

# Сейсмический «ПУЛЬС» ВУЛКАНА

Экспедиция на вулкан Горелый

Во все времена вулканы были объектом живейшего и зачастую благоговейного интереса людей. Завораживающая красота и мощь вулканических извержений вдохновляла людей на создание легенд и мифов, которые были ничем иным, как попыткой объяснить эти поразительные природные явления. И сегодня интерес к вулканам не ослабевает, ведь человечество по-прежнему уязвимо перед природными катаклизмами, которые вызывают крупные вулканические извержения. Ученые стремятся изучить механизмы, которые приводят к активизации вулканической деятельности: эти данные позволяют не только лучше понять геодинамические процессы, протекающие в глубинах нашей планеты, но и повысить ценность прогнозов вулканической опасности

И. Ю. КУЛАКОВ



КУЛАКОВ Иван Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 70 научных работ

Белые облака над камчатским вулканом Горелый (1829 м) – его «визитная карточка», образовались из газов и водяного пара, извергнутых с огромных глубин

*Ключевые слова:* вулканы, сейсмоприемники, томография, землетрясения.

*Key words:* volcanoes, seismic stations, tomography, earthquakes

© И. Ю. Кулаков, 2014





Одним из способов заглянуть внутрь вулкана и увидеть особенности его строения является сейсмическая томография – достаточно молодой геофизический метод, который в наши дни активно используется для изучения различных геологических структур. Сейсмические волны, которые инициируются землетрясениями, распространяются внутри земной поверхности, «просвечивая» ее подобно рентгену. Задача сейсмической томографии – расшифровать эту информацию и на ее основе создать трехмерную модель упругих параметров (например, сейсмических скоростей). На основе такой модели, в свою очередь, можно судить о геологических процессах, происходящих в глубинах Земли.

При изучении вулканов для получения качественной томографической картины необходимо накопление большого количества точных данных, что подразумевает установку сейсмических сетей на достаточно длительный срок. Это требует больших финансовых затрат, поскольку стоимость одной современной станции для сейсмологических исследований сопоставима с ценой нового автомобиля бюджетного класса, а для проведения качественного эксперимента требуется несколько десятков таких станций. Кроме того, серьезные проблемы вызывает доставка тяжелого оборудования в труднодоступные места и установка его на вулкане.

Поэтому неудивительно, что несмотря на большой интерес, который проявляют ученые к методам сейсмической томографии, в мире не так много примеров

Некоторые из наиболее крупных известных извержений вулканов имели глобальные эффекты и оказали существенное влияние на климат и историю человечества. Так, катастрофическое извержение вулкана Хуайнапутина в Южной Америке в 1601 г. привело к малому ледниковому периоду в Европе, а в России – к неурожаю и голоду в 1601–1603 гг., что стало одной из причин трагического «Смутного времени». Изменение климата в результате извержения вулкана Тамбора в Индонезии в 1815 г. привело к неурожаям, голоду, эпидемиям и смутам на всех континентах. И даже относительно небольшое

удачно расставленных сетей, которые можно использовать для получения внутри вулкана сейсмических изображений хорошего качества.

В 2013 г. лаборатория сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А. А. Трофимука (Новосибирск) инициировала экспедицию на вулкан Горелый на Камчатке, в задачу которой входила установка достаточно плотной сети сейсмических станций.

### «Дышащий» вулкан

Горелый – один из наиболее активных камчатских вулканов. О его потенциальной опасности свидетельствует крупная кальдера (обширная кольцевая котловина) диаметром около 30 км, окружающая современную вулканическую постройку вулкана. Эта кальдера образовалась в результате мощного извержения прото-Горелого вулкана, случившегося около 40 тыс. лет назад, что по геологическим меркам может рассматривать как «вчерашний день».

Объем пород, выброшенных при этом извержении, который оценивается в 100 км<sup>3</sup>, дает основания предположить, что извержение могло оказать глобальный эффект на климат Земли подобно извержению вулкана Тамбора в 1815 г. Такого рода взрывные извержения происходят в случае андезитовых магм, которые представляют собой высоковязкий материал, насыщенный флюидами.

