

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ

И.Ю. Кулаков

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9, Россия*

Полуостров Камчатка — один из наиболее тектонически-активных регионов мира с большим разнообразием и высокой интенсивностью проявлений современного вулканизма. В последнее десятилетие достигнут существенный прогресс в изучении глубинного строения под Камчаткой, благодаря томографическим исследованиям с использованием сейсмологических данных с постоянных сейсмостанций КФ ФИЦ ЕГС РАН и временных сетей, установленных на некоторых ключевых объектах. Задача настоящего обзора состоит в том, чтобы систематизировать десятки разрозненных геофизических работ по Камчатке и на их основе построить цельную картину функционирования вулканических систем. Особое внимание здесь уделяется Ключевской группе вулканов, которая, благодаря множеству многомасштабных исследований, находится среди наиболее хорошо изученных вулканических областей в мире. Согласно полученным результатам региональной томографии, особый характер активности Ключевской группы определяется ее близостью к области разрыва Тихоокеанского слэба. Среднемасштабные томографические исследования показали, что из этого разрыва поднимается астеносферный поток, который при достижении подошвы коры в районе влк. Шивелуч, распространяется далее горизонтально в сторону Ключевской группы. Сейсмические модели коры в районе Ключевской группы выявили различные механизмы магматического питания трех наиболее активных вулканов: Ключевского, Безымянного и Толбачика. Наконец, локальные сейсмические сети, установленные на отдельных вулканах Камчатки, позволили построить детальные изображения верхнекоровых очагов, непосредственно ответственных за текущие извержения. Сопоставление результатов по камчатским вулканам с томографическими моделями по нескольким другим вулканам мира позволило выявить общие закономерности систем питания активных магматических систем.

Вулканы, сейсмическая томография, мантия, кора, магматический очаг, гидротермальная система, Ключевская группа вулканов, Авачинская группа вулканов, Камчатка

SEISMIC TOMOGRAPHY OF KAMCHATKAN VOLCANOES

I.Yu. Koulakov

The Kamchatka Peninsula is one of the most tectonically active regions in the world, where intensive and diverse modern volcanic activity takes place. In the recent decade, a substantial progress in the investigation of deep structures beneath Kamchatka has been achieved owing to numerous tomography studies based on seismological data provided by permanent stations and temporary networks deployed in some key areas. The goal of this review is summarizing and systematizing dozens of separate multiscale geophysical studies in Kamchatka and constructing an integral model of volcano-feeding systems. An important part of this review contains the description of results of various seismic studies related to the Klyuchevskoy group volcanoes, which can now be considered one of the best studied volcanic areas in the world. The results of the regional-scale seismic tomography reveal the existence of the Pacific slab window, which determines the particular activity of the Klyuchevskoy group volcanoes. Middle-scale tomography studies have found traces of an ascending hot mantle flow that passes through the slab window, reaches the bottom of the crust below Shiveluch Volcano and then propagates laterally toward the Klyuchevskoy group. Seismic models of the entire crust in the area of the Klyuchevskoy group were used to identify different mechanisms of magmatic feeding of three most active volcanoes: Klyuchevskoy, Bezymianny, and Tolbachik. The data of local networks deployed on several volcanoes of Kamchatka were used to image the magma sources in the upper crust, which are directly responsible for the current eruption activity. The comparison of the results for the Kamchatkan volcanoes with tomography models of several other volcanoes of the world allowed determining some common features and differences in feeding active magmatic systems.

Volcanoes, seismic tomography, mantle, crust, magma chamber, hydrothermal system, Klyuchevskoy group of volcanoes, Avacha group of volcanoes, Kamchatka

1. ВВЕДЕНИЕ

Камчатка — регион на Дальнем Востоке России, который характеризуется многочисленностью и разнообразием проявлений вулканической активности, связанной с субдукцией Тихоокеанской плиты. Всего на полуострове имеется несколько сотен плейстоценовых и голоценовых вулканов [Лаверов, 2005], из которых около тридцати являются действующими, т. е. имеющими следы извержений в историческое время и/или признаки газовыделения, вулканической сейсмичности, гидротермальных проявлений и прочих свидетельств вулканической деятельности [Мелекесцев, 2006]. На Камчатке практически каждый год происходят два—три достаточно сильных извержения [Гирина и др., 2018], однако из-за весьма низкой населенности территорий вокруг вулканов большинство из этих извержений не несет прямого риска людям и инфраструктуре. Тем не менее проблеме мониторинга вулканической активности уделяется большое внимание, прежде всего по причине потенциальной опасности, которую несут пепловые шлейфы для плотного авиасообщения вблизи побережья Камчатки [Гордеев, Гирина, 2014]. Изучение вулканов имеет большое значение для понимания фундаментальной природы процессов питания магматических систем и подготовки извержений. Выявленные при этом закономерности могут оказаться полезными для прогнозов извержений аналогичного типа в других частях планеты, где население может быть гораздо более плотным. Очевидно, что такого рода исследования могут помочь спасти жизни людей и минимизировать материальный ущерб от вулканических катастроф.

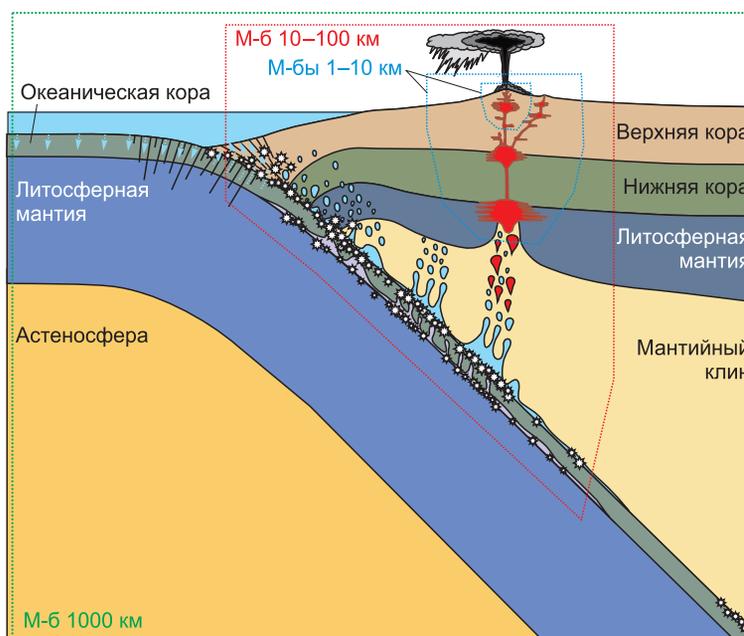
Важная задача состоит в изучении потенциальной опасности крупных извержений с индексом вулканической эксплозивности (VEI) более 5, могущих иметь значительный региональный и даже глобальный эффект [Sigurdsson, 1990; Self, 2006]. Наиболее крупные в историческом прошлом на Земле извержения масштаба Тамборы в 1815 г. [Raible et al., 2016], Уайнапутина в 1600 г. [De Silva, Zielinski, 1998] и Кракатау в 1883 г., происходящие в среднем раз в 100 лет, имели глобальный эффект и приводили к значимым изменениям климата на Земле. На Камчатке имеется ряд вулканических структур с высоким риском такого рода катастрофических событий. Например, на влк. Ксудач на юге Камчатки только за последние 7000 лет произошла серия кальдерообразующих извержений: одно с VEI = 6 (в 240 г. н. э) и четыре с VEI = 5, последнее из которых случилось 28 марта 1907 г. [Braitseva et al., 1996; Volynets et al., 1999]. В другом месте Южной Камчатки, на Курильском озере, обнаруживаются следы двух кальдерообразующих извержений 41.5 и 7.6 тыс. л. н., последнее из которых выбросило около 170 км³ пород и считается одним из сильнейших голоценовых извержений в мире [Ponomareva et al., 2004]. Следы крупных кальдерообразующих извержений обнаруживаются и в других частях Камчатки [Bindeman et al., 2010], что повышает риски того, что следующее извержение, имеющее глобальный эффект, может произойти именно там.

К настоящему моменту на некоторых вулканах в мире созданы системы прогнозов вулканической активности, с помощью которых успешно предсказывают начало и интенсивность извержений, благодаря чему спасены тысячи жизней [Marzocchi, Bebbington, 2012]. Например, серия крупных пирокластических потоков на влк. Мерапи на о. Ява в Индонезии в 2010 г. была успешно спрогнозирована вулканологами и корректно оценена территория эвакуации, в результате чего количество жертв данной катастрофы было минимальное [Jousset et al., 2012]. Определенные успехи в этом направлении достигнуты сотрудниками КФ ФИЦ ЕГС РАН [Сенюков, 2013; Иванов, 2013], которые обеспечивают корректные краткосрочные прогнозы взрывных извержений влк. Безымянный и некоторых других вулканов на Камчатке. Вместе с тем далеко не везде такого рода точное прогнозирование возможно, что связано с тем, что каждый вулкан по сути является уникальным. В некоторых случаях сильные извержения случаются фактически без видимых предвестников, которые могли бы послужить основой для успешного прогноза. Помимо изучения отдельных феноменов, предвосхищающих катастрофические события, создание универсальной системы прогнозирования извержений требует понимания общих принципов функционирования магматической системы, представляющей собой сложный механизм, где взаимодействуют механические, термодинамические, химические и другие процессы [Добрецов и др., 2015]. Для решения этой задачи ключевую роль играет сейсмическая томография, которая позволяет определять геометрию системы магматического питания, изучать физические свойства ее отдельных элементов, а также выявлять их возможные изменения во времени.

Система магматического питания вулканов на Камчатке, как и в других зонах субдукции, является сложным многоуровневым комплексом, изучение которого требует многомасштабных геофизических исследований (рис. 1) [Добрецов и др., 2012]. Например, характер дугового магматизма во многом определяется особенностями погружения океанической литосферной плиты [Syracuse, Abers, 2006], форму и физические свойства ее можно изучать посредством крупномасштабной томографии с использованием глобальных и региональных сейсмологических баз данных. Информация о строении мантийного клина необходима для понимания процессов выделения флюидов и расплавов из погружающейся океанической литосферы [Ulmer, 2001] и может быть получена путем использования данных о глубоких

Рис. 1. Схема строения зоны субдукции.

Пунктирные линии различного цвета показывают области для выполнения разномасштабных сейсмотомографических исследований по различным системам наблюдений, представленных в тексте.



землетрясениях, зарегистрированных региональными сейсмологическими сетями. Строение коры позволяет воссоздать геометрию магматических источников, непосредственно связанных с активностью вулканов, и может быть изучено с использованием данных как по объемным, так и поверхностным волнам. Наконец, структуры в самых верхних слоях системы на глубинах от первых километров до десятков метров могут нести информацию о гидротермальных процессах, являющихся

важным следствием вулканической активности. Объекты такого масштаба могут изучаться с помощью пассивных и активных сейсмических методов, а также другими геофизическими подходами.

В данной статье дается обзор исследований магматических структур под различными активными вулканами Камчатки методами сейсмической томографии, большая часть из которых выполнена при непосредственном участии автора. Изложение начинается с описания основных модификаций томографических алгоритмов, используемых для изучения многомасштабного строения магматической системы в зонах субдукции. Далее представляются сейсмические данные, которые получены на Камчатке на базе постоянных и временных сетей и используются для томографических исследований. После этого приводятся результаты изучения нескольких различных по типу и размерам вулканических комплексов Камчатки. Наконец, в части дискуссии обсуждаются некоторые общие черты и особенности сейсмического строения отдельных вулканов и даются сценарии зарождения и хода вулканических извержений главным образом на базе результатов сейсмотомографии, а в отдельных случаях и с привлечением дополнительной информации из смежных областей наук о Земле.

Необходимость данного обзора определяется тем, что за последние годы, благодаря проведению серии сейсмологических экспериментов, изученность глубинного строения Камчатки вышла на принципиально новый уровень, в результате чего этот регион стал одним из наиболее хорошо изученных в мире. За последнее десятилетие опубликованы десятки разрозненных статей с разномасштабными моделями отдельных участков Камчатки. В связи с этим представляется важным в рамках единого труда показать основные достижения в этом направлении и на базе их обобщения представить концептуальную модель функционирования магматической системы, которая может быть применена как для Камчатки, так и для других зон субдукции.

Настоящий обзор рассчитан на широкий круг специалистов. В частности, описание томографических схем производится максимально простым языком, чтобы дать возможность негеофизикам лучше понимать границы применимости данного метода. С другой стороны, интерпретация томографических моделей предлагает общие механизмы магматической активности, не претендуя на детальное изложение всех геологических и петрологических аспектов. Этот обзор призван инициировать дискуссию и стать стартом для следующих междисциплинарных исследований совместно со специалистами из других разделов геонаук.

2. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ПРОЦЕССАХ В НАДСУБДУКЦИОННЫХ КОМПЛЕКСАХ

Главная причина возникновения камчатских вулканических комплексов состоит в их приуроченности к зоне субдукции (см. рис. 1). Поэтому, прежде чем приступать к описанию сейсмических структур под Камчаткой, представляется важным дать общую информацию о строении надсубдукционных структур, где происходит формирование магматических источников.

Дуговой вулканизм в зонах субдукции во многом определяется циркуляцией летучих в мантийном клине, главным компонентом которых является вода [Ulmer, 2001]. Вода проникает в океаническую

литосферу в достаточно большом количестве в процессе формирования плиты и перемещения от зоны спрединга до зоны субдукции (см. рис. 1) [Fujiie et al., 2018]. Определенную роль при насыщении литосферы водой является ее изгиб и растрескивание непосредственно перед погружением [Faccenda et al., 2009; Kogonaga, 2017]. Летучие сохраняются в породах гидрированной литосферы как в свободной форме в трещинах и порах, так и на атомарном уровне в водосодержащих минералах [Reasock, 1996, 2003; Van Keken et al., 2002]. При погружении слэба происходит обратный процесс постепенного выхода летучих материалов [Arcau et al., 2005]. Участки наиболее активных реакций дегидратации в слэбе маркируются кластерами землетрясений, которые формируют зону Беньоффа вдоль верхней границы погружающейся плиты [Hacker et al., 2003]. Большая часть воды выходит на глубинах от 10 до 300 км вследствие фазовых переходов [Reasock, 2003]. На глубинах 10—30 км, где слэб еще находится под корою вышележащей плиты, вода выделяется в основном из цеолитов. При попадании слэба в мантию на глубинах от 30 до 70 км происходит дегидратация голубых сланцев, а от 80 до 120 км — эклогитов [Winter 2001]. В более глубинных реакциях дегидратации в слэбе участвуют флагопиты (до 200 км) и лавсониты (до 300 км). Одновременно на верхней кромке мантийной океанической литосферы в широком диапазоне глубин идет преобразование серпентинита, сопровождающееся выбросом большого количества воды. Именно с этой реакцией связывают возникновение двойной полосы сейсмичности в большинстве зон Беньоффа [Reasock, 2003].

Распределение отдельных групп землетрясений на различных глубинах, которые связываются с дегидратацией слэба, свидетельствует, что процесс выброса летучих из океанической плиты протекает не непрерывно вдоль поверхности слэба, а дискретным образом в местах, где наиболее сильно проявлена та или иная реакция. При этом глубины таких поясов сейсмичности неодинаковы в разных зонах субдукции и не всегда соответствуют оценкам, описанным в предыдущем абзаце [Hacker et al., 2003; Reasock, 2003]. Вариация глубин протекания реакций дегидратации может быть связана со множеством разных факторов, таких как возраст слэба, скорость и угол погружения плиты, наличие неоднородностей (например, симаунтов), разрывов в слэбе и пр. В свою очередь, глубина и интенсивность выброса флюидов из слэба являются ключевыми факторами, которые определяют характер магматической активности в вулканической дуге [Syracuse, Abers, 2006].

Таким образом, изучение строения мантийного клина и коры геофизическими методами позволяет проследить цепочку процессов образования и миграции магмы и флюидов на всем пути от поверхности слэба до кратера конкретного вулкана, откуда происходит извержение. В литературе есть множество моделей, представляющих строение надсубдукционных комплексов в различных регионах, которые показывают, что структура потоков в каких-то случаях может иметь схожие черты, а в некоторых — существенно отличаться. Средняя глубина сейсмических кластеров под вулканическими дугами в мировых зонах субдукции составляет 120 км, что и принимается как типичный уровень дегидратации, связанный с формированием вулканизма [Hacker et al., 2003]. Такого рода глубины инициации формирования расплавов определяются по результатам томографии для большинства вулканических комплексов Японии [Zhao, 2015], в Центральной Америке под Коста-Рикой и Никарагуа [Syracuse et al., 2008] и во многих прочих зонах субдукции. Вместе с тем результаты сейсмической томографии, выполненные по другим зонам субдукции, показывают, что в отдельных регионах эта глубина может существенно отличаться от средней величины. Например, существенно большая глубина формирования флюидного потока в мантийном клине наблюдается под вулканическим комплексом Пуна-Альтиплато в Центральных Андах [Koulakov et al., 2006a] и под кальдерой Тоба на Суматре [Koulakov et al., 2016], где соответствующие сейсмические аномалии начинаются на глубине около 150 км. Представляется логичным, что в этих случаях флюиды проходят через более широкую и значит более горячую часть мантийного клина, вызывая более активное плавление, что, в свою очередь, оказывает влияние на интенсивность вулканизма. Действительно, в районе плато Пуна-Альтиплато наблюдаются следы крупных кальдер и повсеместное присутствие игнимбритов, указывающих на катастрофический характер извержения [De Silva et al., 2006], а Тоба является местом крупнейшего суперизвержения, произошедшего 74 тыс. л. н. [Chesner, 2012]. С другой стороны, в районе Центральной Явы под влк. Мерами наблюдаемая аномалия в мантийном клине, связанная с миграцией флюидов и расплавов из слэба, имеет наклонную форму и начинается на слэбе на глубине 90—100 км [Koulakov et al., 2009a]. Несмотря на существенно меньшую глубину выделения флюидов и их миграцию в менее горячей части мантийного клина, Мерапи является одним из наиболее активных в мире. Эти примеры показывают, что связь между конфигурацией потоков в мантийном клине и характером вулканизма, несомненно, существует, однако многие аспекты такой связи остаются необъясненными. Для более полного понимания этих процессов необходимо продолжать изучение различных зон субдукции, и в этом смысле Камчатский регион является очень показательным, поскольку субдукция здесь приводит к исключительно активному и разнообразному вулканизму. Построив сейсмические модели и реалистичные сценарии работы магматической системы здесь, мы сможем лучше понять аналогичные процессы в других зонах субдукции.

3. МЕТОДЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ И ДАННЫЕ ДЛЯ МНОГОМАСШТАБНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВУЛКАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Прежде чем приступить к изложению сейсмических моделей, полученных в разных масштабах для ряда структур Камчатки, представляется важным кратко описать методики сейсмической томографии, использованные для получения этих результатов. Это даст возможность читателю оценить границы применимости того или иного метода и более критически подойти к интерпретации представленных изображений.

3.1. Определение сейсмической томографии, входные и выходные данные

Сейсмическая томография — это метод определения непрерывного распределения сейсмических свойств среды с использованием параметров просвечивания сейсмическими волнами. Искомыми свойствами среды могут быть скорости продольных и поперечных волн (v_p и v_s), их отношение (v_p/v_s), сейсмическая добротность (или обратная величина — затухание), различные типы анизотропии и пр. На практике обычно изучают двумерные (2D) или трехмерные (3D) распределения этих параметров, однако есть работы по выявлению четырехмерных функций (4D), т. е. с учетом вариаций во времени. Также в случае пассивных схем наблюдений важным элементом томографической задачи является определение положения сейсмических источников. Геометрия резких границ, как правило, не является объектом исследований сейсмической томографии.

В качестве входных данных при томографической инверсии используют различные параметры просвечивания изучаемой области, которые несут информацию о ее внутреннем строении. Прежде всего, разделяют две большие и более или менее равнозначные группы методов, основанных на использовании объемных и поверхностных сейсмических волн. В случае объемных волн в большинстве работ даются времена пробега сейсмических волн (в случае активных, т. е. искусственных источников с известными параметрами) или времена прихода (в случае пассивных, естественных источников, расчет параметров которых является дополнительной задачей). При определении распределения сейсмической добротности или затухания применяют амплитудные характеристики приходящих волн или форму коды волны (т. е. сигнала, следующего за главным вступлением волны). В случае поверхностных волн используют зависимости групповых и фазовых скоростей от частоты колебаний (дисперсионные кривые), которые позволяют восстанавливать распределение сейсмической скорости (главным образом v_s) с глубиной и по латерали. В практических исследованиях поверхностные волны генерируются либо активными (искусственными) источниками, либо землетрясениями. В последние годы большую популярность приобрел метод шумовой томографии, в котором сейсмические поверхностные волны выделяются путем кросс-корреляции записей сейсмического шума на парах станций.

3.2. Схемы наблюдений для сейсмической томографии вулканов

Как было отмечено во введении, при полноценном изучении вулканических систем важно выполнять разномасштабные исследования от тысячи километров (например, в случае изучения конфигурации зоны субдукции) до первых километров и сотен метров (например, гидротермальных полей). Каждое из таких исследований подразумевает применение различных систем наблюдений и типов данных. В случае изучения крупных мантийных структур используют данные глобальных каталогов, например, International Seismological Centre (ISC), включающие информацию о миллионах землетрясениях и соответствующих им временах прихода P - и S -волн, зарегистрированных в мире за более чем 60 лет. При исследовании строения мантии под отдельными регионами можно использовать данные по станциям, расположенным там и регистрирующим землетрясения в мире (телесеismicкая схема) [Bianchi et al., 2013]. Вместе с тем в мире существует не так много мест, где покрытие станций достаточно для реализации телесеismicкой томографии. Поэтому была разработана обратная телесеismicкая схема, в которой берутся в рассмотрение лучи от землетрясений в изучаемой области, зарегистрированные всеми возможными станциями в мире [Koulakov et al., 2002]. С помощью комбинации этих двух схем (рис. 2, а) было построено множество моделей строения мантии по всему миру [Koulakov et al., 2009b; Koulakov, 2011], в том числе и в зонах субдукции [Кулаков и др., 2011; Jaxybulatov et al., 2013].

Для изучения структуры в верхах мантии и коре берут данные региональных сетей, которые, как правило, функционируют в сейсмически-активных регионах под эгидой государственных сейсмологических служб, таких как Федеральный исследовательский центр единой геофизической службы РАН (ФИЦ ЕГС РАН) в России. В некоторых случаях данные перманентных региональных сетей дополняются временными сетями, устанавливаемыми на отдельных наиболее интересных для специалистов территориях. Такого рода сети могут иметь масштабы от сотен до первых десятков километров, что определяет глубинность и детальность исследований. Данные региональных сетей позволяют изучать строение набсубдукционного мантийного клина (см. рис. 2, б), что дает важную информацию о дегидратации

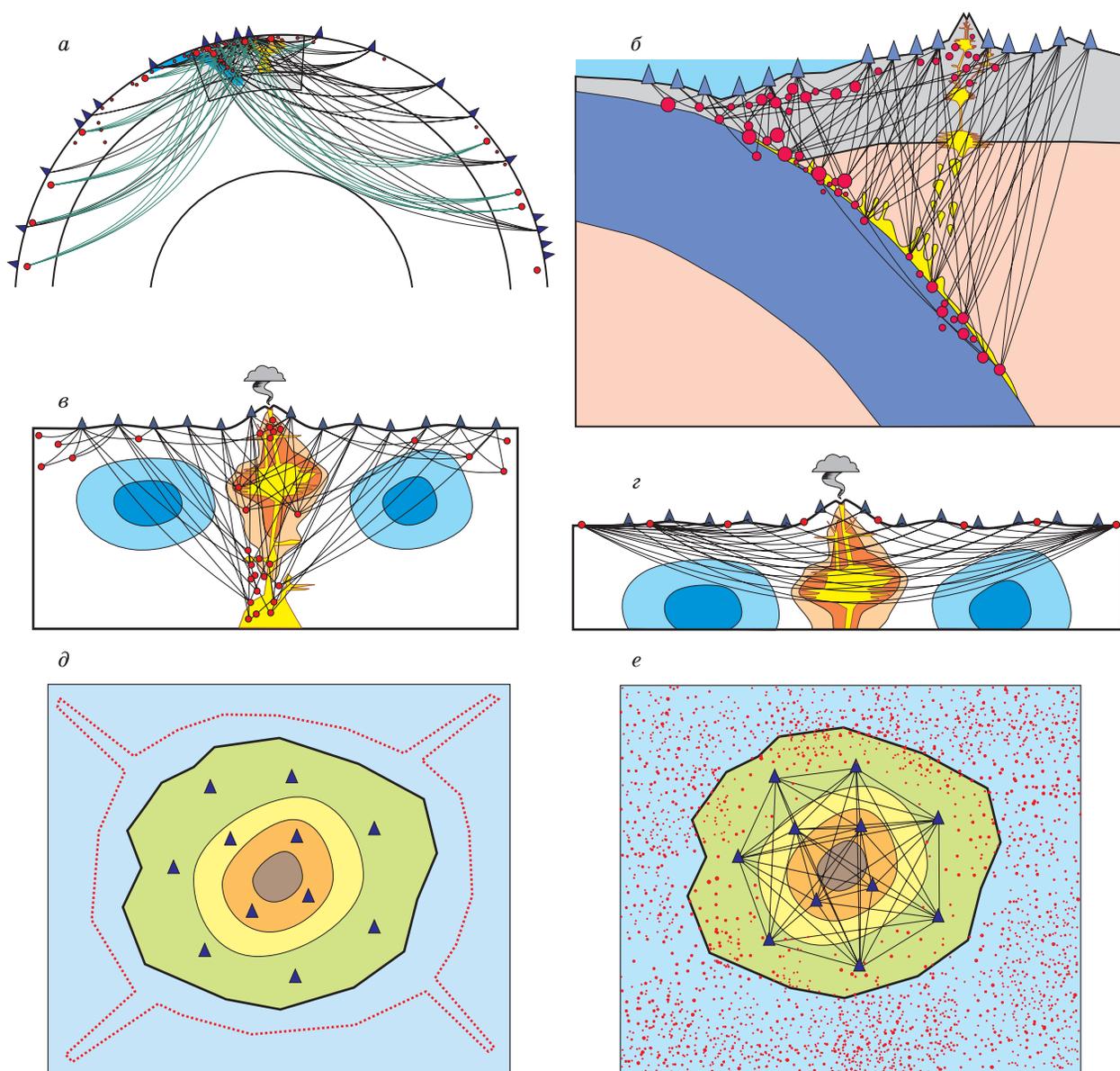


Рис. 2. Примеры систем наблюдения, используемых при томографических исследованиях много-масштабных структур, связанных с магматической активностью.

