

УДК 550.34+551.21

СТРУКТУРА КРАЕВЫХ ОБЛАСТЕЙ МАЛКО-ПЕТРОПАВЛОВСКОЙ РАЗЛОМНОЙ ЗОНЫ ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОЙ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ И МЕХАНИЗМАМ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Н.А. Бушенкова, О.А. Кучай

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

Настоящее исследование продолжает работы по новой сейсмотомографической структуре надсубдукционного комплекса центральной зоны Камчатки, построенной по данным плотных локальных сетей станций 2018—2020 гг., и посвящено анализу скоростной структуры в пограничных областях и окружении Малко-Петропавловской разломной зоны. В сейсмотомографической модели задействовано около 98 тыс. времен пробега P - и S -волн от 2963 локальных землетрясений за период времени с августа 2018 по июль 2020 г. Разрешающая способность этой модели дает возможность проследить системы питания вулканов Восточного вулканического пояса и Южной Камчатки до поверхности слэба, а также позволяет выявить субвертикальные структурные нарушения. Для построения ориентаций осей сжатия и растяжения использованы механизмы очагов 41 землетрясения с $M \geq 4.5$ из каталога Международного сейсмологического центра за период 1979—2019 гг. Вдоль Малко-Петропавловской зоны поперечных дислокаций практически на всю глубину модели в геометрии и взаимном расположении скоростных аномалий отчетливо прослеживается Авачинский трансформный разлом. При сопоставлении сейсмических аномалий с картой распределения направленностей осей сжатия и растяжения по механизмам очагов землетрясений наблюдается явная корреляция смены знака аномалий скорости вдоль Авачинского трансформного разлома с изменением направленностей осей практически на 180° . Вдоль западной границы Малко-Петропавловской зоны под южной оконечностью Срединного хребта обнаружена близповерхностная низкоскоростная аномалия, прослеживающаяся до глубин 25—35 км. Эта аномалия, вероятно, маркирует границу зоны сочленения осей древнего вулканического фронта по Срединному хребту и современного активного Восточного вулканического пояса, образовавшегося в результате аккреции Кроноцкой палеодуги. Западнее южной оконечности Срединного хребта выявлена еще одна низкоскоростная аномалия, прослеживающаяся до глубины ~150 км и имеющая контрастную южную границу, которая подтверждается распределением направленностей осей сжатия и растяжения по механизмам очагов землетрясений и, по всей видимости, маркирует южную границу Западно-Камчатского блока.

Малко-Петропавловская зона, локальная сейсмическая томография, механизмы очагов землетрясений, Камчатка

THE BOUNDARY AREAS STRUCTURE OF THE MALKO-PETROPAVLOVSK FRACTURE ZONE FROM LOCAL SEISMIC TOMOGRAPHY AND EARTHQUAKE FOCI MECHANISMS DATA

N.A. Bushenkova, O.A. Kuchay

This study continues analysis of the new seismic tomographic structure of the suprasubduction complex of the central zone of Kamchatka, obtained from the dense local networks data of 2018–2020, and is devoted to the analysis of the velocity structure in the Malko-Petropavlovsk fracture zone margins and around them. The seismic tomographic model involves about 98,000 P - and S -wave travel times from 2963 local earthquakes from August 2018 to July 2020. The resolution of this model makes it possible to trace the feeding systems of volcanoes of the South Kamchatka and East Volcanic Belt to the slab surface, as well as to identify subvertical structural faults. To construct the orientations of the compression and extension axes we used the foci mechanisms of 41 earthquakes with $M \geq 4.5$ from the catalog of the International Seismological Center for the period 1979–2019. Along the Malko-Petropavlovsk fracture zone, the Avacha transform fault is clearly traced in the geometry and mutual arrangement of velocity anomalies almost throughout the entire depth of the model. Comparison of seismic anomalies with a map of the directions of the compression and extension axes distribution from the earthquake foci mechanisms showed the correlation between the change in the value of the velocity anomalies along the Avacha transform fault with the axes direction change by almost 180° . A near-surface low-velocity anomaly to the depths of 25–35 km was found along the western border of the Malko-Petropavlovsk zone under the southern tip of the Sredinny Ridge. This anomaly probably marks the axes junction zone boundary of the ancient volcanic front along the Sredinny Ridge and the modern active Eastern Volcanic Belt, which formed as a result of the Kronotsky paleoarc accretion. To the west from the Sredinny Ridge southern tip, another low-velocity anomaly was revealed. This anomaly was traced to a depth of ~150 km, has a contrasting

southern boundary confirmed by the distribution of the compression and extension axes directions by the earthquake foci mechanisms and apparently marks the southern boundary of the West Kamchatka block.

Local seismic tomography, earthquake foci mechanisms, Malko-Petropavlovsk zone, Kamchatka

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмические исследования коровых и мантийных структур позволяют получить информацию, необходимую для построения геодинамических моделей и для выявления надежных критериев оценки сейсмического и вулканического риска конкретных регионов. При этом для достижения максимально точных оценок сейсмического риска важно расширять территорию исследования за счет окружающих локальный район территорий. Более ранние исследования глубинного строения центральных районов Камчатки с использованием разных методик весьма разобщены и имеют слабую детальность, поскольку главной проблемой была низкая плотность и неравномерность расположения сейсмических станций. Настоящее исследование продолжает наши работы по построению новой сейсмотомографической структуры надсубдукционного комплекса центральной зоны Камчатки [Бушенкова и др., 2022; Bushenkova et al., 2022] по данным новейших плотных локальных сетей станций (постоянных станций КФ ФИЦ ЕГС РАН и временных сетей). Новая детальная сейсмотомографическая модель центральной зоны Камчатки охватывает территорию от вулканов Горелый и Мутновский на юге до вулканов Бакенинг и Заварицкий (проявляли активность в голоцене) на севере, включает Авачинскую группу вулканов, вулканы Вилучинский и Жупановский, кальдеру Карымшина, моногенные проявления вулканизма в виде шлаковых конусов и экструзивных куполов и др. В центре района исследований располагается Малко-Петропавловская разломная зона (МПЗ), по которой, как предполагается, проходит граница между двумя принципиально разными режимами субдукции на севере и юге Камчатки.

