

**МАГМАТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ В МАНТИЙНОМ КЛИНЕ ПОД ВУЛКАНАМИ
КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ И ВЛК. КИЗИМЕН (Камчатка)
ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ**

И.Ю. Кулаков^{1,2}, Е.В. Кукарина^{1,2}, Е.И. Гордеев³, В.Н. Чебров⁴, В.А. Верниковский^{1,2}

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

³ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия

⁴ Камчатский филиал Геофизической службы РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия

Представлена трехмерная модель скоростей P и S сейсмических волн над погружающимся под Камчатку слэбом, полученная в результате томографической инверсии по временам прихода сейсмических волн от глубоких землетрясений в зоне субдукции. Различные тесты, выполненные в рамках исследования, показали границы пространственного разрешения модели и позволили убедиться в надежности основных структур, используемых при интерпретации. В верхних 20 км томографическая модель показывает резкие низкоскоростные аномалии, которые совпадают с распределением голоценовых вулканов Ключевской группы и Кизимена. В сейсмогенной зоне над слэбом на глубинах от 80 до 150 км мы наблюдаем крупную аномалию пониженных скоростей P - и S -волн, которая, по-видимому, связана с наличием достаточно мощной океанической коры, погружающейся вместе с субдуцирующим слэбом. Также эта аномалия может отражать процессы фазовых переходов и частичного плавления вдоль верхней границы слэба. На сейсмических разрезах в мантийном клине выделяются вертикальные и наклонные низкоскоростные структуры, связывающие аномалию над слэбом с вулканическими группами, что, вероятно, отражает пути миграции флюидов и расплавов. В случае влк. Кизимен наблюдается один вертикальный канал, соединяющий вулкан с областью трансформаций на слэбе на глубине 100 км. Под Ключевской группой в мантийном клине наблюдается множество линейных аномалий с различными наклонами, что может указывать на то, что вулканы там питаются из различных сегментов слэба. Возможно, именно это определяет разнообразие составов и режимов извержений вулканов Ключевской группы.

Вулканы, субдукция, миграция расплавов и флюидов, сейсмическая томография, Камчатка, Ключевская группа, Кизимен.

**MAGMA SOURCES IN THE MANTLE WEDGE BENEATH THE VOLCANOES
OF THE KLYUCHEVSKOY GROUP AND KIZIMEN BASED
ON SEISMIC TOMOGRAPHY MODELING**

I.Yu. Koulakov, E.V. Kukarina, E.I. Gordeev, V.N. Chebrov, and V.A. Vernikovsky

This study presents a 3D model of the P and S seismic velocities above the Kamchatkan slab obtained as a result of tomographic inversion of arrival times of body waves from deep seismicity in the subduction zone. Various tests performed have shown limitations of the spatial resolution of the model and provided arguments for the reliability of the major structures used in the interpretation. In the uppermost layer down to 20 km depth, the model reveals strong low-velocity anomalies coinciding with Holocene volcanoes of the Klyuchevskoy group and Kizimen. In the seismogenic zone at depths from 80 to 150 km, we observe a low-velocity anomaly, which probably reflects the presence of the relatively thick oceanic crust sinking together with the subducting slab. This anomaly may also represent a zone of phase transitions, melting, and release of fluids from the slab. In the cross sections, we observe vertical and inclined low-velocity anomalies connecting the slab with the volcanic groups that probably represent the paths of ascending fluids and melts, which feed the volcanoes. In the case of Kizimen, we observe a single conduit connecting the volcano with the slab transformation area at 100 km depth. Beneath the Klyuchevskoy group, we identify several linear inclined patterns having different dipping angles. This may show that the volcanoes of the group are fed from different segments of the slab and might be one of the reasons for the diversity of lava compositions in the volcanoes of the Klyuchevskoy group.

