

КАМЧАТКА
«Это нормально – жить на вулкане»

ПОЦЕЛУЙ КАМЧАТСКИХ ВУЛКАНОВ:

**Проект KISS
для сейсмологического
исследования
Ключевской группы
вулканов**



КУЛАКОВ Иван Юрьевич – член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 100 научных работ

Одной из главных визитных карточек Камчатки являются вулканы, которых там насчитываются сотни, из них около 30 – действующие. В любой момент времени три-четыре вулкана на Камчатке находятся в состоянии извержения. Камчатка – рай для вулканологов, они найдут здесь неограниченный объем материала для научных исследований

Еще в советское время на Камчатке была создана мощная вулканологическая школа, в рамках которой проводились многоплановые исследования вулканов на высочайшем мировом уровне. Так, в результате десятилетий непрерывного сейсмологического мониторинга, проводимого Камчатским филиалом геофизической службы (КФГС), собран ценнейший материал о поведении вулканов. Несмотря на жесткие финансовые ограничения в постперестроечный период, работникам службы удалось создать современную сейсмологическую сеть, которая непрерывно в режиме реального времени передает сейсмические записи в центральный офис КФГС. Многие станции расположены в труднодоступных местах, и их установка,

ремонт, замена батарей представляют собой тяжелую работу в экстремальных условиях. По количеству и качеству приборов сеть КФГС на Камчатке ничем не уступает зарубежным аналогам, установленным в значительно более простых условиях и с использованием существенно большего финансирования.

Вместе с тем для решения некоторых современных задач этой сети оказывается недостаточно. Так, для изучения структуры недр под вулканом методом сейсмической томографии необходимо, чтобы на нем работали одновременно в течение достаточно длительного времени по крайней мере несколько десятков сейсмических станций. Естественно, одной организации не под силу обеспечить такого рода мониторинг всех интересных с научной точки зрения объектов. Поэтому подключение других организаций к работе на Камчатке активно приветствуется. В рамках такого сотрудничества ученые из Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука (ИНГГ) СО РАН совместно с КФГС и Институтом вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН организует ежегодные установки сейсмических сетей на вулканах



ШАПИРО Николай Михайлович – профессор, заместитель директора Института физики Земли в Париже (IPGP). Автор и соавтор 115 научных работ



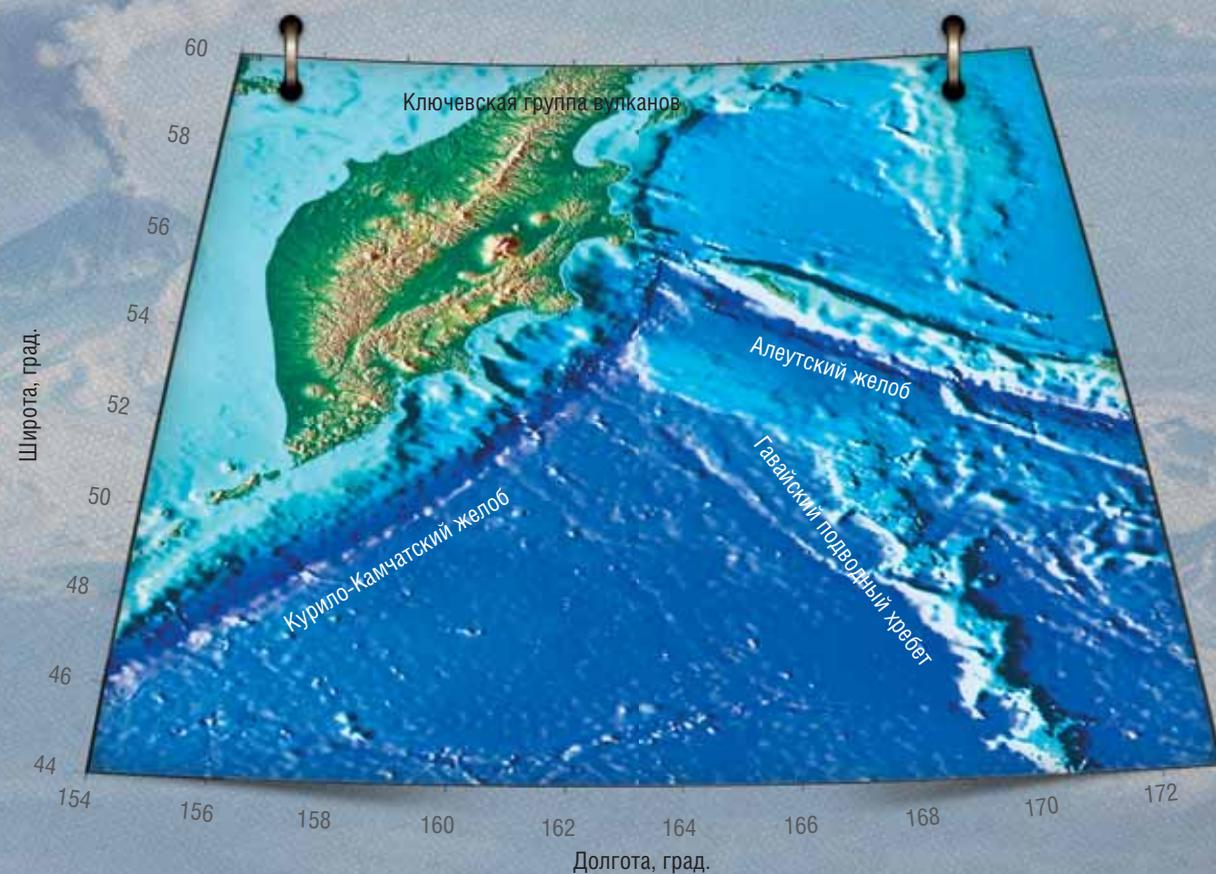
ЯКОВЛЕВ Андрей Владимирович – PhD Университета Франкфурта-на-Майне, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 19 статей