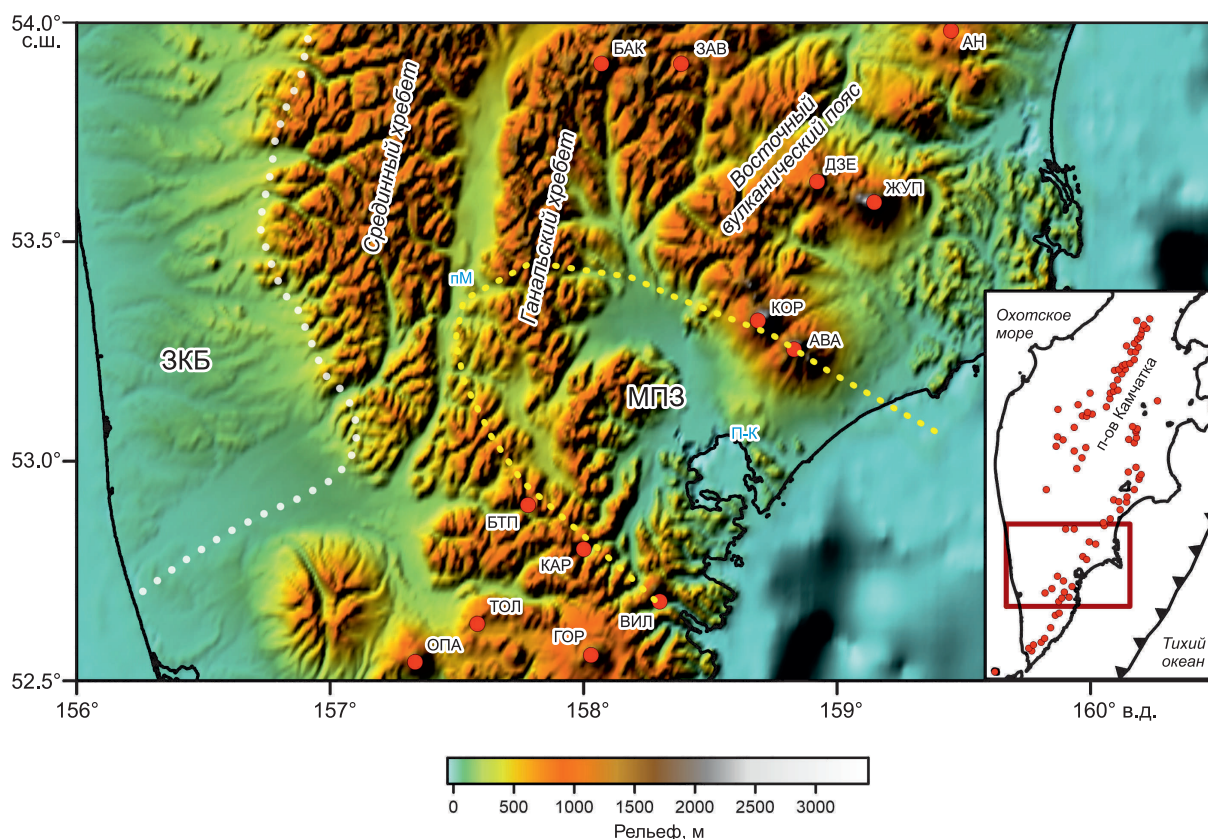


Рис. 1. Район исследования.

Красными точками показаны вулканические комплексы: Бакенинг (БАК), Заварицкого (ЗАВ), Академии Наук (АН), Дзензур (ДЗЕ), Жупановский (ЖУП), Корякский (КОР), Авачинский (АВА), Вилучинский (ВИЛ), Горелый (ГОР), Опа (ОПА), Карымшина (КАР), Толмачевский Дол (ТОЛ) и Большеебанное термальное поле (БТП). Желтым пунктиром отмечена Малко-Петропавловская зона (МПЗ), белым пунктиром — Западно-Камчатский блок (ЗКБ). Аббревиатуры синего цвета: П-К — г. Петропавловск-Камчатский, пМ — пос. Малки. На врезке прямоугольником отмечено расположение района на территории Камчатки.

Разрозненные и разномасштабные результаты исследований предыдущих лет на Камчатке выявили морфологическое изменение рельефа и распространения вулканов на переходе между центральной и южной частями Камчатки, которое, примерно, соответствует области МПЗ на широте $\sim 53^\circ$ С [Авдейко и др., 2006]. Сама МПЗ представляет собой грабенообразную перпендикулярную субдукционной дуге структуру с относительно низкой сейсмической активностью по сравнению с большинством других частей восточной окраины Камчатки [Государственная..., 2000; Шеймович, Сидоров, 2000; Гордеев и др., 2006]. Предполагается, что МПЗ расположена на продолжении Авачинского трансформного разлома океанической Тихоокеанской плиты, выделенного на основании анализа магнитных аномалий [Андреев, 1993]. Этот глубинный трансформный разлом рассматривается как граница между разновозрастными сегментами Тихоокеанского слэба. Севернее разлома возраст тихоокеанской плиты, погружающейся под Восточный вулканический пояс, составляет 87—92 млн лет, тогда как под Южной Камчаткой плита имеет возраст 100—105 млн лет [Gorbatov et al., 1997; Syracuse, Abers, 2006]. Следует отметить, что южнее МПЗ интенсивная плитная сейсмичность наблюдается вплоть до ~ 600 км, тогда как севернее МПЗ глубина зон Бенъоффа не превышает 300 км с постепенным уменьшением далее в северные широты [Gorbatov et al., 1997; Lander, Shapiro, 2007; Levina et al., 2013; Мороз, Гонтюкова, 2018; Гордеев, Бергаль-Кувиас, 2022]. Долгоживущий вулканический пояс на Южной Камчатке формировался с позднего олигоцена [Авдейко и др., 2006]. Субдукционный сегмент к северу от МПЗ имел более сложную историю — претерпел аккрецию Кроноцкой палеодуги в миоцене—плиоцене и перескок (омоложение) зоны субдукции с формированием разновозрастных вулканических поясов Срединного хребта и Восточного вулканического пояса на Северной Камчатке [Авдейко и др., 2003; Lander, Shapiro, 2007; Авдейко, Бергаль-Кувиас, 2015; Добрецов и др., 2017].

По результатам сейсмотомографического исследования с использованием данных временной сети 2019—2020 гг. с введенными ограничениями по эпицентральному расстоянию опубликована в JVGR отдельная статья [Bushenkova et al., 2023]. Поскольку в ней для получения максимально детальных изображений внутренних областей надсубдукционного комплекса МПЗ и систем питания ближайших вулканических групп при отборе данных были введены значительные ограничения, то область получения результатов в таком исследовании меньше, чем мы получаем по всем имеющимся в нашем распоряжении данным 2018—2020 гг. И хотя со снятием ограничений несколько падает детальность восстанавливаемых сейсмотомографическим методом структур в центральной части исследуемого района, появляется возможность изучить структуры краевых зон и окружения МПЗ, особенно соседствующих с ней западных территорий.

В настоящем исследовании впервые выполнено сопоставление полученной с использованием всего имеющегося набора плотных локальных данных 2018—2020 гг. структуры аномалий скорости района МПЗ и окружающих ее территорий (рис. 1) с распределением осей сжатия и растяжения по механизмам очагов землетрясений с магнитудой $M \geq 4.5$, представленным в доступных каталогах за период 1979—2019 гг. Сопоставление выполнено для выявления и уточнения геометрии значимых глубинных структурных нарушений в пределах изучаемой области, главным образом Авачинского трансформного разлома.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В сейсмотомографическом исследовании задействовано почти 98 000 времен пробега P - и S -волн от 2963 локальных землетрясений за период с августа 2018 по июль 2020 г., зарегистрированных постоянными станциями КФ ФИЦ ЕГС РАН, 33 временными станциями сети 2019—2020 гг. в Центральной Камчатке и 18 станциями в рамках полевого эксперимента 2018—2019 гг. Плотность покрытия исследуемой территории имеющимися данными представлена на рис. 2.

