

Камчатская вулканическая одиссея:

ОТ БЕЗЫМЯННОГО ДО АВАЧИ

Ключевые слова: вулкан Безымянный, Авачинская группа вулканов, вулкан Удина, вулкан Камбальный, сейсмические сети, магматический очаг, вулканическая опасность.

Key words: Bezymianny volcano, Avacha volcano group, Udina volcano, Kambalny volcano, seismic networks, magma reservoir, volcanic hazard

Новосибирские сейсмологи с 2012 г. занимаются регулярными исследованиями вулканов на Камчатке, благодаря чему один из самых активных вулканических регионов мира становится хорошо изученным по международным меркам. В летний экспедиционный сезон 2018 г. ученые планировали только снять сеть сейсмических станций с вулкана Безымянный в центральной части полуострова и установить новую сеть на Авачинской группе на юго-востоке Камчатки, в непосредственной близости от г. Петропавловск-Камчатский. Несмотря на не всегда благоприятную погоду и трудности с воздушным транспортом, все задуманное удалось реализовать. И даже в большем объеме, чем планировалось: «попутно» сейсмологам пришлось поработать на вулканах Удина и Камбальный

Вулканы Ключевской группы: Безымянный, Камень и гигант Ключевской. Камчатка, 2018

© И. В. Кулаков, 2018

Сейсмическая томография, основанная на изучении скоростей прохождения упругих волн сквозь плотную среду, сегодня является одним из основных методов изучения внутреннего строения земных недр. И чем больше регистрируется землетрясений, тем точнее и полнее оказывается полученная информация.

Одно из приоритетных направлений лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (ИНГГ) (Новосибирск) – изучение поведения магматических очагов и внутреннего строения вулканов в различных регионах планеты с целью выявить конкретные механизмы вулканических извержений. Получение исходных сейсмических данных на вулканах – процесс непростой, требующий проведения дорогостоящих экспедиций по установке сейсмических сетей. И это в полной мере относится к Камчатке, малозаселенному региону с достаточно суровыми климатическими условиями.

Безымянный блокбастер

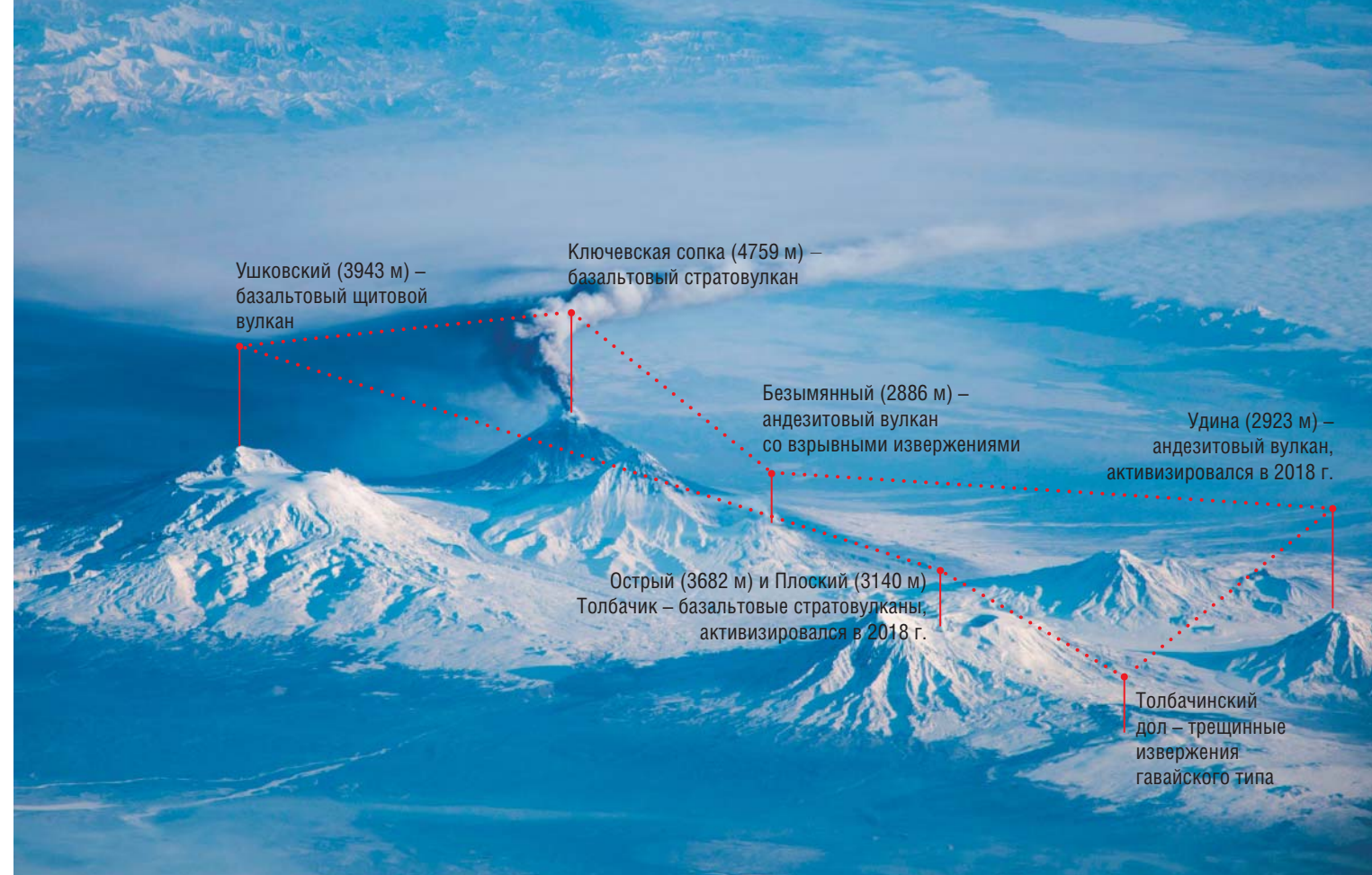
В 2017 г. сеть из 10 сейсмических станций была установлена на вулкане Безымянный – одном из самых беспокойных вулканов Камчатки. Расположенный по соседству с гигантским Ключевским вулканом, Безымянный до середины прошлого века даже не рассматривался как самостоятельное вулканическое образование, представляющее реальную опасность. Однако катастрофический взрыв, произошедший в 1956 г., вывел его в число наиболее активных вулканов мира.

Удивительно то, что по режиму извержений и составу лав Безымянный принципиальным образом отличается от Ключевского вулкана, расположенного рядом – всего в 10 км. И этот замечательный факт не мог не обратить на себя внимание ученых.

В последние десятилетия Безымянный сотрясают регулярные взрывы, в среднем один раз в год, и иногда пепел выбрасывается на высоту более 10 км. Чрезвычайной удачей для исследователей стало довольно сильное *эксплозивное* (взрывное) извержение, которое произошло в декабре 2017 г. во время работы сети. Столб пепла при этом извержении достиг высоты около 18 км! Вместе с тем это радостное для сейсмологов событие заставило их поволноваться, поскольку сейсмические станции, расположенные в непосредственной близости от кратера, могли попасть под пирокластический поток из горячей смеси газов, пепла и камней, а данные космических наблюдений не давали однозначного ответа о траектории его распространения. Если бы поток прошелся по приборам, обнаружить и достать их было бы крайне сложно, к тому же они могли выйти из строя из-за высокой температуры.