Volcanoes, subduction, migration of melts and fluids, seismic tomography, Kamchatka, Klyuchevskoy volcano group, Kizimen

ВВЕДЕНИЕ

Вулканизм в зонах субдукции имеет сложный механизм питания, включающий многоуровневую систему магматических очагов в коре и верхах мантии [Добрецов и др., 2012, 2015]. Основной источник питания вулканов в надсубдукционных зонах связан с дегидратацией погружающегося слэба, которая приводит к формированию расплавов и флюидов в гарцбургитовой мантии, контактирующей с погружающейся литосферной плитой. Судя по распределению сейсмичности в различных зонах субдукции мира, максимально интенсивные процессы фазовых переходов и плавления происходят на глубинах от 80 до 150 км [Peacock, 2001; Hacker et al., 2003]. Вместе с тем конфигурации пути подъема и накопления магматического вещества от слэба до поверхности могут оказаться весьма сложными и часто существенно отличаются в различных зонах субдукции [Добрецов и др., 2012]. В связи с тем, что большая часть наиболее катастрофических кальдерообразующих извержений, имеющих глобальное влияние на климат Земли, происходит именно над зонами субдукции, изучение их глубинных источников является актуальной задачей, которая может помочь оценить вероятность возобновления катастрофической вулканической активности.

К Камчатской зоне субдукции приурочено множество вулканических комплексов, часть из которых проявляет высокую эруптивную активность. Наличие следов крупных кальдер размерами от десятков до сотен километров говорит о высоком потенциале супервулканизма в этом регионе [Действующие вулканы..., 1991; Добрецов и др., 2012]. Для оценки потенциала катастрофических извержений необходимо детально изучать глубинные недра под вулканическими комплексами. Одним из основных методов для исследования строения коры и мантии под вулканами является сейсмическая томография. Существует множество работ по изучению разномасштабных структур коры и мантии под Камчаткой сейсмическими методами. Наиболее крупномасштабные исследования основываются на глобальных базах сейсмологических данных и позволяют проследить конфигурацию погружающейся литосферы в верхней мантии и глубже. Достаточно четкие изображения слэба под Камчаткой получены в ряде глобальных [Bijwaard et al., 1998; Grand, 2002; Zhao, 2004; Fukao, Obayashi, 2013] и региональных моделей [Gorbatov et al., 2001; Jiang et al., 2009; Кулаков и др., 2011]. В частности, в работе [Кулаков и др., 2011] удалось выявить разницу между формой слэба под Камчаткой и Южными Курилами и объяснить ее принципиально различными движущими механизмами субдукции. Вместе с тем, как отмечается в этих работах, эти региональные и глобальные модели не обеспечивают достаточное разрешение для детального изучения структур выше 100 км.

К настоящему моменту выполнен большой объем работ по изучению детальной структуры земной коры под отдельными вулканами Камчатки. Например, на основании данных перманентных сетей Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФГС) различными авторами были получены сейсмические модели под Ключевской группой вулканов [Khubunaya et al., 2007; Lees et al., 2007; Koulakov et al., 2011]. В работе [Koulakov et al., 2011] было показано, что основной магматический очаг этой системы расположен на глубине ниже 25 км, где соотношение v_p/v_s принимает аномально высокое значение 2.2. В средней и верхней коре были также выявлены зоны с аномально высоким отношением v_p/v_s , которые были связаны с наличием промежуточных магматических очагов. В работе [Koulakov et al., 2013] были приведены доказательства того, что сейсмическая структура коры в районе Ключевской группы может претерпевать существенные изменения, связанные с эруптивной активностью вулканов. Так, в периоды активизации вулканов обнаружено существенное повышение в коре среднего значения v_p/v_s , в то время как в периоды релаксации промежуточные очаги в коре исчезают. При этом положение наиболее интенсивной аномалии на глубине ниже 25 км остается неизменным во все периоды времени.