Релокация источников, подбор параметров инверсии и расчет модели выполнены в соответствии с методикой и программным кодом локальной сейсмотомографии LOTOS [Kulakov, 2009]. Алгоритм находится в открытом доступе и активно используется многими исследователями во всем мире, в том числе для районов Камчатки (например, [Bushenkova et al., 2019; Кулаков, 2022] и др.). Алгоритм основан на использовании времен пробега продольных и поперечных волн от местных землетрясений, зарегистрированных станциями в исследуемом регионе. Этот алгоритм позволяет изучать структуру земных недр в масштабах от нескольких километров до первых сотен километров, причем глубинность исследований обычно ограничивается распределением землетрясений и размером области.

Проведенный комплекс синтетических и реалистичных тестов показал, что полученная по новым данным 2018—2020 гг. томографическая модель позволяет уверенно выделять в центральной части модели структуры с характерным размером от 30 км, а в краевых областях — структуры с размером от 50 км на глубинах вплоть до 100 км. Примеры тестов «шахматная доска» представлены на рис. 3. Таким образом, мы имеем возможность проследить зоны выделения флюидов и расплавов из слэба, их миграцию в мантийном клине и коре, и выявить значимые глубинные структурные нарушения (разломы).

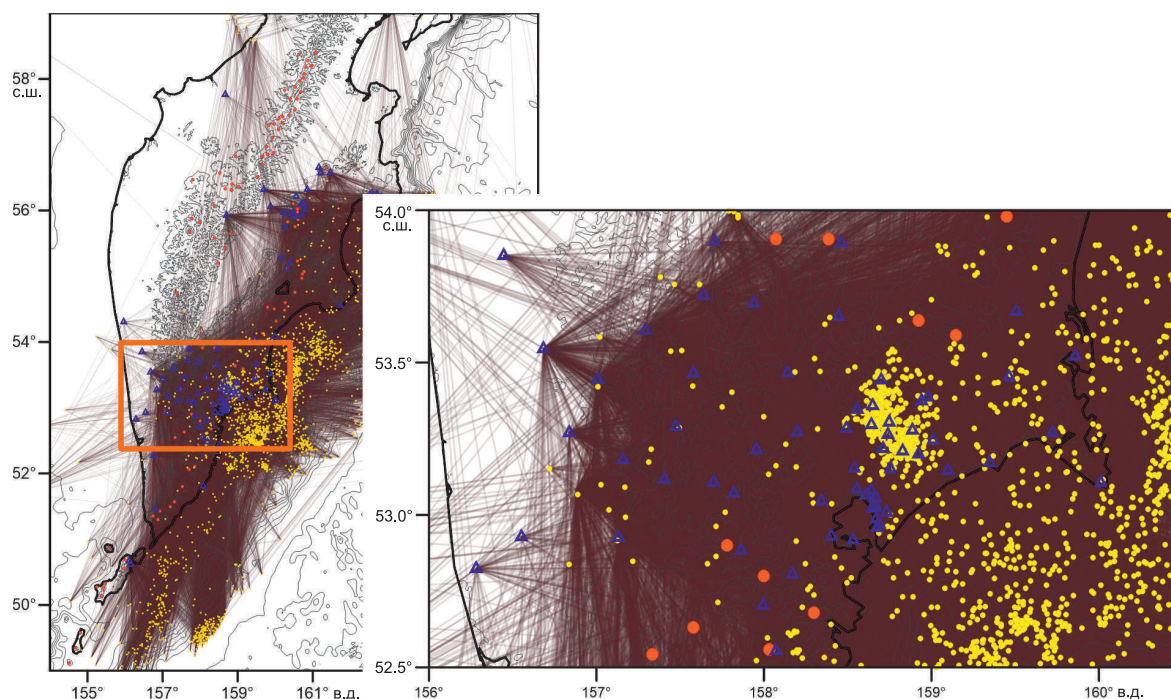


Рис. 2. Распределение и плотность задействованных в изучаемом районе данных.

Синими треугольниками показаны сейсмические станции, желтыми кружками — землетрясения, темно-коричневыми тонкими линиями — лучи для используемых в исследовании времен пробега P - и S -волн. На карте слева оранжевым прямоугольником обозначена область исследования, вынесенная на карту справа. Красные кружки — вулканические постройки.

Для построения ориентаций осей сжатия и растяжения (проекции, на нижнее полупространство, единичных векторов осей сжатия и растяжения по механизмам очагов землетрясений) были привлечены механизмы очагов 41 землетрясения из каталога Международного сейсмологического центра (www.isc.ac.uk) за период 1979—2019 гг. с $M \geq 4.5$. Для наглядности отображения проекции осей показаны стрелками. Направление стрелки указывает направление погружения оси, а длина зависит от угла оси с горизонтальной плоскостью (так, стрелки минимальной длины, напоминающие треугольник, соответствуют близвертикальному положению оси, см. ниже).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 4—6 представлены горизонтальные (на глубине 40 км) и различные вертикальные сечения полученной по данным 2018—2020 гг. структуры аномалий сейсмических скоростей v_p и v_s в пределах надсубдукционного комплекса МПЗ и прилегающих территорий Камчатки от западного до восточного побережья. Аномалии повышенных скоростей на рисунках отражены оттенками синего и указывают на наличие областей относительно холодного и консолидированного вещества, тогда как аномалии пониженных скоростей показаны оттенками красного и маркируют области разуплотнения, причинами которого могут быть тектонические нарушения, повышенные температуры, присутствие флюида и/или расплава (в случае пониженных v_s без явного понижения v_p) и т.д.

Аномалии v_p на рис. 7 сопоставлены с распределением направленностей осей сжатия и растяжения по механизмам очагов землетрясений. На этом сопоставлении можно видеть, что оси сжатия имеют преимущественно ЮВ-СЗ простирание. Погружение осей сжатия между 157.7° и 159.5° в.д. осуществляется в СЗ направлении. В ЮЗ и ЮВ сегментах района оси сжатия погружаются к ЮВ, меняя направление погружения на $\sim 180^\circ$. Простирание осей растяжения менее упорядоченное и меняется от СЗ до субмеридионального, принимая на юго-востоке близвертикальное положение.