Большая удача, что работой новосибирских исследователей заинтересовались репортеры журнала «Шпигель», одного из самых крупных и известных еженедельных журналов Германии, которые оплатили часть затрат на эту экспедицию. Операторы, которые занимались съемкой процесса полетов работ через открытую дверь вертолета, придавали им особую динамику и заставляли всех участников чувствовать себя почти героями блокбастера. Пилоты же предпринимали все возможное и невозможное, чтобы сделать съем-

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 100 научных работ



ку максимально эффективной, и летали над дымящимся кратером и окружающими его хребтами по самым невероятным траекториям.

Каждая минута работы МИ-8 стоит очень дорого, поэтому все работали в большом напряжении. Ильяс Абкадыров из Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС) (Петропавловск-Камчатский), участвовавший в установке станций годом ранее, первым выскакивал из еще работающего вертолета и, подобно охотничьей легавой, носился кругами в поисках видимых ему одному следов присутствия станции. Затем подключались другие сотрудники, раскапывая батареи и приборы с глубины около полуметра. Как только оборудование закидывалось в вертолет и в него нырял последний человек, машина в ту же секунду взмывала вверх. Вся операция, с момента посадки до взлета, занимала не более трех минут!

Особое беспокойство вызывала верхняя станция, расположенная практически у самого кратера вулкана, ее поискам к тому же мешал снеговой покров. И когда исследователи увидели мерцающую лампочку, говорящую о том, что все это время станция успешно работала, они не могли сдержать криков радости.

Участок, где стояли две другие станции, оказался покрыт туманным облаком. Погода ухудшалась, и шансов, что туман уйдет, не оставалось – существовал реальный

риск потерять эти приборы вместе с информацией, поскольку еще одной возможности арендовать вертолет вряд ли бы представилось. Чтобы спасти невосполнимые научные данные, было принято решение лететь в тумане. Вертолет перемещался практически на ощупь на минимальной (2–3 м) высоте, позволяющей увидеть на поверхности хоть что-то и вовремя среагировать в случае опасности.

Credit: NASA, Johnson Space Center

Известный вулканолог Б. И. Пийп (1956) так писал о Ключевской группе вулканов: «12 вулканов этой группы выступают среди хребтов и лесистых долин северной Камчатки исполинскими массивами камня и льда, образуя незабываемую панораму, полную величия и суровой красоты». Сегодня эта крупнейшая на Камчатке группа вулканов привлекает пристальное внимание вулканологов всего мира благодаря уникальному разнообразию составов и режимов извержений.

Благодаря высокопрофессиональной работе пилотов все станции были успешно собраны, и теперь предстоит кропотливая работа по обработке информации в лабораторных условиях. Уже сейчас можно сказать, что получен уникальный материал, позволяющий проследить процесс зарождения и осуществления вулканического взрыва.





Для снятия с Безымянного сейсмической сети станций был зафрахтован вертолет МИ-8



Активный купол Новый вулкана Безымянный вырос после катастрофического взрыва 1956 г. Это извержение было одним из крупнейших в прошлом веке. Вырвавшиеся из жерла пирокластические потоки и облака горячего газа растопили окрестные ледники и снега, образовав мощные грязевые потоки. Облако вулканического пепла поднялось на высоту 45 км и рассеялось по всему Северному полушарию

Вынужденная посадка в верхней точке сейсмической сети у подножия конуса Безымянного



Вулкан Безымянный не представляет для людей явной опасности, так как расположен достаточно далеко от крупных населенных пунктов. Вместе с тем в мире имеется множество похожих вулканов на территориях с высокой плотностью населения. Если с помощью данных, собранных на Безымянном, удастся обнаружить надежные предвестники приближающегося катаклизма, это поможет предсказывать извержения на других вулканах. И тем самым, возможно, спасти множество жизней.

Спящие и просыпающиеся

Другая научная задача летней экспедиции касалась еще одного вулкана Ключевской группы – Удины. До недавнего времени этот вулкан считался спящим, однако в конце 2017 г. сейсмологи начали регистрировать в его окрестностях землетрясения, интенсивность которых усиливалась во времени.

Следовало пристально наблюдать за активностью Удины, однако Камчатский филиал геофизической службы РАН (КФГС) имел в своем распоряжении для этого лишь 3–4 станции, расположенные на расстояниях 25–40 км, да к тому же лишь с одной стороны от вулкана. С их помощью нельзя было надежно определять

Выкопав самую верхнюю сейсмическую станцию, расположенную в непосредственной близости от активного вулканического конуса Безымянного, ученые с радостью убедились, что она находится в рабочем состоянии

КЛЮЧЕВСКАЯ ГРУППА ВУЛКАНОВ: НЕИСПОВЕДИМЫ ПУТИ МАГМЫ

Уникальная особенность Ключевской группы в том, что здесь, на относительно небольшой территории, сосредоточены практически все типы земного вулканизма. Из многих вулканов этой группы три проявляют высокую активность и в наше время: Ключевской, Безымянный и Толбачик. Причины такого разнообразия активно дискутируются в научном сообществе. Прояснить проблему поможет знание глубинной структуры коры и мантии под вулканами. Уже в течение нескольких десятилетий в окрестности Ключевского постоянно работает сеть сейсмических станций КФГС РАН.

За это время в районе Ключевской группы зарегистрировано более сотни тысяч землетрясений, данные о которых были использованы для построения томографических моделей коры под Ключевским вулканом. В 2011 г. новосибирские сейсмологи выявили там крупную сейсмическую

аномалию на глубине 25–30 км (Koulakov *et al.*, 2011), совпадающую с плотным облаком землетрясений (несколько десятков и даже сотен в день). Считалось, что эта аномалия представляет собой глубинный магматический очаг, питающий вулканы группы.

Повысить детальность томографических изображений позволила установка временной сейсмической сети из 25 станций вокруг Толбачика силами ИНГГ СО РАН, КФГС РАН и ИВиС ДВО РАН. Новая модель выявила три пути питания вулканов Ключевской, Безымянный и Толбачик (Koulakov *et al.*, 2017).