Благодаря установке временных сетей станций силами сотрудников ИНГГ СО РАН в сотрудничестве с ИВС ДВО РАН и КФГС РАН на отдельных вулканах Камчатки удалось получить важные результаты о детальном строении верхней коры. Так, по результатам экспедиции 2012—2013 года на вулканах Авачинской группы была построена сейсмическая модель до глубины 5 км, которая четко показала наличие крупной кальдеры на юго-западе от влк. Авачинский [Koulakov et al., 2014]. Этот результат согласуется с моделью, полученной на основании использования данных ГСЗ по профилю вкост влк. Авачинский [Балеста и др., 1988; Koulakov et al., 2014]. В 2013—2014 гг. была установлена сеть из 22 станций на влк. Горелый. В результате обработки записанных на ней данных построена сейсмическая модель, которая показала чрезвычайно низкое среднее значение v_p/v_s в верхних 3—5 км под поверхностью вулкана [Koulakov et al., 2015a]. Из этого сделан вывод о высоком содержании газов внутри вулкана. В 2014—2015 гг. была установлена сеть из 30 станций на влк. Толбачик. Данные этого эксперимента находятся на предварительных стадиях обработки.

Как видно из вышеприведенного обзора, при изучении недр под Камчаткой основные результаты получены на крупномасштабных (глубины от 100 до 1000 км) и мелкомасштабных (глубины до 30 км) уровнях. При этом гораздо хуже изучены среднеглубинные структуры, соответствующие участкам коры и мантии между погружающимся слэбом и поверхностью Земли. Отдельные результаты по этим интер-

валам глубин представлены в работах [Gorbatov et al., 1999], где используются данные до 1999 г. и [Низкоус и др., 2006]. Последняя модель представляется нам недостаточно устойчивой, что не позволяет получить из них полезную информацию для геодинамической интерпретации. В настоящей работе мы делаем еще одну попытку исследовать структуру мантийного клина под Камчаткой на базе использования новейшей версии томографического алгоритма LOTOS [Koulakov, 2009] и наиболее свежего набора данных, предоставленного постоянной сетью КФГС РАН. В настоящей работе уделяется большое внимание оценке пространственного разрешения, что позволяет оценить достоверность тех или иных структур, полученных в результате инверсии. Полученные сейсмические модели показывают достаточно четкие структуры, на базе которых можно выявить пути питания отдельных вулканических групп Камчатки.

ДАННЫЕ И АЛГОРИТМ

Материал для настоящего исследования базируется на каталоге региональной сейсмичности Камчатки с 1966 до 2014 г., который был предоставлен Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (КФГС РАН). Всего этот каталог включает более двух миллионов времен прихода продольных и поперечных волн. В нашей работе мы в основном концентрируемся на изучении северной группы вулканов, где имеется наибольшее количество сейсмических станций, распределенных на достаточно большой территории (рис. 1). Мы использовали данные начиная с 2004 г., поскольку именно с этого времени достигается максимальное количество одновременно функционирующих станций [Чебров и др., 2013]. При отборе данных мы рассматривали события, расположенные внутри круга с центром в точке 160.6° E и 56° N , радиусом 2° (рис. 2). Всего в каталоге КФГС РАН используются данные более 100 станций Камчатки и окружающих территорий. В случае настоящего исследования мы использовали станции, расположенные внутри изучаемой области и в непосредственной близости вокруг нее (всего около 30 станций, показанных на рис. 1). Для томографии отбирали землетрясения с количеством записей не менее 13. При этом невязки времен, полученные после предварительной локализации источников, не должны превышать 1.0 и 1.5 с для P и S данных соответственно. После селекции набор данных включал времена прихода 117922 P -волн и 86607 S -волн от 7335 землетрясений (27.8 записей на событие в сред-