АБКАДЫРОВ Ильяс Фаритович – научный сотрудник Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский). Автор и соавтор 10 научных работ

Ключевые слова: вулканы Камчатки, Ключевская группа вулканов, вулкан Ключевской, сейсмическая сеть, сейсмическая томография.
Key words: volcanoes of Kamchatka, Klyuchevskoy volcano, klyuchevskoy volcano group, seismic network, seismic tomography

© И. Ю. Кулаков, Н. М. Шапиро, А. В. Яковлев, И. Ф. Абкадыров 2016



Камчатки. С 2012 по 2015 г. были проведены три экспедиции на вулканах Авачинский, Горелый и Толбачик. Но, как говорится, «аппетит приходит во время еды». Во время одной из таких кампаний Николаю Шапиро, приехавшему из Института физики Земли в Париже (IPGP), Ивану Кулакову, заведующему лабораторией из ИНГГ, академику Е. И. Гордееву, директору ИВиС и другим заинтересованным лицам пришла в голову амбициозная идея организовать беспрецедентный сейсмологический эксперимент на Ключевской группе вулканов.

Почему именно Ключевская группа вулканов заинтересовала исследователей? Эта группа уникальна по разнообразию и интенсивности вулканических проявлений. На территории, представляющей собой эллипс 80×50 км, собраны 13 вулканов, из которых три – чрезвычайно активные. Ключевской вулкан – самый высокий действующий вулкан Евразии, высотой 4750 м. Каждые 3–5 лет он извергается. Продукты извержения выходят из центрального конуса или из побочных конусов, которых насчитывается около 80. Лавы Ключевского вулкана имеют базальтовый или андезибазальтовый состав и вытекают достаточно спокойно, без крупных взрывов. Всего в 10 км от Ключевского расположен вулкан Безымянный, который имеет принципиально иной андезитовый состав, с большим насыщением флюидами. В 1956 г. произошел катастрофический взрыв,

Топография Камчатки и окружающих территорий. Можно видеть, что Ключевская группа вулканов (КГВ) расположена напротив стыка Курило-Камчатского и Алеутского желобов и совпадает с местом погружения Императорско-Гавайского хребта

который разрушил большую часть горы. С тех пор извержения Безымянного происходят почти каждый год в виде относительно небольших взрывов, выбрасывающих пепел на высоту до нескольких километров. Следующий вулкан группы – Толбачик – характеризуется своими трещинными извержениями, в результате которых изливаются огромные объемы базальтовой лавы, которая в виде раскаленных рек растекается на десятки километров вокруг вулкана. Последнее такое извержение произошло в 2012–2013 гг. Это уникальное разнообразие составов и режимов извержений близко расположенных друг к другу вулканов связано с чрезвычайно сложной системой магматических очагов в земной коре и мантии.