недавнее извержение исландского вулкана Эйяфьядлайекюдль вызвало коллапс авиасообщений в Европе, при том что объем извергнутых им пород (0,01 км<sup>3</sup>) был несопоставим с известными историческими извержениями, такими как Кракатау в 1883 г. (20 км<sup>3</sup>). Огромную опасность представляют и образующиеся во время извержений горячие пепловые тучи (пирокластические потоки), которые движутся с огромной скоростью, уничтожая все на своем пути. Самый печально знаменитый пример – извержение Везувия в 79 г., которое стерло с лица земли процветающий римский город Помпеи

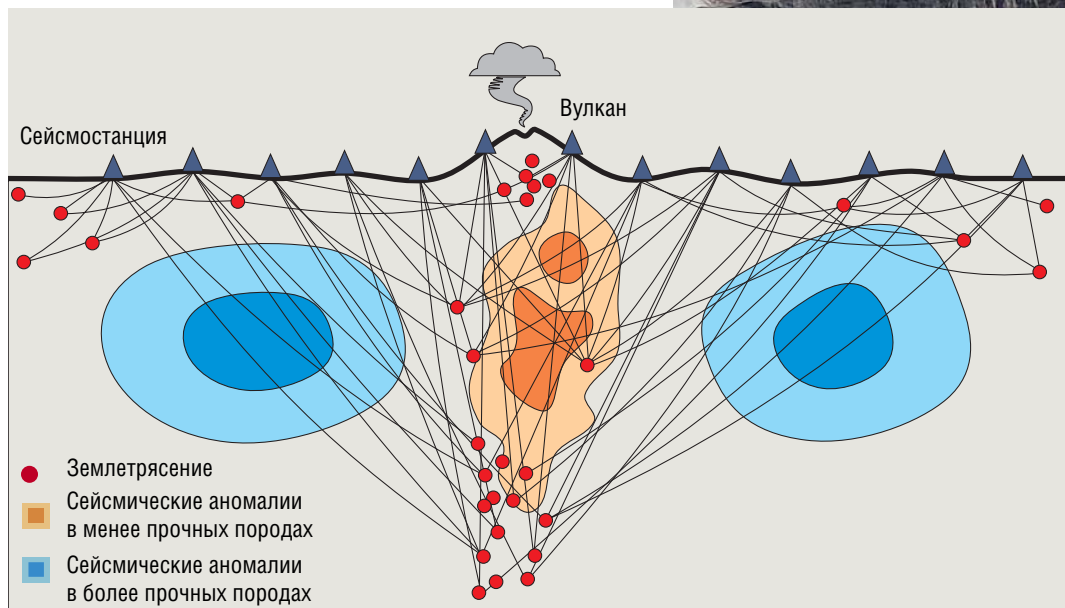
До 2013 г. на вулкане Горелый была установлена только одна стационарная сейсмическая станция, еще две работали на вулкане Мутновский и вулкане Асача

Исследователи на краю активного кратера вулкана Мутновский





В большинстве случаев для изучения глубинного строения вулканов с помощью сейсмической томографии используют пассивные схемы наблюдения. При этом сейсмический сигнал, возбуждаемый естественными источниками (землетрясениями), регистрируется сейсмостанциями, установленными на поверхности. Распространяясь в среде, сейсмические волны «накапливают» интегральную информацию о распределении упругих параметров в пространстве между приемником и источником. Задача томографии состоит в том, чтобы расшифровать эту информацию и определить пространственное распределение сейсмических параметров



Вулкан Горелый располагается в 75 км к юго-западу от г. Петропавловск-Камчатский. Горелый – типичный кальдерный вулкан. Его современную постройку венчают три крупных слившихся вулканических конуса, на склонах которых имеются десятки побочных прорывов. На вершине вулкана сегодня насчитывается одиннадцать кратеров, включая центральный, из которого идет мощный выброс газов





Вид с вершины вулкана Горелый. Слева – почти идеальный конус вулкана Вилючинский, справа – вулкан Мутновский



Это застывшее озеро расположено в одном из кратеров вулкана Мутновский, входящего в единую магматическую систему с вулканом Горелый

В настоящее время вулкан Горелый характеризуется достаточно спокойными, регулярными извержениями базальтовых лав. Такие лавы благодаря своей низкой вязкости спокойно растекаются по большой площади, в результате чего формируется щитовой вулкан с пологими склонами. Такой режим, как правило, не приводит к катастрофическим извержениям. Вместе с тем никто не может гарантировать, что этот вулкан вновь не изменит «стиль поведения», что случилось уже неоднократно в его геологической истории.