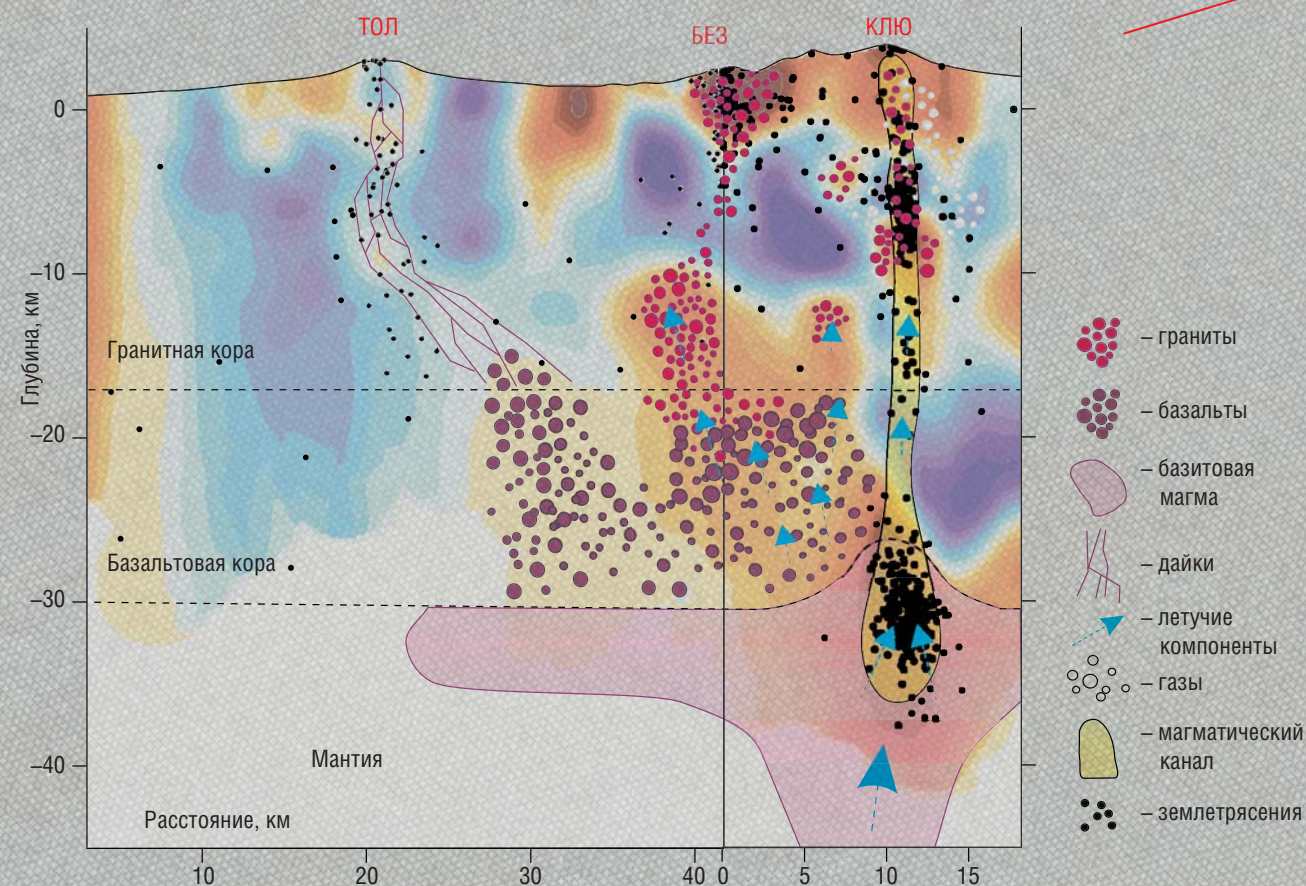
Под Ключевским имеется вертикальная «труба», по которой напрямую выносятся базальтовый материал из мантийного магматического очага. Предполагается, что этот канал обычно находится в закрытом состоянии, но открывается на короткое время, когда давление в нижележащем очаге повышается. И землетрясения на глубинах 25–30 км происходят в результате раскрытия и резкого схлопывания некоего «ниппеля» на нижнем конце канала.

Под Безымянным в средней коре обнаружена аномалия с пониженными скоростями, где может происходить

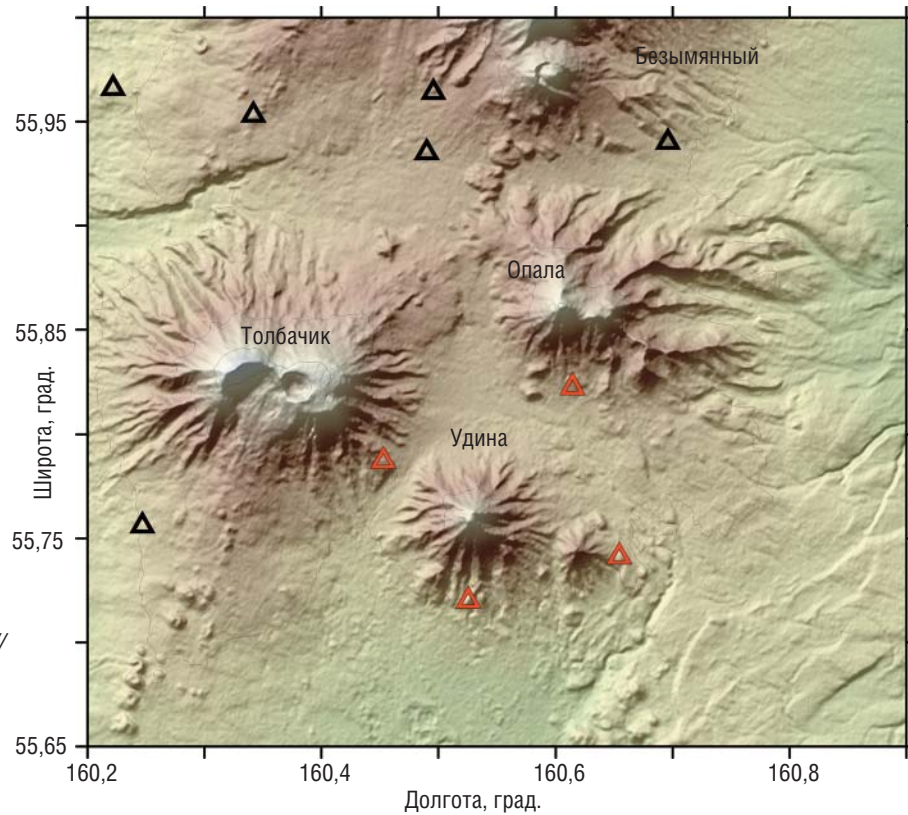
постепенное разделение магмы на тяжелую и легкую фракции и накопление растворенной воды и магматических газов. При достижении порогового количества флюидов происходит лавинная дегазация, приводящая к периодическим взрывам.

Под Толбачиком обнаружены вытянутые аномалии, очевидно, приуроченные к разломам в земной коре, по которым поднимается магма. У вулкана есть два источника, откуда приходит магма: один под Ключевским вулканом и второй – где-то на юго-востоке

На основе результатов сейсмической томографии под вулканами Ключевской группы была построена томографическая модель коры, на которой выявлены разные магматические источники, питающие Толбачик (ТОЛ), Безымянный (БЕЗ) и Ключевской (КЛЮ) вулканы. Разным цветом отмечены аномалии сейсмических скоростей поперечных волн (красные – пониженные, синие – повышенные). Точками показаны проекции землетрясений



В 2018 г. новосибирские сейсмологи установили вокруг вулкана Удина четыре сейсмические станции (красные треугольники). До этого информация с вулкана поступала лишь на станции постоянной сети КФГС РАН (черные треугольники). Карта построена на основе данных по рельефу с сайта <https://www.gmrt.org/GMRTMapTool/> (Ryan et al., 2009)



координаты землетрясений; особенно плохо определялась глубина очагов, поэтому судить об источниках магматической активности было невозможно.

