнинск: ГС РАН, 2015. С. 93-98.
14. Кугаенко Ю.А., Титков Н.Н., Салтыков В.А., Воропаев П.В. Анализ подготовки Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. в параметрах сейсмичности и деформаций земной коры по данным системы комплексного мониторинга активности вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 40-58.
15. Кугаенко Ю.А., Фирстов П.П., Воропаев П.В., Махмудов Е.Р., Макаров Е.О., Коновалова А.А. Комплексная геофизическая экспедиция в район Трещинного Толбачинского извержения 2012-2013 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2. Вып. 22. С. 225-231.
16. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В. Об аномалии сейсмического режима, предвращавшей новое (2012 г.) трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестник Камчатской региональной организации «Учебно-научный центр». 2012. № 2. Вып. 20. С.16–19.
17. 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.
18. 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.
19. Федотов С.А., Славина Л.Б., Сеньюков С.Л., Кучай М.С. Сейсмические процессы и перемещение магм, происходившие при Большом трещинном Толбачинским извержением 1975-1976 гг. и Трещинном Толбачинском извержении 2012-2013 гг. // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13. № 3. С. 5-30.
20. 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.
21. Флеров Г.Б., Мелекесцев И.В. Извержение 2012–2013 гг. как результат продолжающейся активности Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов (Ключевская группа вулканов, Камчатка) // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 27 - 28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 139-144.
22. Belousov A., Belousova M., Edwards B., Volynets A., Melnikov D. Overview of the precursors and dynamics of the 2012–13 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.04.009
23. Caudron C.; Taisne B.; Kugaenko Yu.; Saltykov V. Magma migration at the onset of the 2012-13 Tolbachik eruption revealed by Seismic Amplitude Ratio Analyses // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.09.010.
24. Lundgren P., Kiryukhin A., Milillo P., Samsonov S. Dike model for the 2012-2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.05.011