Схематически показаны: треугольники — станции, красные точки — источники и черные линии — лучи. *a* — региональная схема с использованием глобальных данных; *б* — схема с использованием региональных сетей и региональной сейсмичности; *в* — схема с использованием локальных сетей и локальной сейсмичности; *г* — двумерная сейсмика с использованием рефрагированных волн от активных источников; *д* — площадная активная сейсмика с использованием гидропушек; *е* — шумовая томография, поверхностные волны.

слэба и формировании глубинных источников магматизма [Koulakov et al., 2006, 2016; Syracuse et al., 2008; Zhao, 2015].

Пассивные исследования локального масштаба (первые десятки километров, см. рис. 2, *в*) направлены на определение геометрии и физических свойств магматических очагов в средней и верхней коре, что дает возможность определить сценарии питания вулканов, непосредственно приводящие к извержениям. Автор разработал алгоритм пассивной томографии LOTOS [Koulakov, 2009], позволяющий восстанавливать структуру сейсмических скоростей и локацию землетрясений, который активно используется множеством специалистов в мире для изучения различных геологических структур. В частности, с его помощью получены сейсмические модели по десяткам различных вулканов мира [Vargas et al., 2017; Koulakov et al., 2018, 2019, 2020a; Bushenkova et al., 2019].

Для изучения структур верхней коры используют системы наблюдения с активными источниками (см. рис. 2, *з*). В прошлом веке в Советском Союзе был проведен ряд экспериментов по глубинному сейсмическому зондированию (ГСЗ) отдельных вулканов [Утнасин и др., 1974], одним из которых является Авачинская сопка [Балеста и др., 1988], результаты экспериментов будут подробно обсуждаться в разделе 5.2. В настоящее время применение взрывных источников для сейсмических исследований вулканов ограничивается высокой ценой экспериментов, а также опасением, что ударные воздействия могут спровоцировать вулканическую активность. Для проведения томографии в прибрежных областях или на островах широкое распространение приобрели активные источники с использованием гидропушек, установленных на судне, которое курсирует вокруг объекта исследования (см. рис. 2, *д*). Таким образом, были получены детальные модели островов Десепшн [Zangomeneghi et al., 2009] и Генерифе [García-Yeguas et al., 2012], а также восточной части Сицилии под влк. Этна [Díaz-Moreno et al., 2017]. Для построения сейсмических моделей в последних двух работах использовался алгоритм трехмерной активной томографии АТОМ-3D, разработанный автором. К сожалению, на Камчатке и Курильских островах такого рода наблюдения пока не проводились, хотя они представляются весьма перспективными для этих регионов.

Томография на основе использования поверхностных волн также применяется для изучения вулканических систем. В последние годы получила большую популярность методика выявления поверхностных волн из корреляции сейсмического шума, данные по которым используются для томографической инверсии (см. рис. 2, *е*) [Shapiro et al., 2005; Bensen et al., 2007]. При изучении локальных областей вокруг вулканических структур поверхностно-волновая томография применяется для выявления крупных отложений вулканокластических формаций вблизи поверхности или для выявления скрытых оснований крупных вулканических построек, как, например, в случае изучения Ключевской группы вулканов в работах [Егорушкин и др., 2021] и Центральной Явы [Koulakov et al., 2016b]. Вместе с тем существуют работы, в которых особо крупные магматические тела удается восстановить и с помощью томографии на поверхностных волнах, как в случае супервулкана Тоба [Jaxybulatov et al., 2014] и Йеллоустон [Seats, Lawrence, 2014].

Поскольку метод корреляции шума позволяет достаточно надежно выявлять стационарный во времени сигнал, его можно использовать для расчета тонких временных вариаций сейсмических скоростей. Этот метод был успешно апробирован для выявления изменений в структуре вулканов Килауэа [Feng et al., 2020] и Питон де ля Фурнез [Duputel et al., 2009], которые происходили непосредственно перед их извержениями. На более региональном масштабе этот метод был использован для выявления связи между катастрофическим землетрясением Тохоку в Японии в 2011 г. и активизацией нескольких вулканов на окружающих территориях [Brenquier et al., 2014].

3.3. Сейсмологические сети на Камчатке

На Камчатке развернута достаточно большая сеть перманентных сейсмических станций (синие треугольники на рис. 3), которые обслуживаются Камчатским филиалом Единой геофизической службы РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН) [Чебров и др., 2013]. В течение десятилетий телеметрические станции, установленные в труднодоступных местах, ведут непрерывную запись сейсмического сигнала и осуществляют его передачу в режиме реального времени в центральный офис в г. Петропавловск-Камчатский. Несмотря на чрезвычайно сложные природные условия, отсутствие дорог и весьма ограниченное финансирование, сотрудникам КФ ФИЦ ЕГС РАН удается поддерживать станции в образцовом состоянии и постепенно модернизировать системы наблюдения, что позволяет систематически повышать качество и количество зарегистрированных данных. Специалисты службы в круглосуточном режиме производят мониторинг землетрясений и снятие времен прихода P - и S -волн, в результате чего в базах данных службы накоплена информация о сотнях тысяч событий в коре и мантии под Камчаткой и миллионах лучей. Вместе с тем следует отметить, что установка постоянных станций была нацелена в основном на изучение сейсмичности в ключевых областях Камчатки, главным образом на вулканах. Однако имеющееся распределение станций не всегда оптимально для изучения структурных особенностей методами сейсмической томографии (см. рис. 3). По этой причине реализация томографических исследований, основанных только на данных КФ ФИЦ ЕГС РАН, была ограничена небольшим числом областей, где покрытие лучами более или менее удовлетворительное.

Для плотного и равномерного покрытия отдельных областей Камчатки сейсмическими станциями организуется установка временных сетей. Одна из первых таких сетей была установлена на влк. Безымянный в 2009 г. в ходе совместного российско-американского проекта PIRE [Thelen et al., 2010]. Она состояла из шести станций и проработала всего два месяца. С 2012 г. консорциум институтов ИНГТ СО РАН, ИВиС ДВО РАН и КФ ФИЦ ЕГС РАН практически ежегодно устанавливает сети временных станций в различных локациях на Камчатке, каждая из которых функционирует, как правило, в течение

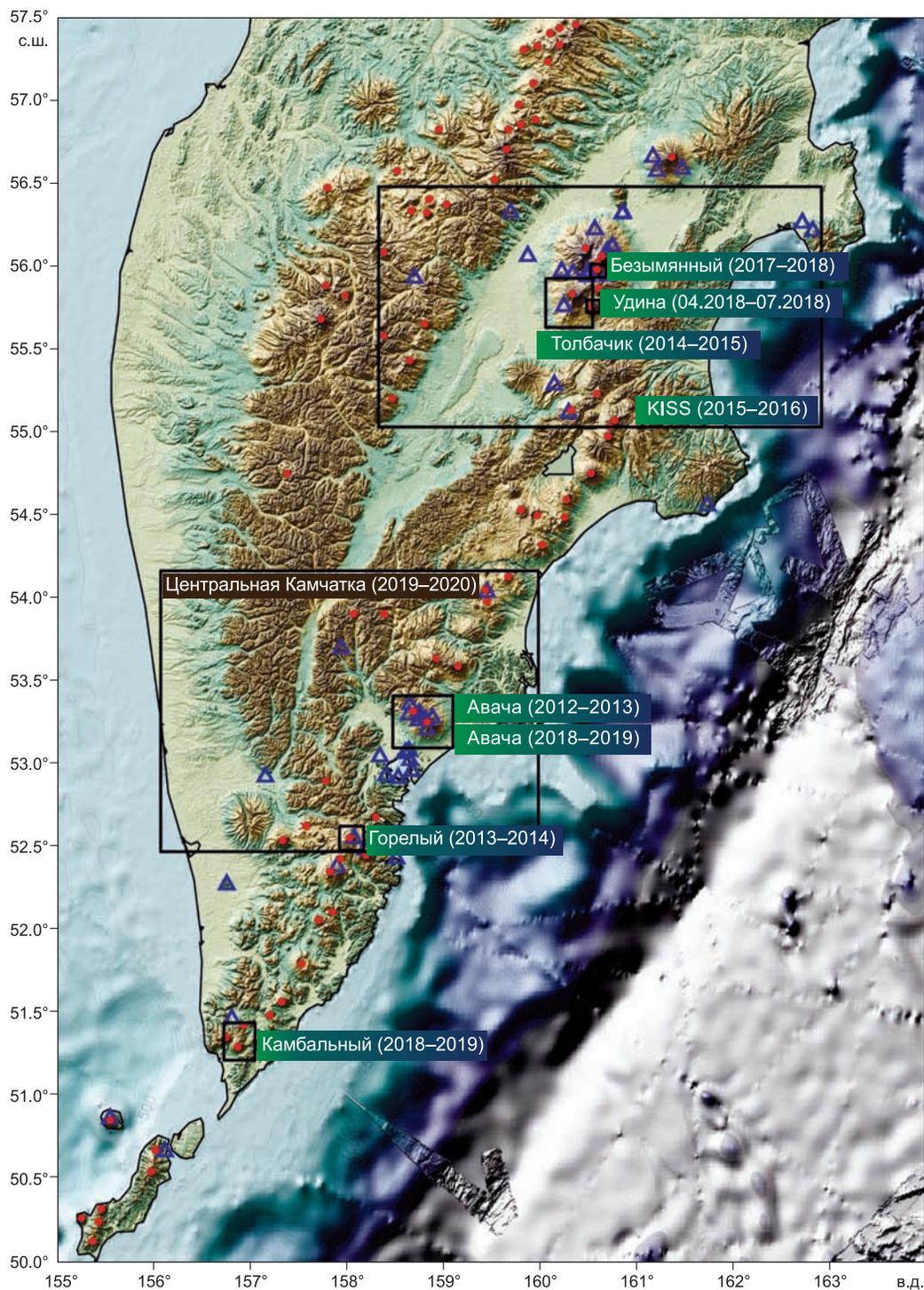


Рис. 3. Сейсмические наблюдения на Камчатке.

Синие треугольники — станции постоянной сети КФ ФИЦ ЕГС РАН. Прямоугольники — области, покрытые временными сетями в разные годы. Красные точки — плейстоцен-голоценовые вулканы.

одного года. Положение этих сетей показано на рис. 3. Распределение постоянных и временных станций, установленных до 2016 г. на территории Северной группы вулканов, показано на рис. 4. Ниже приведено краткое описание проведенных экспериментов.

– В 2012 г. сеть из 11 станций была установлена на вулканах Авачинской группы в дополнение к существующим постоянным семи станциям. К сожалению, многие временные станции вышли из строя

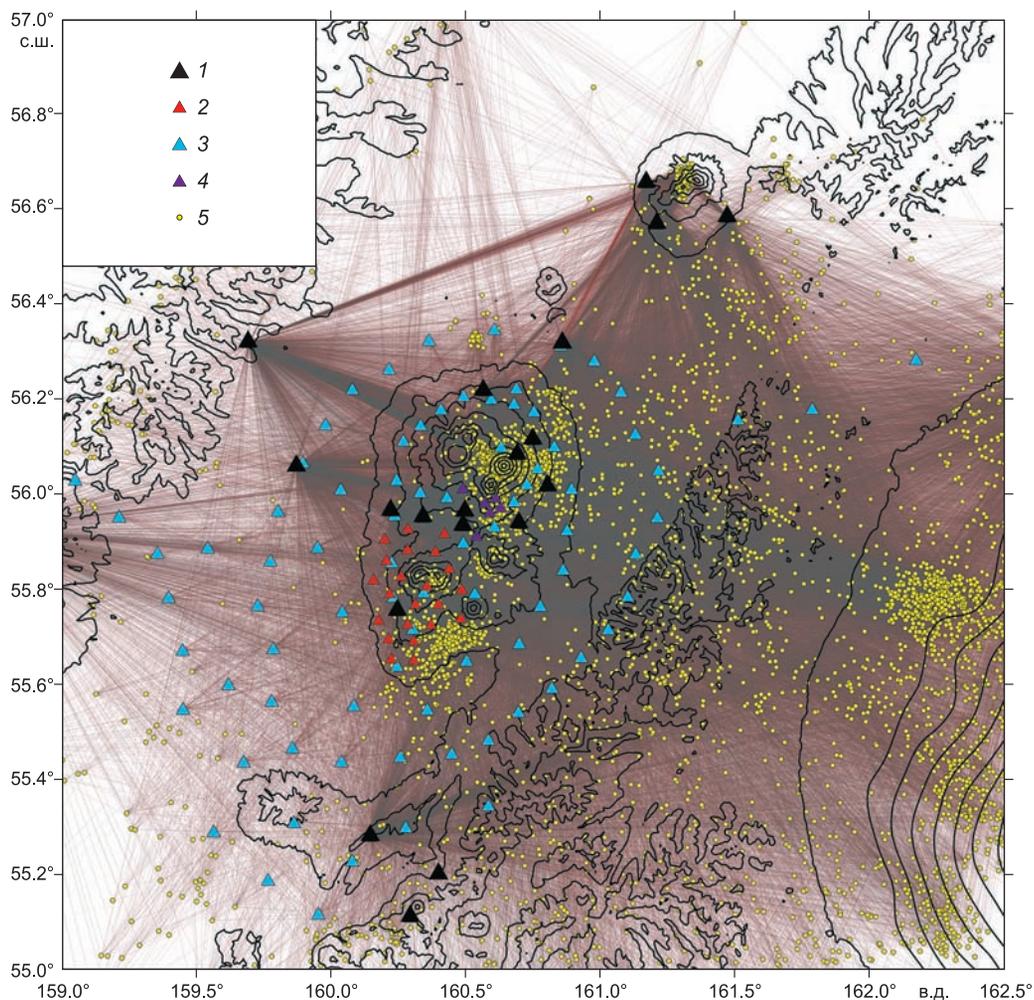


Рис. 4. Станции постоянной и временных сейсмических сетей на территории Северной группы вулканов.

Серые и красные линии показывают траектории *P*- и *S*-лучей, использованные в работе [Koulakov et al., 2020b]. Станции: 1 — постоянные, 2 — TOLB-2014, 3 — KISS, 4 — PIRE; 5 — землетрясения.

спустя два месяца из-за технических проблем, вследствие чего набрать информацию о достаточном количестве локальных событий в этом случае не удалось. В качестве альтернативы к этим данным был применен метод шумовой томографии [Koulakov et al., 2014], результаты которой показаны в разделе 5.3.

– В 2013 г. 20 временных станций были поставлены на влк. Горелый, который в тот момент демонстрировал высокий уровень дегазации и сейсмической активности. Данные этой сети и одной постоянной станции были использованы для локальной томографии [Kuznetsov et al., 2017], описанной в разделе 6, а также для выделения и анализа десятков тысяч длиннопериодных событий [Abramenkov et al., 2020].

– В 2014 г. 20 временных станций были установлены вокруг влк. Толбачик (сеть TOLB-2014, красные треугольники, см. рис. 4). Данные этой сети позволили существенно дополнить информацию, получаемую постоянной сетью. Совместный анализ всех имеющихся по Ключевской группе данных методом сейсмической томографии позволил получить модели коры с достаточно высоким разрешением и выявить ранее неизвестные структуры под Толбачиком и окружающими вулканами [Koulakov et al., 2017]. Результаты этой работы описаны в разделе 4.3.

– В 2015 г. совместно с французскими и германскими коллегами был реализован масштабный проект KISS по установке более чем 80 сейсмических станций (синие треугольники, см. рис. 4) на большой территории, покрывающей Ключевскую группу вулканов и окрестности [Shapiro et al., 2017b]. Вместе со станциями постоянной сети количество одновременно работающих сейсмоприемников превосходило сотню. В результате обработки этих данных была получена высокая плотность лучей, позво-

лившая получить изображения мантийного клина и коры с беспрецедентным для данного региона разрешением [Koulakov et al., 2020b]. Данные этой сети использовались также для проведения шумовой томографии [Green et al., 2020; Егорушкин и др., 2021].

– В 2017 г. были установлены 10 временных станций на влк. Безымянный. По счастливому стечению обстоятельств во время работы сети произошло сильное взрывное извержение вулкана, в результате чего станциями была зарегистрирована уникальная информация, позволяющая изучать стадии подготовки и реализации взрыва [Koulakov et al., 2021]. Результат обработки этих данных приведен в разделе 4.5.

– Весной 2018 г. на три месяца были установлены четыре станции на влк. Удина, который неожиданно для специалистов стал проявлять сейсмическую активность, хотя ранее рассматривался как потухший [Koulakov et al., 2019]. Результаты обработки этих данных приведены в разделе 4.6.

– В июле 2018 г. была установлена сеть из 18 станций на территории Авачинской группы вулканов, которые на этот раз успешно отработали в течение года. Обработка этих данных к настоящему моменту еще не закончена.

– Также в 2018 г. была установлена сеть из 10 станций на влк. Камбальный на Южной Камчатке, где за два года до этого произошло извержение. В настоящий момент проводится анализ этих данных и построение моделей по объемным и поверхностным волнам.

– В 2019 г. совместно с университетом Тайваня была установлена крупная региональная сеть в центральной части Камчатки, которая функционировала до лета 2020 г. В настоящий момент производится обработка этих данных.

В заключение данного раздела следует отметить, что, благодаря установке временных сетей с 2012 г., произошел принципиальный прогресс в степени изученности Камчатки. На сегодня можно определенно сказать, что, несмотря на сложные условия проведения полевых работ, по уровню покрытия сейсмостанциями и по качеству полученных моделей данный регион не уступает любым другим вулканически-активным областям мира. Нужно добавить, что участники описанных выше экспериментальных проектов заинтересованы в том, чтобы полученная уникальная информация была обработана наиболее эффективно максимально возможным количеством методов, поэтому непрерывные сейсмические данные и все снятые времена прихода сейсмических волн по сетям, функционировавшим до 2018 г., могут быть предоставлены всем желающим для работы.

4. КЛЮЧЕВСКАЯ ГРУППА ВУЛКАНОВ

4.1. Общая информация

Ключевская группа представляет собой уникальный комплекс, состоящий из серии вулканов плейстоцен-голоценового возраста с широким диапазоном составов и режимов извержений, расположенных на площади размером около 80 × 40 км (рис. 5). За последние 300—400 тыс. лет на территории группы накоплено около 6200 км³ изверженного материала, из которых более половины было извергнуто в последние 50 тыс. лет [Мелекесцев, 1980]. Три вулкана этой группы: Ключевской, Безымянный и Толбачик относятся к ряду самых активных вулканов в мире [Лаверов и др., 2005]. Ключевской является самым высоким активным вулканом в Евразии (4835 м). Почти идеальная форма конуса этого вулкана, сформировавшегося в течение последних 6 000 лет, может свидетельствовать об относительно спокойном режиме его извержений и об отсутствии катастрофических взрывных извержений в его истории. В настоящее время Ключевской вулкан регулярно производит извержения умеренной силы с излиянием высокомагнезиальных базальтов и андезибазальтов из вершинного кратера и побочных конусов [Хренов и др., 1989, 1991; Ozerov, 2000].

Вулкан Безымянный, расположенный на расстоянии всего около 10 км от Ключевского, имеет принципиально другой состав и природу извержений [Богоявленская и др., 1991]. До середины прошлого века он рассматривался как спящий, однако в 1956 г. внезапно произошло крупное взрывное извержение, в ходе которого была разрушена большая часть постройки вулкана [Gorshkov, 1959; Белоусов, Белоусова, 1998]. С этого времени он с периодичностью в среднем одного раза в год производит короткоживущие извержения, при которых пепел и газы выбрасываются на высоту от нескольких километров до 10 и даже 20 км [Girina, 2013]. В результате такой регулярной активности внутри взрывного кратера в 1956 г. образовался конус, к настоящему времени он почти достиг исходной высоты вулкана, которую он имел до взрыва [Shevchenko et al., 2020]. Вулкан Безымянный в основном имеет андезитовый состав с компонентами дацитов [Богоявленская и др., 1991], однако с момента начала активизации в 1956 г. состав продуктов извержений постепенно становится более основным и приближается по своим свойствам к лавам Ключевского вулкана. На основании этого некоторые авторы предлагают взаимное проникновение магматического материала в системах питания этих двух вулканов [Озеров и др., 1997].

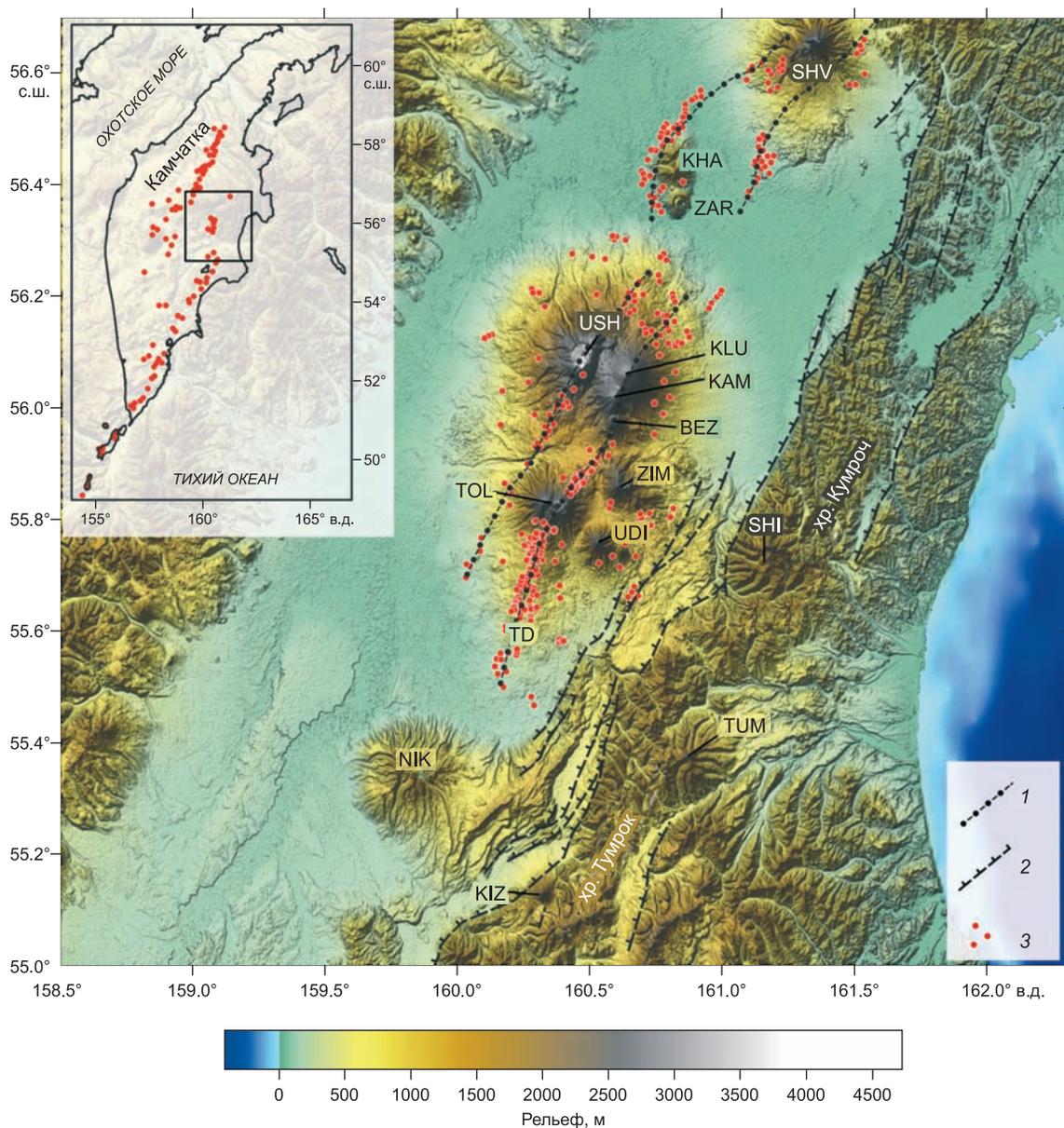


Рис. 5. Северная группа вулканов, включающая Ключевскую группу в центре, Шивелуч на севере и Кизимен на юге, а также множество спящих и потухших стратовулканов и моногенных конусов, обозначенных красными точками.

1 — линейменты в СГВ; 2 — Восточно-Камчатская разломная зона; 3 — моногенные конусы. KIZ — Кизимен, NIK — Николка, TUM — Тумрок, TD — Толбачинский Дол, TOL — толбачинский вулканический комплекс, UDI — Удинские вулканы, SHI — Шиш, ZIM — Зимица, BEZ — Безымянный, KAM — Камень, KLU — Ключевской, USH — Ушковский и Крестовский, ZAR — Заречинский, KHA — Харченко, SHV — Шивелуч. На врезке — красными точками обозначены голоценовые вулканы Камчатки, прямоугольник — изучаемая область.