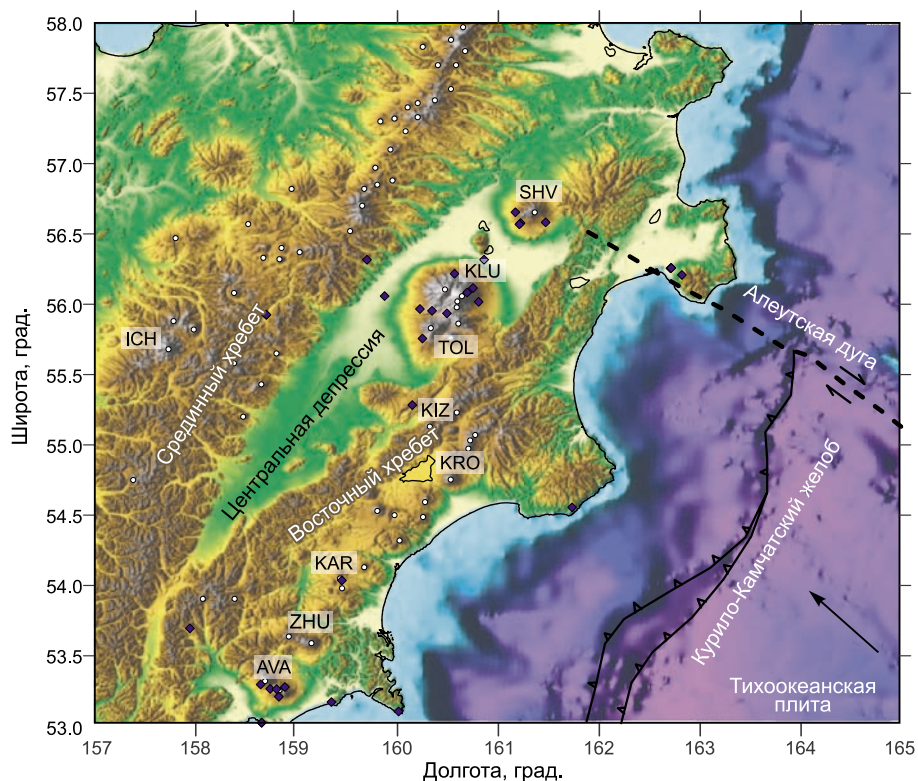


Рис. 1. Топография/батиметрия изучаемого региона (по данным с сайта www.marine-geo.org).

Синие ромбы — сейсмические станции, данные с которых использованы в работе. Основные группы вулканов обозначены: AVA — Авачинская группа, ZHU — Жупановский, KAR — Карымская система, KRO — Кроноцкий, KIZ — Кизимен, TOL — Толбачик, KLU — Ключевская группа, SHV — Шивелуч, ICH — Ичинский вулкан.