Можно видеть (см. рис. 4, 5), что центральная часть Малко-Петропавловской зоны выделяется контрастной низкоскоростной аномалией в верхней части модели, что особенно хорошо проявляется в аномалиях v_p . В западной части МПЗ в верхней коровой части модели высокоскоростной аномалией проявляется Ганальский хребет, а на восточном продолжении МПЗ, практически на всю глубину модели, в геометрии и взаимном расположении аномалий, главным образом отрицательных, отчетливо прослеживается Авачинский трансформный разлом, примерное положение которого показано серой штри-

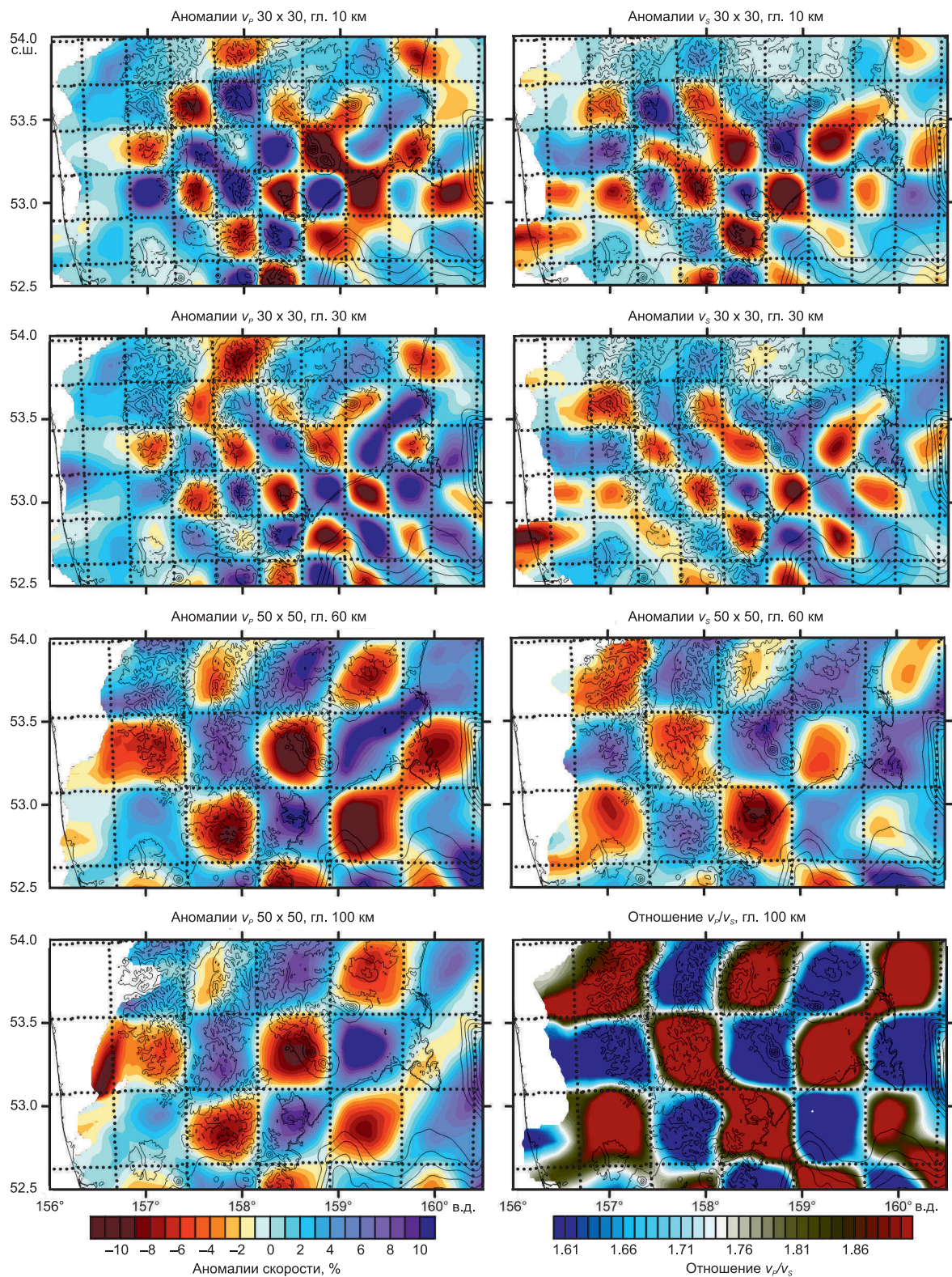


Рис. 3. Синтетические тесты «шахматная доска» с характерным размером аномалий 30×30 и 50×50 км (заданы аномалии $\pm 7\%$),

представлены сечения восстановленных синтетических аномалий скоростей P - и S -волн на разных глубинах, в нижнем правом углу — срез синтетической модели для соотношения v_p/v_s на глубине 100 км. Пунктиром показана геометрия исходных синтетических моделей.