Толбачинский вулканический комплекс состоит из двух сросшихся стратовулканов (Острый и Плоский Толбачик) и протяженной структуры с большим количеством моногенных конусов и лавовых потоков, называемой Толбачинским Долом. Современные извержения происходят на Плоском Толбачике и Толбачинском Доле и представляют собой серию чрезвычайно продуктивных трещинных излияний маловязкой базальтовой лавы, по стилю приближающихся к гавайским типам извержений. Крупнейшее в историческое время извержение произошло в 1975—1976 гг., когда из серии трещин Северного и Южного прорывов в Толбачинском Долу вылилось около 2.3 км³ базальтовой лавы, покрывшей территорию примерно 50 км² [Федотов, 1984; Федотов и др., 1991]. Недавнее трещинное из-

вержение, произошедшее в 2011—2012 гг., имело общий объем изверженных пород около 1 км³ [Belousov et al., 2015]. Следует отметить, что продукты извержений в районе Плоского Толбачика, Северного и Южного прорывов имеют некоторые геохимические особенности, позволяющие предполагать, что они имеют различные глубинные источники питания [Churikova et al., 2015].

Помимо этих трех активных вулканов, Ключевская группа включает в себя 10 крупных вулканических сооружений, которые представляются спящими или потухшими. Так, к гигантскому массиву на западе от Ключевского вулкана, имеющему объем больший, чем все остальные вулканы Ключевской группы вместе взятые, относятся два сросшихся спящих вулкана — Крестовский и Ушковский [Чурикова, Соколов, 1993]. На восточной половине Ключевской группы расположены две цепочки вулканов, куда входят комплексы Зимины и Удина. Если влк. Зимины никогда за период инструментальных наблюдений ни разу не проявлял никакой активности [Флеров и др., 2019], то влк. Удина неожиданно для специалистов в 2017 г. стал показывать нарастающую сейсмическую активность, которая могла указывать на возможное его просыпание [Koulakov et al., 2019; Кугаенко и др., 2021]. Однако до настоящего времени никакой магматической или газовой активности на этом вулкане не наблюдалось, что не позволяет пока его относить к действующим вулканам.

В связи с вулканами Ключевской группы часто рассматривают два других вулкана, расположенных на некотором отдалении — Шивелуч на севере и Кизимен на юге, а также серию потухших вулканов (Николка, Заречный, Харчинский) (см. рис. 5). Следует отметить, что Шивелуч является самым северным активным вулканом Камчатки и относится к числу наиболее взрывоопасных в мире [Мелекесцев и др., 1991б]. Кизимен принадлежит Восточному вулканическому поясу Камчатки. Севернее этот пояс проходит по хребтам Тумрок и Кумроч, где активных вулканов больше нет; таким образом, Кизимен представляется самым северным действующим вулканом на Восточном вулканическом поясе. Он имеет андезитовый состав и показывает умеренную интенсивность извержений. Последние его извержения происходили в 1928 г. и в 2010—2013 гг. [Auer et al., 2018].

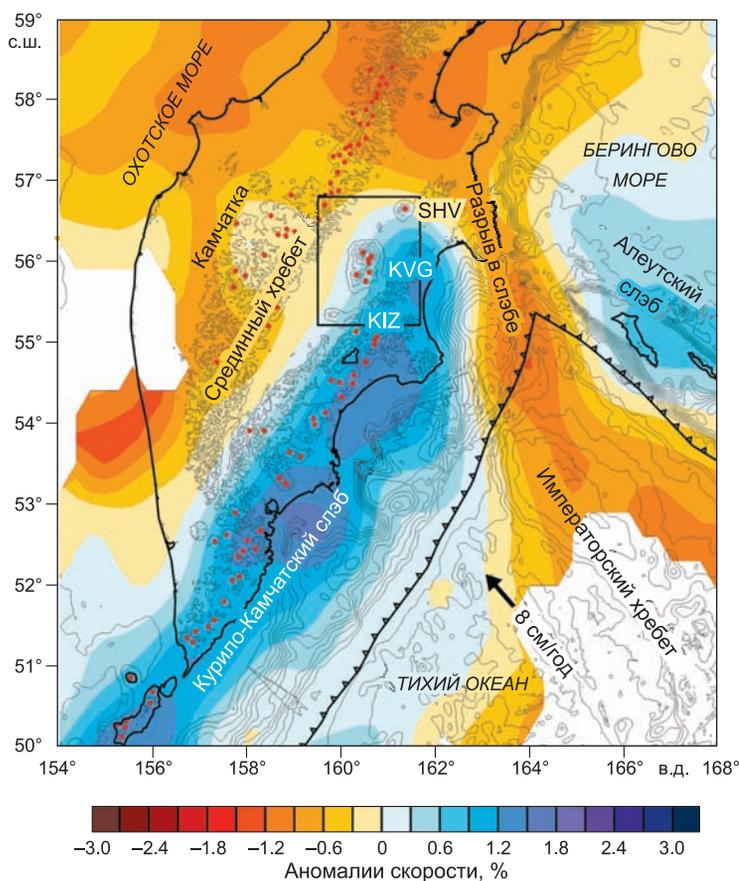
Как уже указывалось ранее, для более полного понимания особенностей вулканической активности региона, необходимы многомасштабные исследования глубинных структур, начиная от определения формы слэба, заканчивая восстановлением деталей строения малоглубинных магматических очагов и геотермальных систем. В этом смысле Ключевская группа вулканов является одной из наиболее полно и системно изученных территорий в мире, что представляется далеко не очевидным в силу низкоразвитой дорожной инфраструктуры и малой населенности этого района. Основную роль в успешном геофизическом изучении этой территории сыграли сотрудники Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН, которые в чрезвычайно сложных природных условиях при очень ограниченном финансировании сумели создать сеть из 25 телеметрических сейсмостанций [Чебров и др., 2013], которые уже в течение десятилетий дают непрерывные записи сейсмического сигнала на территории Северной группы вулканов (СГВ). Помимо этого, определенный вклад внесли ИНГГ СО РАН, ИВиС ДВО РАН и другие организации России, Германии и Франции, которые с 2014 г. провели несколько экспедиций по установке временных сейсмических сетей (см. раздел 3.3), обеспечивших более равномерное покрытие по отношению к постоянной сети КФ ФИЦ ЕГС РАН.

4.2. Форма слэба под СГВ

Форма погружающейся под Камчатку Тихоокеанской плиты имеет ключевую роль в определении особенностей формирования вулканических поясов. Изучение строения зоны субдукции в этом районе проводилось в серии глобальных и региональных томографических исследований, основанных на использовании общемировых баз данных. Модели сейсмических неоднородностей в верхней мантии на основании использования объемных волн, полученные в работах [Gorbatov et al., 2001; Jiang et al., 2009; Кулаков и др., 2011], предоставили в целом согласованную информацию о строении погружающегося слэба под Камчаткой. Так, в работе [Кулаков и др., 2011] выявляются четкие высокоскоростные аномалии под Курило-Камчатской и Алеутской дугами (рис. 6), которые трассируют положение Тихоокеанской плиты и согласуются с распределением глубинной сейсмичности. Согласно этим моделям, к северу от влк. Шивелуч эта аномалия резко обрывается, что интерпретируется как признак наличия разрыва слэба и существования астеносферного окна между Камчатским и Алеутским сегментами субдукции. Аналогичные результаты получены в работах [Levin et al., 2002, 2005] с использованием данных по поверхностным волнам. Наличие мантийного потока, вызванного разрывом в слэбе, подтверждается оценками азимутальной анизотропии в мантийном клине по расщеплению SKS-волны [Park et al., 2002], а также геохимическими свидетельствами плавления литосферы на краю слэба [Yogodzinski et al., 2001]. Образование разрыва в слэбе связывается многими авторами с погружением аномально толстой коры Императорского хребта, который представляет собой цепочку вулканов, протягивающуюся вплоть до Гавайских островов, образованную вследствие воздействия мантийного плюма.

Рис. 6. Аномалии скорости продольных волн, полученные в результате региональной сейсмической томографии [Кулаков и др., 2011] на глубине 150 км,

показывающие положение субдущирующей Тихоокеанской плиты (синяя высокоскоростная аномалия) и наличие разрыва между камчатским и алеутским участками слэба. Линия с насечками показывает положение желоба, где происходит погружение Тихоокеанской плиты, прямоугольник — положение Северной группы вулканов. KVG — Ключевская группа вулканов.



4.3. Структура коры под Ключевской группой вулканов

Данные по постоянным станциям КФ ФИЦ ЕГС РАН, накопленные в течение нескольких десятилетий, использовались различными авторами для изучения строения земной коры в районе вулканов Ключевской группы. Был опубликован ряд томографических моделей [Славина и др., 2001; Lees et al., 2007; Хубуная и др., 2007; Koulakov et al., 2011], которые предоставили распределение сейсмических неоднородностей в коре главным образом в районе Ключевского вулкана, где расположение станций и геометрия лучей наиболее благоприятны для реализации томографической инверсии. Так, в работе [Koulakov et al., 2011] по распределению отношения v_p/v_s были выявлены три уровня накопления магматического вещества: на границе кора—мантия, в средней и верхней коре. В работе [Koulakov et al., 2013] сделана попытка проследить эволюцию этих очагов во времени и связать их изменения с этапами вулканической активизации. Сделан вывод, что глубинный очаг на подошве коры в течение десяти рассмотренных лет оставался практически неизменным. В то же время аномалии в средней и верхней коре претерпевали существенные изменения синхронно с наиболее сильными извержениями вулканов Ключевской и Безымянный. Авторы этой статьи предположили, что такие быстрые вариации сейсмических свойств, скорее всего, связаны с миграцией флюидов в магматической системе и процессами дегазации.

К сожалению, покрытие данными, обеспечиваемое станциями постоянной сети КФ ФИЦ ЕГС РАН, не позволяло получить какие-либо изображения структур под другими вулканами группы. В связи с этим был организован ряд экспедиций по установке временных сетей, описание которых приведено в разделе 3.3 и показано на рис. 4, с помощью которых удалось существенно повысить плотность данных в указанном регионе. Так, на базе данных российско-американского эксперимента PIRE с помощью шести временных сетей удалось уточнить форму глубинных структур между Ключевским и Безымянным вулканами [Ivanov et al., 2016].

Установка в 2014 г. 25 станций в районе толбачинского вулканического комплекса (см. рис. 4) обеспечила существенное повышение качества томографических изображений коры под всей Ключевской группой. Построенная в результате обработки этих данных томографическая модель в работе [Koulakov et al., 2017] позволила определить механизмы питания трех главных активных вулканов группы. Под Ключевским вулканом данная модель подтвердила наличие аномалии с высоким отношением v_p/v_s в низах коры, совпадающей с облаком сейсмичности на глубинах от 27 до 33 км, которая связывается с наличием глубинного магматического резервуара (рис. 7). Наличие сейсмичности между этим резервуаром и поверхностью, довольно плотно сконцентрированной вдоль вертикальной линии, может свидетельствовать о том, что Ключевской вулкан питается непосредственно из мантийного источника по прямой вертикально направленной «трубе», которая пронизывает всю кору. Глубинная сейсмичность показывает, что аномально высокого давления в этом резервуаре на подошве коры достаточно, чтобы доставить базальтовый материал к поверхности. Вместе с тем насколько можно судить из гео-

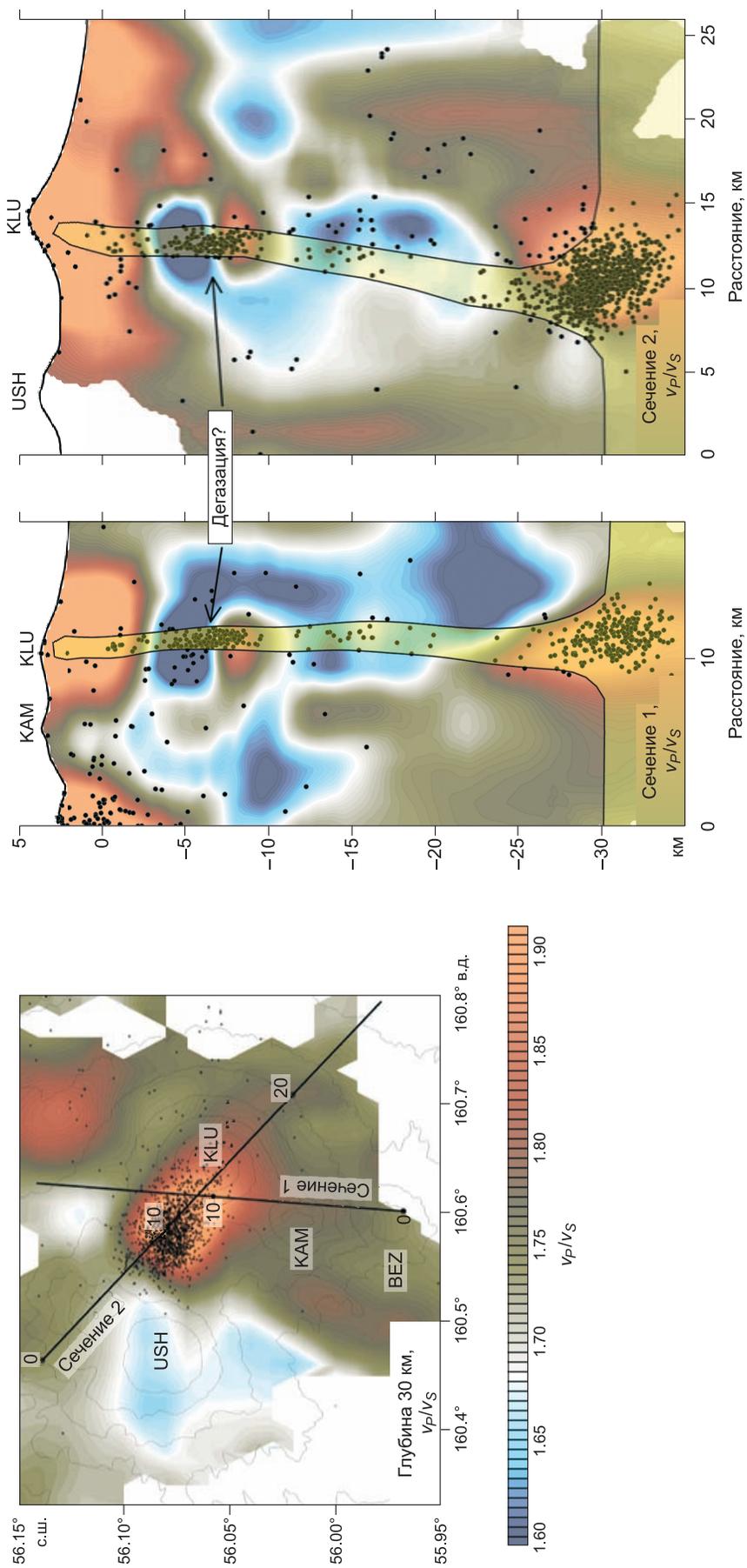


Рис. 7. Распределение отношения v_p/v_s на глубине 30 км в двух вертикальных сечениях из [Koulaikov et al., 2017] и схематическая интерпретация.

Точками показаны землетрясения.

химических характеристик изверженных из Ключевского вулкана пород, поднимающаяся по этой «трубе» магма претерпевает некоторые изменения и приобретает кислые компоненты вследствие контакта породами верхней коры [Ozerov, 2000]. Усиление сейсмичности на глубинах 5—8 км под уровнем моря и переход от высоких к низким значениям v_p/v_s , вероятно, свидетельствует о возможной дегазации магматического материала, которая может служить еще одним движущим механизмом для подъема магмы к поверхности.

Под влк. Безымянный на глубине между 10 и 15 км наблюдается аномалия с пониженными скоростями P - и S -волн (рис. 8, сечение 1). На основании интерпретации сейсмической модели авторами работы [Koulakov et al., 2017] сделано предположение, что эта аномалия связана с долгоживущим среднекоревым резервуаром, в котором происходит постепенное фракционирование магматического материала, вследствие чего там выделяются более легкие и насыщенные летучими андезиты и дациты. В формировании извержений влк. Безымянный могут участвовать как поднимающаяся из этого резервуара магма кислого и среднего состава, так и флюиды, которые являются достаточно эффективным средством переноса тепла в верхнюю кору и способствуют плавлению магмы в малоглубинных резервуарах.

Данные временной сети, установленной в 2014—2015 гг., позволили принципиальным образом улучшить понимание механизмов функционирования толбачинского вулканического комплекса. На горизонтальных сечениях томографической модели (см. рис. 8), полученной в работах [Koulakov et al., 2017; Кулаков и др., 2017], можно видеть, что постройка ныне активного Плоского Толбачика расположена на пересечении двух линейных структур с пониженными скоростями S -волн. На вертикальных сечениях прослеживаются, по крайней мере, две низкоскоростные аномалии: одна под Плоским Толбачиком и другая — под Толбачинским Долом. Обе эти структуры совпадают с распределением землетрясений, которые формируют линейные кластеры, лежащие внутри вытянутых зон с пониженными скоростями. Одна из этих аномалий, обозначенная цифрой «1», направлена в сторону резервуара на подошве коры под Ключевским вулканом, из чего можно предположить, что Толбачик питается из того же глубинного источника, что и Ключевской. С противоположной стороны в районе Северного прорыва в Толбачинском Долу прослеживаются другие аномалии «2» и «3», которые идут из совершенно других направлений и могут быть связанными с независимыми глубинными источниками питания. Это согласуется с геохимическими особенностями продуктов извержений в различных сегментах толбачинского комплекса, выявленными в работе [Churikova et al., 2015], указывающими на возможность существования нескольких отдельных глубинных источников питания этого вулкана. Вместе с тем в работе [Koulakov et al., 2017] указывалось, что существовавших на тот момент данных было недостаточно, чтобы определить более глубокие источники магматической активизации, расположенные в мантийном клине.

4.4. Строение коры и мантии под Северной группой вулканов по данным проекта KISS

Структура мантийного клина представляется важной для понимания процесса дегидратации и плавления слэба и выявления путей миграции расплавов и флюидов в надсубдукционном комплексе. Силами КФ ФИЦ ЕГС РАН собрана достаточно большая база данных о глубинной сейсмичности в зоне Беньоффа под СГВ, которые были использованы в серии томографических исследований для изучения строения мантийного клина [Gorbatov et al., 1997, 1999; Низкоус и др., 2006; Кулаков и др., 2016]. Однако, как было отмечено в работе [Кулаков и др., 2016], чрезвычайно неравномерное и редкое распределение сейсмических станций постоянной сети являлось серьезным препятствием для получения надежных и детальнейших результатов по этому региону.

Принципиальный прорыв в понимании процессов в набсубдукционном комплексе под Северной группой вулканов был достигнут благодаря проведению крупного международного проекта KISS (Klyuchevskoy Investigation—Seismic Structure of an Extraordinary Volcanic System), выполнявшегося научными организациями России, Франции и Германии при поддержке Российского научного фонда (РНФ) [Shapiro et al., 2017b]. Вместе с существующими постоянными станциями КФ ФИЦ ЕГС РАН количество одновременно работающих станций в этом районе в начале эксперимента превышало сотню. Описание этого эксперимента с указанием характеристик станций и сроков их функционирования приведено разделе 3.3 и в статье [Green et al., 2020]. В настоящий момент все данные доступны на сервисе GEOFON [Shapiro et al., 2021] и могут быть использованы любыми желающими для дальнейших исследований.

Для изучения сейсмической структуры района Ключевской группы были вручную обработаны данные по более чем 1100 землетрясениям, значительная часть которых расположена на большой глубине в зоне Беньоффа. По некоторым событиям количество выявленных времен прихода P - и S -волн превосходило сотню, что обеспечивало высокое качество локализации источников. Эти данные были дополнены существующей информацией, полученной в предыдущие годы постоянными станциями КФ ФИЦ ЕГС РАН и временными сетями PIRE и TOLB-2014 (см. рис. 4), и использованы для реализации

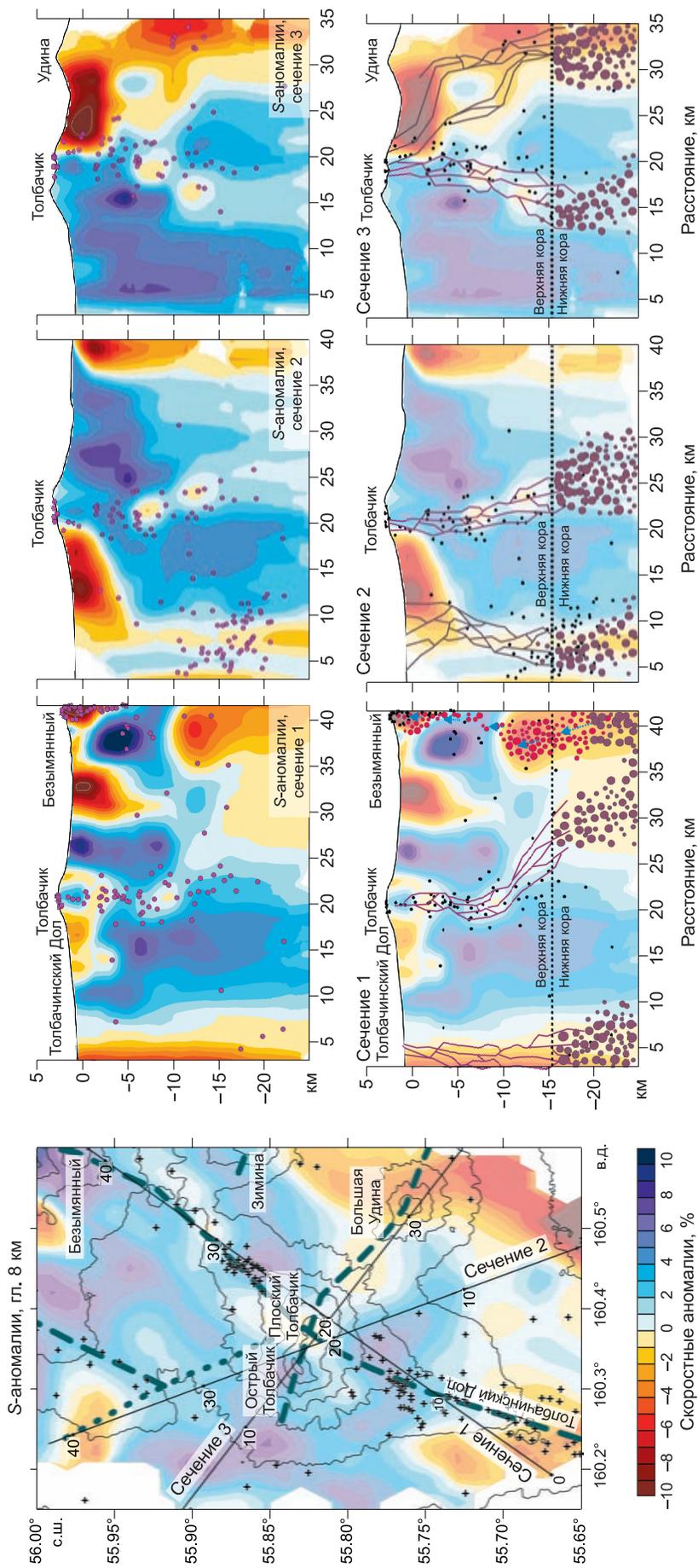


Рис. 8. Распределение аномалий скорости поперечных волн по результатам томографической инверсии в [Koulaikov et al., 2017] и интерпретация.

Слева — сечение модели на глубине 8 км. Кресты — моногенные конусы; зеленые штриховые линии, по [Мелекесцев и др., 1991а; Кулаков и др., 2017]. Справа сверху — аномалии на трех вертикальных сечениях. Красные точки — проекции землетрясений. Справа снизу — интерпретация результатов на вертикальных сечениях. Линии схематически показывают внедрение базальтовых даек. Кружки — схематические изображения диапиров (коричневые — основные и красные — кислые). Синие стрелки на сечении 1 под влк. Безвymянный — миграция флюидов.

томографической инверсии с применением алгоритма пассивной томографии LOTOS [Koulakov, 2009]. Была проведена серия синтетических тестов, которая показала, что полученный объемный набор данных обеспечил высокое разрешение томографической модели, сопоставимое по качеству с результатами в областях с исторически плотными системами наблюдения, например, в Японии.

Для верхней части коры результаты, полученные с помощью данных по объемным волнам (рис. 9, а, б, по [Koulakov et al., 2020]), оказались достаточно хорошо согласованными с моделями, построенными по данным сети KISS с использованием метода шумовой томографии (см. рис. 9, в, по [Green et al., 2020; Егорушкин и др., 2021]). Выявленные в этих исследованиях сейсмические неоднородности на глубинах до 10 км позволили обнаружить реликтовые вулканические постройки, с которых начиналось формирование Ключевской группы вулканов. Так, в районе гигантского комплекса сросшихся вулканов Крестовский и Ушковский наблюдается крупная высокоскоростная аномалия («1»), которая в некоторых частях выходит за пределы современного контура массива. Авторы статьи [Koulakov et al., 2020] предположили, что эта аномалия отражает форму щитового базальтового вулкана, который существовал здесь около 50—60 тыс. л. н. до начала формирования вулканов Ушковский и Крестовский [Флеров, Овсянников, 1991; Флеров и др., 2017]. Аналогичная высокоскоростная аномалия в верхней коре наблюдается в районе Острого и Плоского Толбачика («2»), что также может свидетельствовать о наличии крупного основания пра-Толбачика, существовавшего до начала образования современных построек Толбачинского массива. Третья крупная высокоскоростная аномалия в верхней коре наблюдается в районе влк. Зимина («3»), который, в отличие от двух предыдущих случаев, имеет преимущественно андезитовый и дацитовый состав. Вместе с тем существуют свидетельства, что этот комплекс мог сформироваться на основании другого крупного базальтового вулкана [Флеров и др., 2019], следы которого прослеживаются в томографической модели.

С помощью данных, зарегистрированных сетью KISS, в работе [Koulakov et al., 2020] была получена принципиально новая информация о строении мантийного клина под всей Северной группой вулканов, включающей Шивелуч на севере, Ключевскую группу в центре и Кизимен на юге. Прежде всего, на профиле от Шивелуча до Кизимена (рис. 10, сечение 4) наблюдается яркая аномалия со схожей конфигурацией в моделях для P - и S -волн, которая имеет вертикальную направленность под Шивелучем и затем распространяется горизонтально непосредственно под подошвой коры на юг в сторону Ключевской группы. Этот результат согласуется с региональной моделью мантии региона в работе [Кулаков и др., 2011], которая обнаружила наличие разрыва Тихоокеанской плиты между Курило-Камчатским и Алеутским сегментами субдукции (см. рис. 6). В этой модели астеносферное «окно» в слэбе начинается именно под Шивелучем. На основании полученной по данным KISS модели в работе [Koulakov et al., 2020a] можно предположить, что к этому «окну» приурочен восходящий поток горячего астеносферного материала, который при достижении нижней границы коры распространяется в юго-западном направлении. Представляется вероятным, что именно наличие этого потока определяет аномально высокую продуктивность вулканов Ключевской группы.