Поэтому весной 2018 г. ИНГГ выделил средства и оборудование на установку на Удине четырех станций. В апреле команда сейсмологов отправилась на вулкан на вертолете МИ-8, однако погода в этой части Камчатки оказалась непредсказуемой: на горе дул штормовой ветер. Тем не менее было сделано несколько попыток посадить вертолет на разные склоны вулкана, закончившихся неудачей: участникам экспедиции пришлось пережить несколько неприятных моментов, когда казалось, что машина теряет управление.

Все шло к тому, что работы по проекту придется закончить, однако ученым помог случай. Один из пилотов, давно сотрудничавший с новосибирцами, в это время обучал одного бизнесмена летать на его собственном вертолете. Владельцу вертолета предложили помочь ученым установить станции и заодно потренироваться в полетах в тяжелых высокогорных условиях, вместо того чтобы бесцельно кружить над Камчаткой, налетывая часы.

Все участники новой экспедиции с большим энтузиазмом восприняли эту идею, а сам хозяин вертолета вместе с исследователями бурил в мерзлой земле с помощью перфоратора ямы для установки

сейсмических станций. В результате такой дружной и высокопрофессиональной работы сеть была успешно и с минимальными затратами поставлена в непосредственной близости от вулкана.

В июле эти станции вместе с записанными на них данными были сняты в то же время, что и с вулкана Безымянный. Уже по результатам предварительной обработки этой информации можно с уверенностью сказать, что магматическая система вулкана Удина вполне «жива». И если даже в этот раз активизация вулкана не разродится извержением, оно вполне может случиться в ближайшие годы.

Другой совершенно неожиданно «проснувшийся» вулкан расположен на юге Камчатке. 24 марта 2017 г. началось взрывное извержение вулкана Камбальный, ранее считавшегося потухшим. Поскольку этот вулкан находится на большом удалении от населенных пунктов и дорог, организовать систему мониторинга было чрезвычайно трудно. К сожалению, найти средства, чтобы установить сейсмическую сеть в год извержения, не удалось. И лишь летом 2018 г. ИВиС ДВО РАН организовал на этот вулкан междисциплинарную экспедицию, основная цель которой состояла в установке 10 сейсмических станций, часть из которых была предоставлена ИНГГ СО РАН.

на стр. 68

Оборудование на вулканы Авачинской группы доставляли с помощью легкого четырехместного американского вертолета «Робинсон 44»

Старший научный сотрудник ИГиГФ СО РАН, к.г.-м.н. А.В. Яковлев монтирует оборудование сейсмической станции. На заднем плане – вулкан Корякский





Вулкан Галерас. Колумбия. Фото Д. Кадена

На моделях вулкана Галерас, построенных по результатам повторной томографии, видно, что в 2001–2007 гг. под вулканом наблюдалась аномалия грибообразной формы, отмечающая расположение магматической камеры с питающим каналом. Разным цветом показано отношение сейсмических скоростей V_p/V_s , чувствительное к наличию жидкости (расплавов или флюидов). Коричневым цветом отмечены породы с высоким содержанием жидкой фазы

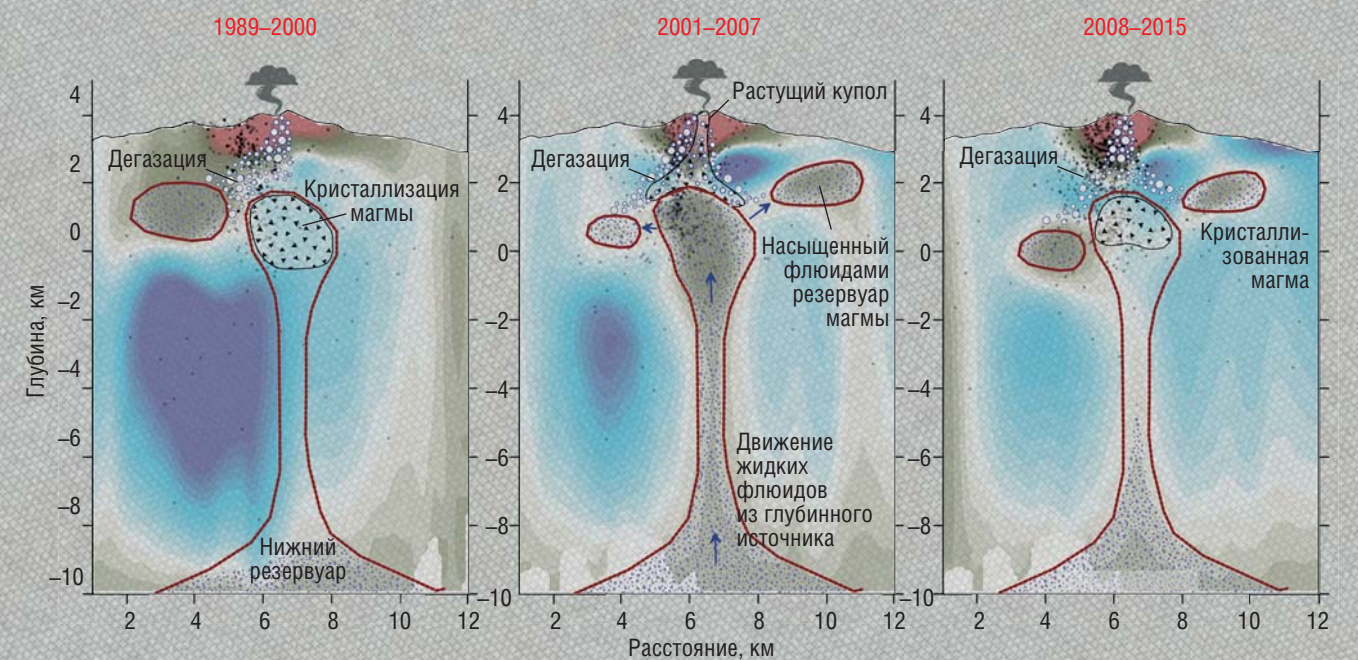
ОТ «АНАТОМИИ» ВУЛКАНОВ – К ИХ «ФИЗИОЛОГИИ»

