

«МИССИЯ ВЫПОЛНИМА»:

УСЛЫШАТЬ ДЫХАНИЕ ВУЛКАНА ЭБЕКО

Установить на активном вулкане сеть сейсмических станций – это совсем не то, что поставить точки на карте, исходя из научной целесообразности. Это уже настоящие приключения в стиле Джеймса Бонда, которые выпали на долю новосибирских ученых на о. Парамушир – самом северном в цепи Курильских островов, где расположен вулкан Эбеко. Целый год 21 сейсмическая станция будет записывать «пульс» вулкана. С помощью этих данных ученые смогут понять, как устроен вулкан и как он работает.

О важности этих исследований и трудностях, с которыми пришлось столкнуться, рассказывают сами участники экспедиции

СМИРНОВ Сергей Захарович – доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН (Новосибирск), профессор Новосибирского государственного университета. Автор и соавтор более 150 научных работ

КУЛАКОВ Иван Юрьевич – член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе и заведующий лабораторией сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор более 250 научных работ

© И. Ю. Кулаков, С. З. Смирнов 2021



На Парамушире – втором по величине острове Большой Курильской гряды – находится несколько действующих вулканов. Наиболее активный из них – Эбеко: с 2016 г. в некоторые дни он производит взрывные выбросы туч пепла и газа с периодичностью менее часа. При этом сам «взрыв» продолжается несколько минут, после чего идет относительно спокойное выделение газов.

Эбеко расположен всего в 6 км от г. Северо-Курильска с населением около 2,5 тыс. человек, поэтому его активность вызывает серьезные опасения и к тому же доставляет определенные неудобства местным жителям. Когда ветер дует от вулкана в сторону города, все открытые поверхности покрываются слоем пепла, что приводит к быстрому износу техники, а иногда в воздухе явно ощущается неприятный запах вулканического газа.



Судно «Гипанис», курсирующее между г. Петропавловском-Камчатским и о. Парамушир, – главное связующее звено острова с Большой землей.

Вверху – вид из иллюминатора судна на г. Северо-Курильск – единственный на начало XXI в. жилой населенный пункт Парамушира

Ключевые слова: извержения вулканов, Курильские острова, Парамушир, вулкан Эбеко, термальные воды, сейсмическая томография.

Key words: volcanic eruptions, Kuril islands, Paramushir, Ebeko volcano, thermal waters, seismic tomography



До недавнего времени считалось, что выбросы вулкана Эбеко состоят только из газов и пепла. Такого рода *фреатические* извержения происходят потому, что так называемые *метеорные* (дождевые и талые) воды, оказавшиеся под поверхностью вулкана, нагреваются поднимающейся магмой, вскипают и в виде пара под большим давлением вырываются наружу. Наблюдения за аналогичными вулканами мира показали, что подобного рода вулканическая активность вряд ли сможет вылиться в более крупное извержение с катастрофическими последствиями для населения острова.

Однако недавно в вулканическом пепле Эбеко выявили отчетливые следы магматического материала (Belousov *et al.*, 2021). Это означает, что исключить возможность сценария, когда в игру могут вступить глубинные *флюиды* – жидкие и газообразные легкоподвижные компоненты, которые находятся в магматических расплавах в виде пузырьков или растворенном состоянии, нельзя. Если их концентрация окажется высокой, а показатели температуры и давления близки к критическим, может развиваться лавинообразный процесс дегазации – аналогично образованию пены при быстром открывании бутылки с шампанским. И это может стать причиной катастрофичного взрывного

извержения. Именно поэтому Эбеко надо изучать всеми доступными методами современной геологии и геофизики.