Результаты томографии с использованием данных KISS позволили также определить пути формирования глубинного резервуара под Ключевским вулканом, которые наиболее отчетливо прослеживаются на распределении отношения v_p/v_s (рис. 11). Этот параметр, который имеет повышенные значения при наличии жидкой фазы, показывает траектории миграции флюидов и расплавов в мантийном клине [Takei, 2002]. На вертикальном сечении, проходящем вкост субдукции через Ключевской вулкан (см. рис. 11, сечение 1), высокие значения v_p/v_s показывают достаточно широкую область дегидратации слэба на глубинах от 100 до 150 км. Можно выделить три струи, которые выходят из слэба и объединяются примерно на глубине 90 км в единый поток, поднимающийся к глубинному очагу Ключевского вулкана. На другом сечении, проходящем через Толбачик (см. рис. 11, сечение 2), можно наблюдать аналогичную картину дегидратации слэба, производящей три отдельные «струи», однако, в отличие от сечения под Ключевским вулканом, эти струи не объединяются. Возможно, это является причиной того, что в данном случае разрозненные потоки флюидов не формируют устойчивые зоны плавления и не приводят к образованию крупных магматических очагов, которые можно было бы проследить в томографической модели. На перпендикулярном сечении, проходящем через цепочку вулканов Ключевской, Безымянный и Толбачик (см. рис. 11, сечение 3), можно видеть, что глубинная аномалия под Ключевским распространяется в горизонтальном направлении, что может указывать на растекание магматического материала вдоль подошвы коры. Предполагается, что именно это в первую очередь обеспечивает подпитку глубинных магматических очагов под Толбачиком.

В настоящее время обработка данных сети KISS продолжается. Так, партнеры из Германии работают над построением детальной модели глубинных границ под Ключевской группой вулканов методом приемных функций (receiver functions). Другая группа из GFZ-Potsdam исследует возможность выявления временных вариаций сейсмических параметров в районе Ключевского вулкана в ходе его извержения в 2016 г. с использованием методов корреляции шума.

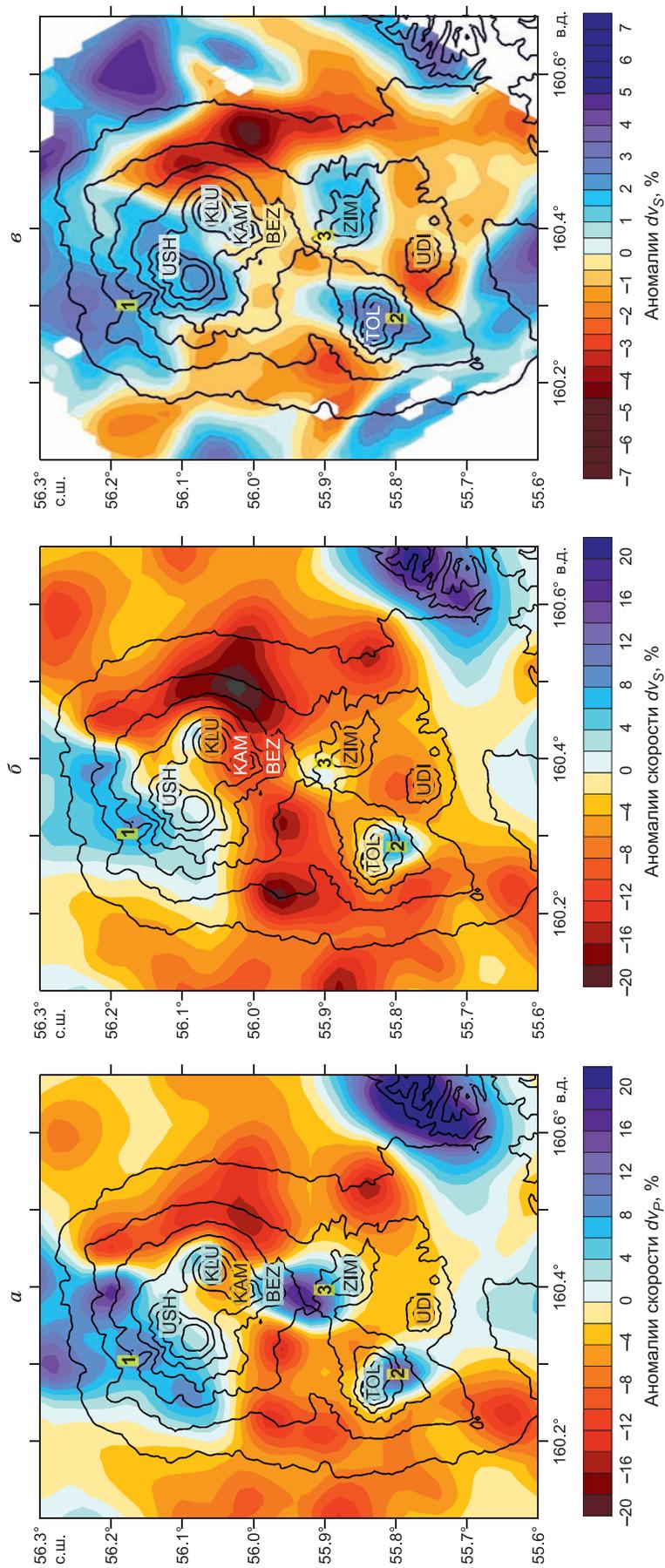


Рис. 9. Малоглубинные аномалии сейсмических скоростей,

полученные независимо в результате инверсии данных по объемным волнам (*a, б*, по [Kouřakov et al., 2020b] и шумовой томографии (*e*, по [Егорушкин и др., 2021]). Цифрами указаны структуры, обсуждаемые в тексте.

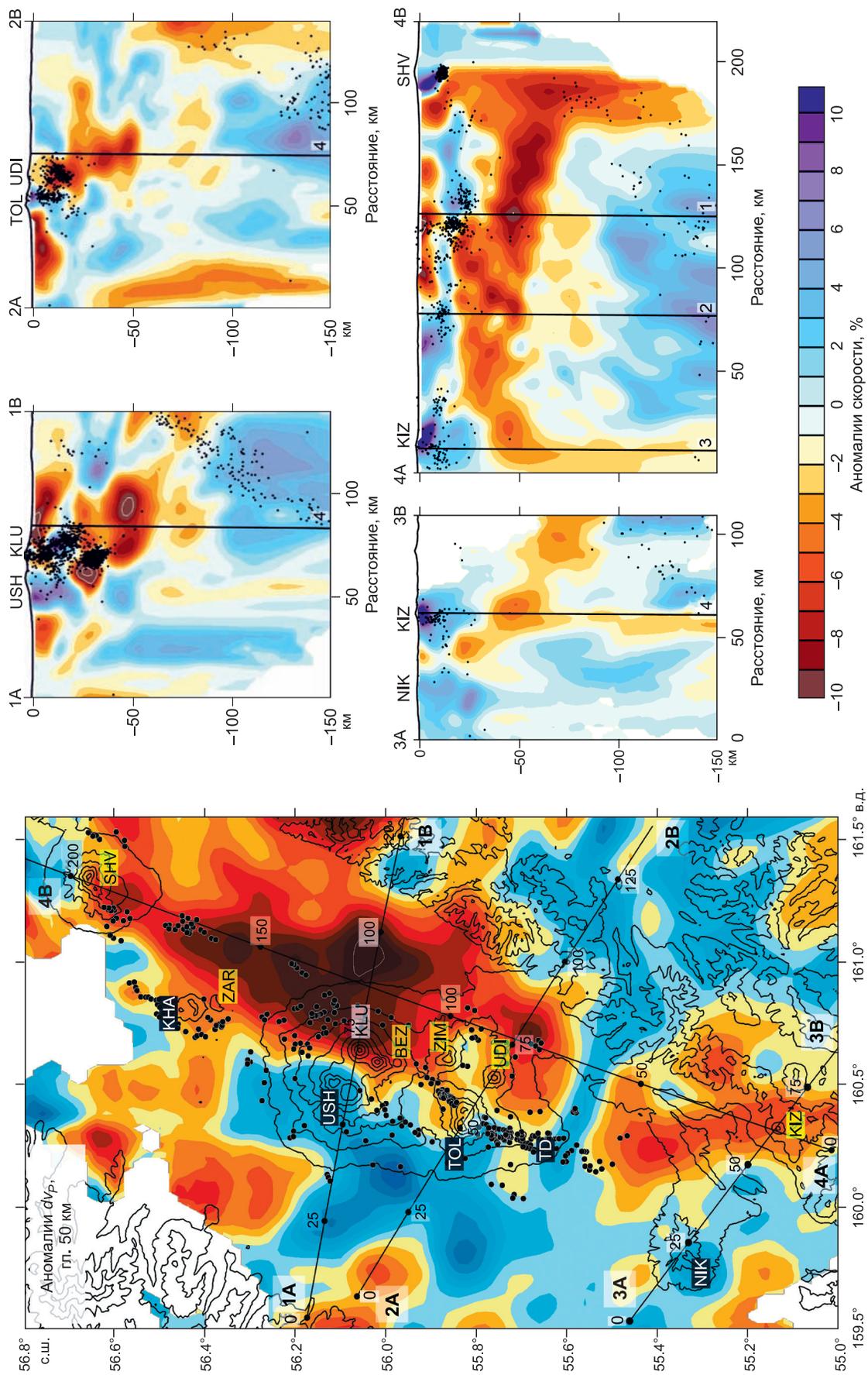


Рис. 10. Аномалии скоростей P -волн по результатам проекта KISS [Koulikov et al., 2020] на глубине 50 км и четырех вертикальных сечениях.
 На карте точки показывают положение моногенных конусов. На сечениях точки — проекции землетрясений. Желтым отмечены вулканы с преимущественно кислым составом, черным — основного состава (кроме Ключевского). Черные вертикальные линии на сечениях отмечают пересечения с другими сечениями с соответствующими номерами.

4.5. Локальные структуры под влк. Безымянный

В предыдущих разделах рассматривались работы по изучению структур в мантийном клине и коре в крупном и среднем пространственных масштабах. Вместе с тем не меньший интерес исследователей вызывают локальные структуры в верхней коре, где находятся малоглубинные магматические источники, которые являются ответственными за подготовку и ход извержения. При исследованиях методами пассивной сейсмологии основными условиями успешной реализации таких работ является наличие локальной сейсмичности и функционирование достаточно плотной сейсмической сети в течение

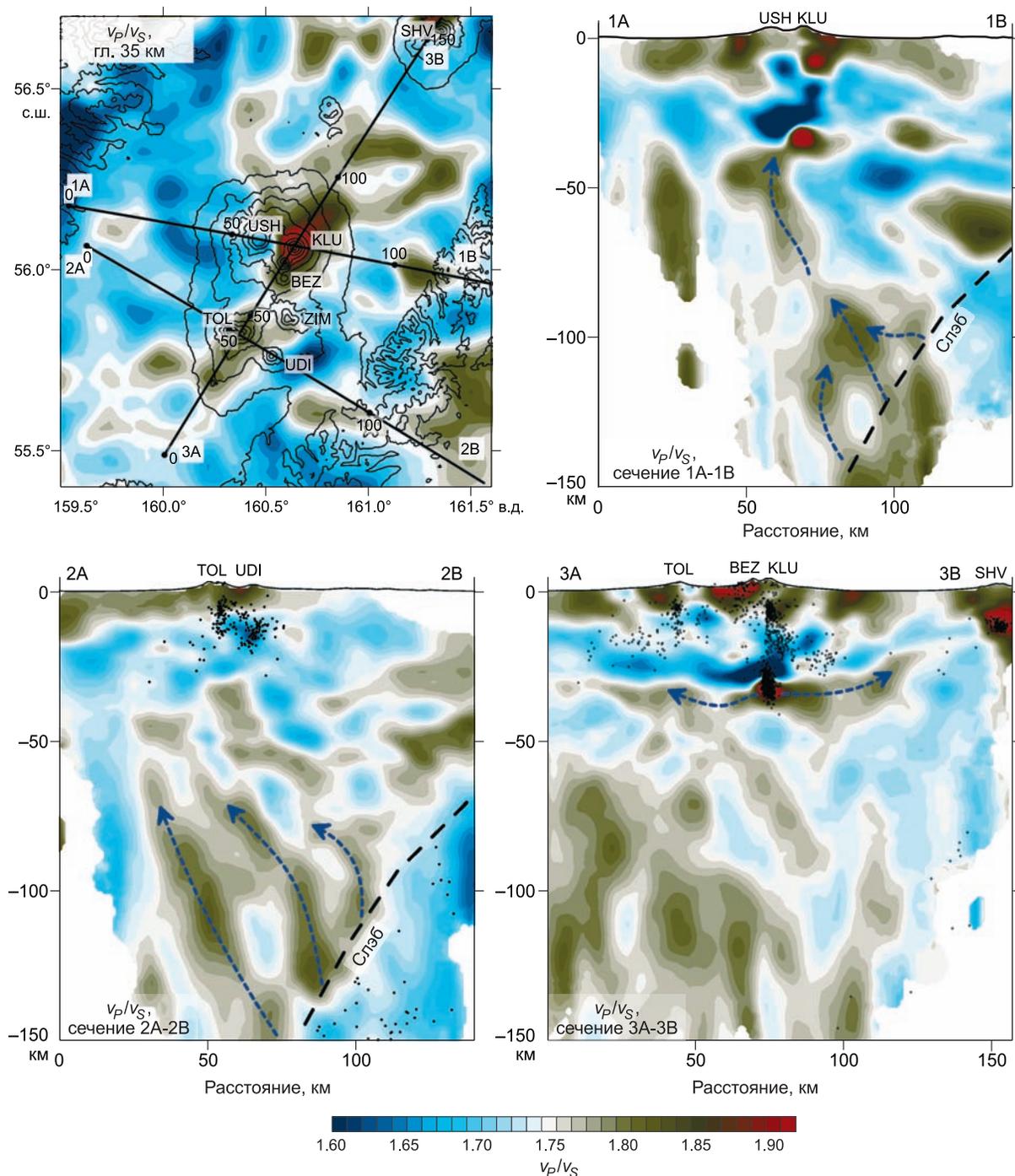


Рис. 11. Распределение отношения v_p/v_s из работы [Koulikov et al., 2020b] на глубине 35 км и трех вертикальных сечениях.

Точки на профилях показывают проекции гипоцентров землетрясений. Стрелки указывают на возможные пути миграции глубинных флюидов в мантийном клине.

длительного времени. На территории Ключевской группы проводились несколько экспериментов локального масштаба, направленных на изучение отдельных вулканов группы. Первая попытка установить сейсмическую сеть на влк. Безымянный была реализована в 2009 г. в рамках российско-американского эксперимента PIRE [Thelen et al., 2010]. К сожалению, фактически никакой активности вулкана за два месяца работы сети не наблюдалось. Зарегистрированные данные после томографической инверсии позволили лишь уточнить картину сейсмических неоднородностей между Ключевским и Безымянным вулканами [Ivanov et al., 2016], но не предоставили возможность восстановить структуру непосредственно в постройке влк. Безымянный.

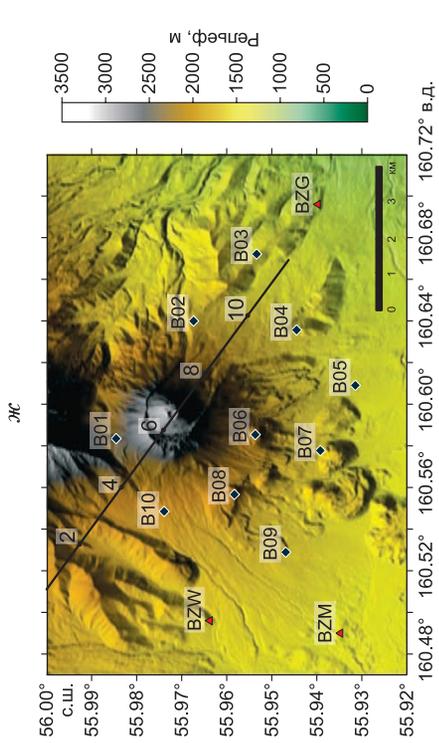
Следующая попытка установить локальную сеть на влк. Безымянный была предпринята в 2017 г., в результате чего на срок один год была установлена сеть из десяти сейсмостанций (рис. 12, ж). В этот раз во время работы сети 20 декабря 2017 г. произошло мощное взрывное извержение, в процессе которого был выброшен в атмосферу значительный объем материала. Всего за 15 мин с начала извержения газово-пепловое облако достигло высоты 15 км, после чего интенсивность выбросов быстро сошла на нет. Функционировавшие в этот момент сейсмические станции, несколько из которых были расположены всего в нескольких километрах от эпицентра взрыва, смогли зарегистрировать детали процесса подготовки и реализации извержения [Koulakov et al., 2021].

Следует отметить, что влк. Безымянный в промежутках между извержениями имеет достаточно низкий фоновый уровень сейсмичности: в среднем 5—10 событий в месяц [Сенюков, 2013]. По этой причине всплески сейсмической активности в период подготовки извержений достаточно отчетливо прослеживаются на сейсмических записях. После нескольких месяцев относительного спокойствия, 3—5 ноября (45—47 дней до извержения) наблюдалась первая сейсмическая активизация, в ходе которой были зарегистрированы несколько десятков достаточно сильных событий на глубинах около 8 км относительно дневной поверхности. Затем наступила пауза до 13 декабря, после чего сейсмичность появилась вновь, но уже на малых глубинах, и стала нарастать экспоненциальным образом до момента взрыва. За два последних перед извержением дня было зарегистрировано 316 значительных по магнитуде событий. Практически вся сейсмичность на последнем этапе подготовки извержения происходила на глубинах до 2 км ниже уровня моря или 4—5 км от поверхности вулкана. Общее количество событий, зарегистрированных в двух эпизодах активизации, составило 523, что оказалось достаточным для построения томографической модели вулкана, отражающей его состояние непосредственно перед извержением.

Рисунок 12 показывает распределения аномалий скоростей v_p и v_s , а также отношение v_p/v_s на одном горизонтальном (см. рис. 12, а—в) и одном вертикальном сечениях (см. рис. 12, г—е) из работы [Koulakov et al., 2021]. Можно видеть, что аномалии v_p и v_s антикоррелируют друг с другом, что дает достаточно сильные вариации v_p/v_s . В районе вершины вулкана наблюдаются повышенные v_p , пониженные v_s и очень высокий уровень v_p/v_s . Такие соотношения наблюдаются во многих постройках активных вулканов [Vargas et al., 2017; Kuznetsov et al., 2017] и объясняются наличием изверженных пород (высокие v_p) с высокой пористостью и насыщением метеорными водами (низкие v_s).

На уровне моря или на глубине 2—3 км под дневной поверхностью наблюдаются два тела, расположенные рядом, которые имеют противоположные знаки аномалий. Тело, обозначенное цифрой (2), имеет высокую v_p , низкую v_s и очень высокое значение v_p/v_s , что является типичными атрибутами активного магматического очага с магмой более примитивного состава и высоким содержанием расплавов и флюидов [Takei, 2002; Vargas et al., 2017]. Предполагается, что именно этот очаг является ответственным за эпизодические магматические извержения влк. Безымянный, которые приводят к постепенному росту конуса. Рядом наблюдается аномалия (3) с противоположными значениями аномалий скоростей. Низкая v_p , высокая v_s и очень низкое значение v_p/v_s является признаком пористой среды, насыщенной газом [Takei, 2002; Husen et al., 2004]. Можно предположить, что именно здесь накапливался большой объем газа, который вырвался в атмосферу при извержении 20 декабря 2017 г.

На основании данных по выявленным землетрясениям и построенной томографической модели в работе [Koulakov et al., 2021] был предложен сценарий подготовки и реализации извержения 20 декабря 2017 г. (см. рис. 12, з). Предполагается, что до начала ноября происходило накопление флюидов в промежуточном магматическом очаге в средней коре, кровля которого расположена на глубине 8—10 км от дневной поверхности. Наличие этого очага подтверждается более крупномасштабной томографической моделью, приведенной в работе [Koulakov et al., 2017] и показанной выше на сечении 1 на рис. 8. Отсутствие сейсмичности на этом уровне свидетельствует, что магма там находится в вязкопластичном состоянии. В среде такого рода миграция флюидов происходит достаточно медленно, и при постоянном их поступлении может быть достигнута высокая концентрация растворенных летучих. При достижении некоторого критического уровня содержания и температуры флюидов часть их начинает выходить из резервуара в хрупкую верхнюю кору [Fournier, 1999; Koulakov et al., 2018]. По-видимому, именно этот этап наблюдался в начале ноября, когда была зарегистрирована первая серия землетрясений на глубине



160.48° 160.52° 160.56° 160.60° 160.64° 160.68° 160.72° в.д.

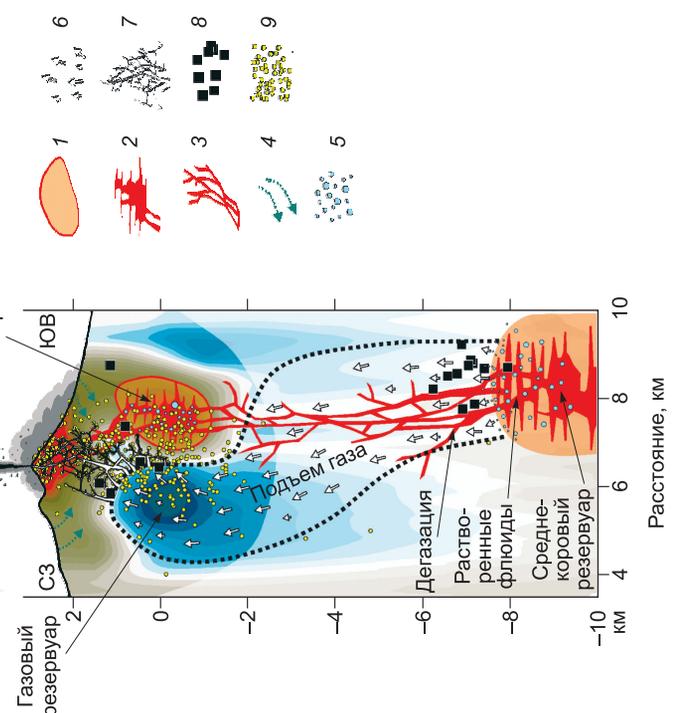
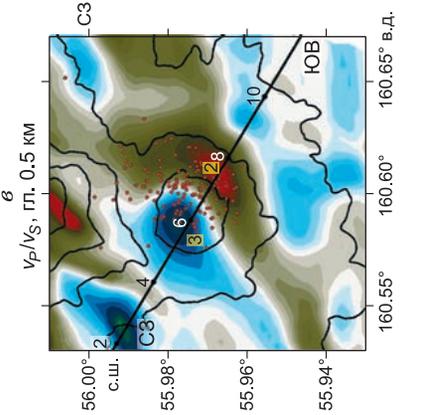
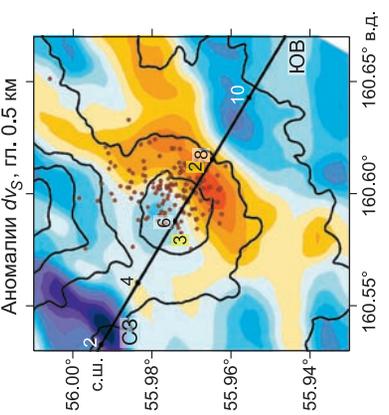
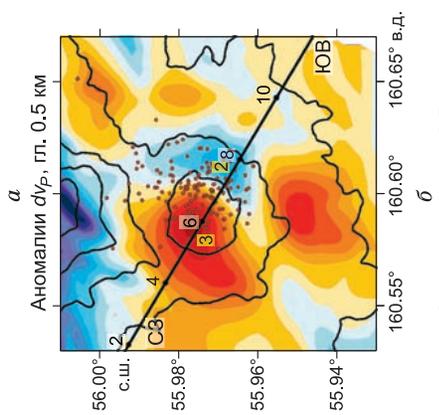
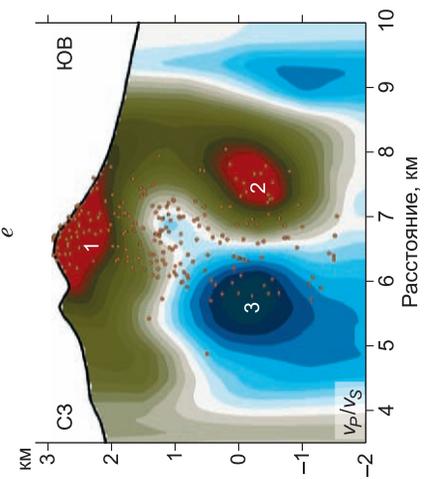
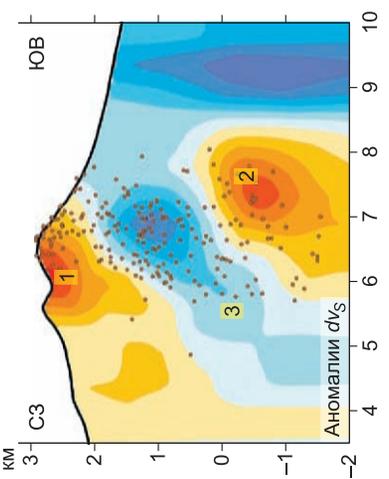
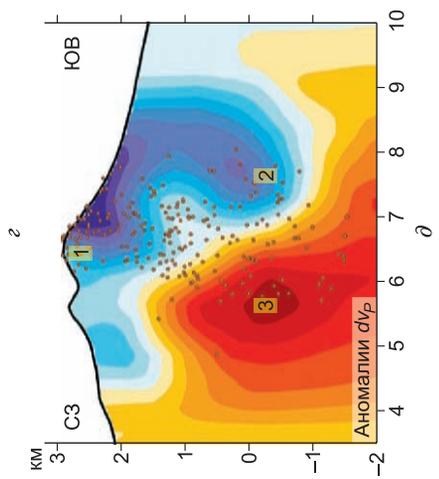


Рис. 12. Результаты томографического эксперимента по влк. Безымянный из работы [Koulakov et al., 2021].