Исходные причины вулканизма на Камчатке связаны с погружением Тихоокеанской плиты в зоне субдукции. Необычайно высокая концентрация активных вулканов в одном месте в районе Ключевской группы может быть связана с тем, что напротив этого места зона субдукции формирует резкий угол, отделяющий Алеутскую дугу от Камчатской.

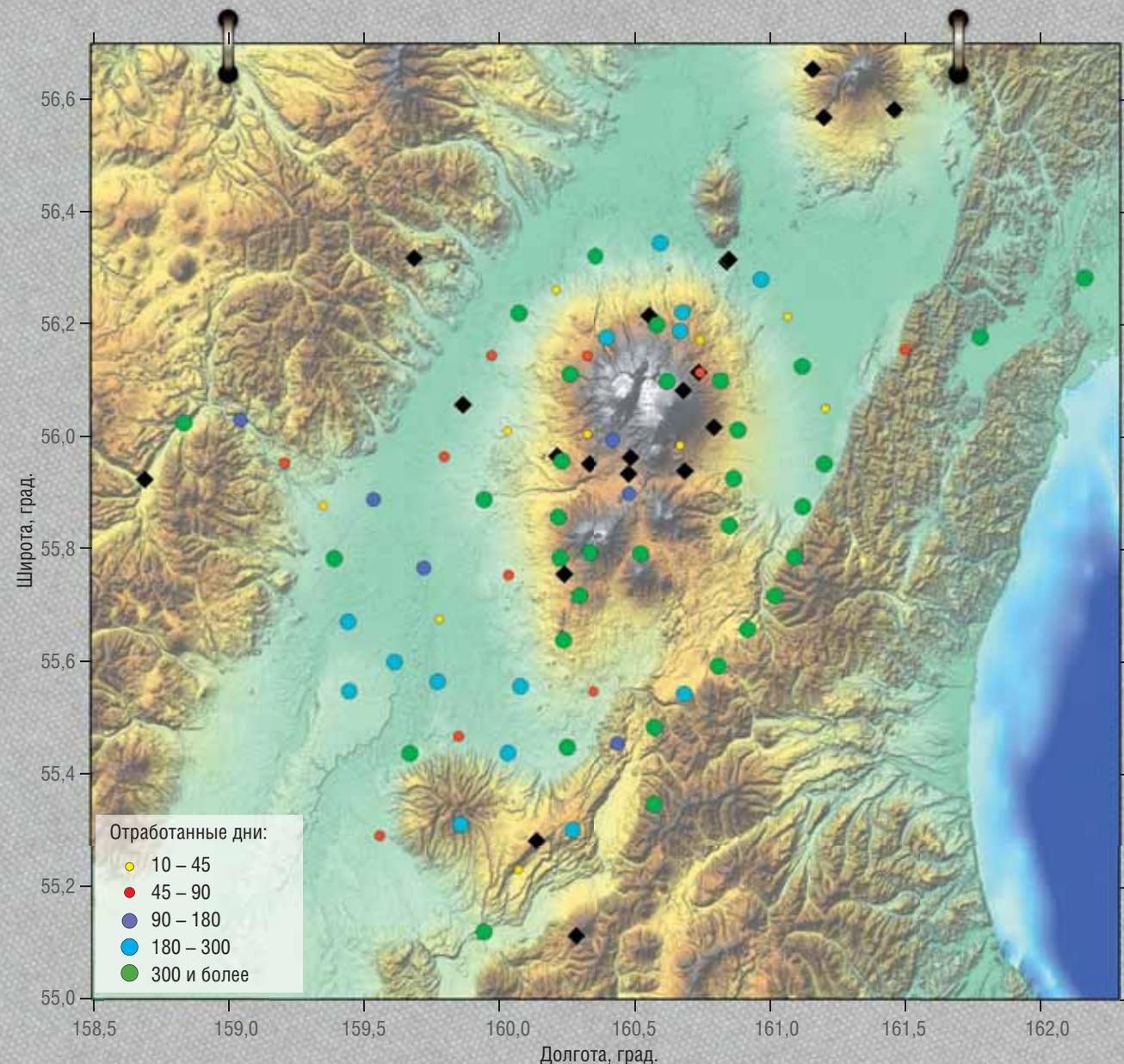
На стыке этих дуг погружающаяся плита (слэб) рвется. Есть гипотеза, что активный вулканизм в этом месте связан с более интенсивным плавлением на краю плиты, приводящим к образованию большего количества магмы (Yogodzinski *et al.*, 2001). Плавление океанической плиты может быть дополнительно ускорено за счет относительно недавнего (по геологическим меркам) изменения положения зоны субдукции, которая сместилась приблизительно на 150 км на восток около 2 млн лет назад (Levin *et al.*, 2002). Согласно другой гипотезы, особое поведение вулканов в этом месте может быть связано с погружением Императорского хребта, который является продолжением огромной цепочки вулканических гор, идущих из центральной части Тихого океана от Гавайских островов. Эти горы образовались вследствие работы Гавайского мантийного плюма, который вот уже более 80 млн лет «протыкает» движущуюся Тихоокеанскую литосферу и образует цепочку вулканов. Погружаясь под континент, этот хребет плавится более активно, чем обычная литосфера, что и могло привести к исключительно интенсивной работе вулканов Ключевской группы.