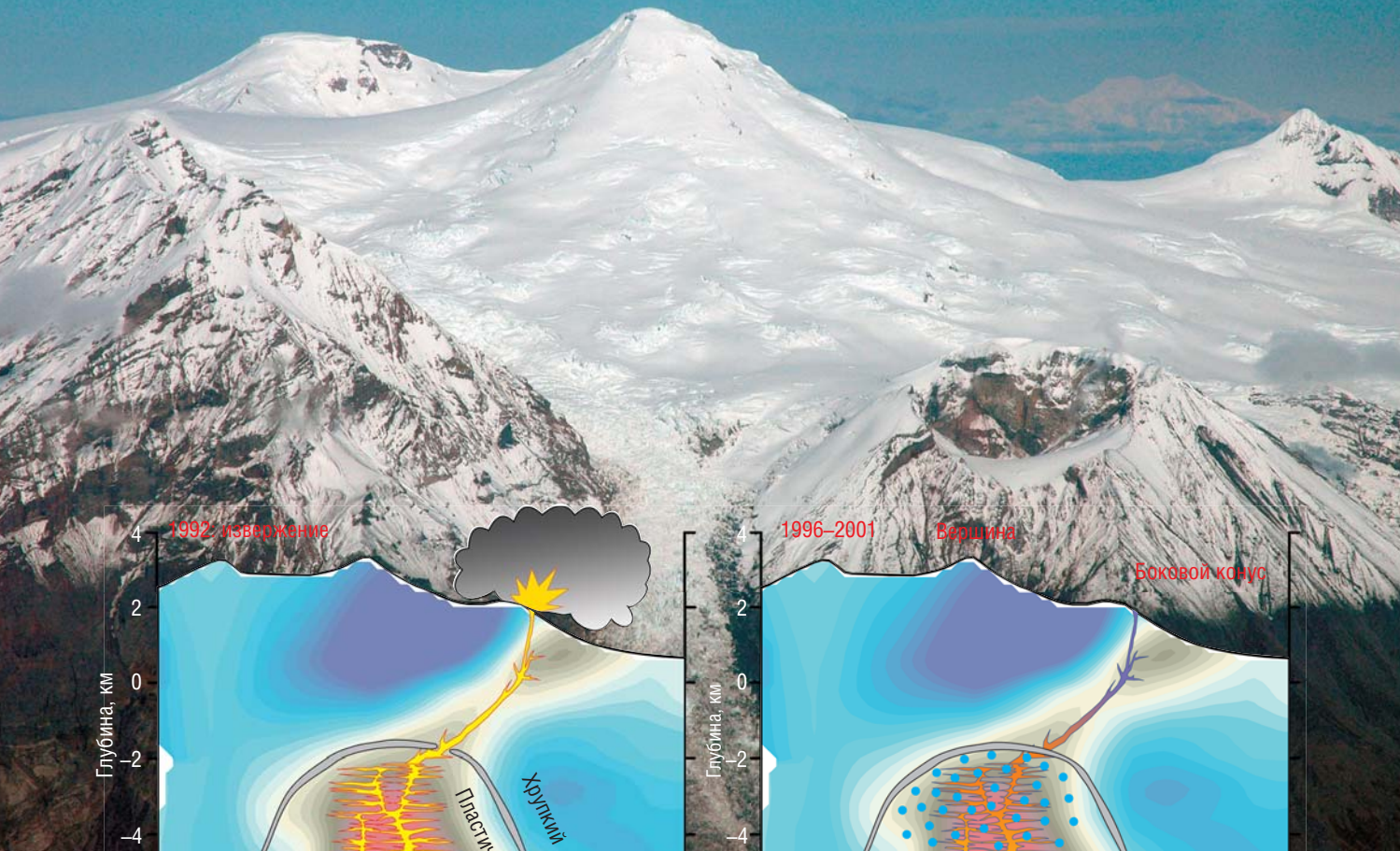
Вулканы представляют собой наиболее быстро меняющиеся природные геологические объекты. В отличие от других структур земных глубин, где процессы протекают в масштабах времени в миллионы и миллиарды лет, существенные изменения «внутренностей» вулкана могут произойти в течение нескольких лет, дней и даже часов. Изучение этой динамики помогает понять, как устроена вся система питания магматической структуры, и установить причины извержений, что дает нам ключ к предсказанию вулканических катастроф.

Для изучения внутреннего, глубинного строения вулканических структур в большинстве случаев используется метод сейсмической томографии, когда источником сейсмического сигнала служат землетрясения, часто случающиеся под вулканом. С первого взгляда задача обнаружения временной изменчивости кажется не слишком сложной: нужно просто разделить все данные по временным интервалам, построить для каждого интервала отдельную томографическую модель и затем сравнить эти модели.

Однако, как показывает практика, такой подход не работает, поскольку «подвулканые» землетрясения случаются нерегулярно и к тому же неравномерно. В результате полученные различия между моделями будут, скорее, отражать изменения в системе наблюдения, а не реальные процессы внутри Земли.

Новосибирские исследователи предложили использовать другой подход, основанный на отборе наборов данных с идентичной геометрией, что позволяет выявлять достаточно малые изменения глубинных структур. В 2018 г. этот алгоритм был применен для изучения двух активных вулканов: Галераса в Колумбии и Спурра на Аляске. Такой выбор был обусловлен, во-первых, тем, что на этих вулканах в течение продолжительного времени работала достаточно плотная сейсмическая сеть, и эти данные доступны. Во-вторых, в период инструментальных измерений на обоих вулканах наблюдались периоды активизации, которые могли приводить к существенным изменениям в их глубинном строении.