Другая причина, определяющая важность подобных исследований на Парамушире, – перспектива разведки геотермальных ресурсов, которые предполагается использовать для нужд местного населения. Сегодня для обеспечения Северо-Курильска электроэнергией, теплом и горячей водой приходится тратить огромные средства на закупку и доставку мазута. А ведь город находится в непосредственной близости от огромного вулканического «парового котла» с неисчерпаемым ресурсом энергии. Еще в 1990-е гг. для поиска резервуара термальных вод недалеко от города вслепую была

Вверху – долина реки Зеленой. Сейсмические станции, установленные в устье реки и на перевале, с которого сделан кадр, будут год слушать дыхание вулкана Эбеко

Команда новосибирских исследователей, десантированная с вертолета на перевал, где будет установлен лагерь





На Парамушире есть только один населенный пункт – Северо-Курильск, окруженный некоторым подобием дорог, по которым можно перемещаться на автомобилях. Кое-куда получится добраться на квадроцикле, вдоль береговой линии – на моторной лодке, однако делать это можно только в условиях хорошей безветренной погоды, что на Северных Курилах большая редкость. По этой же причине рискованно полностью уповать на вертолет в качестве основного транспорта. Поэтому рассчитывать приходится прежде

всего на собственные ноги и спины, чтобы в любых условиях добраться до нужного места и использовать каждый погожий денек.

Запланировать рейсовый вертолет, который прилетает на остров раз в неделю, – сложная задача со множеством неизвестных. Заранее договорившись на определенную дату, нельзя быть уверенным, что погодные условия позволят в этот день выполнить запланированную работу.

Но вот приходит условленный день. Вертолет приземляется на площадке за городом. Команда быстро и слаженно грузит почти тонну оборудования. Взлетаем. Кажется, не проходит и пары минут, как машина идет на посадку на вершине высотой около 1000 м – месте установки первой станции. Буквально за 10 секунд два человека вместе с оборудованием оказываются на земле, и в ту же секунду вертолет взлетает. У нас есть полчаса, пока он доставляет еще две бригады и разбрасывает оборудование по острову. За это время надо быстро

Установка сейсмической станции на вершине утеса на фоне взрывных выбросов вулкана Эбеко

Рыжая лиса – хозяйка местных гор – пришла с инспекцией в лагерь геофизиков

пробурена очень дорогая скважина глубиной около 2,5 км, но термальных вод в ней не оказалось. И поныне на тропе, ведущей к вулкану, можно встретить останки старой буровой установки, напоминающие об этой неудачной попытке.