За последнее столетие вулкан Горелый извергался не слишком интенсивно, но регулярно, с периодичностью 20–30 лет; последнее извержение произошло в 1980 г. Пепел от этого извержения долетел до г. Петропавловск-Камчатский, расположенного в 70 км от вулкана.

Сейчас вулкан Горелый находится в стадии активизации: в вулканической постройке ежедневно происходят десятки землетрясений, регистрируются продолжительные сейсмические колебания (треморы), которые обычно связывают с перемещениями масс внутри магматического очага. Возможно, фаза сейсмической активизации вскоре перейдет в фазу извержения, однако определенно предсказать развитие процессов в вулкане пока не представляется возможным.

Еще одной особенностью Горелого является постоянный активный выброс газов через центральный кратер. Это воистину грандиозное зрелище: газы вырываются из раскаленного докрасна отверстия на дне кратера со звуком, сопоставимым с работой ракетного двигателя. Поднимаясь с огромной скоростью на высоту нескольких сотен метров, газы конденсируются и образуют облака, которые видны за многие десятки километров.

Общая масса газов, выбрасываемых из центральной фумаролы вулкана Горелый, оценивается в 11 тыс. т в сутки! Такие цифры заставляют задуматься о том, что, может быть, основным продуктом жизнедеятельности

вулканов являются вовсе не изверженные породы, выброс которых происходит эпизодически, а именно газовые флюиды, которые выходят из недр Земли постоянно. Очевидно, что в этом смысле вулканическая активность должна играть весьма существенную роль в атмосферном балансе Земли. Но это уже другая история...

## Август на Камчатке

Несмотря на интересное строение и достаточно высокую активность вулкана Горелый, его геофизические исследования до недавнего времени велись не так интенсивно, как он того заслуживал. К началу экспедиции там была установлена только одна постоянная сейсмическая станция, которая позволяла вести мониторинг сейсмической активности в режиме реального времени, однако по этим данным невозможно определить координаты землетрясений внутри вулкана. В ближайшем окружении Горелого, на соседних вулканах Мутновский и Асача, имелись еще две станции, однако этой сети было недостаточно для полноценного изучения внутреннего строения вулкана Горелый.

Экспедиционные работы начались летом 2013 г. Базовый лагерь экспедиции находился на дне кальдеры у подножия вулкана. Это место представляло собой продуваемую ветрами пустынную долину. Из-за высокой пористости грунта любая вода, стекающая с ледников, мгновенно впитывается, поэтому рядом с лагерем не было источника воды, в том числе питьевой, которую пришлось завозить в бочках. За водой для гигиенических целей приходилось отправляться к подножию снежников, где встречались небольшие лужи: при сильном ветре и температуре чуть выше нуля «водные процедуры» давали хороший освежающий эффект. Но несмотря на такие непростые условия, большой опыт участников отряда и правильная организация быта сделали проживание в лагере вполне комфортным.

Станции устанавливались как на склоне вулкана, так и за пределами кальдеры. Это делалось в любую погоду, несмотря на сильный ветер, туман, дождь, пылевые бури и прочие прелести камчатского августа.