Для того чтобы проверить те или иные гипотезы, необходимо иметь достоверные данные о глубинном строении коры и мантии. Ранее предпринимались попытки изучать сейсмические структуры под вулканами Ключевской группы на базе имеющихся сейсмических станций КФГС, и были выявлены интересные закономерности, объясняющие особенности вулканической активности группы (Koulakov *et al.*, 2013, 2016). Однако плотности данных при этом было явно недостаточно для детального исследования такого сложного объекта.

По нашим оценкам, чтобы обеспечить надежные топографические изображения всей Ключевской группы вулканов, необходимо около ста сейсмических станций. Сказано – сделано. Данному проекту присвоили романтическое название KISS, которое расшифровывается как: *Klychevskoy Investigation – Seismic Structure of an Extraordinary Volcanic System*. Был написан и выигран грант на международное сотрудничество под эгидой Российского научного фонда (РНФ). Загляли энтузиазмом коллег из Немецкого центра геонаук в Потсдаме (GFZ), которые выразили готовность выделить большое количество сейсмических станций и приехать устанавливать их на Камчатку. Были исписаны тонны бумаг для оформления провоза оборудования через границу и получения разрешения компетентных органов для установки сейсмических датчиков в определенных местах на Камчатке. Шаг за шагом, благодаря слаженной работе коллег из Новосибирска, Германии, Камчатки и Парижа, все формальности были успешно улажены, и в августе 2015 г. горы приборов и батарей прибыли на Камчатку. Все это было погружено на несколько грузовиков и вместе с членами международной команды вывезено в поселок Козыревск, расположенный в непосредственной близости к вулканам.

Следует отметить, что Ключевская группа представляет собой слабо освоенную территорию. Относительно хорошая дорога есть только на западном и северном краях группы. Пути на вулкан Толбачик и некоторые другие точки на западных склонах вулканической группы назвать дорогами можно весьма условно. Для этой экспедиции ИВиС выделил лучшую машину из своего парка. Продираясь сквозь непролазные лесные дебри,





форсируя бурные потоки, пересекая пепловые осыпи, и люди, и машины показывали чудеса выносливости и мастерства.

Все остальные территории, где были запланированы около 70% станций, абсолютно недоступны для автомобильного транспорта. Единственная возможность добраться до них вместе с оборудованием – легкий четырехместный вертолет типа *Robinson*, который способен приземлиться и на полянке в лесу, и на болоте, и на скальном утесе. Отдельно стоит рассказать о пилоте Геннадии Крошкине, который работал вместе с нами. Перед его прилетом в Козыревск наши немецкие коллеги с присущей им педантичностью пытались