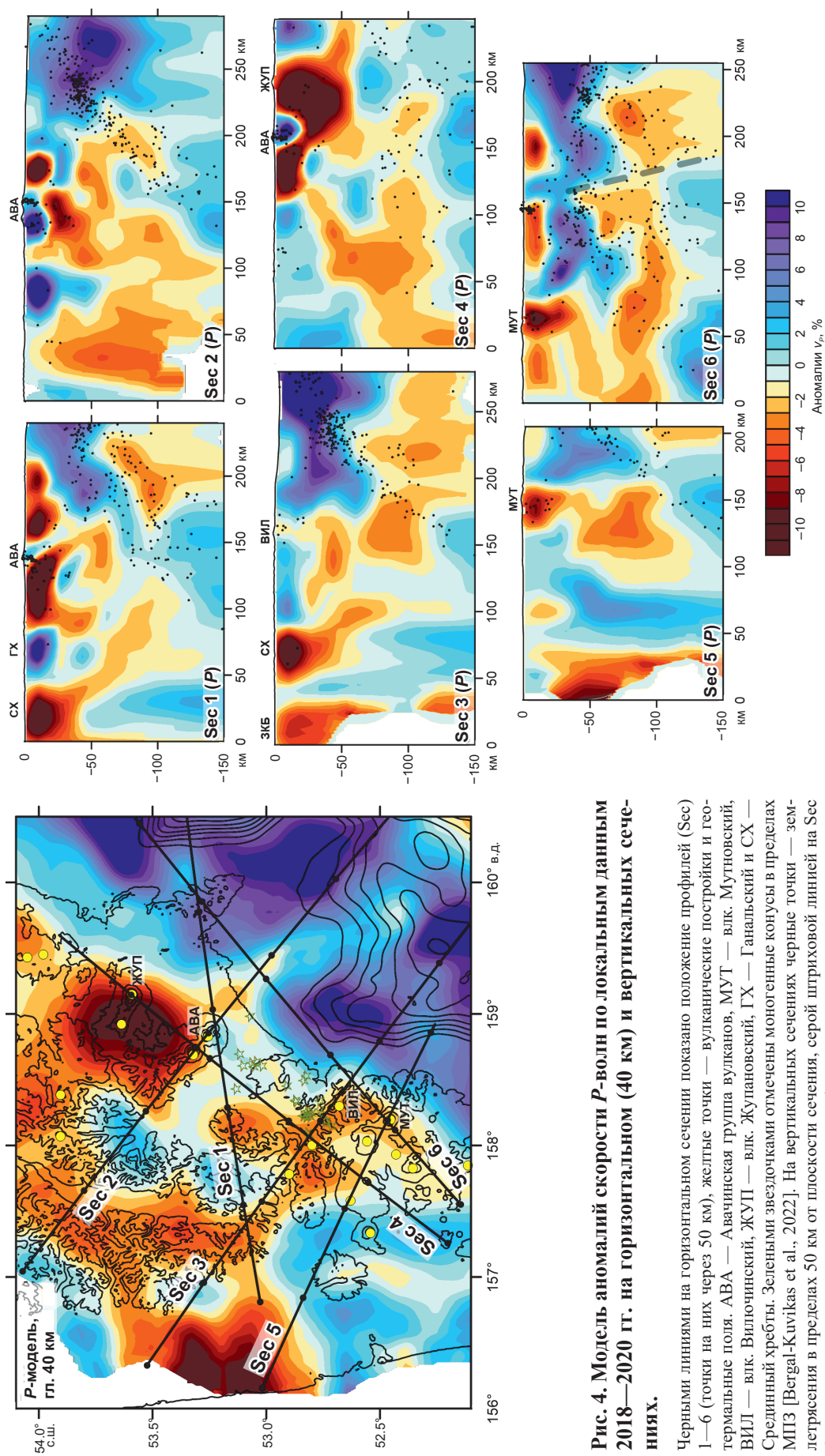


Рис. 4. Модель аномалий скорости P -волн по локальным данным 2018—2020 гг. на горизонтальном (40 км) и вертикальных сечениях.

Черными линиями на горизонтальном сечении показано положение профилей (Sec) 1—6 (точки на них через 50 км), желтые точки — вулканические постройки и геотермальные поля. АВА — Авачинская группа вулканов, МУТ — влк. Мутновский, ВПЛ — влк. Виллюнский, ЖУП — влк. Жупановский, ГХ — Ганальский и СХ — Срединный хребты. Зеленными звездочками отмечены моногенные конусы в пределах МПЗ [Bergal-Kivikas et al., 2022]. На вертикальных сечениях черные точки — землетрясения в пределах 50 км от плоскости сечения, серой штриховой линией на Sec 6 — вероятное положение Авачинского трансформного разлома.

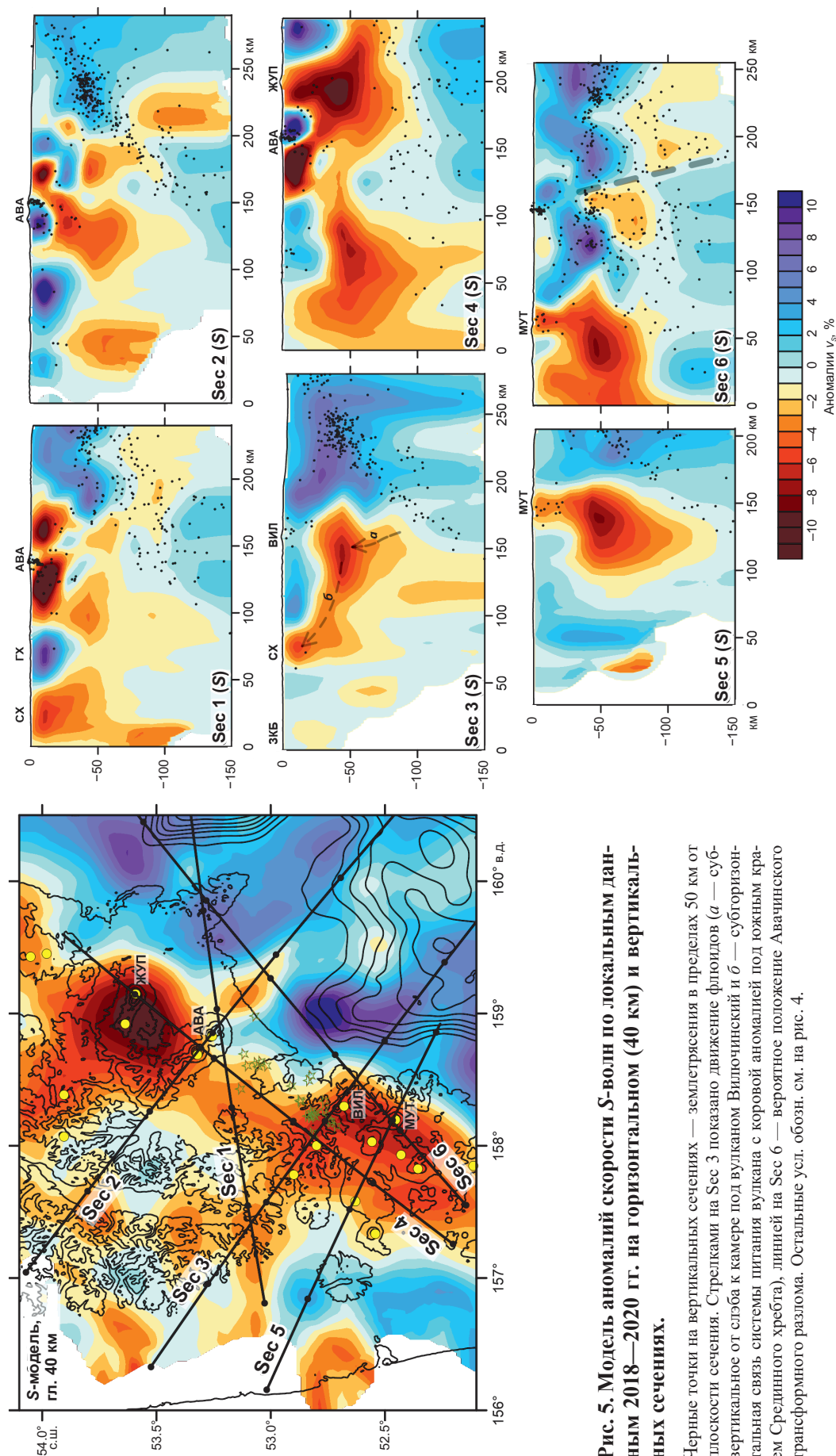


Рис. 5. Модель аномалий скорости S -волн по локальным данным 2018—2020 гг. на горизонтальном (40 км) и вертикальных сечениях.

Черные точки на вертикальных сечениях — землетрясения в пределах 50 км от плоскости сечения. Стрелками на Sec 3 показано движение флюидов (a — суб-вертикальное от сблза к камере под вулканом Вилочинский и b — субгоризонтальная связь системы питания вулкана с коровой аномалией под южным краем Срединного хребта), линией на Sec 6 — вероятное положение Авачинского трансформного разлома. Остальные усл. обозн. см. на рис. 4.