#### УЧАСТНИКИ ЭКСПЕДИЦИИ

Полевые работы по установке сейсмических станций проводились в августе 2013 г. группой из десяти человек. Шестеро из них – сотрудники и студенты лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН из Новосибирска, которые ежегодно проводят полевые работы по сейсмологическому исследованию различных вулканов Камчатки. В качестве волонтеров к группе присоединились двое зарубежных коллег. Для Алехандро Диаса, аспиранта из университета Гранада (Испания), с которым наша лаборатория давно сотрудничает, работа на Камчатке выполнялась в качестве стажировки с целью приобретения бесценного опыта работ в тяжелых полевых условиях. Другой зарубежный коллега, профессор Николай Шапиро, заместитель директора Института физики Земли Парижа (Institut de Physique du Globe de Paris) известен во всем мире как автор целого направления в сейсмологии. Его советы были чрезвычайно важны для оптимизации установки сети. Богатый опыт проведения полевых работ на Камчатке молодого сотрудника из Института вулкано-

гии и сейсмологии ДВО РАН Ильяса Абкадырова выручал нас в непростых ситуациях. Наконец, мастерство и самоотверженность водителя экспедиции Сергея во многом определило успешность установки сейсмической сети. О водителях на Камчатке, которые совершают настоящие чудеса, следует написать отдельный рассказ. Например, для того чтобы подъехать к некоторым частям вулкана и тем самым сократить продолжительность пеших маршрутов, приходилось пересекать крупные поля снежников. В некоторых местах под снегом были возможны скрытые резервуары талой воды. Если тяжело загруженный ГАЗ-66 провалится в таком месте, вытащить его будет очень сложно. Благодаря феноменальному чутью водителя нам удалось благополучно преодолеть все препятствия и проникнуть на машине в такие места, где и пешком трудно передвигаться. Научная задача работавшей параллельно с нами геофизической экспедиции оказалась невыполненной именно из-за того, что пересечение таких снежников стало для них непреодолимой проблемой

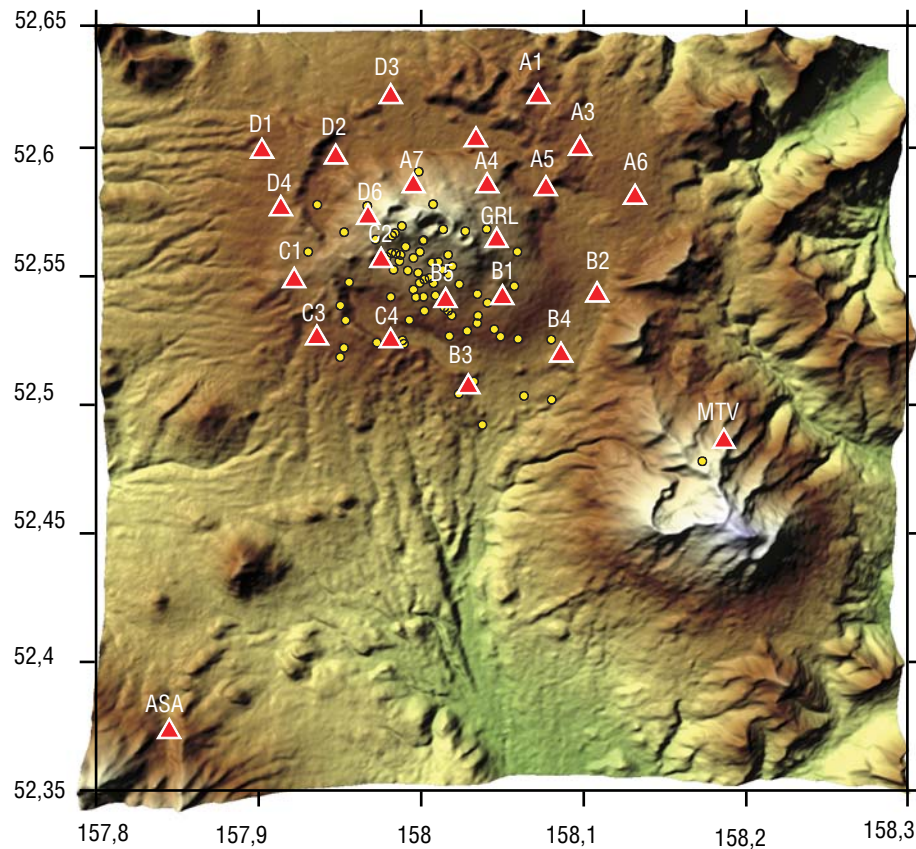
Испанский коллега Алехандро Диас и Павел Кузнецов прокладывают путь к новой станции на склоне Горелого