Станции, установленные в рамках эксперимента KISS, и постоянная сеть КФГС

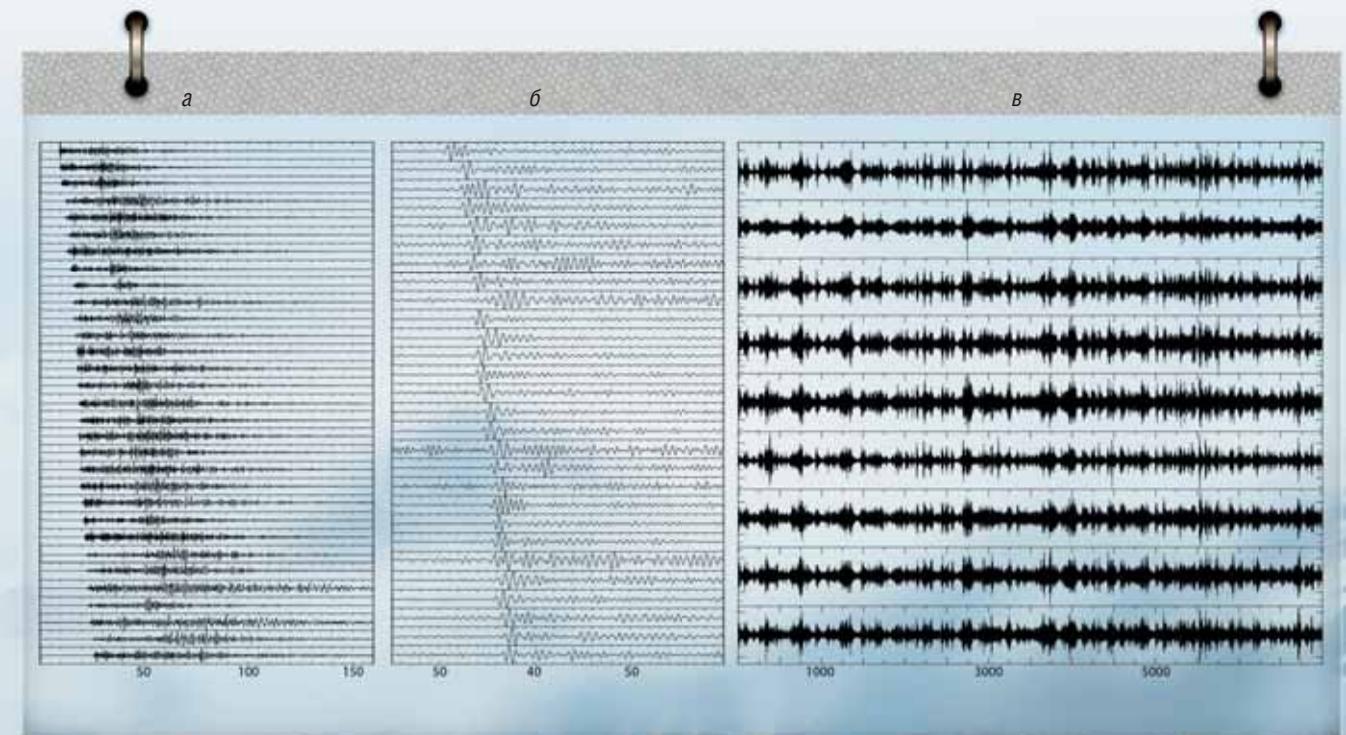
оптимизировать задачу транспортировки оборудования и людей на точки установки станций. В итоге эта задача, схожая по сути с известной головоломкой о волке, козе и капусте, решалась довольно сложным образом, чуть ли не с помощью компьютерного моделирования. По самым оптимистичным прогнозам получалось, что в день можно было установить 3–4 станции, т. е. на установку всей сети потребовалось бы недели две при условии постоянно хорошей погоды. В действительности наш пилот сделал все по-своему, руководствуясь своими

собственными способами организации работы. В немногие ясные дни установка станций производилась с 4 ч утра и до темноты, и благодаря хитрым комбинациям Геннадия удавалось устанавливать до 12 станций в день. При этом погода была далеко не идеальная, и порой в некоторых местах приходилось прорываться под дождем, буквально в паре метров под нижней кромкой облаков. Именно благодаря опыту и безошибочной интуиции Геннадия удалось успешно установить все удаленные станции в кратчайшие сроки – всего за четыре дня.

Что представляет собой установка станции? Сейсмическая станция – это комплекс приборов, в который входят: датчик (своего рода микрофон, способный улавливать низкочастотные колебания Земли), регистратор (прибор для оцифровки и записи непрерывного сигнала), антенна GPS (для синхронизации времени) и высокоемкая батарея для устойчивой работы комплекса в течение года. В мировой практике в качестве источников питания обычно используют солнечные батареи или ветряки. Однако в условиях Камчатки

с ее многометровыми снегами и ураганными ветрами такого рода оборудование использовать невозможно. По этой причине там приборы питаются одноразовыми батареями «Бакен» российского производства с общей емкостью 700 Ач и напряжением 14 В, которые хорошо себя зарекомендовали в суровых камчатских условиях. Сначала выкапываются две ямы: одна побольше – для батарей, и поменьше – для датчика. На дно второй ямы в цементный раствор фиксируется бетонная плита, на которую выставляется ориентированный по уровню и сторонам света датчик. После подключения проводов и тщательной герметизации вся эта система закапывается. На поверхности остается только датчик GPS, который необходимо тщательно замаскировать. Через пару часов после окончания работ ничто не указывает на место, где закопана станция.