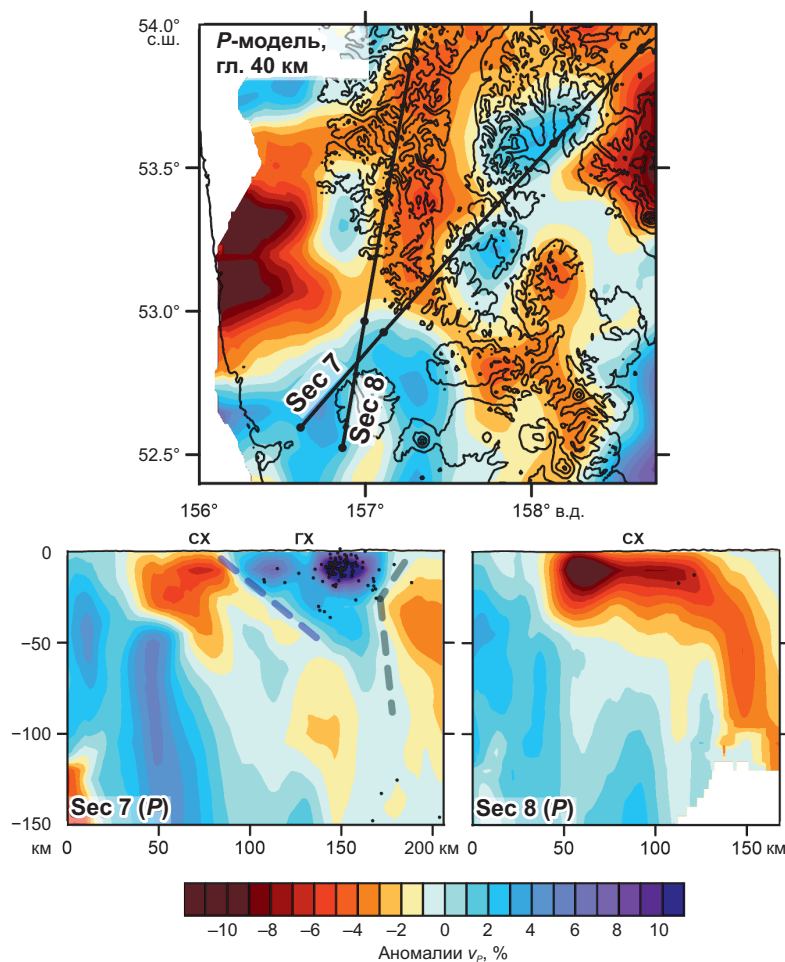


Рис. 6. Западная часть модели аномалий скорости P -волн по локальным данным 2018—2020 гг. на горизонтальном и двух вертикальных сечениях.

Черными линиями на горизонтальном сечении глубиной 40 км показано расположение профилей Sec 7 и 8 (точки на них через 50 км). На вертикальных сечениях черные точки — землетрясения в пределах 50 км от плоскости сечения, ГХ — Ганальский и СХ — Срединный хребты, пунктирными линиями на Sec 7 показано вероятное положение разломов, огибающих грабеноподобную структуру МПЗ, серой штриховой линией показан разлом, субвертикальную часть которого можно соотнести с Авачинским трансформным разломом.

хойвой линией на вертикальном сечении Sec 6. При сопоставлении сейсмических аномалий с картой распределения направленных осей сжатия и растяжения, полученных по механизмам очагов землетрясений, наблюдается явная корреляция смены знака аномалий скорости вдоль Авачинского трансформного разлома с разворотом направлений осей практически на 180° .

На профиле Sec 7 (рис. 6), пересекающем Ганальский хребет, проявленный высокоскоростной аномалией, четко выделяется грабеноподобная структура западной оконечности МПЗ, вероятное положение разломов показано штрихами, причем серой штриховой линией отмечен разлом, субвертикальная часть которого находится на продолжении оси Авачинского трансформного разлома и, вероятно, может быть проявлением влияния погружения слэба с разломом под эту территорию еще до омоложения зоны субдукции. А перескок зоны субдукции под влиянием аккреции Кроноцкой дуги произошел по зеркалу скольжения этого трансформного разлома. Такое перемещение омолодило субдукцию к северу от Авачинского трансформного разлома, вследствие чего мы сейчас наблюдаем менее глубокую сейсмофокальную зону (слэб) к северу от этого трансформала и, наоборот, более глубокую к югу от него.

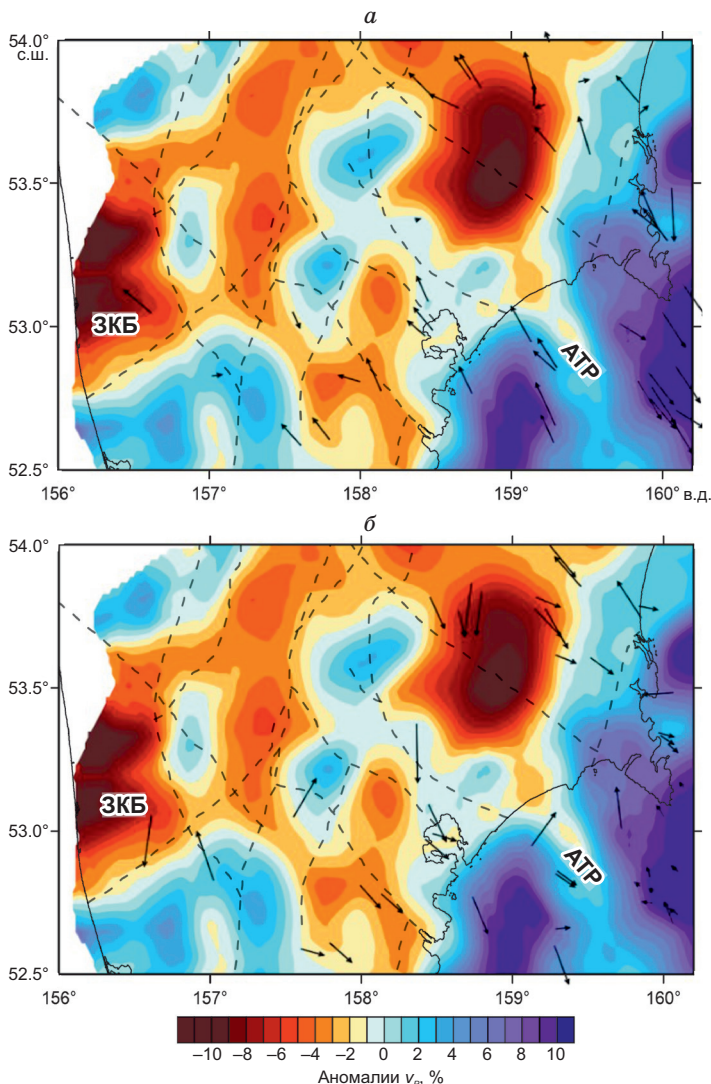
К западу от МПЗ наблюдаются две контрастные низкоскоростные аномалии. Ближайшая из них к МПЗ, западнее Ганальского хребта, обнаруживается в районе пос. Малки (см. рис. 1), в окрестностях которого присутствуют как горячие источники, расположенные в направлении Большеебанного геотермального поля, так и холодные углекислые минеральные источники, непосредственно у подножия Срединного хребта (см. рис. 1 и горизонтальное сечение рис. 4). На рисунках 4 и 5 эта контрастная зона

Рис. 7. Сопоставление распределения аномалий скорости P -волн на глубине 40 км с ориентаций осей сжатия (а) и растяжения (б) по механизмам очагов землетрясений.