Аномалии v_p , v_s и отношение v_p/v_s показаны на глубине 0.5 км ниже уровня моря ($a—e$) и вертикальном сечении (э—е). Красные точки — проекции гипоцентров землетрясений. Номера отмечают аномалии, обсуждаемые в тексте. Ж — сейсмическая сеть, включающая временные станции (синие ромбы) и постоянные (красные треугольники). 3 — схематическое изображение сценария подготовки взрывного извержения 20 декабря 2017 г. 1 — магматическое тело с низким уровнем плавления; 2 — магматическое тело с высоким уровнем плавления; 3 — магматические каналы; 4 — метеоритные флюиды; 5 — флюиды, растворенные в магме; 6 — разрывы, растворенные в магме; 7 — разрывы, разломы; 8 — события ранее 7 дней до извержения; 9 — события за менее чем 7 дней до извержения.

8 км. После этого в течение 40 дней флюиды в газовом состоянии мигрируют вверх и аккумулируются на глубинах 2—4 км под постройкой вулкана. При достижении критического давления газа, начинается разрушение вышележащих слоев. В результате образуется серия трещин, формирующих магистральный канал, по которому газ лавинообразно вырывается на поверхность, вынося с собой большое количество ювенильного вещества, что подтверждается петрологическими данными, также приведенными в работе [Koulakov et al., 2021]. Следует отметить, что этот сценарий подготовки и реализации извержения, выявленный благодаря удачному размещению сети, может оказаться актуальным для описания активности множества других вулканов аналогичного типа в мире, что важно для создания надежной системы предсказания катастрофических событий.

4.6. Вулкан Удина

Удинский вулканический комплекс, расположенный в юго-восточной части Ключевской группы, состоит из двух стратовулканов — Малой и Большой Удины — находящихся друг от друга на расстоянии 5 км. Структурно они приурочены к тому же самому линейному элементу, который проходит через вершины Плоского и Острога Толбачика. До недавнего времени оба эти вулкана рассматривались как потухшие и изучались довольно мало в силу их трудной доступности. Геологическая информация, содержащаяся в работах [Тимербаева, 1967; Максимов, 1976], указывает на андезитовый и андезит-базальтовый состав Удинских вулканов, однако никаких следов извержений в недавнем геологическом прошлом описано не было.

Сейсмичность в этом районе регистрировалась в последние десятилетия в районе Толудского поля на юге от Удинских вулканов и на востоке от Толбачинского Дола [Кугаенко и др., 2017]. Предполагается, что эти землетрясения указывают на глубинный магматический источник, питающий толбачинские извержения. Под Удинскими вулканами за время работы сети с 1961 г. до конца 2017 г. практически никакой сейсмичности не обнаружено [Кугаенко и др., 2018]. Рост сейсмической активности под Большой Удиной начался в октябре 2017 г. За период до начала 2019 г. зарегистрировано более 2500 событий с магнитудами, достигающими $M_L = 4.3$ [Кугаенко и др., 2018, 2021]. К сожалению, расположение постоянных станций КФ ФИЦ ЕГС РАН не позволяло точно определять координаты этих событий и, тем более, глубину. По этой причине 5 мая 2018 г. со второй попытки (из-за экстремальных климатических условий) были установлены четыре станции, которые успешно работали до 13 июля 2018 г. За это время обнаружены и обработаны 559 локальных сейсмических событий в районе влк. Большая Удина, для большинства из которых были отпикированы времена прихода P - и S -волн [Koulakov et al., 2019].

Исследование по этому вулкану в работе [Koulakov et al., 2019] носило важный методологический характер. Впервые была сделана попытка выполнить томографическую инверсию по данным с четырех станций, что обычно недостаточно для получения какого-либо значимого результата. В данном исследовании проделана большая работа по построению ряда синтетических моделей на основе имеющихся данных с целью оценить возможность получения информации о распределении сейсмических скоростей под вулканом. Оказалось, что имеющаяся система наблюдений позволяет восстанавливать общие контуры простых аномалий, таких как показаны на рис. 13, г. При этом точность определения гипоцентров землетрясений в ходе томографической процедуры существенно повышается по сравнению с локализацией в одномерной модели.

В результате инверсии под влк. Большая Удина была выявлена аномалия с повышенной v_p , пониженной v_s и высоким отношением v_p/v_s , что является достаточно типичным атрибутом активной магматической системы (см. рис. 13, а—в). Обнаруженная локальная сейсмичность формирует кластер под Удиной, который вытягивается в юго-западном направлении в сторону Толудского поля, где землетрясений в этот период зарегистрировано не было. По результатам этого исследования сделано предположение, что магматические источники под Толудским полем, которые обычно принимали участие в питании толбачинских извержений, в данном случае мигрировали в сторону Большой Удины и активизировали магматический очаг под ней на глубинах более 5 км.

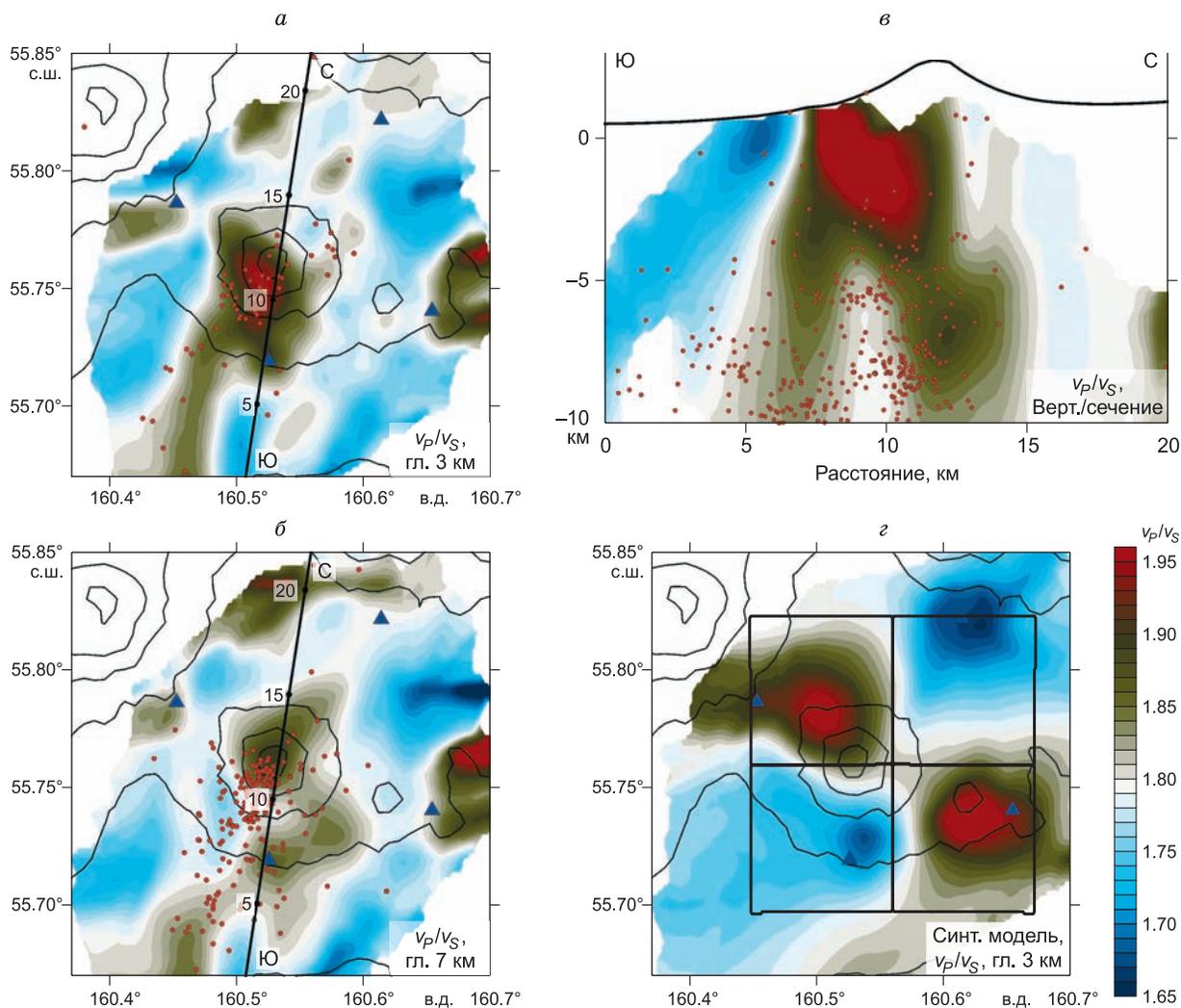


Рис. 13. Результаты томографического исследования влк. Большая Удина из работы [Koulakov et al., 2019].

Отношение v_p/v_s и проекции гипоцентров землетрясений (красные точки) представлены на глубинах 3 и 7 км (а, б) и вертикальном сечении (е). Рисунок з представляет результат восстановления отношения v_p/v_s в синтетической модели. Черные линии показывают конфигурацию исходной модели, состоящей из четырех аномалий с чередующимися знаками. Синие треугольники — сейсмические станции.

Такого рода сейсмическая активизация эпизодически происходит под отдельными спящими вулканами мира. Например, в 1983 г. произошел резкий всплеск сейсмичности под спящим камчатским влк. Асача [Токарев, 1984; Федотов и др., 1989], который привел к эвакуации рабочих из близлежащего прииска, однако не завершился ничем. Другим примером такого рода активизации может служить сейсмический рой под базальтовым полем Лунайир в Саудовской Аравии, который продолжался около трех месяцев и где магнитуды доходили до 4.6, однако также постепенно сошел на нет без каких-либо признаков магматического извержения [Pallister et al., 2010; Koulakov et al., 2015]. По всей видимости, аналогичный сценарий повторился и в случае Большой Удины. Тем не менее наличие сейсмических атрибутов, характерных для активного магматического очага, дают основание рассматривать Большую Удину как потенциально активный вулкан.

Данный обзор показал, что несмотря на сложные природные и логистические условия для проведения полевых геофизических экспериментов, конфигурация магматической системы под Ключевской группой вулканов изучена достаточно хорошо на всех масштабных уровнях, начиная от геометрии субдуцирующей океанической литосферы вплоть до малоглубинных локальных магматических тел, непосредственно ответственных за извержения. В этом смысле Ключевская группа является удачным примером системного геофизического исследования, которое было бы невозможно без плотной кооперации российских и зарубежных организаций.

5. АВАЧА — ПРИМЕР КОМПЛЕКСНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ ВУЛКАНА

5.1. Общая информация об Авачинской группе вулканов

Авачинская группа вулканов расположена в непосредственной близости к главному городу Камчатки — Петропавловску-Камчатскому с населением более 200 тыс. человек и является главным туристическим объектом для местных жителей и приезжих. Группа включает в себя два действующих вулкана Авачинский и Корякский и несколько потухших (Козельский, Ааг и Арик). В историческое время зарегистрировано 15 извержений Авачинского вулкана, которые в большинстве случаев сопровождались умеренными по объемам лавовыми потоками, выбросами пепла и лахарями [Мелекесцев и др., 1994]. Последние магматические извержения этого вулкана произошли в 1945 и 1991 гг. Наличие следов крупных взрывных извержений на Авачинском вулкане [Braitseva et al., 1995; Брайцева и др., 1998] указывает на значительную потенциальную опасность для прилегающих населенных территорий, расположенных от него на расстоянии менее 30 км. Следует отметить, что сам город Петропавловск-Камчатский построен на пирокластических потоках, выброшенных кальдерообразующим извержением Авачинского вулкана около 30 тыс. л. н.

Второй действующий вулкан группы, Корякский, хотя за исторический период наблюдений не производил магматических извержений, эпизодически отмечается существенным газовыделением и сейсмичностью [Мелекесцев и др., 2011; Гордеев и др., 2011]. Несмотря на то, что он обладает практически идеальной формой и значит не имеет следов взрывных извержений в прошлом, полностью исключить катастрофические сценарии для этого вулкана нельзя.

Близость к городу и потенциальная опасность для населения определяет большой интерес к Авачинской группе со стороны множества исследователей из различных разделов наук о Земле. Например, в библиотеке ИВиС ДВО РАН зарегистрировано более двухсот научных публикаций, посвященных Авачинскому и Корякскому вулканам. В частности, данные гравитационного поля, измеряемые с 60-х годов прошлого века, были использованы для построения плотностных моделей района Авачинской группы [Зубин, Козырев, 1988]. Для построения геоэлектрической модели коры в этой области проводились площадные магнитотеллурические зондирования [Мороз, Нурмухамедов, 1998]. Эта группа является одним из немногих мест на Камчатке, где для изучения глубинного строения были применены несколько сейсмических методик различного типа, результаты представлены в следующих разделах.

5.2. Активные сейсмические исследования

В 80-х годах прошлого века по профилю длиной около 40 км, проходящему через вершину Авачинского вулкана, были проведены работы по глубинному сейсмическому зондированию с использованием 11 взрывов. Результатом обработки, полученных в эксперименте данных классическим методом лучевого трассирования, явилась модель глубинного строения вулкана, построенная С.Т. Балестой с соавторами [1988] (рис. 14, *а*). Дальнейшие уточнения этой модели в работах [Гонтовая и др., 1990, 1998; Гонтовая, Сеньюков, 2000] не привели к принципиальным изменениям выявленных структур. Переобработка этих данных методом двумерной активной сейсмической томографии на базе алгоритма PROFIT [Koulakov et al., 2010] была произведена в работе [Koulakov et al., 2014]. Полученная модель, показанная на рис. 14, *б*, в целом достаточно хорошо согласуется с результатами более ранних исследований, выполненных методами лучевого моделирования. Так, изолиния скорости 4 км/с в томографической модели совпадает с положением границы с соответствующей граничной скоростью в модели, представленной в [Балеста и др., 1988]. Если под северо-восточным склоном вулкана эта граница расположена на глубине около 1 км, то под северо-западным склоном она погружается примерно до 3 км. Авторы работы [Koulakov et al., 2014] предложили, что такая асимметричная структура связана с наличием крупной кальдеры, образовавшейся в результате мощного взрыва вулкана около 30 тыс. л. н. и впоследствии заполненной рыхлым вулканокластическим материалом. Этот пример наглядно демонстрирует, что эти альтернативные подходы обработки данных активной сейсмике, лучевое моделирование и томография в целом обеспечивают непротиворечивую и взаимодополняющую информацию, что говорит о важности их комплексирования.

5.3. Шумовая томография

В 2012 г. сотрудниками ИНГТ СО РАН на Авачинской группе вулканов была установлена временная сейсмическая сеть, состоящая из десяти широкополосных сейсмометров, которые дополнили сеть КФ ФИЦ ЕГС РАН, состоящую из семи перманентных сейсмостанций. К сожалению, время работы большей части станций временной сети не превышало двух месяцев, и они не сумели зарегистрировать достаточное количество локальных землетрясений для реализации томографии с использованием объемных волн. В этом случае достаточно эффективным показал себя алгоритм шумовой томографии.

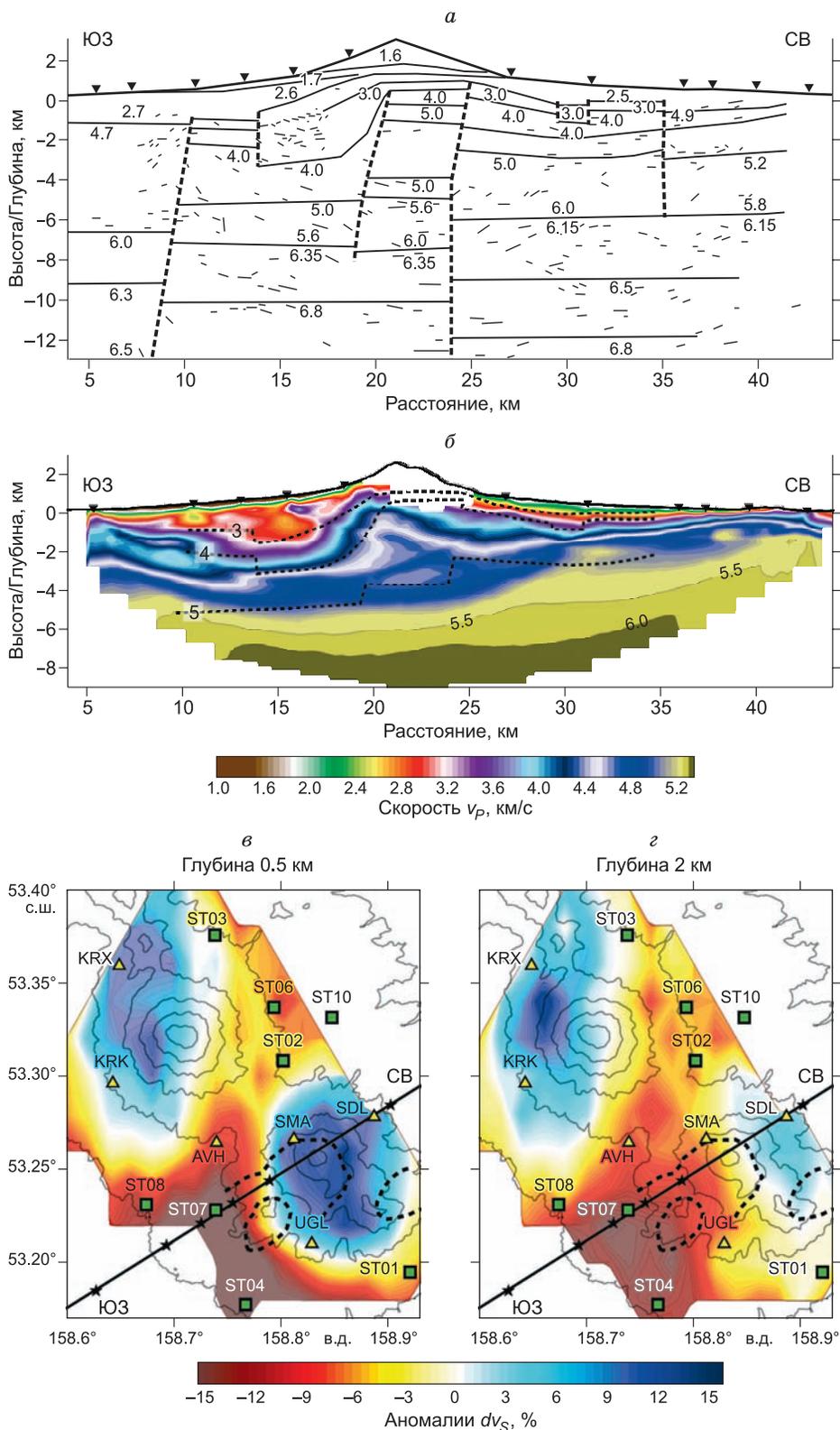


Рис. 14. Результаты исследования верхней коры в районе Авачинской группы вулканов методами активной сейсмологии и шумовой томографии.

a — результат обработки данных глубинного сейсмического зондирования из работы [Балеста и др., 1988] с модификацией автора по профилю, указанному на картах *v* и *z*. *b* — результат томографической инверсии данных по преломленным волнам [Koullakov et al., 2014]. Пунктирные линии — основные горизонты, см. *a*, *v*, *z* — аномалии скорости поперечных волн, полученные из шумовой томографии [Koullakov et al., 2014] на глубинах 0.5 и 2 км. Пунктирные линии показывают основные геологические структуры. Желтые треугольники — постоянные станции; зеленые квадраты — временные.

Путем корреляции сейсмических записей по парам станций удалось выявить поверхностные волны Рэлея и рассчитать для них дисперсионные кривые, на основании которых были построены двумерные карты групповых скоростей на отдельных периодах, а затем — трехмерные распределения скорости поперечных волн в верхней коре.

Результат шумовой томографии (см. рис. 14, *в, г*), опубликованный в работе [Koulakov et al., 2014], в основном согласуется с моделями, построенными с использованием данных по активной сейсмике. На малых глубинах, непосредственно у поверхности сейсмическая структура определяется наличием крупных построек Авачинского и Корякского вулканов, состоящих преимущественно из прочных консолидированных пород. По сравнению с рыхлыми вулканокластическими отложениями на окружающих территориях вулканы проявляются как тела с высокими сейсмическими скоростями, что является общей закономерностью для большинства изученных в мире вулканов. На глубине около 2 км от поверхности структура аномалий меняется кардинальным образом: под юго-западным склоном Авачинского вулкана появляется крупная низкоскоростная аномалия. Эта структура согласуется с результатом обработки активной сейсмике, хотя и существенно проигрывает ей в детальности. С другой стороны, шумовая томография обеспечила трехмерное распределение сейсмических скоростей, что дало важную новую информацию о строении Авачинской группы. В частности, было доказано, что упомянутая низкоскоростная аномалия относится только к Авачинскому вулкану и может быть связана с наличием там скрытой кальдеры, а не со смещением по региональному разлому, как предполагалось ранее [Гонтовая, Сениуков, 2000].

5.4. Локальная томография с использованием данных по местным землетрясениям

Следует отметить, что ни активная сейсмике, ни шумовая томография не позволяют изучать детальные структуры на глубинах более 3 км под поверхностью. Поскольку магматические резервуары под Авачинским и Корякским вулканами предполагаются на большей глубине, данные два типа томографических работ не смогли дать никакой информации о геометрии и свойствах системы питания вулканов Авачинской группы. Несколько большую глубинность способен обеспечить алгоритм с использованием данных по объемным волнам от локальных землетрясений. Однако, как было указано ранее, временная сеть 2012 г. не зарегистрировала достаточного количества событий, что не позволяет применять ее для такого рода исследований. Поэтому для решения этой задачи приходится использовать данные семи постоянных станций. Следует отметить, что до недавнего времени в среде специалистов в пассивной томографии существовало негласное соглашение, что пассивную томографию возможно делать только на базе сетей, состоящих из не менее чем десяти станций. Поэтому попытка использовать меньшее количество приемников для изучения строения под Авачинской группой в работе [Bushenkova et al., 2019] имеет важное методологическое значение. Авторами этого исследования было выполнено тщательное синтетическое тестирование, которое показало достаточно высокую разрешающую способность моделей, полученных по имеющимся данным. Последствием этого вывода может стать пересмотр стратегии обработки данных по множеству локальных сетей мира, для которых возможность реализации томографической инверсии отклонялась в силу недостаточного количества станций.

Результат пассивной томографии по локальным землетрясениям из работы [Bushenkova et al., 2019] позволил определить конфигурацию магматических очагов под Авачинским и Корякским вулканами. На малых глубинах аномалии повышенных скоростей P - и S -волн совпадают с положением построек Авачинского и Корякского вулканов, что согласуется с результатом шумовой томографии и отражает доминирование там высококонсолидированных магматических пород. Вместе с тем отношение v_p/v_s на малых глубинах имеет высокие значения, что может свидетельствовать о проникновении метеорных вод внутрь вулканов.

На глубинах 3—4 км под поверхностью Авачинского вулкана скорости продольных волн остаются повышенными, тогда как поперечные волны дают отрицательные аномалии скорости, что приводит к чрезвычайно высокому значению v_p/v_s , доходящего до 2.4. Как показано в экспериментальной работе [Takei, 2002] и на примерах других активных вулканов, приведенных в разделе 7, такое соотношение скоростей P - и S -волн, а в особенности v_p/v_s , отчетливо указывает на наличие магматического очага с магмой, пришедшей снизу (высокие v_p) и высоким содержанием расплавов и флюидов (низкое v_s). На вертикальных сечениях 1, 2, 3 (см. рис. 15) видно, что это тело под Авачинским вулканом имеет бутылкообразную форму: изометрический «сосуд» диаметром 3—4 км на глубинах от 2 до 6 км от поверхности, соединенный с поверхностью «горлышком» с такими же высокими значениями v_p/v_s и высоким уровнем сейсмичности.