Снежники – коварное препятствие для машины. Требуется большое мастерство и интуиция водителя, чтобы успешно их пересечь

Временный «дом» экспедиционников был разбит в кальдере у подножия современной вулканической постройки Горелого







Сейсмическая сеть, установленная на вулкане Горелый летом 2013 г. в дополнение к трем действующим станциям Камчатского филиала Геофизической службы РАН (ASA, MTV и GRL), уже в самом начале работы за несколько часов зарегистрировала положение ряда сейсмических событий, сопровождавших активацию вулкана. Положение станций отмечено красными треугольниками, землетрясения – желтыми точками

Камчатская погода в августе непредсказуема: иногда балует ярким солнцем, а иногда встречает ураганным ветром, дождем и туманом. В любом случае маршрут на вулкан Горелый никто не отменял



По дну кальдеры можно было проехать на автомашине, но далее приходилось продвигаться пешком на расстояние до 3–4 км по резко пересеченной местности, да еще с грузом за плечами. Груз в рюкзаках включал в себя все компоненты сейсмической станции, дополненные компьютером, шанцевым инструментом, теплоизоляционной паклей и другими необходимыми вещами для установки станции.

Сейсмическая станция включает в себя три основных элемента. Во-первых, датчик – упрощенно говоря, очень чувствительный микрофон, улавливающий колебания поверхности Земли на достаточно низких частотах (например, с периодом до 50 с.). Во-вторых, регистратор, который проводит оцифровку сигнала с датчика и записывает его на карту памяти. И, наконец, источники питания. В качестве последних за рубежом часто ис-







Полуостров Камчатка –  
родина красной лисы-огневки

Фумаролы на вулкане Мутновский,  
извергающие раскаленный газ  
с пренеприятным запахом