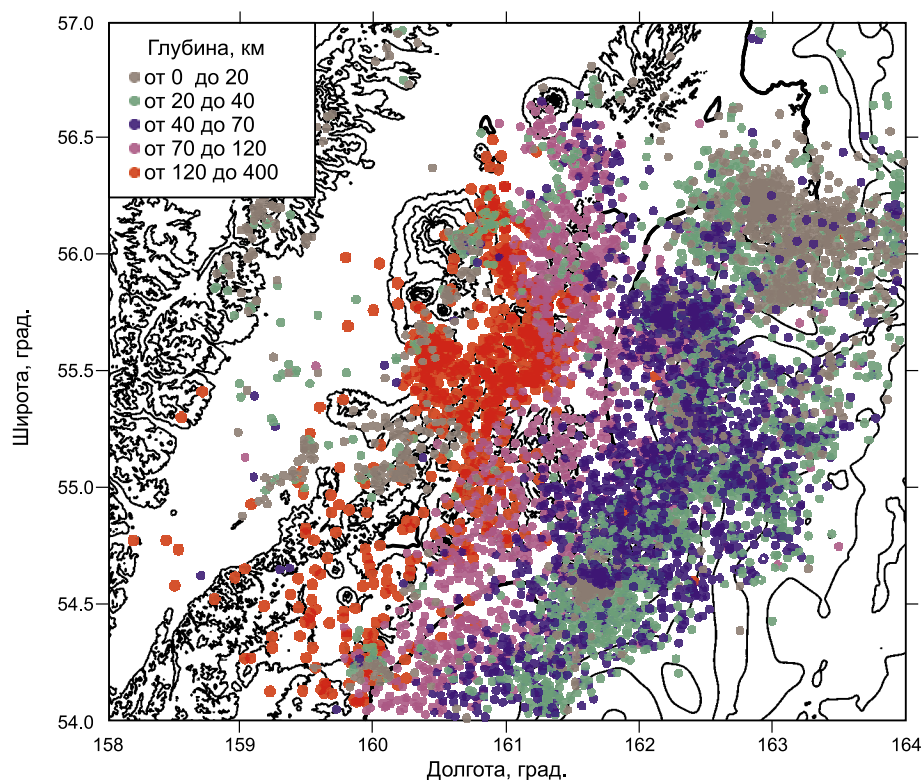


Рис. 2. Распределение сейсмичности в изучаемом регионе из каталога КФГС РАН за 2004—2014 годы.

Цвет точек обозначает интервал глубин землетрясений.

нем). Такое количество данных представляется достаточным для осуществления высокоточной локации событий и реализации томографической инверсии. Распределение землетрясений, использованных в работе, показано на рис. 2. Можно видеть, что при смещении под континентальную часть Камчатки глубина землетрясений увеличивается, что естественно, если учесть, что большая часть этих событий приурочена к зоне субдукции. Большая часть землетрясений расположена на востоке от вулканической дуги.

В работе мы использовали томографический алгоритм LOTOS [Koulakov, 2009], который осуществляет итеративную инверсию данных по временам прихода P - и S -волн от локальных пассивных источников. В данной версии алгоритма имеется возможность учитывать кривизну земной поверхности, связанную с рельефом и эллиптичностью Земли.

В качестве референтной модели мы выбирали одномерное сферически-симметричное распределение скорости согласно табл. 1. В этом случае задаются скорости P -волн на нескольких уровнях; между уровнями скорости интерполируются линейным образом. Скорости S -волн определяются, исходя из постоянного значения отношения v_P/v_S , равного 1.72. Данное скоростное распределение было выбрано

Таблица 1. Одномерная сферически-симметричная референтная модель

Глубина, км	Скорость P -волн, км/с
5	4.8
20	6.3
40	6.8
70	8.0
120	8.2
400	9.03

Примечание. Заданы глубины и скорости P -волн. Скорости S -волн определяются, исходя из постоянного отношения $v_P/v_S = 1.72$.

после нескольких попыток полных расчетов с различными стартовыми моделями, исходя из наиболее оптимального баланса положительных и отрицательных аномалий в модели после томографической инверсии.

Процедура инверсии начинается с предварительной локализации источников в одномерной модели. На этом этапе применяется узловой метод с использованием сеток с переменным шагом, который позволяет находить абсолютные экстремумы целевой функции и избегать локальных максимумов. Для расчета времен пробега между узлами сетки и станциями используются табулированные значения, полученные на предварительном этапе.

Одновременно с локализацией производится идентификация и отбрасывание ошибок в данных согласно алгоритму, описанному в [Koulakov, Sobolev, 2006].

Следующий шаг состоит в уточнении локализации источников на базе алгоритма трехмерного лучевого трассирования с использованием метода изгиба [Um, Thurber, 1987], который позволяет гарантированно находить траектории лучей и времена пробега для любых пар источник—приемник в изучаемой области.

Параметризация модели производится с помощью узлов, которые распределяются в изучаемой области согласно плотности лучей. Между узлами искомое скоростное распределение аппроксимируется линейной интерполяцией. Узлы располагаются на вертикальных линиях, которые в плане расположены с постоянным шагом (в нашем случае — 10 км). Расстояния между узлами в вертикальном направлении варьируют в зависимости от количества данных в окрестности. В нашем случае минимальное расстояние между узлами по вертикали составляет 5 км. При уменьшении плотности лучей расстояние между узлами увеличивается. В областях, где нет данных, узлы не выставляются. Для уменьшения влияния конфигурации сетки на результат, инверсия производится в четырех сетках с различной базовой ориентацией (0, 22, 45 и 66 град.). После выполнения расчетов по всем сеткам результаты усредняются и переносятся на равномерную сетку.