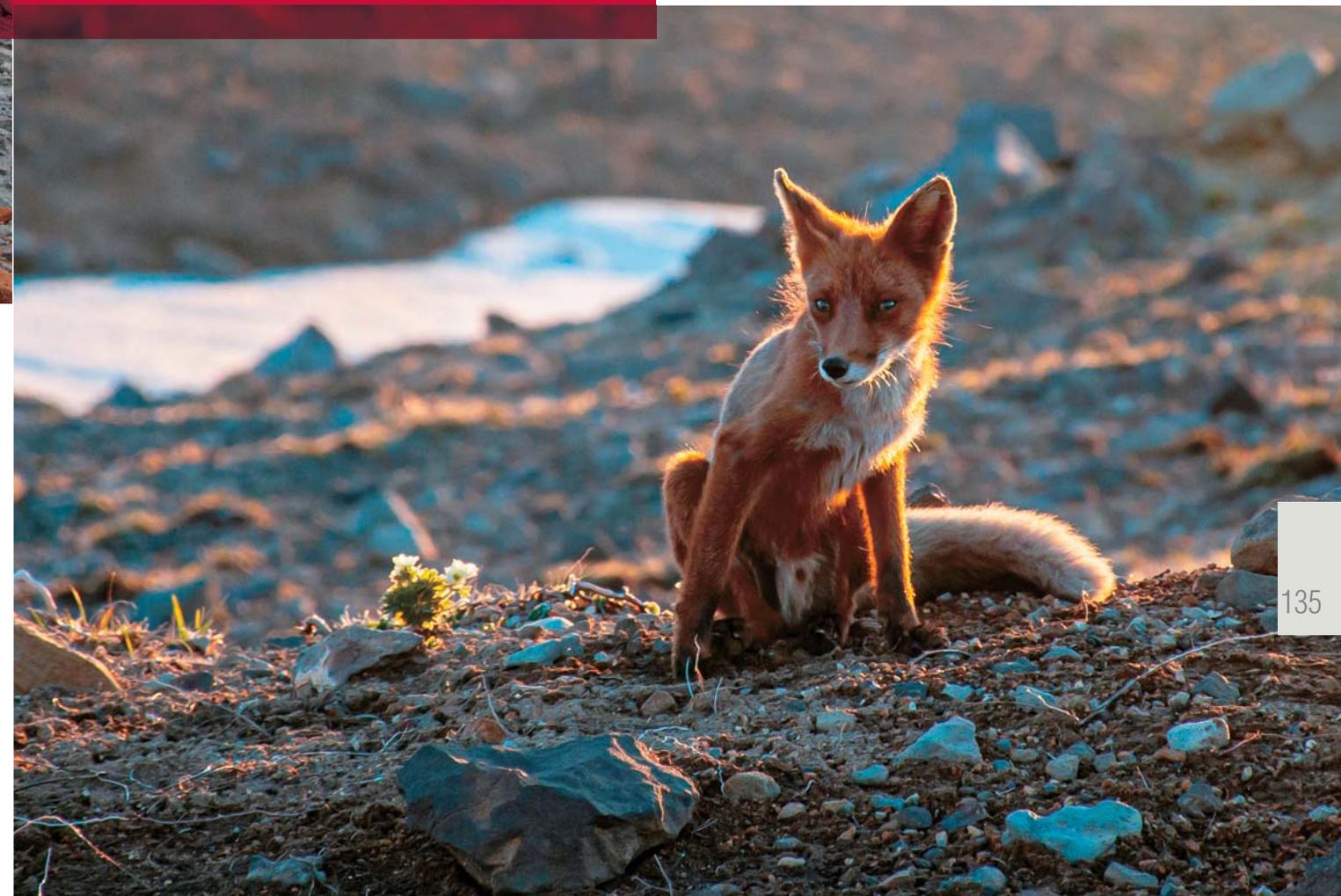
Вместе с тем ни у кого нет сомнений, что под вулканом Эбеко и несколькими соседними фумарольными полями имеются мощные геотермальные резервуары. Задача состоит в том, чтобы оценить, насколько близко находятся их границы от города. Имея информацию о глубинном строении недр под островом, можно в будущем избежать неудач с бурением скважин. А учитывая общемировую тенденцию активного развития альтернативной энергетики, включая геотермальную, геолого-геофизические исследования в районе Эбеко приобретают особую актуальность.

До 2021 г. на Парамушире функционировала в постоянном режиме одна сейсмическая станция, позволявшая отслеживать только общий фон сейсмической активности. В июне этого года новосибирские ученые из Института нефтегазовой геологии и геофизики

им. А. А. Трофимука и Института геологии и минералогии СО РАН установили на Эбеко и в его окрестностях сеть из 21 сейсмической станции, чтобы определить геометрию и физические характеристики магматического очага, изучить процессы взаимодействия с ним глубинных и метеорных флюидов.

Проверка на прочность. Из дневника экспедиции

Установка сейсмической сети на активном вулкане – сложная логистическая задача. Самое простое – поставить точки расположения станций на карте, исходя из научной целесообразности. А дальше начинаются приключения в стиле фильма «Миссия невыполнима» или сериала про Джеймса Бонда, по ходу которых приходится прибегать к самым разным средствам передвижения, но чаще всего пробираться с тяжелым рюкзаком через глыбы лавовых потоков и густые заросли ольхи и кедрового стланика, используя все физические ресурсы человеческого организма.



найти место для станции, вырыть яму, настроить оборудование и замаскировать его. Земля абсолютно непригодная – мокрая и каменистая. До боли в спине таскаем большие камни, устраивая над станцией нечто вроде саркофага. Наконец все готово, и в ту же минуту появляется вертолет.

Кажется, что огромная машина МИ-8 приземляется прямо на нас – колесо оказывается в метре от места, где мы лежим. Прыгаем в вертолет и в ту же секунду взлетаем. Летим на следующую точку, забираем ребят и двигаемся дальше. Все происходит молниеносно, никаких лишних движений. Профессионализм экипажа завораживает – точность до секунд и сантиметров.