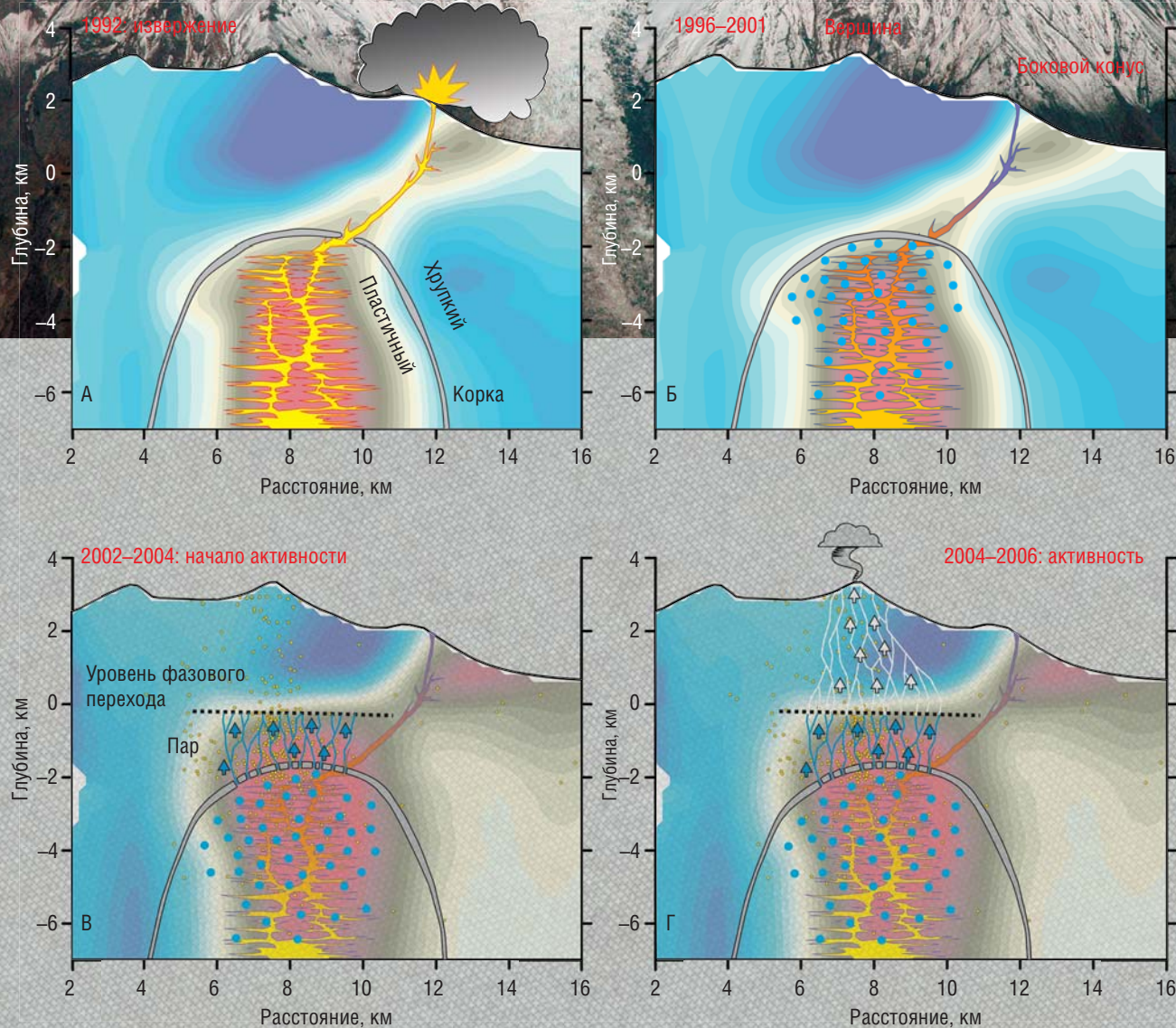




Вулкан Спурр и кратер Пик (Аляска). Фото G. McGimsey (Alaska Volcano Observatory, USGS)

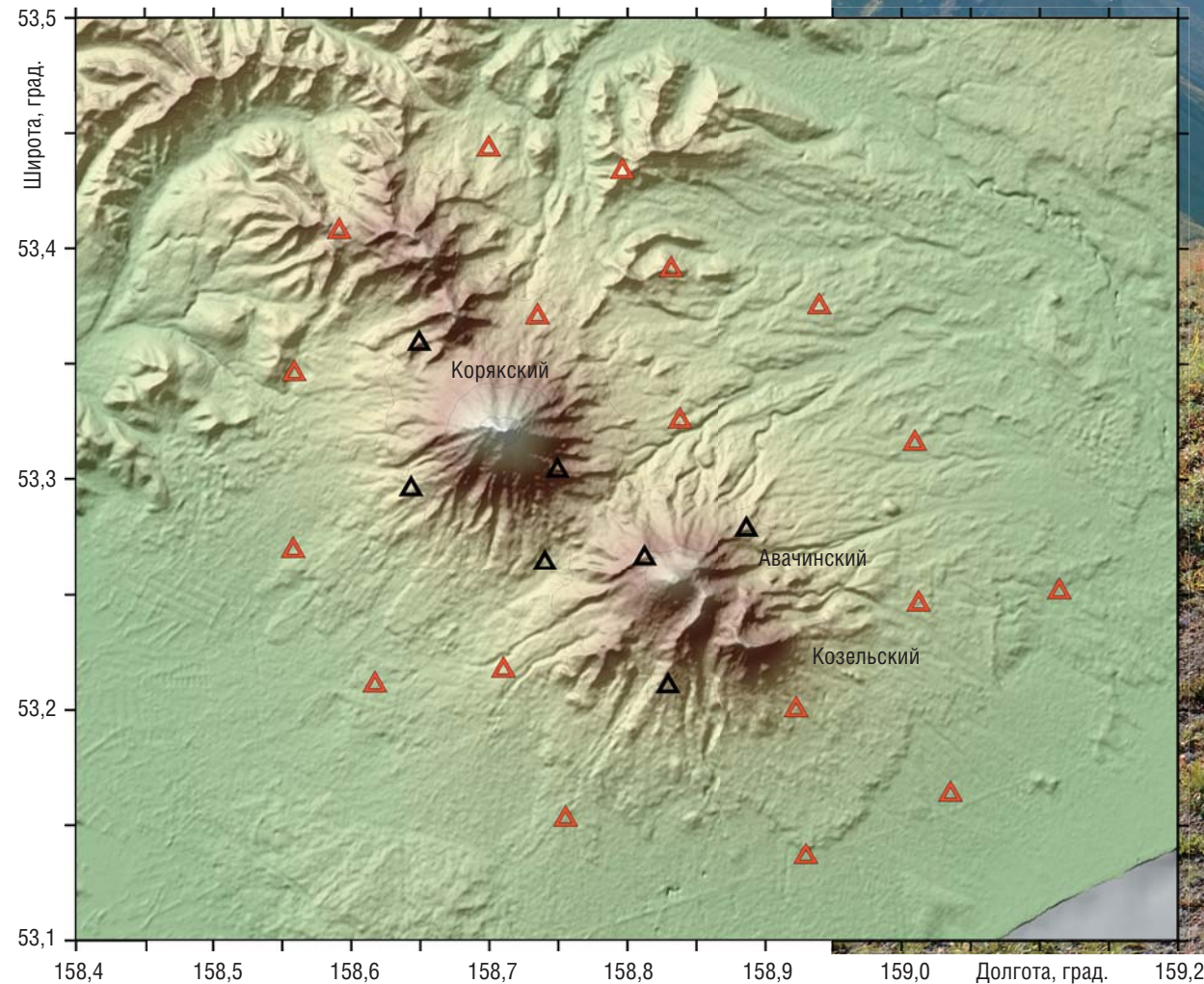
Эти томографические модели отражают изменения внутри вулкана Спурр на Аляске во время сейсмического кризиса в 2002–2006 гг. В 2002 г. аномалия с повышенным отношением сейсмических скоростей V_p/V_s резко изменила свою форму, сместив верхнюю границу на 2 км вверх. На модели схематично показана возможная причина такого изменения, связанная с подъемом магматических флюидов

Облако, поднимающееся из кратера Пик. Снимок сделан 11 июля 1953 г., спустя два дня после извержения, когда на Анкоридж упало 6 мм пепла. Фото У. Велленштейна



Изучение вариаций сейсмических скоростей показало, что в период максимальной активности непосредственно под вулканом Галерас формировалось тело грибообразной формы – активная магматическая камера с питающим каналом, соединяющим ее с более глубокими резервуарами горячей магмы. В периоды пониженной вулканической активности это тело становилось меньше либо вообще исчезало. Это означает, что внедрение перегретых флюидов может приводить к быстрому плавлению магмы в камере, что, в свою очередь, приводит к извержениям. Когда приток флюидов прекращается, магматический очаг достаточно быстро затвердевает и становится «невидимым» для сейсмической модели (Koulakov, Vargas, 2018). Вторым объектом исследования геофизиков в 2018 г. стал вулкан Спурр – самый крупный действующий вулкан Аляски. В прошлом веке крупные извержения этого вулкана произошли в 1953 и 1992 гг., причем эти, как и все другие известные