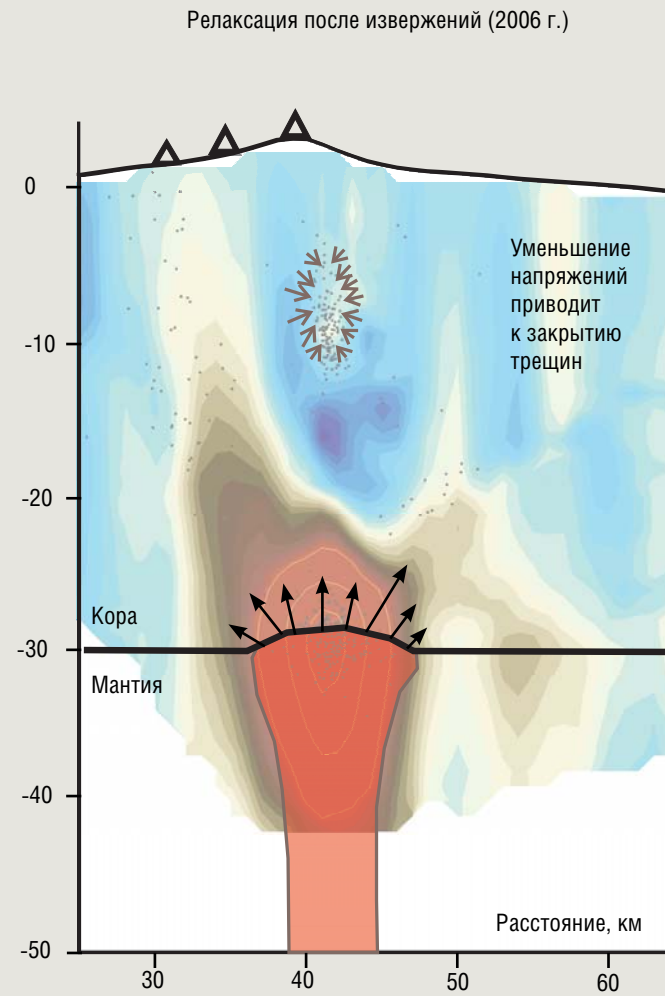
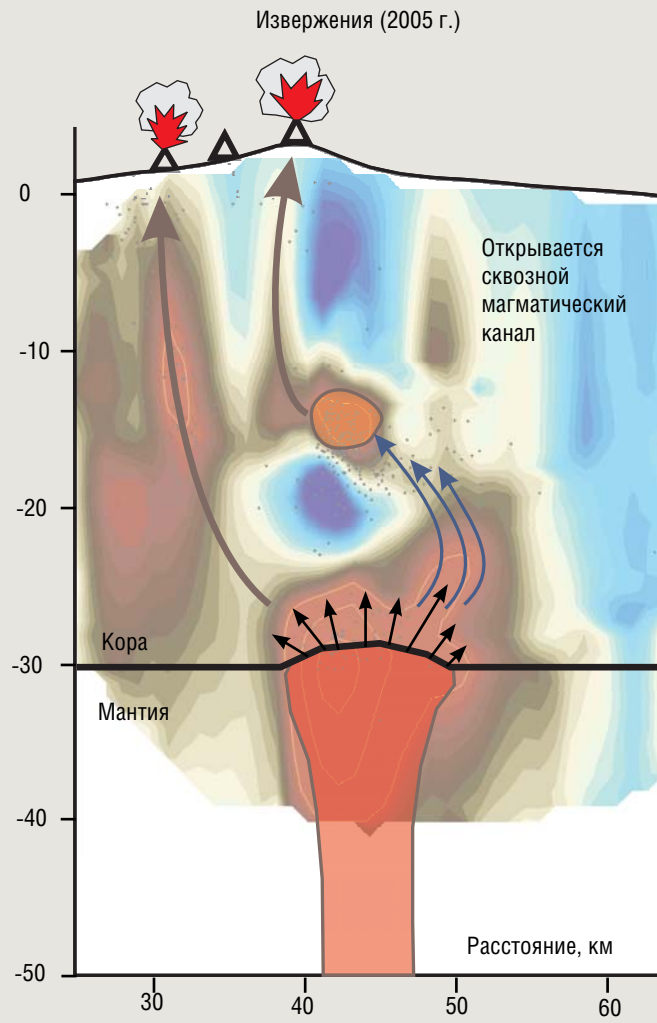
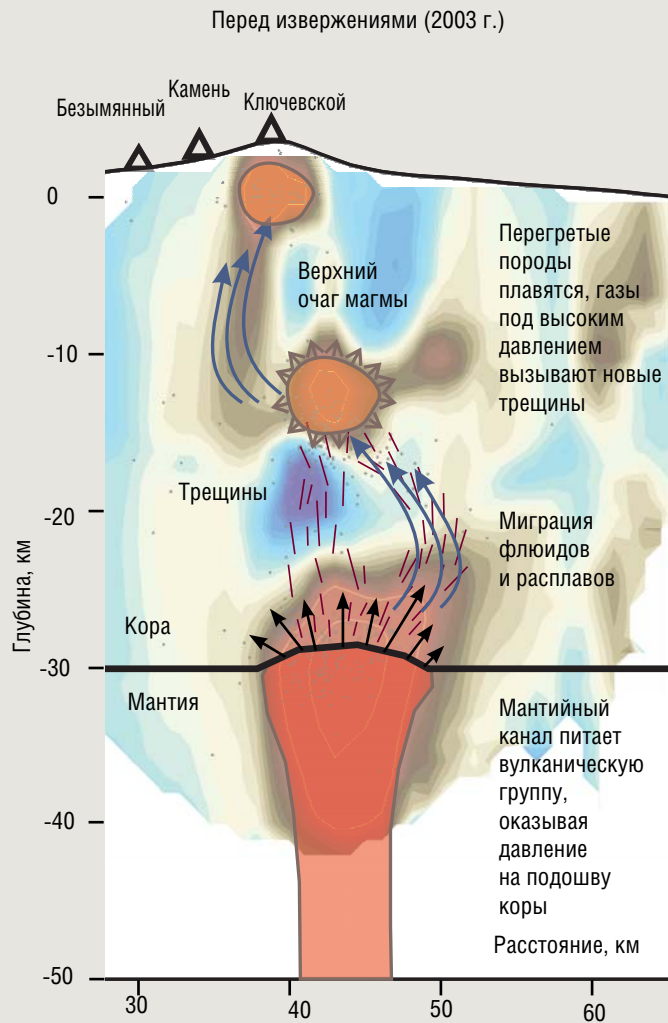