Под перевалом высаживается весь отряд вместе с оборудованием для временного лагеря. С начала полета прошло чуть больше часа. Все станции разбросаны по точкам, часть уже установлена. Можно расслабиться, наслаждаясь прекрасным видом. С одной стороны – вулкан Алаид на о. Атласова, в лучах заходящего солнца над покрывалом облаков, укрывающих Охотское море, с другой – вулкан Эбеко приветствует нас выбросом пеплового столба. Подбегает лисичка и с видом хозяйки, без тени смущения пытается изучить содержимое котелков и палаток. Мы сидим среди всего этого великолепия и чувствуем себя немного хоббитами. Счастье!

Вечер. Вулкан Алаид на о. Атласова над покровом облаков над Охотским морем





Вид на вулканы южной части о. Парамушир.
Справа – рис. И. Кулакова. Акрил, бумага

Утро. Все отправляются на заранее запланированные точки, основное оборудование уже ждет нас на местах установки станций. Погода прекрасная, настраиваемся на приятную прогулку налегке. Приблизившись к точке, видим перед собой утес, в районе вершины заканчивающийся отвесными скалами, – сверху с вертолета это место смотрелось совсем по-другому. Делать нечего, начинаем восхождение. Когда кажется, что прохода нет, неожиданно оказываемся наверху, на небольшом плоском плато. Утешаем себя мыслью, что среди медведей вряд ли найдутся такие дураки, которые залезут сюда и разграбят нашу станцию.

Устанавливаем оборудование на фоне феерической картины извергающегося вулкана. Ищем путь для отступления с другого края плато. Потихоньку сползаем в глубокую долину, образованную крутыми фронтами лавовых потоков и прорезанную ледником. Далее карабкаемся обратно вверх. Вместо запланированного часа весь этот круг занимает более трех.

Добираемся до подножья утеса, где оставили рюкзаки. Хочется лежать и не думать о предстоящем подъеме на хребет. Но погода портится, начинается дождь, накрывает туман – решаем быстро двигаться обратно. Понимаем, что возможности установить еще одну станцию нет. Поднимаемся на перевал, ветер усиливается, туман рассеивается, и мы видим, что точка с нашим оборудованием находится совсем рядом. Решаем ставить. Станция расположена на кромке кратера Южного конуса Эбеко, откуда в 700 м видна активная воронка Северного конуса. К счастью, в этот час вулкан молчит. Штормовый ветер, вулканическая пыль и песок забиваются в глаза, рот и нос. Завершаем установку. Начинаем спуск



к городу абсолютно изможденные, но с чувством выполненного долга.

...Кажется, самая сложная работа позади: все станции на хребте Вернадского в северной части острова установлены. Осталось несколько точек со стороны западного побережья. Наиболее разумно установить их с моря, однако это долго, да и погода может испортиться внезапно, что может оказаться критичным. Принимаем решение до части станций добираться пешком. К двум из них нужно пройти вдоль берега 10 км по валунным пляжам вдоль отвесных скал. Чтобы добраться еще до одной, надо пересечь остров от Тихого океана до Охотского моря. А потом вернуться обратно.

Выходим в шесть утра, погода балует. За рекордное время поднимаемся на перевал, затем спуск на речку Юрьева. Кругом бьют горячие источники, покрывая окрестности паром. Река теплая, хотя часть ее питается тающими снежниками. До побережья Охотского моря остается 3 км, которые нужно пройти по руслу. Местные жители рассказали, что путь лежит то по одной, то по другой стороне реки, поэтому ее придется постоянно пересекать.



Подняться на этот утес, на вершине которого была установлена сеймостанция, было очень трудно без специального оборудования. Но еще тяжелее было спускаться



Только в одном месте поток проходит по глубокому ущелью, где нужно осторожно пройти по узкой полочке на крутой скале.