Под Корякским вулканом (см. рис. 15, сечения 1, 4, 5) также наблюдается аналогичная аномалия с высоким v_p , низким v_s и высоким отношением v_p/v_s , которая ассоциируется с магматическим резервуаром, однако она находится на существенно большей глубине. В отличие от Авачинской сопки, верхняя

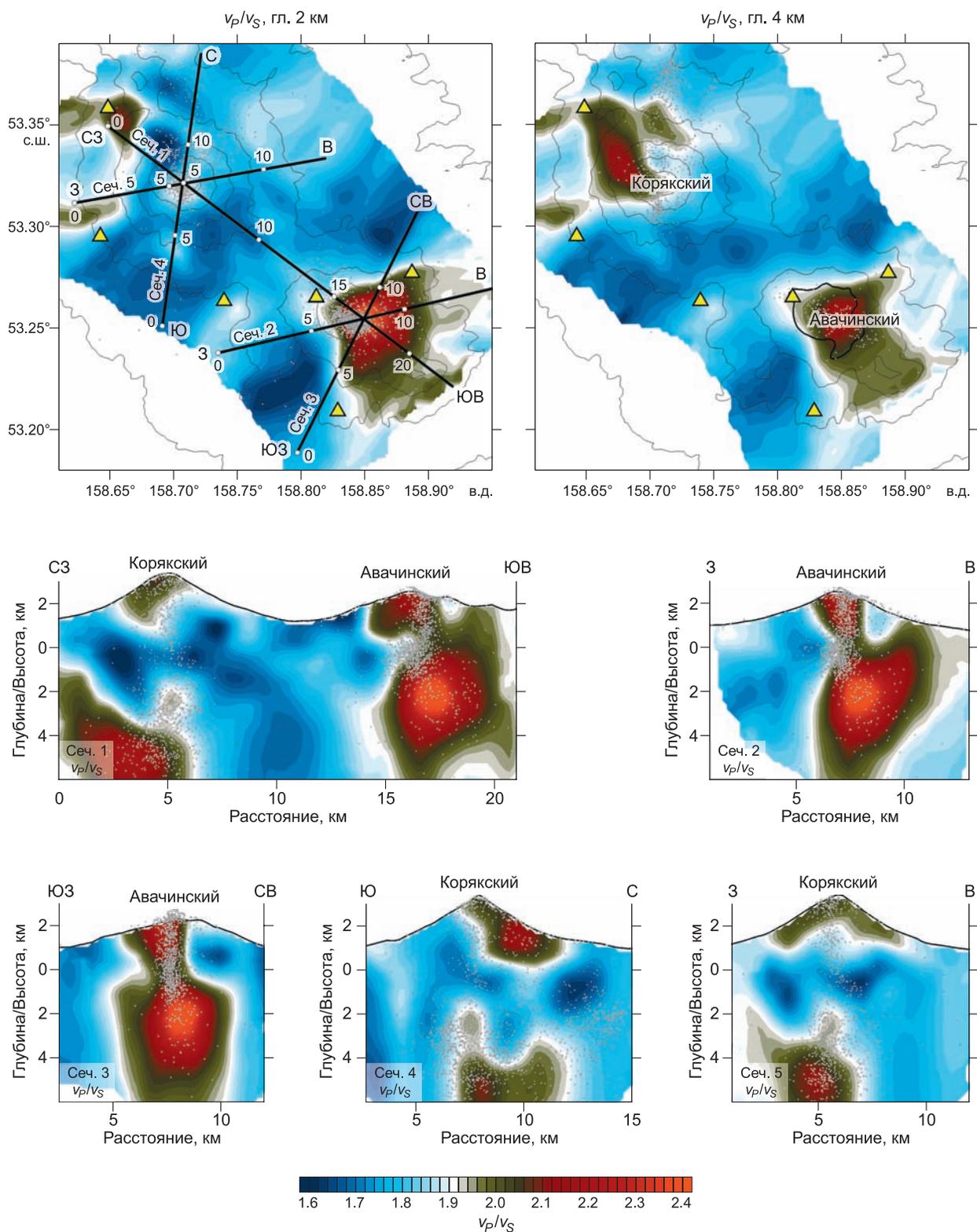


Рис. 15. Распределение отношения v_p/v_s в районе Авачинской группы вулканов из работы [Bushenkova et al., 2019] на глубинах 2 и 4 км ниже уровня моря и пяти вертикальных сечениях.

На горизонтальных сечениях желтыми треугольниками показаны станции. Точками отмечены проекции гипоцентров землетрясений.

граница этой аномалии проходит на глубине около 7 км от поверхности, и она представляется изолированной от вершины вулкана. Над магматическим очагом здесь преобладают аномалии с пониженным v_p/v_s . В совокупности с информацией о явно выраженном вертикально направленном поясе сейсмичности можно сделать вывод, что в данном случае происходят дегазация магмы и миграция газов к поверхности, которые приводят к эпизодическим фреатическим извержениям Корякского вулкана практически без внедрения магмы [Мелекесцев, 2011; Гордеев и др., 2011].

Результаты пассивной томографии показывают, что по крайней мере в верхней коре магматические источники Корякского и Авачинского вулканов представляются независимыми. Пониженные скорости под седловиной между вулканами отражают, скорее всего, факт наличия большого объема рыхлого материала, накопившегося в процессе извержений окружающих вулканов. Тот факт, что на отношении v_p/v_s не наблюдается никаких значимых аномалий, может свидетельствовать об отсутствии какой-либо геотермальной активности в этом месте.

Дальнейшее повышение детальности и качества томографических моделей для Авачинской группы вулканов ожидается после обработки данных временной сети, состоящей из 18 станций, которая функционировала с лета 2018 г. по лето 2019 г.

6. Вулкан Горелый

Вулканы Горелый и Мутновский (рис. 16, а, б), расположенные на расстоянии 75 км на юго-западе от г. Петропавловск-Камчатский, являются одними из наиболее легкодоступных активных вулканов Камчатки, которые посещаются большим количеством туристов со всего мира. В непосредственной близости от них расположена Мутновская геотермальная электростанция, которая обеспечивает значительную часть энергопотребления г. Петропавловск-Камчатский.

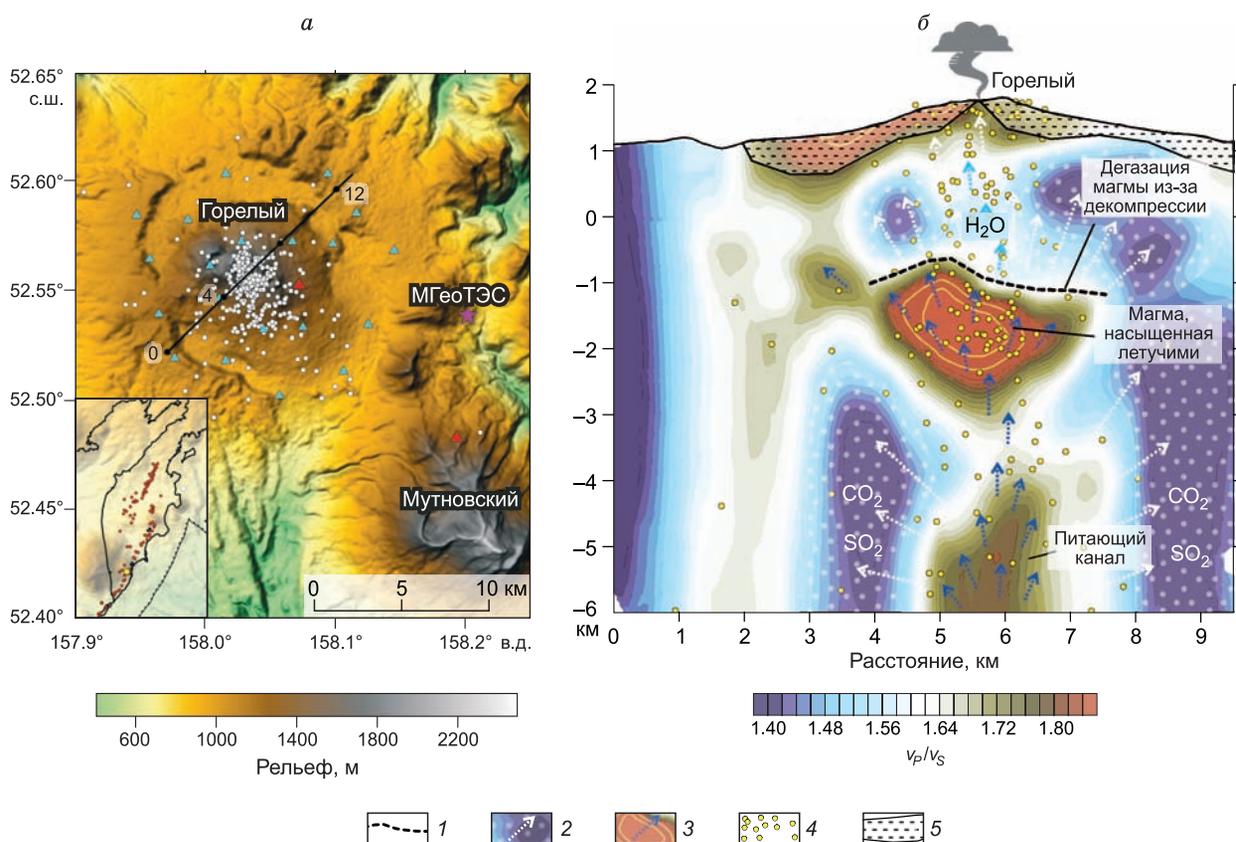


Рис. 16. Эксперимент на влк. Горелый и результат томографической инверсии из [Kuznetsov et al., 2017].

На врезке — положение изучаемого объекта на карте Камчатки (желтая точка). Красные точки — вулканы. а — положение сейсмической сети (треугольники) и выявленной сейсмичности (белые точки). Красные треугольники — станции постоянной сети. б — распределение отношения v_p/v_s на вертикальном сечении вместе с возможной интерпретацией. Положение профиля показано на части а. 1 — уровень дегазации магматических флюидов; 2 — газонасыщенные области с возможным направлением миграции газов, 3 — области, насыщенные жидкими флюидами и расплавами; 4 — проекции гипоцентров землетрясений; 5 — слой излившихся базальтов.

Современная постройка влк. Горелый представляет собой щитовой вулкан высотой 1800 м над уровнем моря, расположенный внутри эллиптической кальдеры размером 12×15 км. Предполагается, что эта кальдера образовалась вследствие серии крупных кальдерообразующих извержений, происшедших здесь в период от 300 до 30 тыс. л. н. [Брайцева и др., 1998; Селянгин, Пономарева, 1999], объем выброса которых мог быть более 100 км^3 . В последние десятки тысяч лет на Горелом происходили эффузивные извержения базальтового состава, которые сформировали пологую постройку вулкана высотой 800 м относительно краев кальдеры [Кирсанов, Мелекесцев, 1991; Чашин и др., 2011]. В настоящий момент на влк. Горелый имеются 11 кратеров различного размера и степени эрозии, а также около 30 боковых конусов, приуроченных к нескольким разломным зонам [Кирсанов, Мелекесцев, 1991]. В историческое время известны около десяти извержений, которые сопровождались значительными выбросами пеплового материала и умеренными лавовыми потоками [Siebert et al., 2010]. Последнее магматическое извержение здесь наблюдалось в 1984—1986 гг. С 2010 по 2014 г. влк. Горелый находился в стадии активной дегазации и сейсмического дрожания. По оценкам [Aiuppa et al., 2012], расход газа из центральной фумаролы в этот период составлял до 11 тыс. т в сутки.

До 2013 г. на влк. Горелый стояла всего одна станция КФ ФИЦ ЕГС РАН, по которой можно было судить только о факте наличия сейсмической активности, но не представлялось возможным локализовать источники сейсмического сигнала [Соболевская, 2009]. Летом 2013 г. на постройке вулкана и краях кальдеры была установлена временная сейсмическая сеть, состоявшая из 20 сейсмостанций [Kuznetsov et al., 2017]. Работа сети совпала с последними месяцами деятельности вулкана, продолжавшейся до декабря 2013 г., после чего всякая активность прекратилась. Вместе с тем информации, записанной станциями за первые месяцы работы сети, оказалось достаточно для реализации сейсмической томографии с удовлетворительным пространственным разрешением. Следует отметить, что в этот период на сейсмических записях наблюдалось огромное количество событий (тысячи в день), однако большинство из них представляли собой длиннопериодные землетрясения (или *drumbeat events*), которые непригодны для томографии. Очень сложный рутинный труд, который занял больше года, состоял в обнаружении на фоне шума и интенсивной сейсмической активности достаточно редких вулканотектонических событий, для которых можно определить вступления *P*- и *S*-волн. В результате выявлены 360 локальных событий такого типа, данные по которым были использованы для построения томографической модели [Kuznetsov et al., 2017].

Для поиска оптимальной референтной скоростной модели использовался метод сеточного поиска, в котором варьировались значения скорости *P*-волн и отношения v_p/v_s . Были рассмотрены различные значения скоростного градиента с глубиной, и во всех случаях получены весьма низкие значения v_p/v_s около 1.5, что не типично для вулканов. Обычно вулканические структуры содержат большое количество жидкой фазы в виде флюидов и расплавов, которые ассоциируются с повышенными значениями v_p/v_s . В данном случае низкие значения этого параметра могут свидетельствовать о доминировании газовой фазы в сильнопористой среде, слагающей постройку вулкана [Takei, 2002; Husen et al., 2004].

Томографическая инверсия в работе [Kuznetsov et al., 2017] позволила определить неоднородности сейсмических скоростей под вулканом примерно до глубины 6 км под уровнем моря. Наиболее информативным является распределение v_p/v_s , которое позволяет разделить случаи насыщения пород жидкими и газообразными компонентами (см. рис. 16, в). На фоне доминирующих низких значений v_p/v_s , непосредственно под вулканом в центральной части изучаемой области наблюдается аномалия с высоким отношением v_p/v_s , достигающим до 2. Внутри этой аномалии сосуществуют повышенные значения v_p и пониженные v_s , что может отражать наличие магматического вещества с высоким уровнем частичного плавления и насыщения флюидами. Верхняя граница этой аномалии расположена примерно на глубине 2 км от поверхности, и ее форма повторяет рельеф вулкана. Если принять, что эта аномалия связана с магматической камерой, то ее верхняя граница может отражать зону перехода растворенных в ней флюидов из жидкого состояния к газообразному, которое может происходить вследствие декомпрессии на определенной глубине за счет снижения литостатического давления [Fournier, 1999]. В этом случае этот процесс газовыделения, приводящий к резкому изменению объема, должен сопровождаться активной сейсмичностью, что и наблюдается в полученном распределении локальных землетрясений [Kuznetsov et al., 2017] и длиннопериодных событий [Abramenkov et al., 2020].

Ниже этой аномалии с высоким значением v_p/v_s наблюдается другая аномалия также с повышенной величиной этого параметра, которая может указывать на наличие подводящего канала, по которому магма поступает в верхний очаг. Эта аномалия также содержит определенное количество землетрясений, хотя существенно меньше, чем в случае верхней аномалии, что может также отражать процесс газовыделения. Однако состав газа здесь может быть другой: если в верхнем очаге ожидается в основном выброс воды, то на нижних уровнях дегазация касается выброса CO_2 и SO_2 [Chiodini et al., 2016].

Наконец, у поверхности также наблюдается аномалия с высоким отношением v_p/v_s , которая является достаточно типичной для множества активных вулканов. Поскольку постройка вулкана сложена из

базальтовых пород, они дают повышенные значения v_p . Вместе с тем их высокая проницаемость и достаточно влажный климат в данном регионе приводят к проникновению внутрь вулкана большого количества метеорной воды, которая дает пониженные значения v_s и повышенное отношение v_p/v_s . Часть метеорной воды может перемешиваться с магматическими флюидами. В итоге, если на глубине соотношение H_2O находится на уровне 70 %, то при выходе из фумаролы она составляет 90 % [Aïuppa et al., 2012].

Интересные результаты, также полученные с использованием непрерывных сейсмических записей на временной сети на влк. Горелый, касаются изучения длиннопериодной (LP) сейсмичности. В работе [Abramenkov et al., 2020] были автоматически выявлены несколько тысяч таких событий и обнаружено, что большинство из них имеют практически идентичную форму на сейсмограммах. При этом выделено всего пять семейств, к которым можно отнести практически все обнаруженные события. Переход от одного семейства к другому осуществляется последовательно: после окончания функционирования одного типа сейсмичности начинает работать другой. Было сделано предположение, что эти события являются своего рода реакцией проводящего канала на поток газа (подобно свистку). По прошествии какого-то времени канал изменяет свои свойства (например, вследствие перегрева или изменения геометрии), и далее повторяющийся LP сигнал начинает производиться в другом месте, пока изменения не коснутся и того участка канала. Эти результаты хорошо согласуются с результатами томографии и показывают детали процесса дегазации и миграции флюидов на поверхность.

7. ДИСКУССИЯ

7.1. Магматическое питание вулканов Северной группы

Многомасштабные сейсмические исследования строения коры и мантии под Северной группой вулканов позволили принципиальным образом улучшить понимание механизмов питания магматических систем и установить связь между процессами на разных глубинных уровнях. В частности, существенный прогресс достигнут благодаря реализации проекта KISS, во время которого на данной территории функционировало более сотни сейсмических станций [Shapiro et al., 2017b]. Сейсмическая модель, полученная по этим данным в работе [Koulakov et al., 2020b], обеспечила детальную и надежную информацию о строении надсубдукционного комплекса. К настоящему моменту это единственная модель такого уровня по Камчатскому региону, однако в ближайшее время ожидается получение аналогичных по детальности результатов по Центральной Камчатке по данным временной сети, которая функционировала там в 2019—2020 гг. Результаты по Северной группе вулканов, приведенные в разделе 4.4, показывают, что по глубинному строению она существенно отличается от большинства других зон субдукции. Исходя из распределения сейсмических неоднородностей, можно сделать вывод, что определяющим фактором в питании вулканов этой группы является наличие разрыва в Тихоокеанском слэбе между Алеутским и Курило-Камчатским сегментами субдукции. Именно через этот разрыв проходит поток аномально горячего астеносферного вещества, который поднимается вертикально в районе влк. Шивелуч и затем распространяется горизонтально по подошве коры в юго-западном направлении в сторону Ключевской группы вулканов и Кизимена. Наличие перегретого материала в верхах мантии вызывает активное плавление и образование аномального количества магматического вещества, что определяет особый характер вулканизма в этой области. Ранее роль окна в слэбе в формировании особо активного вулканизма в этой области обсуждалась на основании различных типов наблюдений в работах [Yogodzinski et al., 2001; Levin et al., 2002, 2005; Park et al., 2002], однако благодаря использованию новых данных проекта KISS удалось получить надежные доказательства этого предположения.

Вместе с тем возникает естественный вопрос, почему по достижении коры астеносферный поток устремляется в одном направлении, а не растекается равномерно во все стороны, подобно шляпке гриба. Во-первых, необходимо отметить, что разрешение томографической модели определяется наличием данных. Поскольку имеющиеся данные охватывают территорию Северной группы вулканов на юго-западе от Шивелуча, невозможно гарантировать отсутствие латеральных течений в других направлениях, например, к северу от Шивелуча, где данные отсутствуют. Во-вторых, распространение астеносферного вещества в виде полосы может определяться свойством литосферной мантии, которая в области дугового магматизма может быть гораздо тоньше, чем в невозмущенной области, или отсутствовать полностью ([Stern, 2002] и рис. 1). Таким образом, образовавшаяся «канавка» на подошве литосферы может послужить путем для латерального продвижения горячего астеносферного вещества, вышедшего из разрыва слэба. Еще одним фактором, объясняющим наличие яркой сейсмической аномалии в верхах мантии может быть наличие выбросов флюидов из слэба и их подъем в мантийном клине. Взаимодействие флюидов с аномально горячим веществом, пришедшим из разрыва слэба, может стать причиной его активного плавления [Reasock, 1996], что делает его более контрастным на сейсмических изображениях.

Другим важным аспектом является латеральное положение низкоскоростной аномалии в верхах мантии относительно вулканов Северной группы. На рисунке 10 показан срез модели аномалий скорости P -волн на глубине 50 км, т. е. непосредственно под корой. Практически идентичная картина аномалий наблюдается и для распределения аномалий dv_s [Koulakov et al., 2020b]. На этих картах прослеживается достаточно четкая корреляция: вулканы с преимущественно базальтовым составом и эффузивным стилем извержений (Николка, Толбачик, Ушковский, Крестовский, Харченко и большинство моногенных конусов) расположены над высокоскоростной аномалией, в то время как вулканы с кислым составом и эксплозивными извержениями (Кизимен, Удина, Зимица, Безымянный, Заречинский и Шивелуч) находятся над низкоскоростной аномалией. Единственным исключением является Ключевской вулкан, состав которого преимущественно базальтовый, но расположен он над областью пониженных скоростей в верхах мантии. Такая связь между составом вулканов и мантийной структурой может быть обусловлена определяющей ролью реологии коры в формировании того или иного типа вулканической активности (рис. 17). Аномалии с низкими сейсмическими скоростями в верхах мантии совпадают с более горячими областями, над которыми кора более разогретая и имеет вязкопластичную реологию. В такой среде магма поднимается за счет медленного внедрения мантийного вещества в кору и его постепенной дифференциации, в результате чего выделяется более легкая фракция, насыщенная летучими, которая может продолжить подъем в виде диапиров в средней и верхней коре. Образованные в результате этого процесса насыщенные флюидами андезитовые и риолитовые расплавы при достижении поверхности становятся продуктами экструзивных и эксплозивных извержений вулканов кислого и среднего состава. Такого рода процесс является доминирующим, например, в случае аномально толстой и низковязкой коры в Центральных Андах, где кислые магматические очаги формируются в коре в виде крупных диапиров [Del Potro et al., 2013].

В случае холодной коры над областями с высокоскоростными аномалиями в верхах мантии породы достаточно хрупки и легко образуют трещины гидроразрыва, по которым маловязкая базальтовая магма быстро поднимается к месту извержения. Возможность быстрого подъема базальтовой магмы в хрупкой коре исследовалась, например, с помощью аналогового моделирования в работе [Galland et al., 2007]. Поскольку за время подъема базальты не успевают претерпевать значимых изменений, продукты эффузивных извержений в таких областях имеют преимущественно основной состав, соответствующий глубинным источникам.

Следует отметить, что масштабы «горячей» и «холодной» областей в верхах мантии несопоставимо большие по сравнению с размерами магматических очагов. Поскольку образование зон плавления связано с наличием глубинных флюидов, а также учитывая тот факт, что скорость проплавления вещества, прежде всего, зависит от интенсивности поступления вещества в локальных мантийных струях

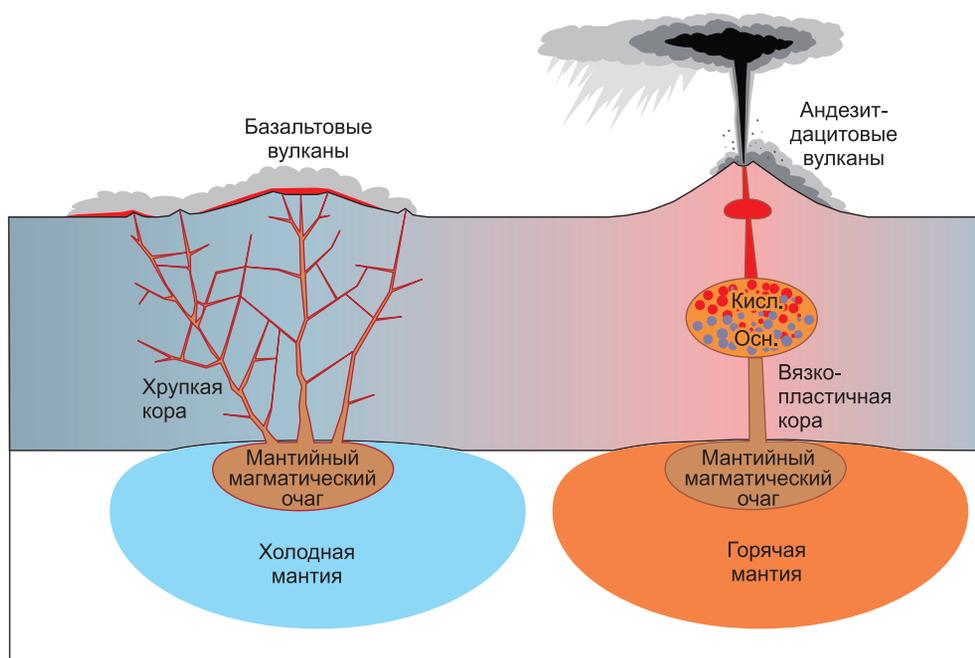


Рис. 17. Схема, иллюстрирующая возможную причину образования кислых вулканов над более горячей мантией и вулканов с основным составом извержений над холодными областями.

[Добрецов и др., 2012], такого рода мантийные магматические очаги примерно в равной степени могут существовать как внутри «холодных», так и «горячих» областей.

Ключевской вулкан является исключением, поскольку для него уже сформирован долгоживущий вертикальный канал, пронизывающий всю кору, по которому вещество из верхов мантии доставляется на поверхность [Koulakov et al., 2017]. По-видимому, образование этого канала определяется аномальными свойствами глубинного резервуара, где достигается крайне высокое давление, о чем можно судить по непрекращающейся высокоамплитудной длиннопериодной сейсмичности на подошве коры [Shapiro et al., 2017a].

В разделе 2 было отмечено, что во многих томографических моделях в различных зонах субдукции выявляются явно выраженные линейные аномалии в мантийном клине, которые соединяют зоны дегидратации на поверхности слэба вулканической дугой [Koulakov et al., 2006, 2016a; Syracuse et al., 2008; Zhao, 2015]. Особенностью полученных для Северной группы вулканов результатов является то, что такого рода структуры в явном виде там не прослеживаются (см. рис. 10, вертикальные сечения 1—3). Интенсивная низкоскоростная аномалия, связанная с латеральным потоком, который обсуждался в предыдущих абзацах, наблюдается только в верхах мантийного клина и не имеет явного продолжения к слэбу. С другой стороны, в мантийном клине четко прослеживаются линейные аномалии с повышенными значениями v_p/v_s , которые интерпретируются как потоки флюидов, проходящие сквозь мантийный клин (см. рис. 11, вертикальные сечения 1 и 2). По распределению этих аномалий в нижней части мантийного клина можно видеть, что выброс флюидов происходит по трем отдельным струям на глубинах от 100 до 150 км. Под Ключевским вулканом они объединяются в общий канал и формируют крупный магматический очаг на подошве коры. Под другими частями Ключевской группы отдельные струи у слэба также прослеживаются, однако явного их объединения в верхней части мантийного клина не наблюдается. Тот факт, что эти потоки явно не выражены в аномалиях скоростей сейсмических волн, как в других зонах субдукции, может быть связан со сдвигом референтной скорости за счет наличия интенсивной низкоскоростной аномалии в верхней части мантийного клина, на фоне которой аномалии в нижней части не видны. Следует отметить, что в полученной модели под Кизименом наблюдается вертикальная низкоскоростная аномалия (см. рис. 10, сечения 3 и 4), которая прослеживается с поверхности слэба на глубине 150 км, что согласуется с ранее полученными результатами в работе [Кулаков и др., 2016].