Матрица первых производных для томографии рассчитывается на базе лучей, полученных после шага локализации. Матрица включает в себя элементы, ответственные за вариации скоростей P - и S -волн, изменение координат и времени источника, а также станционные поправки. Инверсия производится одновременно для всех этих типов неизвестных. Для инверсии крупной разреженной матрицы используется алгоритм LSQR [Paige, Saunders, 1982; Nolet, 1987] с 80 внутренними итерациями. Устойчивость решения для скоростных аномалий контролируется специальным сглаживающим блоком в матрице, каждая строка которого имеет по два ненулевых элемента с равными значениями и противоположными знаками, соответствующими всем комбинациям соседних узлов в параметризационной сетке. В правой части каждого такого уравнения задается ноль. Увеличение веса этого блока приводит к сглаживанию решения. Подбор параметров инверсии производится исходя из результатов синтетического моделирования. Следует отметить, что при подборе параметров производились расчеты с реальными данными с использованием самых разных значений параметров, отдельные результаты которых будут показаны в следующем разделе.

После реализации инверсии и пересчета решения на равномерную сетку повторялся шаг локализации источников в обновленной трехмерной модели. Далее осуществлялся расчет матрицы и инверсии. Такой итерационный цикл повторялся в нашем случае три раза. Следует отметить, что увеличение количества итераций дает схожий эффект, что и увеличение LSQR-циклов, а также уменьшение величины регуляризации. По этой причине первые два параметра были зафиксированы в указанных значениях, и в качестве основного регулятора решения выступал коэффициент сглаживания, роль которого более детально рассматривается в следующем разделе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЕРИФИКАЦИЯ

Результаты томографической инверсии показаны в виде аномалий на горизонтальных сечениях (рис. 3) и вертикальных профилях (рис. 4). Приведены аномалии скоростей P - и S -волн, а также значение соотношения v_P/v_S для вертикальных сечений. Для облегчения интерпретации на горизонтальных сечениях приведены изолинии рельефа и положение основных голоценовых вулканов. Значения аномалий показаны только в местах с достаточным покрытием лучами. На вертикальных сечениях показаны проекции землетрясений, расположенных на расстоянии не более 20 км от профиля.

При подборе свободных параметров для инверсии было сделано множество попыток полной инверсии с различными наборами параметров, что позволило оценить влияние отдельных параметров на результат. На рис. 5 показаны примеры четырех инверсий с различными параметрами, результаты которых приведены на вертикальном сечении 1. При этом меняется сглаживание P -модели (sm_p), сглаживание S -модели (sm_s), вес поправок координат источников ($srce_km$) и времени в источнике ($srce_t0$), вес поправки за станцию (st), а также максимальный порог для невязок, использовавшегося для отбора данных ($tmax$). Значения этих параметров для четырех указанных моделей приведены в табл. 2. Можно видеть, например, что уменьшение коэффициентов сглаживания модели-4 по сравнению с моделью-2 с 2.5 до 1.5 для P -модели и с 3.9 до 2.9 для S -модели приводит к увеличению амплитуды аномалий и появлению мелких аномалий, достоверность которых вызывает сомнение. Однако конфигурация основных крупных аномалий остается неизменной. Введение поправок за станции (см., например, модели-2 и -3 со значениями 3 и 0 соответственно) приводит к незначительным изменениям структур у поверхности, однако не оказывает существенного влияния на результаты на глубине. Сравнение этих и множества других моделей, рассчитанных по ходу работы, показало, что для достаточно широкого диапазона зна-