В реальности река оказывается неожиданно полноводной, каждый брод приходится тщательно искать и исследовать. В итоге переход занимает около трех часов. Ищем спрятанное оборудование, ставим станцию и без отдыха отправляемся обратно. Поток становится еще яростней, а в некоторых местах река совсем непроходима. Пытаемся обойти особенно опасные теснины,

Путь на западное побережье острова идет через долину р. Юрьева

карабкаясь по крутым склонам. Не всегда получается, ищем новые пути. Продвижение вдоль реки кажется бесконечно долгим, хочется упасть и никуда не двигаться. Неимоверными усилиями заставляем себя встать и идти дальше.

Но вот наконец крутой подъем на лавовый поток, который воспринимается как счастье. Солнце стремительно клонится к закату, а надо еще добраться до перевала высотой 1000 м и спуститься вниз. Поднимаемся вверх и в какой-то момент чувствуем характерный запах: накрыло ядовитой газовой тучей из вулкана. Срочно надеваем противогазы.

Погас последний луч солнца. Идти тяжело, дыхания не хватает, в горле пересохло. Но снимать маску нельзя. Надо выбираться из этого гиблого места как можно скорее. Ядовитые газы смешиваются с туманом. В сгустившихся сумерках идем по треку GPS. Кажется, этот подъем никогда не закончится. Но вот и избавление – пересекаем гребень, снимаем противогазы. Как приятно снова вдыхать свежий воздух! Есть мобильная связь. Теперь три часа спуска по камням с фонарями – не отвлекаемся ни на секунду,



Переправа-переправа,
берег левый, берег правый

чтобы не оступиться на последнем участке. Далеко за полночь добираемся до города. Какое счастье!

Осталось установить еще две станции на побережье Охотского моря. Для этого решаем использовать моторную лодку. Ребята уходят на весь день. Все остальные – в томительном ожидании. Наконец поздно вечером они выходят на связь. Задание выполнено успешно. Теперь можно вздохнуть спокойно. Остается надеяться, что все станции, которые были поставлены с такими героическими усилиями, благополучно отработают целый год.



записанной на них информации. Ради чего были все эти затраты и тяжелая работа? Полученная информация будет тщательно проанализирована – ученые надеются, что с ее помощью удастся выявить и локализовать сотни землетрясений, случившиеся за год под Эбеко.

Сами по себе такие события важны для определения состояния магматической системы вулкана. Например, малоглубинные сейсмические события под активным кратером позволят отследить зоны, где происходит контакт метеорной воды с магматическим очагом и ее вскипание перед тем, как она в виде пара вырвется на поверхность в виде фреатического извержения. Более глубокие землетрясения укажут на положение канала, по которому поднимается магма.

Данные со станций также позволят определить скорости, с которыми распространяются сейсмические волны от многочисленных землетрясений, буквально прошивая толщи горных пород и подводящую систему вулкана Эбеко. С помощью метода *сейсмической томографии* будут построены трехмерные распределения скоростей *продольных* (V_p) и *поперечных* (V_s) волн, поскольку эти

Активная воронка вулкана Эбеко – вид с точки, где была установлена сейсмостанция (слева). Туча ядовитых газов с вулкана, накрывшая исследователей на обратном пути в город, заставила надеть противогазы