Нерешенным парадоксом является то, что продукты текущих извержений влк. Шивелуч не имеют явно выраженной глубинной компоненты, которую можно было бы ожидать в случае наличия мощного вертикального астеносферного потока под ним [Мелекесцев и др., 1991]. Более того, петрологические оценки условий формирования магматических источников под этим вулканом не дают никаких подтверждений наличия высокой температуры и глубинных компонент в расплавах [Gorbach, Portnyagin, 2011], которые должны были бы присутствовать в случае подъема астеносферного потока из окна в слэбе. Эти и другие противоречия можно разрешить, если удастся установить сейсмическую сеть на большой территории вокруг влк. Шивелуч и детально изучить глубинные структуры под ним. Также необходимо использовать методы численного моделирования, чтобы рассмотреть различные сценарии магмовыделения в такого рода системе и проверить потенциальные возможности сосуществования горячей струи на глубине с относительно низкотемпературными условиями формирования магмы в верхней коре. Эти и другие вопросы говорят о том, что, несмотря на существенный прогресс в изучении глубинного строения этого региона, очень важно продолжать усилия по совершенствованию систем наблюдения, анализу данных и построению реалистичных моделей систем магматического питания.

Исследования структуры магматических очагов во всей коре проводились на Камчатке только на территории Ключевской группы вулканов, где, благодаря установке нескольких временных сетей сейсмостанций, удалось добиться достаточно высокого разрешения и достоверности томографических моделей [Koulakov et al., 2017, 2020]. Дополнительной уникальностью данного случая является то, что в рамках одной модели в работе [Koulakov et al., 2017] удалось выявить три принципиально разные системы питания вулканов, имеющих различные составы и режимы извержений. Определено, что влк. Ключевской питается из глубинного очага на подошве коры, в котором в постоянном режиме происходит высокоамплитудная сейсмичность [Shapiro et al., 2017a]. Можно предположить, что сейсмические события там возникают вследствие периодического открытия и закрытия магматического канала по принципу ниппеля: когда давление в очаге превышает определенный порог, он открывается, и когда часть материала уходит наверх, давление уменьшается и канал закрывается. Однако эта гипотеза нуждается в детальном изучении путем проведения численного моделирования и сопоставления результатов расчетов с сейсмическими записями глубинных событий. Судя по распределению сейсмичности в коре, которая выстраивается вдоль достаточно плотно сконцентрированной линии, питание Ключевского вулкана осуществляется напрямую через вертикальный канал.

Интересно, что сейсмичность в низах коры также наблюдается в районе супервулкана Тоба на Суматре [Koulakov et al., 2016a]. Как и в случае Ключевского вулкана, эти землетрясения сосредоточены внутри аномалии у подошвы коры, которая интерпретируется как глубинный магматический резервуар. Вместе с тем данный резервуар под Тобой имеет несоизмеримо большие размеры. К тому же, судя по составу продуктов извержений в районе кальдеры, которые соответствуют почти исключительно верхнекоровым источникам, этот глубинный резервуар не имеет прямого канала на поверхность. По этой причине, несмотря на некоторые схожие черты, вряд ли можно выявить принципиальную аналогию между этими двумя случаями.

В случае влк. Безымянный вулканическая активность определяется постепенным и достаточно медленным фракционированием магмы в среднекоровом очаге, который прослеживается в виде низкоскоростной аномалии в правой части сечения 1 на рис. 8. Там выделяется низкоплотная кислая магма (дациты и андезиты), насыщенная большим количеством флюидов. Судя по результатам локальной томографии (см. рис. 12), миграция магмы и флюидов приводит к формированию двух очагов вблизи поверхности — магматическому и газовому, которые производят периодические эксплозивные и экстремальные извержения влк. Безымянный.

Под Толбачиком сейсмическая томография и коровая сейсмичность (см. рис. 8) позволяют выделить систему разрывов в земной коре, по которой базальтовый материал для трещинных извержений доставляется с больших глубин. При этом возможны несколько путей, по которым магма доходит до Плоского Толбачика и Толбачинского Дола, один из которых прослеживается по наклонному пути через кору из глубинного источника под Ключевским вулканом, а другой — с юго-восточной стороны, где наблюдается глубинная сейсмичность в районе Толудского поля [Кугаенко и др., 2017]. Вместе с тем строение мантийного клина показывает, что магматические источники на подошве коры под Толбачиком, скорее всего, получают материал из глубинного источника под Ключевским вулканом и в малой степени питаются непосредственно из слэба. Таким образом, получается, что в обоих случаях исходной точкой миграции магматического материала для толбачинских извержений является глубинный очаг под Ключевским, однако в каких-то случаях магма проходит исключительно в коре, а в других — вначале мигрирует вдоль подошвы коры, а затем поднимается вверх к Толбачинскому Долу. В этих двух случаях, хотя магма исходит из одного мантийного источника, она проходит по разным траекториям и приобретает различные геохимические характеристики, которые фиксируются на Толбачике [Churikova et al., 2015].

7.2. Верхнекоровые магматические источники, сопоставление вулканов Камчатки с другими вулканами мира

Выше представлены работы по изучению верхнекоровых источников пяти вулканов: Безымянного, Удины, системы Авачинский—Корякский и Горелого. В данном разделе предлагается сравнить эти результаты с томографическими моделями других вулканов схожего типа и на основании этого выявить некоторые общие закономерности функционирования малоглубинных магматических очагов.

Общей чертой всех моделей, описывающих сейсмическое строение верхнекоровых магматических очагов, является чрезвычайно контрастные вариации отношения v_p/v_s , которые получаются вследствие существенно различающихся, а порой антикоррелирующих значений аномалий скоростей продольных и поперечных волн. Разная чувствительность v_p и v_s к составу пород, наличию жидкой и газообразной фазы и другим петрофизическим параметрам делает отношение v_p/v_s эффективным параметром для изучения процессов в магматических и геотермальных системах [Takei, 2002]. Действительно, в случае наличия резервуара магмы, пришедшей с больших глубин и отличающейся по составу от окружающих пород, скорость v_p обычно имеет повышенное значение. В то же время скорость v_s , которая чувствительна к наличию жидкой фазы, в такой среде обычно имеет пониженные значения. Таким образом, отношение v_p/v_s дает чрезвычайно высокие значения, часто превышающие 2. Во многих случаях (например, под вулканами Авачинский и Горелый) непосредственно под постройкой активного вулкана на глубине 2—3 км под поверхностью наблюдается аномалия с высокими значениями v_p/v_s , которая ассоциируется с малоглубинным магматическим очагом, непосредственно ответственным за эруптивную активность. Напротив, если пористая среда заполнена газом, она ведет себя, как губка, т. е. имеет пониженные значения модуля сжатия, что ведет к кардинальному понижению скорости v_p . Однако факт наличия газа почти не влияет на модуль сдвига, и в такой среде скорости v_s оказываются нейтральными или даже немного повышенными [Takei, 2002; Husen et al., 2004]. В результате насыщенные газом области проявляются в виде аномалий с низкими значениями v_p/v_s , доходящими до 1.5 и менее.

Исходя из интерпретации результатов томографии, можно видеть явную аналогию в структурах под вулканами Горелый и Невадо дель Руис в Колумбии [Vargas et al., 2017]. Представленный результат для колумбийского вулкана (рис. 18, а) соответствует этапу сильной его дегазации, во время которой из его кратера выходило около 30 тыс. т SO_2 в сутки [Servicio..., 2017]. В случае влк. Горелый общая су-

точная масса выбрасываемого газа в период времени, когда была построена томографическая модель, составляла около 11 тыс. т [Aicuppa et al., 2012]. В обоих случаях источником флюидов выступали тела с высоким отношением v_p/v_s , расположенные на глубинах 2.5 км под поверхностью Горелого и 1.5 км — под Невадо дель Руис (пунктирная область на рис. 18, а). Следует отметить, что для Невадо дель Руис была выполнена повторная томография, позволяющая проследить эволюцию этого очага в период активизации вулкана с 2010 по 2017 г. [Vargas et al., 2017]. Было показано, что перед началом активизации объем аномалии с высоким значением v_p/v_s под вулканом был максимальный, однако со временем (до 2015 г.) она постепенно уменьшалась и практически сошла на нет. После этого внедрилась новая порция насыщенной флюидами магмы из глубинных источников, в результате чего увеличился экструзивный купол в кратере вулкана, и дегазация возобновилась с новой силой. Таким образом, здесь наблюдалось своего рода «дыхание» магматического очага, когда происходит дегазация и выброс флюидов из магматического резервуара, а затем его заполнение новой порцией магмы. Важно, что при изменениях свойств магматического резервуара под влк. Невадо дель Руис, его верхняя граница, разделяющая области с высокими и низкими значениями v_p/v_s , оставалась неизменной. Предполагается, что именно на этом уровне флюиды из растворенного состояния переходят в газообразное [Vargas et al., 2017]. Возможно, аналогичные процессы происходят и в магматическом очаге под влк. Горелый, который имеет удивительно схожую конфигурацию (см. рис. 16), включая форму верхней границы, которая также повторяет рельеф поверхности и отражает линию дегазации флюидов [Kuznetsov et al., 2017]. К сожалению, выявить вариации сейсмических скоростей в этом случае не представляется возможным из-за недостаточного времени наблюдений.

Интересно сопоставить сейсмические структуры, полученные под вулканами Авачинский (см. рис. 15), [Bushenkova et al., 2019] и Спурр (см. рис. 18, б) [Koulakov et al., 2018]. В обоих случаях наблюдаются аномалии с чрезвычайно высокими отношениями v_p/v_s , расположенные точно под вершинами вулканов на глубинах 2—3 км, которые ассоциируются с магматическими резервуарами, ответственными за их эпизодические извержения. В случае Авачинского вулкана этот резервуар связан с поверхностью через вертикальную аномалию, придающую всей системе «бутылочнообразную форму» (см. рис. 15, сечение 3). Следует отметить, что все извержения Авачинского вулкана происходили именно из центрального кратера, куда ведет эта аномалия [Мелекесцев и др., 1994]. В отличие от Авачинского, на влк. Спурр в последние 6000 лет извержения происходили исключительно из побочного кратера (Crater Peak) [Keith, 1995]. Как можно видеть из результатов сейсмической томографии, именно туда следует магматический конduit, прослеживаемый в виде аномалии с высоким отношением v_p/v_s . Как и в случае Невадо дель Руис, для влк. Спурр удалось реализовать повторную томографию и выявить изменения сейсмической структуры во времени. В 2004—2006 гг. на этом вулкане возникла значительная сейсмическая активизация, сопровождаемая дегазацией из центрального кратера вулкана [Mercier, Lowell, 2016]. Было обнаружено, что в ходе активизации уровень перехода от высоких значений v_p/v_s к низким поднялся с глубины 4 км на 1.5—2.0 км (см. рис. 18, б, желтая штриховая линия). В работе [Koulakov et al., 2018] предложен сценарий, согласно которому в это время из магматического очага произошел лавинообразный выброс флюидов, которые на уровне 2.0—2.5 км трансформировались в газ, в результате чего, выше этого уровня среда демонстрирует пониженные значения v_p/v_s . Аналогичные процессы наблюдались на вулканах Горелый и Невадо дель Руис и описаны в предыдущем разделе.

Схожие структуры присутствуют в сейсмической модели [Koulakov et al., 2020a] под вулканами Коровина и Ключева на острове Атка (Алеутские острова, США), которые расположены друг от друга на расстоянии 8 км и представляют собой единую вулканическую систему (см. рис. 18, в). Хотя петрологические анализы показывают независимые глубинные источники магм в продуктах извержений этих вулканов [Myers et al., 2002], газовыделение и фреатические извержения на них часто происходят синхронно [Miller et al., 1998]. В построенной сейсмической модели под обоими вулканами наблюдаются аномалии с повышенными значениями v_p/v_s , которые выглядят независимо в исследованном интервале глубин до 10 км ниже уровня моря (см. рис. 18, в). В этом смысле эта система имеет схожие черты с парой вулканов Авачинский—Корякский в модели [Bushenkova et al., 2019], под которыми также выделяются независимые магматические очаги (см. рис. 15). Отличием является то, что на Атке глубины обоих магматических резервуаров примерно одинаковые, в то время как под Корякским вулканом очаг расположен намного глубже, чем под Авачинским вулканом. Другой особенностью системы Коровин—Ключев является то, что в седловине между ними у поверхности наблюдается аномалия с высоким отношением v_p/v_s , которая, возможно, отражает зону проникновения метеорных вод. Между Авачинским и Корякским вулканами такой особенности не наблюдается. Аномалии с пониженными значениями v_p/v_s в верхней части разреза под вулканами Коровин и Ключев, скорее всего, связаны с дегазацией флюидов, принимая во внимание их частые фреатические извержения и довольно интенсивную фумарольную активность [Miller et al., 1998]. В томографической модели эти зоны с пониженными v_p/v_s выглядят связанными, что объясняет синхронные газовые выбросы из вулканов, наблюдаемые в некоторые эпизоды

занных здесь, является контрастная аномалия на малой глубине в постройке вулкана с высокими v_p , низкими v_s и очень высоким отношением v_p/v_s , которая может быть связана с проникновением метеорных вод в постройку вулкана, состоящую из изверженных пород высокой пористости. То, что такие аномалии не наблюдаются под вершинами вулканов Спурр, Коровин и Ключев, возможно, связано с тем, что эти северные вулканы по большей части покрыты ледниками, препятствующими проникновению воды из осадков в грунт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье совместно рассматриваются томографические модели зоны субдукции и строения магматических систем под вулканами Камчатки в масштабах от тысяч километров до первых километров, что позволило создать цельную картину взаимодействия различных по масштабу структур. Так, было обнаружено, что особые свойства вулканических комплексов в Северной группе вулканов во многом определяются разрывом в Тихоокеанском слэбе, отделяющим Курило-Камчатский и Алеутский сегменты субдукции, который отчетливо прослеживается в региональной томографической модели верхней мантии (масштаб — тысячи км). Результаты обработки данных международного проекта KISS (масштаб 100 км), во время которого на территории Ключевской группы вулканов одновременно работали более 100 станций, показали, что из разрыва в слэбе поднимается вертикальный поток астеносферного материала, который по достижению подошвы коры в районе Шивелуча, устремляется на юго-запад в сторону Ключевской группы вулканов. Предполагается, что аномальный разогрев, вызванный наличием этого потока под корой, определяет особую продуктивность и разнообразие извержений вулканов Ключевской группы. Использование данных постоянной сети КФ ФИЦ ЕГС РАН и временных сетей, установленных в отдельных частях Ключевской группы, позволило изучить детальное строение коры (масштаб — десятки км), на основании которого стало возможным выявить три различных механизма питания основных действующих вулканов: Ключевского, Безымянного и Толбачика. Наконец, использование данных локальных временных сейсмологических сетей на отдельных вулканах Камчатки (масштабы — первые км, первые десятки км) стало основой для получения детальных изображений магматических источников и гидротермальных систем в верхней части коры. В результате всех этих работ Ключевская группа вулканов на Камчатке стала одним из немногих регионов в мире (если не единственным), где был применен системный подход по многомасштабному изучению геологических структур, связанных с вулканической деятельностью.

В работе представлены результаты исследования верхнекоровых структур под пятью вулканами Камчатки, четыре из которых являются действующими (Безымянный, Корякский, Авачинский и Горелый) и один имеет серьезные признаки возможного просыпания (Удина). Результаты томографии для этих вулканов были проинтерпретированы с учетом обширной информации по аналогичным вулканам мира, также изученными посредством сейсмической томографии. Выявлены общие черты, в частности, наличие в большинстве случаев аномалии с высокими значениями v_p/v_s , показывающей положение малоглубинного магматического очага, непосредственно ответственного за извержения. При этом в большинстве случаев верхняя граница этого очага расположена на глубинах 2—3 км, что, возможно, показывает уровень дегазации флюидов вследствие декомпрессии. На поверхности построек вулканов во многих случаях наблюдаются зоны повышенного отношения v_p/v_s , которые отражают проникновение метеорных вод в проницаемую среду вулкана.

Важным методологическим выводом данного обзора является то, что для исследования состояния активных вулканов очень важно иметь возможность определять скорости продольных и поперечных волн и особенно отношения v_p/v_s . По этой причине использование активных сейсмических схем, которые в подавляющем большинстве случаев имеют дело только с продольными волнами, кажется автору не совсем эффективным для изучения такого рода объектов. Хотя такие работы и дают достаточно высокую детальность, полученные распределения скорости v_p не позволяют разделить ключевые физические характеристики, которые наиболее важны для изучения гидротермальных и магматических систем. Те значительные затраты, которые уходят на организацию такого рода активных сейсмических экспериментов, лучше направить на установку значительно более дешевых временных сейсмологических сетей, позволяющих проводить пассивные сейсмические исследования с использованием продольных и поперечных волн.

В заключение следует отметить, что работы по исследованию разномасштабных сейсмических структур Камчатского региона продолжаются, и в ближайшее время планируется получить новые результаты на основании новых данных, которые позволят ответить на множество вопросов, остающихся пока открытыми.

Данная работа была бы невозможна без труда множества специалистов из российских и зарубежных организаций, которые осуществили логистику полевых экспериментов, обеспечивали финансиро-

вание, предоставляли оборудование, устанавливали в тяжелых полевых условиях сейсмические сети на Камчатке, проводили ручную обработку всех сейсмических материалов, делали расчеты для получения сейсмических моделей и участвовали в обсуждении результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-17-00430, 14-47-00002, 20-17-00075), а также в рамках проекта РФФИ 20-15-50094 (Экспансия).

ЛИТЕРАТУРА

Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев А.А., Пушкарев В.Г., Сениюков С.Л. Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ-ГСЗ) // Вулканология и сейсмология, 1988, № 2, с. 43—55.

Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Отложения и последовательность событий извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (Камчатка): отложения обломочной лавины // Вулканология и сейсмология, 1998, № 1, с. 25—40.

Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Максимов А.П., Иванов Б.В. Вулкан Безымянный // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. М., Наука, 1991, с. 166—197.

Брайцева О.А., Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д. Крупнейшие голоценовые извержения вулкана Авачинский на Камчатке (этап 7250—3700 ¹⁴C лет назад) // Вулканология и сейсмология, 1998, № 1, с. 1—27.

Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Романова И.М. Кашницкий А.В., Уваров И.А., Мальковский С.И., Королев С.П., Маневич А.Г., Крамарева Л.С. Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки / Ред. О.А. Гирина. Петропавловск-Камчатский, Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2018, 192 с., <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37061627>.

Гонтовая Л.И., Сениюков С.Л. О сейсмической модели земной коры Авачинского вулкана на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 2000, № 3, с. 57—62.

Гонтовая Л.И., Ефимова Е.А., Костюкевич С.А., Пийп В.Б. Сейсмический разрез вулкана Авачинский по данным КМПВ-ГСЗ // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1990, № 3, с. 73—81.

Гонтовая Л.И., Ризниченко О.Ю., Сениюков С.Л., Степанова М.Ю., Ящук В.В. Об упругих свойствах земной коры в районе Авачинского вулкана на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 1998, № 4—5, с. 79—87.

Гордеев Е.И., Гирина О.А. Вулканы и их опасность для авиации // Вестник Российской академии наук, 2014, т. 84, № 2, с. 134—184.

Гордеев Е.И., Дроздин В.А., Дубровская И.К., Муравьев Я.Д., Овсянников А.А. Вулкан Корякский: современное состояние и активизация в 2008—2010 гг. // Вестник ДВО РАН, 2011, т. 3, № 157, с. 25—34.

Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов Ю.Д. Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (12), с. 1633—1661.

Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов К.Д., Кукарина Е.В. Значение геологии, экспериментальной петрологии и сейсмотомографии для комплексной оценки субдукционных процессов // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 21—55.

Егорушкин И.И., Кулаков И.Ю., Шапиро Н.М., Гордеев Е.И., Яковлев А.В., Абкадыров И.Ф. Структура верхней коры под вулканами Ключевской группы по данным шумовой томографии // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (1), с. 85—102.

Зубин М.И., Козырев А.И. Гравитационная модель строения Авачинского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 1988, № 1, с. 81—94.

Иванов В.В. Средне- и краткосрочные прогнозы извержений вулканов на Камчатке (1955—2012 гг.) // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле, 2013, № 22 (2), с. 98—119.

Кирсанов И.Т., Мелекесцев И.В. Вулкан Горелый // Активные вулканы Камчатки. М., Наука, 1991, с. 294—315.

Кугаенко Ю.А., Павлов В.М., Иванова Е.И., Абубакиров И.Р., Салтыков В.А. Толудская вспышка сейсмичности и землетрясение 30.11.2012 г. ($M_c = 5.4$, $M_w = 4.8$), сопровождавшие начало Тол-бачинского извержения 2012—2013 г. // Вулканология и сейсмология, 2017, № 6, с. 33—48.

Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Вёрнер Г. Сейсмическая активизация и петрология пород Удинских вулканов // Волынцовские чтения, 2018, с. 24—25.

Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Кулаков И.Ю., Павлов В.М., Воропаев П.В., Абкадыров И.Ф., Комзелева В.П. Развитие магматической системы под удинским вулканическим комплексом (Камчатка) по сейсмическим данным 2017—2019 гг. // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (2), с. 273—292, doi: 10.15372/GiG2019160.

Кулаков И. Ю., Добрецов Н. Л., Бушенкова Н. А., Яковлев А. В. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (6), с. 830—851.

Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Верниковский В.А. Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и влк. Кизимен (Камчатка) по данным сейсмической томографии // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (1), с. 109—124.

Кулаков И.Ю., Гордеев Е.И., Добрецов Н.Л., Сениюков С.Л., Кугаенко Ю.А., Абкадыров И.Ф., Яковлев А.В., Новгородова А.М., Кукарина Е.В. Сейсмотомографические реконструкции земной коры и канала магматического питания // Толбачинское трещинное извержение 2012—2013 гг. (ТТИ-50) / Под ред. Е.И. Гордеева, Н.Л. Добрецова. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2017, с. 293—314.

Лаверов Н.П., Добрецов Н.Л., Богатиков О.А., Бондур В.Г., Гурбанов А.Г., Карамурзов Б.С., Коваленко В.И., Мелекесцев И.В., Нечаев Ю.В., Пономарева В.В., Рогожин Е.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Федотов С.А., Хренов А.П., Ярмолюк В.В. Новейший и современный вулканизм на территории России. М., Наука, 2005, 604 с.

Максимов А.П. Геохимические особенности вулканов Удинской группы // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов / Под ред. Б.В. Иванова, С.Т. Балесты. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1976, с. 77—84.

Мелекесцев И. В. Вулканизм и рельефообразование. М., Наука, 1980, 212 с.

Мелекесцев И.В. Действующие и потенциально активные вулканы Курило-Камчатской островной дуги в начале XXI в.: этапы исследований, определение термина «действующий вулкан», будущие извержения и вулканическая опасность // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2006, № 1, вып. 7, с. 15—35.

Мелекесцев И.В. Загрязненная свежевывапавшей тефрой вода как фактор природной опасности (на примере извержения вулкана Корякский, Камчатка, в 2008—2009 гг.) // Вулканология и сейсмология, 2011, № 1, с. 19—32.

Мелекесцев И.В., Хренов А.П., Кожемяка Н.Н. Тектоническое положение и общее описание северной группы и Срединного хребта // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М., Наука, 1991а, т. 1, с. 74—81.

Мелекесцев И.В., Волынец О.Н., Ермаков В.А., Кирсанова Т.П., Масуренков Ю.П. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т. 1. / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М., Наука, 1991б, с. 84—103.

Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н., Базанова Л.И. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Часть II. 1926—1991 гг. // Вулканология и сейсмология, 1994, № 2, с. 3—22.

Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г. Магнитотеллурическое зондирование Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 1998, № 2, с. 77—84.

Низкоус И.В., Санина И.А., Кисслинг Э., Гонтовая Л.И. Скоростные свойства литосферы переходной зоны океан—континент в районе Камчатки по данным сейсмической томографии // Физика Земли, 2006, № 4, с. 18—29.

Озеров А.Ю., Арискин А.А., Кайл Ф., Богоявленская Г.Е., Карпенко С.Ф. Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового магматизма вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // Петрология, 1997, т. 5, № 6, с. 614—635.

Селянгин О.Б., Пономарева В.В. Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка // Вулканология и сейсмология, 1999, № 2, с. 3—23.

Сениюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000—2010 гг. // Вулканология и сейсмология, 2013, № 1, с. 96—108.

Славина Л.Б., Гарагаш И.А., Горельчик В.И., Иванов Б.В., Белянкин Г.А. Скоростное строение и напряженно-деформированное состояние земной коры в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология, 2001, № 1, с. 49—59.

Соболевская О.В. Сейсмичность вулкана Горелый в 1984—2009 гг. // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки (материалы региональной конференции). Петропавловск-Камчатский, КФ ГС РАН, 2009, с. 382—386.

Тимербаева К.М. Петрология Ключевских вулканов на Камчатке. М., Наука, 1967, 208 с.

Токарев П.И. Асачинский рой землетрясений и его природа (Камчатка март—апрель 1983 г.) // Вулканология и сейсмология, 1984, № 3, с. 3—13.

Утнасин В.К., Абдурахманов А.И., Аносов Г.И., Балеста С.Т., Будянский Ю.А., Мархинин Е.К., Федорченко В.И. Глубинное строение Ключевской группы вулканов и проблема магматических очагов // Советская геология, 1974, № 2, с. 36—54.