Штриховые линии — приповерхностные тектонические нарушения, по [Литвинов и др., 1999], аббревиатуры: ЗКБ — Западно-Камчатский блок, АТР — Авачинский трансформный разлом (счет слэб, вертикальное положение см. на Sec 6 на рис. 4, 5).

пониженных скоростей проявлена непосредственно на пересечении профилей Sec 1 и Sec 3. Судя по ее проявлению на пр. Sec 3 (см. рис. 4) и пр. Sec 8 (см. рис. 6), она прослеживается до глубин 25—35 км (т. е. в пределах коры), связи с мантийными глубинами непосредственно под собой не имеет и явно маркирует южную оконечность Срединного хребта. Вдоль хребта на север аномалия имеет менее контрастное продолжение, которое на краю области исследования (выше 53.5° с.ш.), в свою очередь, уже имеет мантийные корни до глубин ~100 км (см. Sec 8, рис. 6). Таким образом, аномалия пониженных скоростей в районе пос. Малки, вероятно, маркирует тектонически разуплотненную кору границы зоны «разворота» вулканического фронта вследствие перескока субдукции [Авдейко и др., 2003], т. е. зоны сочленения древнего вулканического пояса (по Срединному хребту) и современного активного Восточного вулканического пояса, образовавшегося в результате аккреции Кроноцкой палеодуги (коллизии Кроноцкого террейна) и отрыва слэба Командорско-Кроноцкой микроплиты в миоцене—плиоцене [Ханчук, Гребенников, 2021]. Вдоль южного края МПЗ в распределении аномалий скорости S -волн явно прослеживается субгоризонтальная связь отрицательной аномалии в районе пос. Малки с системой питания влк. Вилучинский (см. Sec 3, рис. 5). Стрелками показано субвертикальное перемещение флюидов от слэба к системе питания вулкана (к скоплению разогретого флюидами материала на глубинах 30—55 км под вулканом, которое можно интерпретировать как магматическую камеру) и далее субгоризонтальное — к южной оконечности Срединного хребта. Причем непосредственно над этой субгоризонтальной ветвью находятся кальдера палеовулкана Карымшина и Большебанное геотермальное поле (КАР и БТП, соответственно, см. рис.1 и положение пр. Sec 3 на горизонтальном сечении рис. 5). На срезах построенной модели мы не видим подводящих каналов питания древней системы Карымшина, но поднимающаяся здесь до глубин 30—25 км субгоризонтальная ветвь разогретого мантийными флюидами вещества, вероятно, и является причиной активности источников Большебанного геотермального поля.

Самая западная низкоскоростная аномалия, протянувшаяся до побережья Охотского моря (в пределах 156—157° в.д.), маркирует, по всей вероятности, южную оконечность так называемого Западно-Камчатского блока/микроконтинента [Bogdanov, Chekhovich, 2002; Соловьев, 2005; Вержбицкий, Соловьев, 2009] и прослеживается главным образом в аномалиях v_p почти на всю глубину модели (Sec 3, см. рис. 4). Южная граница этой аномалии практически совпадает с тектоническим нарушением (разломом), погребенным под молодыми образованиями [Литвинов и др., 1999; Апрельков, Попруженко, 2009]. Кроме того, смена знака аномалий скорости вдоль этой границы коррелирует с изменением направленности осей сжатия и растяжения по механизмам очагов землетрясений по разные стороны границы (см. рис. 7). Глубинные корни этой аномалии, вероятно, объясняются подъемом астеносферного



материала в тыловой зоне субдукции (апвеллинг, промоделирован в работе [Perchuk et al., 2019]), причем по шву приращения ЗКБ, как по наиболее реологически ослабленной зоне.

Общие черты строения систем питания вулканов в пределах исследуемой области согласуются в сопоставимых масштабах с предыдущими исследованиями и с детализированной моделью в нашем исследовании по данным 2019—2020 гг. с введенными ограничениями на эпицентральные расстояния [Bushenkova et al., 2023]. Вулканы Авачинской группы, расположенные в северном-восточном контуре МПЗ, кроме собственных небольших приповерхностных магматических камер [Bushenkova et al., 2019], имеют общий источник питания на глубине более 50 км, который, в свою очередь, прослеживается от поверхности слэба (см. пр. Sec 1, 2 на рис. 4, 5). Питание вулкана Вилучинский, как уже сказано выше, идет через промежуточную крупную магматическую камеру, расположенную на глубине 30—55 км, которая, в свою очередь, подпитывается из канала, берущего свое начало от границы слэба на глубине более 70 км (см. пр. Sec 3 на рис. 4, 5). Систему питания комплекса вулканов Горелый и Мутновский можно проследить вплоть до границы слэба на глубине более 100 км (Sec 5 и 6, см. рис. 4, 5).

Расположенные в восточной части МПЗ многочисленные голоценовые моногенные вулканические шлаковые конусы, отмеченные зелеными звездочками на рис. 4 и 5, можно соотнести с восточным краем низкоскоростной аномалии S -волн на глубине 40 км (см. рис. 5), что позволяет говорить о мантийной глубине магматических камер вероятных источников голоценового моногенного вулканизма. Что не противоречит выводам исследования [Bergal-Kuvikas et al., 2022], выполненным на основе анализа изотопных данных и вариаций микроэлементов, о том, что возможным источником магмогенеза в данном случае является декомпрессионное плавление на границах сегментов Авачинского трансформного разлома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что граница между областями с различным характером субдукции вытянута вдоль Малко-Петропавловской зоны и фактически совпадает с продолжением Авачинского трансформного разлома.

На восточном крае МПЗ, практически на всю глубину модели, в геометрии и взаимном расположении v_p и v_s аномалий, главным образом отрицательных, отчетливо прослеживается Авачинский трансформный разлом. При сопоставлении сейсмических аномалий с картой распределения проекций осей сжатия и растяжения по механизмам очагов землетрясений наблюдается явная корреляция смены знака аномалий скорости вдоль Авачинского трансформного разлома с изменением направленностей осей, почти на 180° .

Самая западная отрицательная аномалия за пределами МПЗ маркирует южную оконечность так называемого Западно-Камчатского блока/микроконтинента и прослеживается практически на всю глубину модели. Южная граница этой аномалии практически совпадает с тектоническим нарушением (разломом), погребенным под молодыми образованиями [Литвинов и др., 1999; Апрельков, Попруженко, 2009].

Кроме того, как и в модели с улучшенной детализацией в центральной части района, в сейсмотомографической модели по всему набору данных 2018—2020 гг. без ограничения эпицентральных расстояний наблюдаются следующие особенности. Аномалия в районе пос. Малки маркирует южную оконечность Срединного хребта, вероятно, кора в этой области претерпела множественные деформации вследствие омоложения (перескока оси) субдукции [Авдейко и др., 2003], вызванного аккрецией Кроноцкой палеодуги. Системы питания вулканов прослеживаются вплоть до поверхности Тихоокеанского слэба. Расположение моногенных вулканических шлаковых конусов в восточной части МПЗ [Bergal-Kuvikas et al., 2022] явно соотносится с восточным краем низкоскоростной аномалии S -волн на глубине 40 км, что позволяет говорить о мантийной глубине магматических камер — вероятных источников голоценового моногенного вулканизма на этой территории.