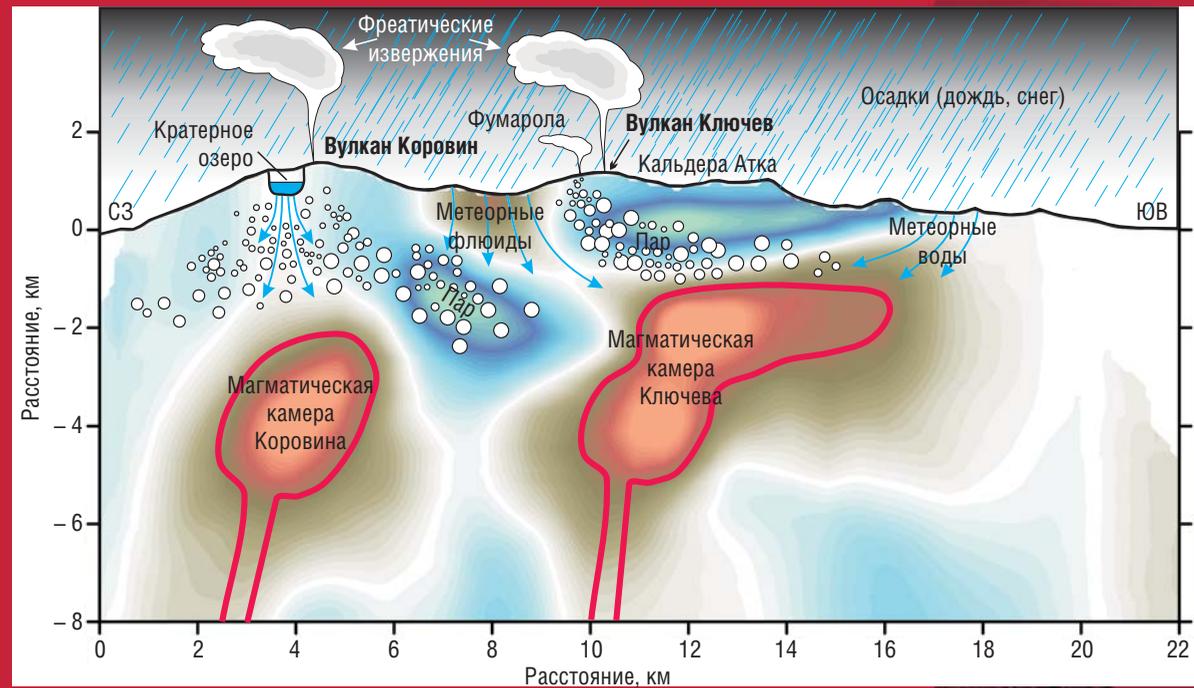


Пара слов о местных жителях, без которых реализация этого проекта была бы невозможна. Прежде всего хочется поблагодарить всех членов семьи Котенко, организовавших наши непростые передвижения и самоотверженно трудившихся вместе с нами. И совершенно блестящий экипаж вертолета, показавший невероятный профессионализм и отзывчивость при выполнении сложнейшей задачи. Местных ребят на квадроциклах, которые помогли нам с доставкой оборудования на несколько точек. Ну и, конечно, сам остров, все две недели

нашей экспедиции даривший нам потрясающе хорошую погоду, что почти невероятно для этих мест.

Ловцы сейсмических волн

Если не произойдет внеплановых неприятностей, установленная на Эбеко и в его окрестностях сейсмическая сеть будет непрерывно в автономном режиме фиксировать колебания земных недр в течение года, после чего станции будут сняты и начнется обработка