- Федотов С.А.** Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка. 1975—1976. М., Наука, 1984.
- Федотов С.А., Иванов Б.В., Двигало В.Н., Кирсанов И.Т., Муравьев Я.Д., Овсянников А.А., Разина А.А., Селиверстов Н.И., Степанов В.В., Хренов А.П., Чирков А.М.** Деятельность вулканов Камчатки и Курильских островов в 1984 г. // *Вулканология и сейсмология*, 1989, № 5, с. 3—23.
- Федотов С.А., Балеста С.Т., Двигало В.Н., Разина А.А., Флеров Г.Б., Чирков А.М.** Новые Толбачинские вулканы // *Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. Т. 1.* / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М., Наука, 1991, с. 214—279.
- Флеров Г.Б., Овсянников А.А.** Ушковский вулкан // *Действующие вулканы Камчатки. Т. 1.* М., Наука, 1991, с. 156—167.
- Флеров Г.Б., Чурикова Т.Г., Ананьев В.В.** Вулканический массив Плоских Сопок: геология, петрохимия, минералогия и петрогенезис пород (Ключевская группа вулканов, Камчатка) // *Вулканология и сейсмология*, 2017, № 4, с. 30—47.
- Флеров Г.Б., Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Ананьев В.В.** Вулканический массив Зиминых Сопок: геология и минералогия пород (Ключевская группа вулканов, Камчатка) // *Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле*, 2019, № 4, с. 19—34.
- Хренов А.П., Антипин В.С., Чувашова Л.А., Смирнова Е.В.** Петрохимические и геохимические особенности базальтов Ключевского вулкана // *Вулканология и сейсмология*. 1989, № 3, с. 3—15.
- Хренов А.П., Двигало В.Н., Кирсанов И.Т., Федотов С.А., Горельчик В.И., Жаринов Н.А.** Ключевской вулкан // *Действующие вулканы Камчатки. Т. 1.* М., Наука, 1991, с. 106—153.
- Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Низкоус И.В.** Магматические очаги под Ключевской группой вулканов (Камчатка) // *Вулканология и сейсмология*, 2007, № 2, с. 32—54.
- Чащин А.А., Мартынов Ю.А., Перепелов А.Б., Екимова Н.И.** Физико-химические условия формирования и эволюции позднеплейстоцен-голоценовых магм вулканов Горелый и Мутновский (Южная Камчатка) // *Тихоокеанская геология*, 2011, т. 30, № 4, с. 87—108.
- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В.** Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // *Вулканология и сейсмология*, 2013, № 1, с. 18—18.
- Чурикова Т.Г., Соколов С.Ю.** Магматическая эволюция вулкана Плоские Сопки, Камчатка (анализ изотопной геохимии стронция) // *Геохимия*, 1993, № 10, с. 1439—1447.
- Abramenkov S., Shapiro N.M., Koulakov I., Abkadyrov I.** Clustering of long-period earthquakes beneath Gorely Volcano (Kamchatka) during degassing episode in 2013 // *Geoscience*, 2020, v. 10, p. 230, doi:10.3390/geosciences10060230.
- Aiuppa A., Giudice G., Liuzzo M., Tamburello G., Allard P., Calabrese S., Chaplygin I., McGonigle A.J.S., Taran Y.** First volatile inventory for Gorely volcano, Kamchatka // *Geophys. Res. Lett.*, 2012, v. 39.
- Arcay D., Tric E., Doin M.P.** Numerical simulations of subduction zones: Effect of slab dehydration on the mantle wedge dynamics // *Physics Earth Planet. Inter.*, 2005, v. 149 (1—2), p. 133—153.
- Auer A., Belousov A., Belousova M.** Deposits, petrology and mechanism of the 2010—2013 eruption of Kizimen volcano in Kamchatka, Russia // *Bull. Volcanol.*, 2018, v. 80 (33), <https://doi.org/10.1007/s00445-018-1199-z>.
- Belousov A., Belousova M., Edwards B., Volynets A., Melnikov D.** Overview of the precursors and dynamics of the 2012—13 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2015, v. 307, p. 22—37.
- Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Levshin A.L., Lin F., Moschetti M.P., Shapiro N.M., Yang Y.** Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // *Geophys. J. Int.*, 2007, v. 169 (3), p. 1239—1260.
- Bianchi M., Heit B., Jakovlev A., Yuan X., Kay S.M., Sandvol E., Alonso R.N., Coira B., Brown L., Kind R., Comte D.** Teleseismic tomography of the southern Puna plateau in Argentina and adjacent regions // *Tectonophysics*, 2013, v. 586, p. 65—83.
- Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N.K., Perepelov A.B., Bazanova L.I., Jicha B.R., Singer B.S., Schmitt A.K.** Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar—Ar and U—Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2010, v. 189 (1—2), p. 57—80.
- Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D.** Ages of calderas, large explosive craters and active volcanoes in the Kuril—Kamchatka region, Russia // *Bull. Volcanol.*, 1995, v. 57 (6), p. 383—402, <https://doi.org/10.1007/BF00300984>.
- Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Kirianov V.Y.** The caldera-forming eruption of Ksudach volcano about cal. AD 240: the greatest explosive event of our era in Kamchatka, Russia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1996, v. 70 (1—2), p. 49—65.

- Brenguier F., Campillo M., Takeda T., Aoki Y., Shapiro N.M., Briand X., Miyake H.** Mapping pressurized volcanic fluids from induced crustal seismic velocity drops // *Science*, 2014, v. 345 (6192), p. 80—82.
- Bushenkova N., Koulakov I., Senyukov S., Gordeev E.I., Huang H.-H., Khrepy S.El., Arifi N.Al.** Tomographic images of magma chambers beneath the Avacha and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // *J. Geophys. Res., Solid Earth*, 2019, v. 124, p. 9694—9713, doi: 10.1029/2019JB017952.
- Chesner C.A.** The Toba caldera complex // *Quat. Int.*, 2012, v. 258, p. 5—18.
- Chiodini G., Paonita A., Aiuppa A., Costa A., Caliro S., De Martino P., Acocella V. Vandemeulebroeck J.** Magmas near the critical degassing pressure drive volcanic unrest towards a critical state // *Nat. Commun.*, 2016, v. 7, p. 13712.
- Churikova T.G., Gordeychik B.N., Edwards B.R., Ponomareva V.V., Zelenin E.A.** The Tolbachik volcanic massif: A review of the petrology, volcanology and eruption history prior to the 2012—2013 eruption // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2015, v. 307, p. 3—21.
- Del Potro R., Díez M., Blundy J., Camacho A.G., Gottsmann J.** Diapiric ascent of silicic magma beneath the Bolivian Altiplano // *Geophys. Res. Lett.*, 2013, v. 40 (10), p. 2044—2048.
- De Silva S.L., Zielinski G.A.** Global influence of the AD 1600 eruption of Huaynaputina, Peru // *Nature*, 1998, v. 393 (6684), p. 455—458.
- De Silva S., Zandt G., Trumbull R., Viramonte J.G., Salas G., Jiménez N.** Large ignimbrite eruptions and volcano-tectonic depressions in the Central Andes: a thermomechanical perspective // *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 2006, v. 269 (1), p. 47—63.
- Díaz-Moreno A., Barberi, G., Cocina O., Koulakov I., Scarfi, L., Zuccarello L., Prudencio J., García-Yeguas A., Álvarez I., García L., Ibáñez J.M.** New insights on Mt. Etna's crust and relationship with the regional tectonic framework from joint active and passive *P*-wave seismic tomography // *Surv. Geophys.*, 2017, v. 39 (1), p. 57—97, doi: 10.1007/s10712-017-9425-3.
- Duputel Z., Ferrazzini V., Brenguier F., Shapiro N., Campillo M., Nercessian A.** Real time monitoring of relative velocity changes using ambient seismic noise at the Piton de la Fournaise volcano (La Réunion) from January 2006 to June 2007 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2009, v. 184 (1—2), p. 164—173.
- Faccenda M., Gerya T.V., Burlini L.** Deep slab hydration induced by bending-related variations in tectonic pressure // *Nat. Geosci.*, 2009, v. 2 (11), p. 790—793.
- Feng K.F., Huang H.H., Wu Y.M.** Detecting pre-eruptive magmatic processes of the 2018 eruption at Kilauea, Hawaii volcano with ambient noise interferometry // *Earth Planets Space*, 2020, v. 72, p. 1—15.
- Fournier R.O.** Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment // *Econ. Geol.*, 1999, v. 94, p. 1193—1211.
- Fujie G., Kodaira S., Kaiho Y., Yamamoto Y., Takahashi T., Miura S., Yamada T.** Controlling factor of incoming plate hydration at the north-western Pacific margin // *Nat. Commun.*, 2018, v. 9 (1), p. 1—7.
- Galland O., Cobbold P.R., de Bremond d'Ars J., Hallot E.** Rise and emplacement of magma during horizontal shortening of the brittle crust: Insights from experimental modeling // *J. Geophys. Res., Solid Earth*, 2007, v. 112 (B6).
- García-Yeguas A., Koulakov I., Ibáñez J.M., Rietbrock A.** High resolution 3D *P* wave velocity structure beneath Tenerife Island (Canary Islands, Spain) based on tomographic inversion of active-source data // *J. Geophys. Res.*, 2012, v. 117, B09309, doi:10.1029/2011JB008970.
- Girina O.A.** Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956—2010 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2013, v. 263, p. 22—41.
- Gorbach N.V., Portnyagin M.V.** Geology and petrology of the lava complex of Young Shiveluch Volcano, Kamchatka // *Petrology*, 2011, v. 19 (2), p. 134—166.
- Gorbatov A., Kostoglodov V., Suarez G., Gordeev E.** Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone // *J. Geophys. Res.*, 1997, v. 102 (B8), p. 17833—17898.
- Gorbatov A., Dominguez J., Suarez G., Kostoglodov V., Zhao D., Gordeev E.** Tomographic imaging of the *P*-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula // *Geophys. J. Int.*, 1999, v. 137, p. 269—279.
- Gorbatov A., Fukao Y., Widiyantoro S., Gordeev E.** Seismic evidence for a mantle plume oceanwards of the Kamchatka—Aleutian trench junction // *Geophys. J. Int.*, 2001, v. 146 (2), p. 282—288.
- Gorshkov G.S.** Gigantic directed blast at Shiveluch volcano (Kamchatka) // *Bull. Volcanol.*, 1959, v. 20 (1), p. 77—109.
- Green R.G., Sens-Schönfelder C., Shapiro N., Koulakov I., Tilmann F., Dreiling J., Luehr B., Jakovlev A., Abkadyrov I., Droznin D., Gordeev E.** Magmatic and sedimentary structure beneath the Klyuchevskoy volcanic group, Kamchatka, from ambient noise tomography // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2020, v. 125, https://doi.org/10.1029/2019JB018900.

Hacker B.R., Peacock S.M., Abers G.A., Holloway S.D. Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2003, v. 108 (B1), ESE11.1—ESE11.16, doi: 10.1029/2001JB001129.

Husen S., Smith R.B., Waite G.P. Evidence for gas and magmatic sources beneath the Yellowstone volcanic field from seismic tomographic imaging // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2004, v. 131, p. 397—410.

Ivanov I., Koulakov I., West M., Jakovlev A., Gordeev E., Senyukov S., Chebrov V. Magma sources beneath the Klyuchevskoy and Bezymianny volcanoes inferred from local earthquake seismic tomography // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2016, v. 323 (1), p. 62—71, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.010>.

Jaxybulatov K., Koulakov I., Dobretsov N.L., Segmentation of the Izu-Bonin and Mariana plates based on the analysis of the Benioff seismicity distribution and regional tomography results // *Solid Earth*, 2013, v. 4, p. 1—15, doi:10.5194/se-4-1-2013.

Jaxybulatov K., Shapiro N.M., Koulakov I., Mordret A., Landès M., Sens-Schönfelder C., A large magmatic sill complex beneath the Toba caldera // *Science*, 2014, v. 346, p. 617—619, doi:10.1126/science.1258582.

Jiang G., Zhao D., Zhang G. Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka // *Tectonophysics*, 2009, v. 465 (1), p. 190—203.

Jousset P., Pallister J., Boichu M., Buongiorno M.F., Budisantoso A., Costa F., Andreastuti S., Prata F., Schneider D., Clarisse L., Humaida H. The 2010 explosive eruption of Java's Merapi volcano—a '100-year' event // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2012, v. 241, p. 121—135.

Keith T.E.C. The 1992 eruptions of Crater Peak vent, Mount Spurr volcano, Alaska. U.S // *Geol. Surv. Bull.*, 1995, 2139.

Korenaga J. On the extent of mantle hydration caused by plate bending // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2017, v. 457, p. 1—9.

Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms // *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2009, v. 99 (1), p. 194—214, doi: 10.1785/0120080013.

Koulakov I. High-frequency *P* and *S*-velocity anomalies in the upper mantle beneath Asia from inversion of worldwide traveltimes data // *J. Geophys. Res.*, 2011, v. 116, B04301, doi:10.1029/2010JB007938.

Koulakov I., Tychkov S., Bushenkova N., Vasilevskiy A. Structure and dynamics of the upper mantle beneath the Alpine-Himalayan orogenic belt from teleseismic tomography // *Tectonophysics*, 2002, v. 358, p. 77—96.

Koulakov I., Sobolev S.V., Asch G. *P*- and *S*-velocity images of the lithosphere-asthenosphere system in the Central Andes from local-source tomographic inversion // *Geophys. J. Int.*, 2006, v. 167, p. 106—126.

Koulakov I., Jakovlev A., Luehr B.G. Anisotropic structure beneath central Java from local earthquake tomography // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2009a, v. 10, Q02011, doi:10.1029/2008GC002109.

Koulakov I., Kaban M.K., Tesauro M., Cloetingh S. *P*- and *S*-velocity anomalies in the upper mantle beneath Europe from tomographic inversion of ISC data // *Geophys. J. Int.*, 2009b, v. 179 (1), p. 345—366, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04279.x.

Koulakov I., Stupina T., Kopp H. Creating realistic models based on combined forward modeling and tomographic inversion of seismic profiling data // *Geophysics*, 2010, v. 75 (3), B115, <http://dx.doi.org/10.1190/1.3427637>.

Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A., Senyukov S., Jakovlev A. Feeding volcanoes of the Kluchevskoy group from the results of local earthquake tomography // *Geophys. Res. Lett.*, 2011, v. 38 (9), L09305, <https://doi.org/10.1029/2011GL046957>.

Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A., Senyukov S., Jakovlev A., Jaxybulatov K. 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, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.10.014>.

Koulakov I., Jaxybulatov K., Shapiro N.M., Abkadyrov I., Deev E.V., Jakovlev A.V., Kuznetsov P., Gordeev E.I., Chebrov V.N. Asymmetric caldera-related structures in the area of the Avacha group of volcanoes in Kamchatka as revealed by ambient noise tomography and deep seismic sounding // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2014, v. 285, p. 36—46, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.08.012.

Koulakov I., El Khrepy S., Al-Arifi N., Kuznetsov P., Kasatkina E. Structural cause of a missed eruption in the Harrat Lunayyir basaltic field (Saudi Arabia) in 2009 // *Geology*, 2015, G36271 (1), <http://dx.doi.org/10.1130/G36271.1>.

Koulakov I., Kasatkina E., Shapiro N.M., Jaupart C., Vasilevsky A., El Khrepy S., Al-Arifi N., Smirnov S., The feeder system of the Toba supervolcano from the slab to the shallow reservoir // *Nat. Commun.*, 2016a, v. 7, 12228, doi:10.5194/se-7-965-2016.

Koulakov I., Maksotova G., Jaxybulatov K., Kasatkina E., Shapiro N.M., Luehr B.-G., El Khrepy S., Al-Arifi N. Structure of magma reservoirs beneath Merapi and surrounding volcanic centers of Central Java modeled from ambient noise tomography // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2016b, v. 17, doi:10.1002/2016GC006442.

Koulakov I., Abkadyrov I., Al Arifi N., Deev E., Droznina S., Gordeev E. I., Jakovlev A., El Khrepy S., Kulakov R. I., Kugaenko Y., Novgorodova A., Senyukov S., Shapiro N., Stupina T., West M. 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, doi:10.1002/2017JB014082.

Koulakov I., Smirnov S.Z., Gladkov V., Kasatkina E., West M., El Khrepy S., Al-Arifi N. Causes of volcanic unrest at Mt. Spurr in 2004—2005 inferred from repeated tomography // *Sci. Rep.*, 2018, 18-20196-T, doi:10.1038/s41598-018-35453-w.

Koulakov I., Komzeleva V., Abkadyrov I., Kugaenko Yu., El Khrepy S., Al Arifi N. Unrest of the Udina volcano in Kamchatka inferred from the analysis of seismicity and seismic tomography // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2019, v. 379, p. 45—59, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.05.006>.

Koulakov I., Boychenko E., Smirnov S.Z. Magma chambers and meteoric fluid flows beneath the Atka volcanic complex (Aleutian Islands) inferred from local earthquake tomography // *Geosciences*, 2020a, v. 10, doi:10.3390/geosciences10060214.

Koulakov I., Shapiro N., Sens-Shoenfelder C., Gordeev E.I., Jakovlev A.V., Abkadyrov I., Chebrov D., Bushenkova N., Droznina S., Senyukov S., Novgorodova A., Stupina T. Mantle sources of magmatic activity in the Northern group of volcanoes in Kamchatka inferred from earthquake tomography // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2020b, v. 125 (10), doi:10.1029/2020JB020097.

Koulakov I., Plechov P.Yu., Mania R., Walter T.R., Smirnov S.Z., Abkadyrov I., Jakovlev A., Davydova V., Senyukov S.L., Bushenkova N.A., Novgorodova A.M., Stupina T.A., Droznina S.Ya. Anatomy of the Bezymianny volcano merely before an explosive eruption on 20.12.2017 // *Sci. Rep.*, 2021, v. 11 (1), p. 1—12, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81498-9>.

Kuznetsov P.Y., Koulakov I., Jakovlev A., Abkadyrov I., Deev E., Gordeev E.I., Senyukov S., El Khrepy S., Al Arifi N. Structure of volatile conduits beneath Gorely Volcano (Kamchatka) revealed by local earthquake tomography // *Geosciences*, 2017, v. 7 (111), doi:10.3390/geosciences7040111.

Lees J.M., Symons N., Chubarova O., Gorelchik V., Ozerov A. Tomographic images of Klyuchevskoi Volcano *P*-wave velocity / Eds. J. Eichelberger, E. Gordeev, M. Kasahara, P. Izbekov, J. M. Lees, *Volcanism and subduction: The Kamchatka region*. Washington, DC, American Geophysical Union, 2007, p. 293—302.

Levin V., Shapiro N., Park J., Ritzwoller M. Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka // *Nature*, 2002, v. 418 (6899), p. 763—767, <https://doi.org/10.1038/nature00973>.

Levin V., Shapiro N.M., Park J., Ritzwoller M.H. Slab portal beneath the western Aleutians // *Geology*, 2005, v. 33 (4), p. 253—256, <https://doi.org/10.1130/G20863.1>.

Marzocchi W., Bebbington M.S. Probabilistic eruption forecasting at short and long time scales // *Bull. Volcanol.*, 2012, v. 74 (8), p. 1777—1805.

Mercier D., Lowell R.P. A quantitative analysis of volcanic unrest: Mt. Spurr, Alaska, 2002—2006 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2016, v. 323, p. 97—109.

Miller T.P., McGimsey R., Richter D., Riehle J., Nye C., Yount M., Dumoulin J.A. Catalog of the historically active volcanoes of Alaska; Open File Report 98-582. Reston, VA, USA. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 1998.

Myers J.D., Marsh B.D., Frost C.D., Linton J.A. Petrologic constraints on the spatial distribution of crustal magma chambers, Atka Volcanic Center, Central Aleutian Arc // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2002, v. 143, p. 567—586, doi:10.1007/s00410-002-0356-7.

Ozerov A.Y. The evolution of high-alumina basalts of the Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia, based on microprobe analyses of mineral inclusions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2000, v. 95 (1—4), p. 65—79.

Pallister J.S., McCausl W.A., Jónsson S., Lu Z.H.M., El Hadidy S., Aburukbah A., Stewart I.C.F., Lundgren P.R., White R.A., Moufti M.R.H. Broad accommodation of rift-related extension recorded by dyke intrusion in Saudi Arabia // *Nat. Geosci.*, 2010, v. 3, p. 705—712.

Park J., Levin V., Brandon M.T., Lees J.M., Peyton V., Gordeev E., Ozerov A. A dangling slab, amplified arc volcanism, mantle flow and seismic anisotropy near the Kamchatka plate corner // Eds. S. Stein, J. Freymueller. *Plate boundary zones*. American Geophysical Union Geodynamics Series. 2002, v. 30, p. 295—324.

Peacock S.M. Thermal and petrological structure of subduction zones (overview) // *Subduction, top to bottom*. Geophysical Monograph, Series, Washington D.C., AGU, 1996, v. 96, p. 119—134.

- Peacock S.M.** Thermal structure and metamorphic evolution of subducting slabs // Inside subduction factory, Geophysical Monograph Series, Washington, D.C., AGU, 2003, v. 138, p. 7—22.
- Ponomareva V.V., Kyle P.R., Melekestsev I.V., Rinkleff P.G., Dirksen O.V., Sulerzhitsky L.D., Zaretskaia N.E., Rourke R.** The 7600 (¹⁴C) year BP Kurile Lake caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigraphy and field relationship // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2004, v. 136 (3—4), p. 199—222.
- Raible C.C., Brönnimann S., Auchmann R., Brohan P., Frölicher T.L., Graf H.F., Jones P., Luterbacher J., Muthers S., Neukom R., Robock A.** Tambora 1815 as a test case for high impact volcanic eruptions: Earth system effects // *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, 2016, v. 7 (4), p. 569—589.
- Seats K.J., Lawrence J.F.** The seismic structure beneath the Yellowstone Volcano Field from ambient seismic noise // *Geophys. Res. Lett.*, 2014, v. 41 (23), p. 8277—8282.
- Self S.** The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions // *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*: 2006, v. 364 (1845), p. 2073—2097.
- Servicio Geológico Colombiano Informe Técnico Anual de la actividad volcánica del segmento volcánico norte de Colombia**, 2016 (in Spanish), <https://www2.sgc.gov.co/getattachment/9c650bb1-617f-4c61-a2cb-fc2197fe61c9/Informe-tecnico-anualde-2015.aspx>.
- Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.** High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise // *Science*, 2005, v. 307 (5715), p. 1615—1618.
- Shapiro N.M., Droznin D.V., Droznina S.Y., Senyukov S.L., Gusev A.A., Gordeev E.I.** Deep and shallow long-period volcanic seismicity linked by fluid-pressure transfer // *Nat. Geosci.*, 2017a, v. 10 (6), p. 442—445.
- Shapiro N.M., Sens-Schönfelder C., Lühr B., Weber M., Abkadyrov I., Gordeev E.I., Koulakov I., Jakovlev A., Kugaenkov I., Saltykov V.A.** Understanding Kamchatka's extraordinary volcano cluster // *EOS*, 2017b, v. 98 (7), p. 12—17, <https://doi.org/10.1029/2017EO071351>.
- Shapiro N.M., Sens-Schönfelder C., Lühr B., Weber M., Abkadyrov I., Koulakov I., Jakovlev A., Kugaenko Y.A., Saltykov V.** Klyuchevskoy volcanic group experiment (KISS) // Supplementary data of the passive seismological measurement, 2021, <https://doi.org/10.5880/GIPP.201505.1>.
- Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., Walter T.R., Mania R., Maccaferri F., Svirid I.Y., Belousov A.B., Belousova M.G.** The rebirth and evolution of Bezymianny volcano, Kamchatka after the 1956 sector collapse // *Commun. Earth Environ.*, 2020, v. 1 (15), doi:10.1038/s43247-020-00014-5.
- Siebert L., Simkin T., Kimberly P.** *Volcanoes of the World*. Oakland, University of California Press, 2010, 246 p.
- Sigurdsson, H.** Assessment of the atmospheric impact of volcanic eruptions. Global catastrophes in Earth history // *Geol. Soc. Am.*, 1990, v. 247, p. 99—110.
- Stern R.J.** Subduction zones // *Rev. Geophys.*, 2002, v. 40 (4), p. 1012, doi:10.1029/2001RG000108.
- Syracuse E.M., Abers G.A.** Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2006, v. 7, Q05017, doi: 10.1029/2005GC001045.
- Syracuse E.M., Abers G.A., Fischer K.M., McKenzie L., Rychert C., Protti J. M., Gonzalez V., Strauch W.** Seismic tomography and earthquake locations in the Nicaraguan and Costa Rican upper mantle // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2008, v. 9, Q07S08, doi:10.1029/2008GC001963.
- Takei Y.** Effect of pore geometry on VP/VS: From equilibrium geometry to crack // *J. Geophys. Res.*, 2002, v. 107 (B2), 2043, <https://doi.org/10.1029/2001JB000522>.
- Thelen W., West M., Senyukov S.** Seismic characterization of the fall 2007 eruptive sequence at Bezymianny Volcano, Russia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2010, v. 194 (4), p. 201—213.
- Ulmer P.** Partial melting in the mantle wedge—the role of H₂O in the genesis of mantle-derived «arc-related» magmas // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2001, v. 127(1—4), p. 215—232.
- Van Keken P.E., Kiefer B., Peacock S.M.** High-resolution models of subduction zones: Implications for mineral dehydration reactions and the transport of water into the deep mantle // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2002, v. 3 (10), 1056, doi: 10.1029/2001GC000256.
- Vargas C.A., Koulakov I., Jaupart C., Gladkov V., Gomez E., El Khrepy S., Al-Arifi N.** Breathing of the Nevado del Ruiz volcano reservoir, Colombia, inferred from repeated seismic tomography // *Sci. Rep.*, 2017, v. 7, 46094; doi: 10.1038/srep46094.
- Volynets O.N., Ponomareva V.V., Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Chen C.H.** Holocene eruptive history of Ksudach volcanic massif, South Kamchatka: evolution of a large magmatic chamber // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1999, v. 91(1), p. 23—42.
- Winter J.** *An introduction to igneous and metamorphic petrology*. New Jersey, Prentice Hall, 2001, 697 p.

Yogodzinski G.M., Lees J.M., Churikova T.G., Dorendorf F., Wöerner G., Volynets O.N. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges // *Nature*, 2001, v. 409, p. 500—504.

Zandomenghi D., Barclay A., Almendros J., Ibañez Godoy J.M., Wilcock W.S., Ben-Zvi T. Crustal structure of Deception Island volcano from *P* wave seismic tomography: Tectonic and volcanic implications // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2009, v. 114 (B6).

Zhao D. Multiscale seismic tomography. Springer, 2015, 304 p., doi:10.1007/978-4-431-55360-1.

*Поступила в редакцию 9 мая 2021 г.,
принята в печать 23 августа 2021 г.*