Авторы благодарны за предоставленные необходимые для сейсмотомографического моделирования исходные данные коллегам из ИНГГ СО РАН, КФ ЕГС РАН и ИВиС ДВО РАН, осуществившим эксперименты по установке временных сейсмологических сетей (в 2018—2020 гг.) и выполнившим пикирование сейсмограмм (до 2021 г.).

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-27-00215 (<https://rscf.ru/project/22-27-00215>).

ЛИТЕРАТУРА

Авдейко Г.П., Бергаль-Кувикас О.В. Геодинамические условия образования адакитов и Nb-обогащенных базальтов (NEAB) на Камчатке // Вулканология и сейсмология, 2015, № 5, с. 1—13.

Авдейко Г.П., Савельев Д.П., Попруженко С.В., Палуева А.А. Принцип актуализма: критерии для палеотектонических реконструкций на примере Курило-Камчатского региона // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2003, № 1, с. 32—59.

Авдейко Г.П., Палуева А.А., Хлебородова О.А. Геодинамические условия вулканизма и магмообразования Курило-Камчатской островодужной системы // *Петрология*, 2006, т. 14, № 3, с. 248—265.

Андреев А.А. Трансформные разломы земной коры северо-запада Тихого океана // *Тихоокеанская геология*, 1993, № 3, с. 11—20.

Апрелков С.Е., Попруженко С.В. Пенжинско-Западно-Камчатская складчатая зона и Укэляйт срединный блок в структуре Корякского нагорья и Камчатки // *Тихоокеанская геология*, 2009, т. 28, № 4, с. 90—104.

Бушенкова Н.А., Бергаль-Кувикас О.В., Гордеев Е.И., Чебров Д.В., Кулаков И.Ю., Абкадыров И.Ф., Яковлев А.В., Ступина Т.А., Новгородова А.М., Дрознина С.Я. Структура надсубдукционного комплекса центральной зоны Камчатки по данным плотных сейсмологических сетей // *Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога*, 30—31 марта 2022 г. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2022, с. 95—98.

Вержбицкий В.Е., Соловьев А.В. Новые данные о кайнозойских деформациях Западной Камчатки и их значение для новейшей тектоники востока Охотоморского региона // *Океанология*, 2009, 49(4), с. 568—585.

Гордеев Е.И., Бергаль-Кувикас О.В. Строение и вулканизм зоны субдукции на Камчатке // *ДАН*, 2022, т. 502, № 2, с. 72—76.

Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И., Леонов В.Л., Чебров В.Н. Мелкофокусные землетрясения полуострова Камчатка // *Вулканология и сейсмология*, 2006, 3, с. 28—38.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Южно-Камчатская. Лист N-57-XXVII (Петропавловск-Камчатский) / Ред. Б.А. Марковский. Объяснительная записка. Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 2000, 303 с.

Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Кулаков И.Ю., Котляров А.В. Проблемы фильтрации флюидов и расплавов в зонах субдукции и общие вопросы теплофизического моделирования в геологии // *Геология и геофизика*, 2017, т. 58 (5), с. 701—722.

Кулаков И.Ю. Сейсмическая томография вулканов Камчатки // *Геология и геофизика*, 2022, т. 63 (11), с. 1455—1499, <https://doi.org/10.15372/GiG2021151>.

Литвинов А.Ф., Патока М.Г., Марковский Б.А., Фролов Ю.Ф., Коляда А.А., Поздеев А.И. Карта полезных ископаемых Камчатской области м-ба 1: 500 000 // *Тихоокеанская геология*, 1999, т. 18, № 5, с. 122—123.

Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И. О глубинном строении Южной Камчатки по геофизическим данным // *Геодинамика и тектонофизика*, 2018, т. 9, № 4, с. 1147—1161, <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0387>.

Соловьев А.В. Тектоника Западной Камчатки по данным трекового датирования и структурного анализа // *Западная Камчатка: геологическое развитие в мезозое*. М., Научный мир, 2005, с. 163—194.

Ханчук А.И., Гребенников А.В. Позднемиоцен-плиоценовая трансформная окраина Камчатки // *Тихоокеанская геология*, 2021, т. 40, № 5, с. 3—15.

Шеймович В.С., Сидоров М.Д. Строение фундамента вулканического пояса, Юго-Восточная Камчатка // *Вулканология и сейсмология*, 2000, № 5, с. 68—75.

Bergal-Kuvikas O., Bindeman I., Chugaev A., Larionova Yu., Perepelov A., Khubaeva O. Pleistocene-Holocene monogenetic volcanism at the Malko-Petropavlovsk zone of transverse dislocations on Kamchatka: geochemical features and genesis // *Pure Appl. Geophys.*, 2022, v. 179, p. 3989—4011, doi: 10.1007/s00024-022-02956-7.

Bogdanov N.A., Chekhovich V.D. On the collision between the West Kamchatka and Sea of Okhotsk Plates // *Geotectonics*, 2002, v. 36 (1), p. 63—75.

Bushenkova N., Koulakov I., Senyukov S., Gordeev E.I., Huang H.-H., El Khrepy S., Al Arifi N. 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.

Bushenkova N., Bergal-Kuvikas O., Gordeev E.I., Chebrov D., Koulakov I., Abkadyrov I., Jakovlev A., Stupina T., Novgorodova A., Droznina S. Seismotomographic structure of the central zone of Kamchatka suprasubduction complex according to the dense seismological networks data // *EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23—27 May 2022*, EGU22-3507, doi: 10.5194/egusphere-egu22-3507.

Bushenkova N., Koulakov I., Bergal-Kuvikas O., Shapiro N., Gordeev E., Chebrov D., Abkadyrov I., Jakovlev A., Stupina T., Novgorodova A., Droznina S., Huang H. Connections between arc volcanoes in Central Kamchatka and the subducting slab inferred from local earthquake seismic tomography // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2023, v. 435, 107768, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107768.

Gorbatov A., Kostoglodov V., Suárez G., Gordeev E. Seismicity and structure of the Kamchatka Subduction Zone // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 1997, v. 102 (B8), p. 17883—17898, doi: 10.1029/96JB03491.

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.

Lander A.V., Shapiro M.N. The origin of the modern Kamchatka subduction zone // *Washington DC AGU Geophys. Monograph Ser.*, 2007, v. 172, p. 57—64, doi: 10.1029/172GM05.

Levina V.I., Lander A.V., Mityushkina S.V., Chebrova A.Yu. The seismicity of the Kamchatka region: 1962–2011 // *J. Volcanol. Seismol.*, 2013, v. 7, p. 37—57, doi: 10.1134/S0742046313010053.

Perchuk A.L., Zakharov V.S., Gerya T.V., Brown M. Hotter mantle but colder subduction in the Precambrian: What are the implications? // *Precambrian Res.*, 2019, v. 330, p. 20—34, doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.023.

Syracuse E.M., Abers G.A. Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2006, v. 7 (5), doi: 10.1029/2005GC001045.