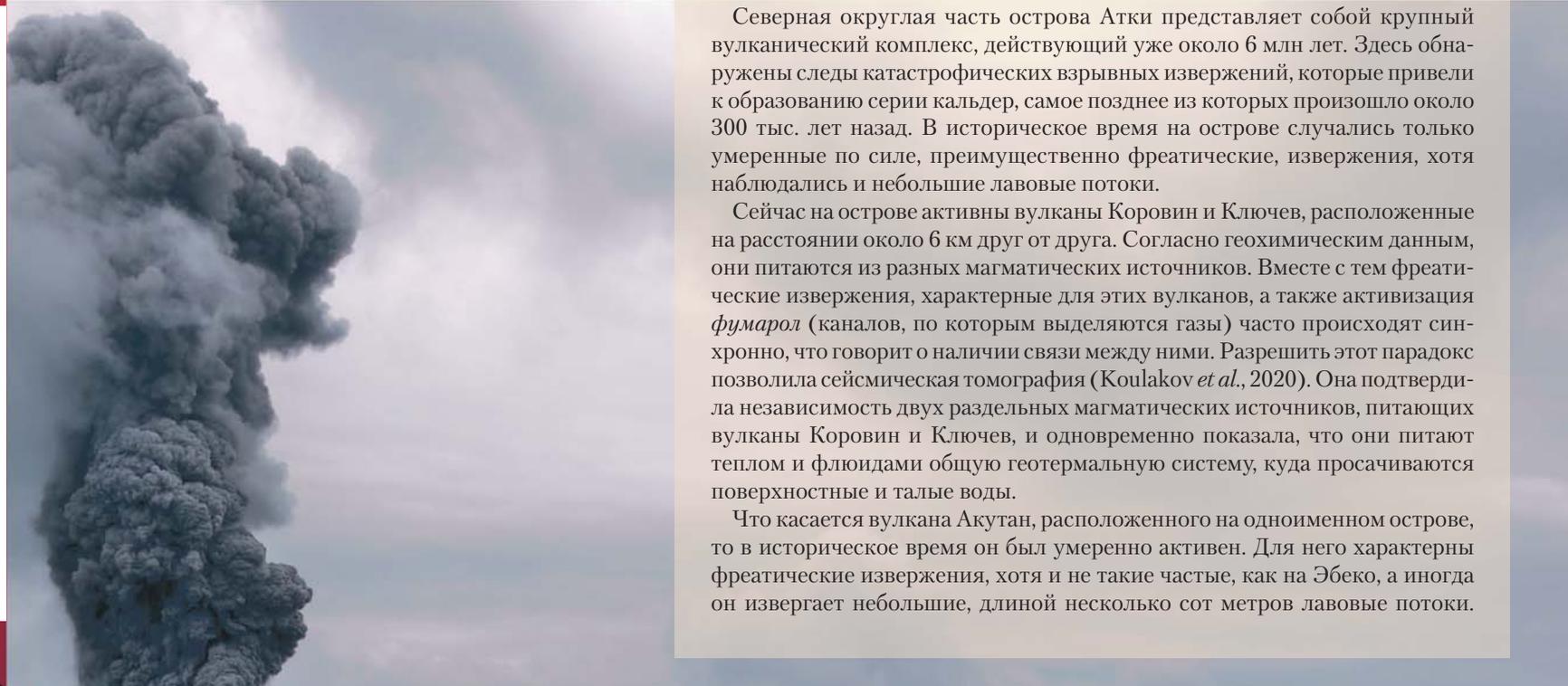


На вертикальном сечении томографической модели, проходящем через вершины вулканов на о. Атка Алеутской гряды, под каждым из них прослеживаются отдельные крупные аномалии с повышенным значением отношения продольных и поперечных сейсмических волн (V_p/V_s), указывающих на два независимых магматических очага. На глубинах менее 2 км от поверхности выделяются аномалии с пониженными значениями этого параметра, которые могут свидетельствовать о наличии зон миграции вулканических газов. Эти зоны под обоими вулканами кажутся связанными между собой

два типа волн по-разному чувствительны к физическим свойствам пород, их совместная интерпретация даст материал для выявления геометрии магматических структур под вулканом.

В такого рода задачах часто используется параметр отношения скоростей V_p/V_s , который очень изменчив в магматических очагах, имеющих контрастные характеристики по составу и наличию жидкой фазы. Оценив характер изменения скоростей сейсмических волн в разных участках недр хребта Вернадского, где расположен действующий вулкан Эбеко, геофизики смогут определить места скопления магмы (магматические очаги) и зоны, по которым глубинные магма и флюиды способны достичь поверхности в районе Эбеко.

Примером могут служить недавние результаты изучения сейсмической активности для двух островов Алеутской гряды – Атки и Акутана. Алеутская дуга во многих смыслах является аналогом Курильской: обе они связаны с *субдукцией* (погружением) океанической плиты примерно одного возраста и стыкуются с крупными континентальными блоками (Аляской и Камчаткой соответственно). По размерам и характеру вулканической активности Атка и Акутан весьма похожи на Парамушир.



Северная округлая часть острова Атки представляет собой крупный вулканический комплекс, действующий уже около 6 млн лет. Здесь обнаружены следы катастрофических взрывных извержений, которые привели к образованию серии кальдер, самое позднее из которых произошло около 300 тыс. лет назад. В историческое время на острове случались только умеренные по силе, преимущественно фреатические, извержения, хотя наблюдались и небольшие лавовые потоки.