пользуют солнечные или ветряные генераторы, однако в условиях Камчатки применять их не представляется возможным из-за сильных ветров и обильных снегопадов. Поэтому в качестве источника энергии для одной станции (которого хватает на один год эксплуатации) используются специальные батареи большой емкости общей массой около 40 кг.

С целью предохранения от мороза оборудование закапывалось в землю на достаточно большую глу-

бину, что было нелегко, учитывая каменистую почву вулкана. Но самую большую опасность для приборов представляют не низкие температуры, а вандалы, двуногие и четвероногие. Так, известны случаи, когда стационарные пункты геофизической службы, установленные в чрезвычайно труднодоступных местах, были полностью разграблены, несмотря на бетонные стены и бронированные двери – злоумышленники использовали автоген, который доставляли издалека





**ВУЛКАНИЧЕСКИЕ МЕТАМОРФОЗЫ**

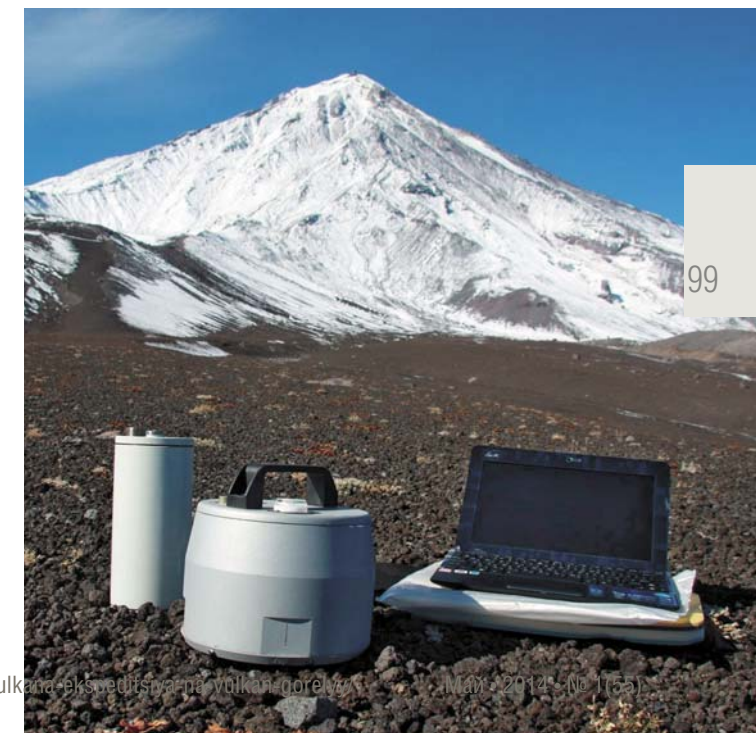
Сибирским исследователям одним из первых в мире удалось предоставить доказательства того, что структура недр под вулканами может существенно меняться на различных этапах вулканической активности (Koulakov *et al.*, 2013). На основании данных длительных сейсмологических наблюдений была построена четырехмерная томографическая модель коры под вулканами Ключевской группы Центральной части п-ова Камчатка и прослежены ее изменения на разных этапах извержения. Оказалось что основной питающий магматический источник под Ключевским вулканом, расположенный на глубине ниже 24 км, оставался неизменным в течение всего периода наблюдения. В то же время вышележащие структуры значительно менялись благодаря миграции флюидов и расплавов. Отмечено, что в период, предшествующий крупным извержениям Ключевского и Безымянного вулканов, под ними находились два тела с аномальным высоким отношением скоростей поперечных и продольных сейсмических волн ( $V_p/V_s$ ), которые были расположены друг над другом