Всего в результате экспедиции было установлено 83 станции. Из них – 60 станций, привезенных из Потсдама. Половина из них оснащена новейшими сенсорами *Thrillium*, позволяющими регистрировать низкочастотные колебания с периодом до 120 с.



Примеры сейсмических записей, зарегистрированных станциями эксперимента KISS:
 а – тектоническое землетрясение с магнитудой $M = 4,6$, случившееся в районе сочленения Камчатской и Алеутской дуг 29 сентября 2015 г.;
 б – длиннопериодное событие, произошедшее на глубине около 30 км под Ключевским вулканом 29 сентября 2015 г.;
 в – вулканический тремор, записанный 15 марта 2016 г., являющийся предвестником извержения Ключевского вулкана

Стоимость такого комплекта сопоставима с ценой нового автомобиля эконом-класса. 15 станций были предоставлены ИНГГ и 8 – ИВиС и КФГС. Кроме того, в течение эксперимента на территории Ключевской группы вулканов постоянно работали еще 23 станции КФГС. Таким образом, общее количество станций, работающих одновременно, составило больше сотни. К сожалению, не все станции выдержали экстремальные условия. Несмотря на все попытки замаскировать точки, четыре станции разграбили медведи. В двух случаях медведь утащил с собой регистратор, так что данные оказались утерянными вместе с прибором. В одном случае он разметал оборудование, но интересно, что после этого приборы (немецкое качество!), валяясь под открытым небом, продолжали функционировать и записывать информацию (к сожалению, абсолютно бесполезную). Один регистратор «героически погиб» и безвозвратно пропал, унесенный лахаром – каменно-грязевой лавиной, вызванной извержением Ключевского вулкана в апреле. При этом датчик, закопанный в земле, удалось каким-то чудом найти и извлечь.

В течение года станции временной сети функционировали в автономном режиме, и проконтролировать их работу было невозможно. Снятие станций, которое представляло собой ненамного менее сложную и дорогостоящую операцию, чем их установка, было успешно выполнено в июле 2016 г. После предварительной

проверки записей уже есть первые выводы. Несмотря на некоторые потери, результаты эксперимента можно считать успешными. Полный срок проработали 56 станций; 70 – больше полугода. Беглый осмотр сейсмограмм показывает их высокое качество, позволяющее выделять достаточно слабые сейсмические события под изучаемой областью. Несомненной удачей для ученых стало извержение Ключевского вулкана, которое началось в апреле 2016 г. и продолжается по сегодняшний день. Записи, выполненные чувствительными плотно расположенными приборами, являются уникальной информацией, которая позволит проследить детали процессов внутри вулкана, сопутствующих извержению. Сейчас ученым предстоит большая работа по обработке сотен гигабайтов записей временной и постоянной сетей. Прежде всего эти данные будут использованы для выполнения сейсмической томографии, которая позволит определить детальную структуру в коре и верхней мантии. Кроме того, планируется провести детальное изучение треморов и вулканотектонических землетрясений для выявления путей продвижения магмы. Также предполагается с помощью метода приемных функций для данного региона изучить форму основных границ в коре и мантии. Ожидается, что в результате этих исследований будут получены новые знания, которые позволят ответить на множество вопросов, связанных с функционированием вулканов Ключевской группы.



Литература

Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И. и др. Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и Кизимен (Камчатка) по данным сейсмической томографии // Геология и геофизика 2016. № 57(1). С. 109–124.

Yogodzinski G.M., Lees J.M., Churikova T.G. et al. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges // Nature. 2001. N. 409. P. 500–504.

Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L. et al. Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography // JVGR. 2013. V. 263. P. 75–91.

Levin V., Shapiro N., Park J. and Ritzwoller M. Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka // Nature. 2002. N. 418. P. 763–767.



Исследование поддержано проектом РФФ 14-47-00002