исторические извержения, шли не из основной вершины, а из бокового конуса. Когда в 2002 г. вулкан начал «трясти» в районе главного конуса, из которого началось активное выделение вулканических газов, ученые стали готовиться к новому извержению. Поскольку эта часть вулкана была «закупорена» уже много тысяч лет, извержение могло стать катастрофическим. К счастью для немногочисленного местного населения и к явному разочарованию исследователей активность вулкана к 2006 г. постепенно сошла на нет. Результаты томографических исследований показали, что под вулканом имеется магматическая камера, верхняя граница которой до 2002 г. находилась на глубине около 5 км от дневной поверхности. При активизации вулкана магматический очаг поднялся на 2 км, а сам процесс подъема сопровождался активной сейсмичностью. Единственным объяснением такого значительного и быстрого изменения строения камеры может быть выброс перегретой воды из магматического очага и ее проникновение под большим давлением в верхнюю хрупкую часть земной коры. На глубине 2 км вода вследствие декомпрессии превращается в пар, который, продолжая подниматься, вызывает разрывы пород и образование все новых и новых трещин. «Хруст», возникающий при этом, регистрируется приборами в виде сотен и тысяч микроземлетрясений. Такой процесс ослабляет прочность коры и тем самым готовит путь для прорыва магмы. Однако в этом случае давление в очаге оказывается недостаточным для извержения. Возможно, через несколько десятилетий, после насыщения магмы новой порцией активных флюидов, вулкан сделает еще одну попытку извергнуться через центральный купол. Сделать это, вероятно, ему уже будет проще благодаря немалой «работе», которую он проделал в предыдущие годы. Результаты работ новосибирских сейсмологов были опубликованы в 2018 г. в престижном научном журнале *Scientific Reports*, входящем в группу *Nature*, и в *Geophysical Research Letters*



В 2018 г. новосибирские исследователи установили на вулканах Авачинской группы сейсмическую сеть из 19 станций (красные треугольники). Около этих вулканов продолжают свою работу и станции постоянной сейсмической сети КФГС РАН (черные треугольники), установленные десятилетия назад. Карта построена на основе данных по рельефу с сайта <https://www.gmrt.org/GMRTMapTool/> (Ryan et al., 2009)

Хотя к тому времени извержение уже завершилось, приборы продолжали регистрировать достаточно сильную сейсмическую активность под вулканом, которую связывают с процессами перемещения и трансформации магмы в питающей вулкан системе. Информация, которая будет получена в течение года после установки станции, будет использована для построения трехмерной сейсмической модели коры под вулканом и определения конфигурации магматических каналов.

Присмотреть за «домашними» вулканами

Но основная цель экспедиционного сезона в 2018 г. состояла в установке сети из 18 сейсмических станций на вулканах Авачинской группы, которые расположены так близко к г. Петропавловск-Камчатский, что местные жители любовно называют их «домашними».

Главный вулкан этой группы, который так и называется Авачинский, – один из наиболее активных на Камчатке. Последние извержения, вызвавшие лавовые и грязевые потоки, произошли здесь в 1945 и 1991 гг. Городу они ничем не угрожали, но геологи находят следы катастрофических взрывных извержений, одно из которых 30 тыс. лет назад привело к разрушению значительной части вулканической постройки. Современный Петропавловск-Камчатский стоит на отложениях громадных пирокластических потоков этого извержения, что лишний раз подчеркивает потенциальную опасность Авачинского вулкана.

В истории расположенного по соседству вулкана Корякский не было таких катастрофических эпизодов, поэтому он обладает практически идеальной формой конуса. Однако отсутствие мощных взрывных извержений в прошлом не дает гарантии, что такой катаклизм не может произойти в будущем. А наличие *фумарол*, из которых выделяются вулканические газы, и периодически случающиеся рои землетрясений говорят о достаточно высокой активности магматических очагов под вулканом.

Такое опасное соседство с главным городом Камчатки заставляет серьезно относиться к мониторингу состояния этих вулканов. На Авачинском и Корякском вулканах уже давно работает 7 сейсмических станций, которые непрерывно передают информацию в центральный офис КФГС РАН, где она круглосуточно обрабатывается в режиме реального времени. Десятки лет непрерывного мониторинга позволили получить важную информацию о поведении вулканов Авачинской группы. Однако такой сейсмической сети недостаточно для построения объемной модели сейсмических

Академик Н. Л. Добрецов у кратера вулкана Штюбель в вулканической системе Ксудача

скоростей, необходимой для точного определения положения магматического очага.

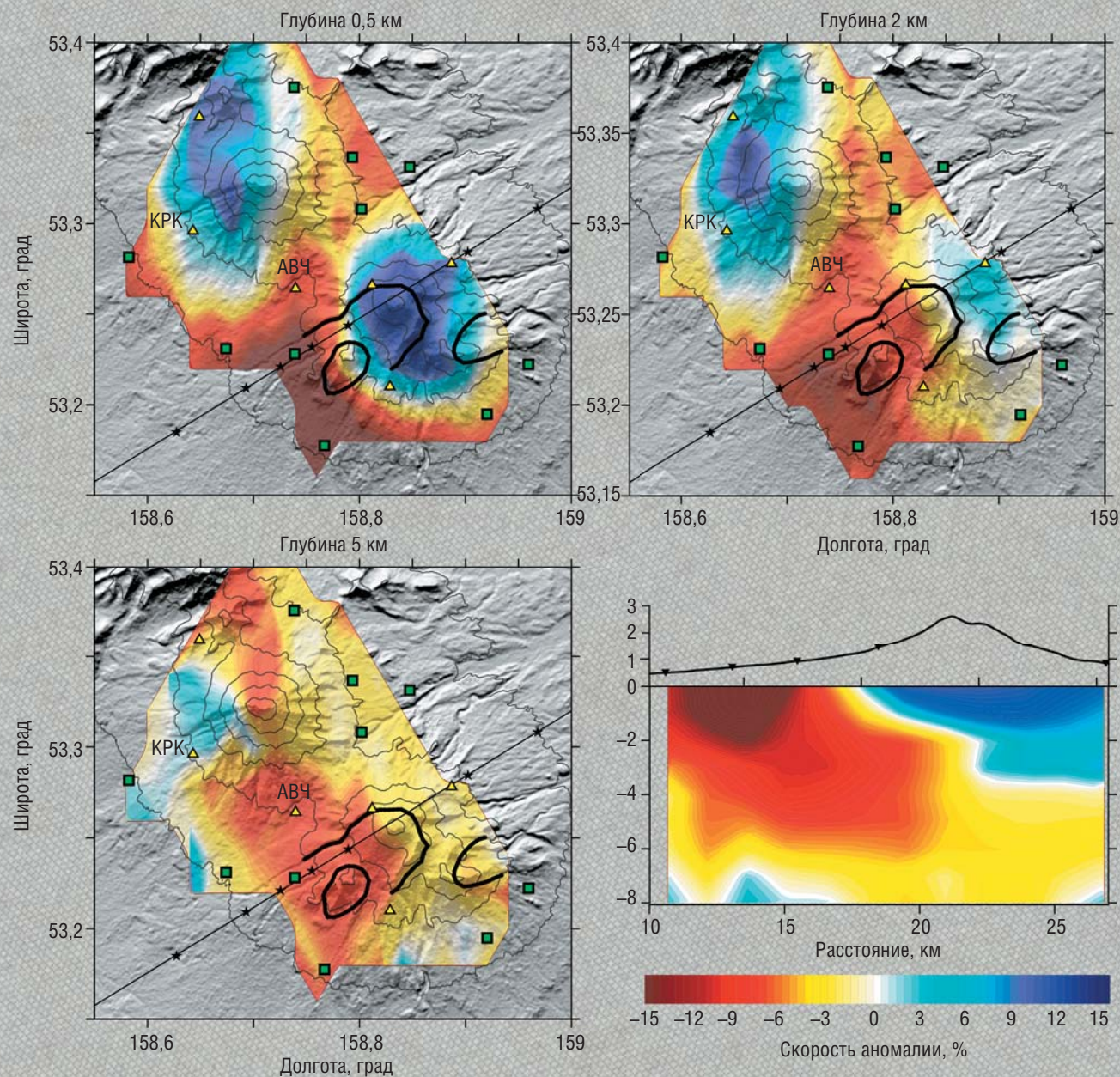
В 2012 г. сотрудники ИНГГ СО РАН впервые попробовали установить здесь временную сеть из 10 станций, однако из-за недостатка опыта и неблагоприятных факторов среды большая часть станций вышла из строя уже в первые месяцы работы. На основе этих фрагментарных данных удалось построить лишь приблизительную модель строения верхней коры без детализации, необходимой для локализации магматического источника (Koulakov et al., 2014).