Сейчас на острове активны вулканы Коровин и Ключев, расположенные на расстоянии около 6 км друг от друга. Согласно геохимическим данным, они питаются из разных магматических источников. Вместе с тем фреатические извержения, характерные для этих вулканов, а также активизация *фумарол* (каналов, по которым выделяются газы) часто происходят синхронно, что говорит о наличии связи между ними. Разрешить этот парадокс позволила сейсмическая томография (Koulakov *et al.*, 2020). Она подтвердила независимость двух отдельных магматических источников, питающих вулканы Коровин и Ключев, и одновременно показала, что они питают теплом и флюидами общую геотермальную систему, куда просачиваются поверхностные и талые воды.

Что касается вулкана Акутан, расположенного на одноименном острове, то в историческое время он был умеренно активен. Для него характерны фреатические извержения, хотя и не такие частые, как на Эбеко, а иногда он извергает небольшие, длиной несколько сот метров лавовые потоки.



Геофизики и вулкан за работой. Каждый занят своим делом

Однако вокруг современной вулканической постройки прослеживаются следы крупной кальдеры диаметром более 2 км, что указывает на возможность катастрофических взрывных извержений. На острове также находится поселок с населением около тысячи человек, для обеспечения нужд которого проводится активная разведка геотермальных месторождений.

В томографической модели этого вулкана четко выделяется глубинный магматический источник вертикальной формы, верхняя граница которого лежит на глубине 5–6 км от поверхности (Koulakov *et al.*, 2021). Выше прослеживается сложная сейсмическая структура, которая может указывать на место скопления термальных вод, разогретых магматическим очагом. Эти аномалии позволяют определить пути питания главного вулканического конуса, отдельных фумарольных полей и горячих источников. Совместно с результатами других исследований сейсмотомография дает важную информацию о динамике подземных флюидов, что позволяет использовать полученные модели для поиска геотермальных месторождений на этом острове.

Установленная на о. Парамушир сейсмическая сеть по плотности и равномерности расположения станций является одной из лучших локальных сетей, работающих на активных вулканах мира. Даже существующие системы наблюдений на Алеутских островах гораздо скромнее, хотя американские исследователи имеют намного больше ресурсов для проведения такого рода экспедиций.

Имея томографическую модель вулкана, которая позволяет определить положение магматической камеры и увидеть пути миграции флюидов вокруг нее, и ведя постоянный мониторинг вулканической активности, можно будет с гораздо большей точностью прогнозировать сильные извержения и развитие связанных с ними геотермальных процессов.

Летом 2022 г. сотрудники Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН одновременно со снятием станций на Эбеко планируют провести также серию электромагнитных исследований по профилю из Северо-Курильска к вулкану Эбеко. Поскольку удельное электрическое сопротивление пород чрезвычайно чувствительно к наличию воды, предполагается, что с помощью этого способа удастся обнаружить границы зоны насыщения геотермальными флюидами. Это станет важным шагом для начала работы по обеспечению города дешевой и возобновляемой энергией земных недр. И, конечно, результаты изучения Эбеко будут полезны для понимания принципов функционирования магматических и геотермальных систем других вулканов аналогичного типа, независимо от их территориальной принадлежности.

Литература

Кулаков И. Ю. Камчатская вулканическая одиссея: от Безымянного до Авачи // НАУКА из первых рук. 2018. № 5/6 (80). С. 54–73.

Belousov A., Belousova M., Auer A. *et al.* Mechanism of the historical and the ongoing Vulcanian eruptions of Ebeko volcano, Northern Kuriles // Bulletin of Volcanology. 2021. V. 83(1). P. 1–24.

Koulakov I., Komzeleva V., Smirnov S.Z. and Bortnikova S.B. Magma-fluid interactions beneath Akutan Volcano in the Aleutian Arc based on the results of local earthquake tomography // Journal of Geophysical Research, Solid Earth. 2021. V. 126. e2020JB021192.

Koulakov I., Boychenko E., Smirnov S. Magma chambers and meteoric fluid flows beneath the Atka volcanic complex (Aleutian Islands) inferred from local earthquake tomography // Geosciences. 2020. V. 10(6). P. 214.

В публикации использованы фото авторов

Работа поддержана грантом РФФ 20-17-00075