на глубинах 12 и 1 км. Эти аномалии отражают наличие промежуточных магматических камер, существование которых подтверждается петрологической информацией о разнообразии составов и режимов извержений вулканов Ключевской группы. При извержении структура земной коры под вулканами резко изменилась: конфигурация сейсмических аномалий стала другой, а среднее значение отношения  $V_p/V_s$  увеличилось. Это может свидетельствовать об активизации миграции флюидов и расплавов во время извержения и насыщении ими пород под вулканами. В последующие три года после извержений средний уровень отношения  $V_p/V_s$  под вулканами уменьшился, а аномалии в верхней части коры исчезли. Это свидетельствует о наступлении фазы релаксации вулкана, когда количество флюидов в системе становится недостаточным для формирования магматических очагов. Полученные результаты позволили сделать вывод, что магматические очаги являются очень динамическими система-

ми. Вероятно, их вещество – пористое, как губка, содержит перегретые породы, близкие к точке плавления. Температура их плавления при проникновении флюидов из мантии понижается, что и приводит к частичному плавлению пород и формированию магматических очагов. Однако, если в результате вулканической активности флюиды в конце концов выходят на поверхность, расплавленная субстанция в магматических очагах может быстро исчезнуть



Главными элементами сейсмостанций, установленных на вулкане Горелый, является регистратор «Baikal» и сенсор СМЕ 4111 отечественного производства (внизу). Эти приборы на целый год закапывают в землю. Для обеспечения непрерывной работы одной сейсмостанции требуются несколько батарей общим весом 40 кг (вверху)







по бездорожью. При этом, как правило, ничего из оборудования не было похищено, и ценные научные приборы, которые нельзя использовать в обычной жизни, были просто разбиты безвозвратно.

Большую опасность для станций представляют и медведи, численность которых на Камчатке достаточно высока и которые отличаются немалым любопытством и интересом к человеку. Известны случаи, когда сразу после установки станции медведи устраивали там настоящий погром, после чего станции требовался капитальный ремонт. Именно поэтому на месте проведения работ рекомендуется не есть, не справлять естественную нужду и вообще не оставлять на поверхности ничего, что могло бы указать животным на присутствие человека. К счастью, в августе медведи обычно стараются держаться подальше от человека, хотя их присутствие где-то рядом чувствуется постоянно.

В результате ударной работы в течение десяти дней все новые станции были успешно запущены, однако отъезд пришлось отложить. В последний день установки была получена информация, что в вулкане началась сейсмическая активизация, выражающаяся в сотнях слабых, но ощутимых землетрясений ежедневно. Нельзя было упустить возможность оперативно получить уникальную информацию, поэтому экспедиция провела трехдневные выходы у подножия вулкана, пока все станции одновременно вели запись сейсмических процессов.

По ходу экспедиционных работ новосибирские исследователи при поддержке Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН установили на вулкане Горелый 21 сейсмическую станцию в дополнение к уже существующей. По расположению и инструментальному обеспечению эта сейсмическая сеть на вулкане на сегодня является одной из лучших в мире.

С помощью новой сети уже удалось получить первые данные о сотнях сейсмических событий на вулкане, которые будут использованы для обнаружения положения магматического очага. На их основе уже в ближайшее время планируется построить предварительную томографическую модель вулкана.

Основной объем информации будет получен в августе 2014 г., а затем приборы будут извлечены из земли. Предполагается, что данные, полученные за полный год работы сети, дадут все необходимые сведения о функционировании магматической системы вулкана и позволят оценить возможность его активизации в будущем.

Молодые геологи на краю кратера вулкана Горелый. К сожалению, на фотографии не передать оглушающий шум газов, вырывающихся из отверстий внизу

#### Литература

Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion // *Benchmarks for testing tomographic algorithms*. 2009. BSSA. V. 99, N. 1. P. 194–214.

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 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. V. 263. P. 75–91.

Работа поддержана проектом Отделения наук о Земле РАН № 7.3, интеграционным проектом СО РАН № 20 и интеграционным проектом СО и ДВО РАН № 42