В 2018 г. новосибирцы привезли уже 18 станций, две трети из которых были оборудованы современными и надежными регистрирующими приборами зарубежного производства. В этот раз экспедиция планировалась очень тщательно, чтобы минимизировать все риски и добиться непрерывной работы станций в течение всего года. Большую часть оборудования должен был доставить на точки легкий четырехместный коммерческий вертолет «Робинсон 44» американского производства. Доставка оборудования и людей представляла собой сложную оптимизационную задачу, аналогичную известной задаче о перевозке волка, козла и капусты, так как требовалось затратить минимум времени при ограниченной вместительности машины. И даже при таких условиях общее время полетов должно было превысить шесть часов.

Благодаря прогнозу погоды, который оказался на удивление точным, удалось определить тот самый единственный день с идеальной погодой, столь редкой на Камчатке. Из-за этого даже пришлось внести изменения в ход вулканологической конференции, которая в это время проходила в Петропавловске-Камчатском и в которой члены новосибирской экспедиции также принимали участие. Все прошло по плану, так что можно надеяться, что летом 2019 г. в распоряжении сейсмологов окажется уникальный материал, позволяющий определить конфигурацию магматических очагов под вулканами Авачинской группы.



Автор и участники
вулканологической конференции
на краю озера, которое заполнило
кратер вулкана Штюбель,
образовавшийся в результате
взрыва в 1907 г.



ШУМОВАЯ ТОМОГРАФИЯ ДЛЯ АВАЧИ

Визуализация результатов шумовой томографии под вулканами Авачинский (АВЧ) и Корякский (КРК) (в двух горизонтальных и вертикальном сечении) выполнена по сейсмическим данным, зарегистрированным в 2012 г.

В 2012 г. специалисты из ИНГГ СО РАН установили на вулканах Авачинской группы свою первую сейсмическую сеть. В предшествующие месяцы вулканы вели себя достаточно активно, демонстрируя относительно высокий уровень сейсмичности. Предполагалось, что за несколько месяцев работы станций будет получен материал, достаточный для того, чтобы построить трехмерную сейсмическую модель вулкана. Однако Авачинский вулкан как будто «застеснялся» своих исследователей и больше не проявлял никаких признаков активности. За несколько месяцев с начала работы сети было зарегистрировано всего несколько десятков сейсмических событий, что недостаточно для использования томографического метода. К тому же морозы нагрянули тогда, когда снеговой покров был еще небольшим,

поэтому некоторые станции переохладились и перестали работать. Результатом этого первого, не слишком удачного опыта стали сейсмические данные, полученные лишь за два месяца непрерывной работы всех станций. Поскольку классический томографический метод оказался в данном случае неприменим, пришлось искать другие способы извлечь полезную информацию. Успешной альтернативой стал недавно разработанный метод «шумовой томографии». Суть его в том, что проводится кросс-корреляционный анализ непрерывных записей для каждой пары станций, который позволяет выявить сейсмические поверхностные волны, пробегавшие между станциями. Анализ групповых скоростей этих волн на различных частотах позволяет определить трехмерное распределение скорости поперечных волн в среде. С помощью этого метода была построена сейсмическая модель Авачинской группы вулканов. Как можно увидеть, на малых глубинах доминируют высокоскоростные аномалии, связанные с прочными постройками вулканов. На большей глубине на юго-западе от Авачинского вулкана отмечается низкоскоростная аномалия, связанная, по-видимому, с наличием здесь огромной ямы, образовавшейся в результате взрывного извержения и заполненной не слишком «прочными» осадочными отложениями. Эти данные косвенно подтверждаются и другими геофизическими измерениями. Полученная картина хорошо согласуется с предположениями, что около 30 тыс. лет назад на Авачинском вулкане произошло крупное извержение, сопровождаемое выбросом большого объема вещества и огромными пирокластическими потоками

Для всех участников международной вулканологической конференции, которая проходила в июле 2018 г. в ИВиС ДВО РАН, были организованы несколько показательных выездов в «поле», чтобы ученые из разных стран могли буквально потрогать руками вулканические структуры Камчатки. Целью одной из таких поездок стал вулкан Ксудач на южной Камчатке.

С борта вертолета было хорошо видно, что этот вулканический комплекс представляет собой серию крупных кальдер, образовавшихся в недавнем геологическом прошлом в результате нескольких катастрофических взрывных извержений. В кальдере Ксудача ученые подробно осмотрели воронку диаметром около полутора километров, заполненную невероятной красоты озером, образовавшимся в 1907 г. в результате взрывного извержения вулкана Штубель, и прямо на его берегах смогли бурно обсудить формирование подобных вулканических систем.

Так благодаря усилиям самых разных специалистов со всего мира, непосредственно работающих на активных вулканах, мы получаем все больше новых данных, которые помогают нам лучше понять суровый нрав этих опасных гигантов и спрогнозировать их поведение.

Литература

- Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L. et al. Feeding volcanoes of the Kluchevskoy group from the results of local earthquake tomography // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. N. 9. L09305.
- Koulakov I., Jaxybulatov K., Shapiro N.M. et al. Asymmetric caldera-related structures in the area the Avacha group of volcanoes in Kamchatka revealed by ambient noise tomography and deep seismic sounding // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2014. V. 285. P. 36–46.
- Koulakov I., Abkadyrov I., Al Arifi N. et al. Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny, and Klyuchevskoy in Kamchatka // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2017. V. 122. N. 5. P. 3852–3874.
- Koulakov I., Smirnov S.Z., Gladkov V. et al. Causes of volcanic unrest at Mt. Spurr in 2004-2005 inferred from repeated tomography. // *Scientific Reports.* 2018. V. 8. P. 17482–17489.
- Koulakov I., Vargas C.A. Evolution of the magma conduit beneath the Galeras volcano inferred from repeated seismic tomography // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 7514–7522.

Работа поддержана грантом РФФ 14-17-00430. В публикации использованы фото автора