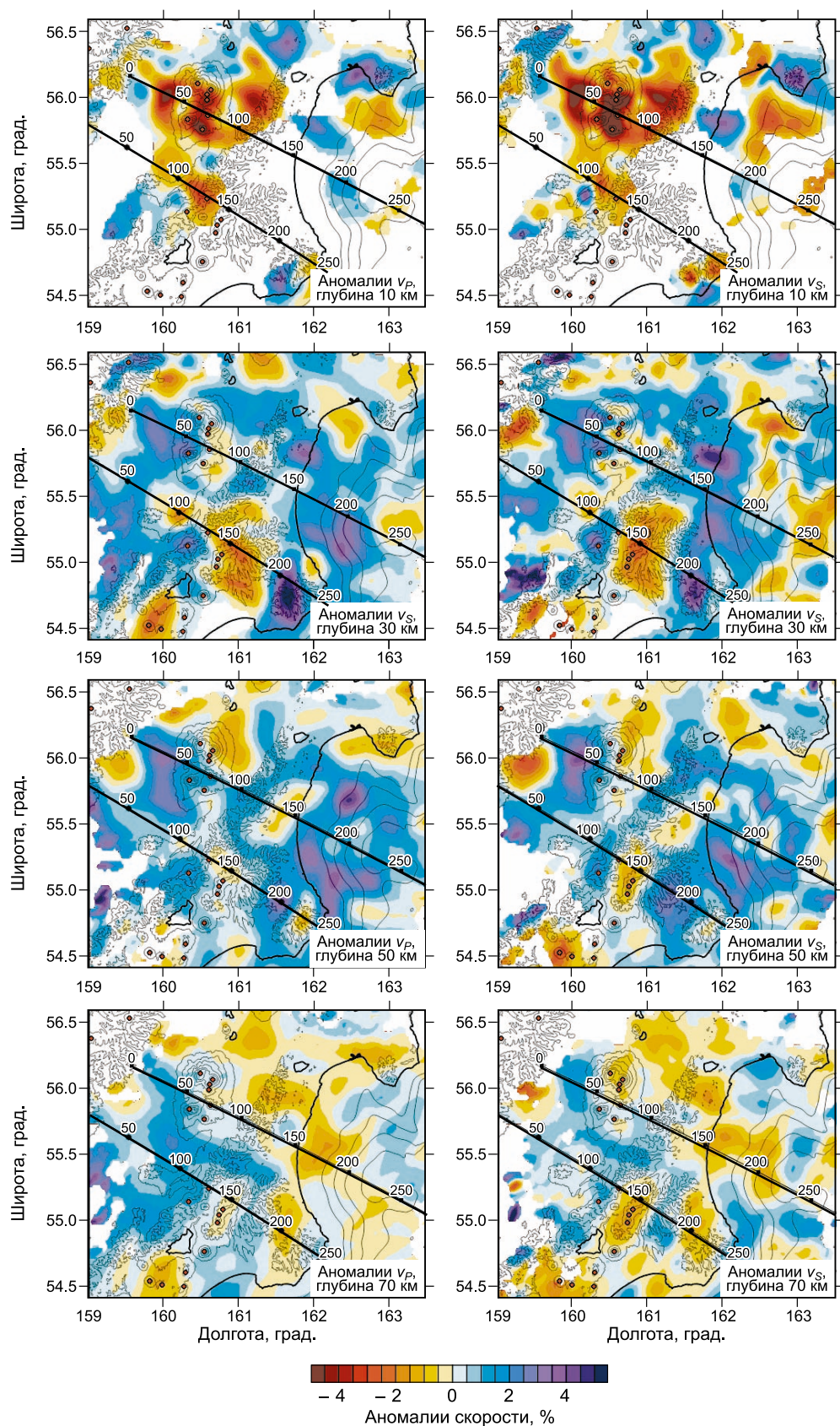


Рис. 3. Аномалии скоростей P - и S -волн на горизонтальных сечениях.

Тонкие линии показывают изолинии рельефа через каждые 500 м. Красные точки — голоценовые вулканы.

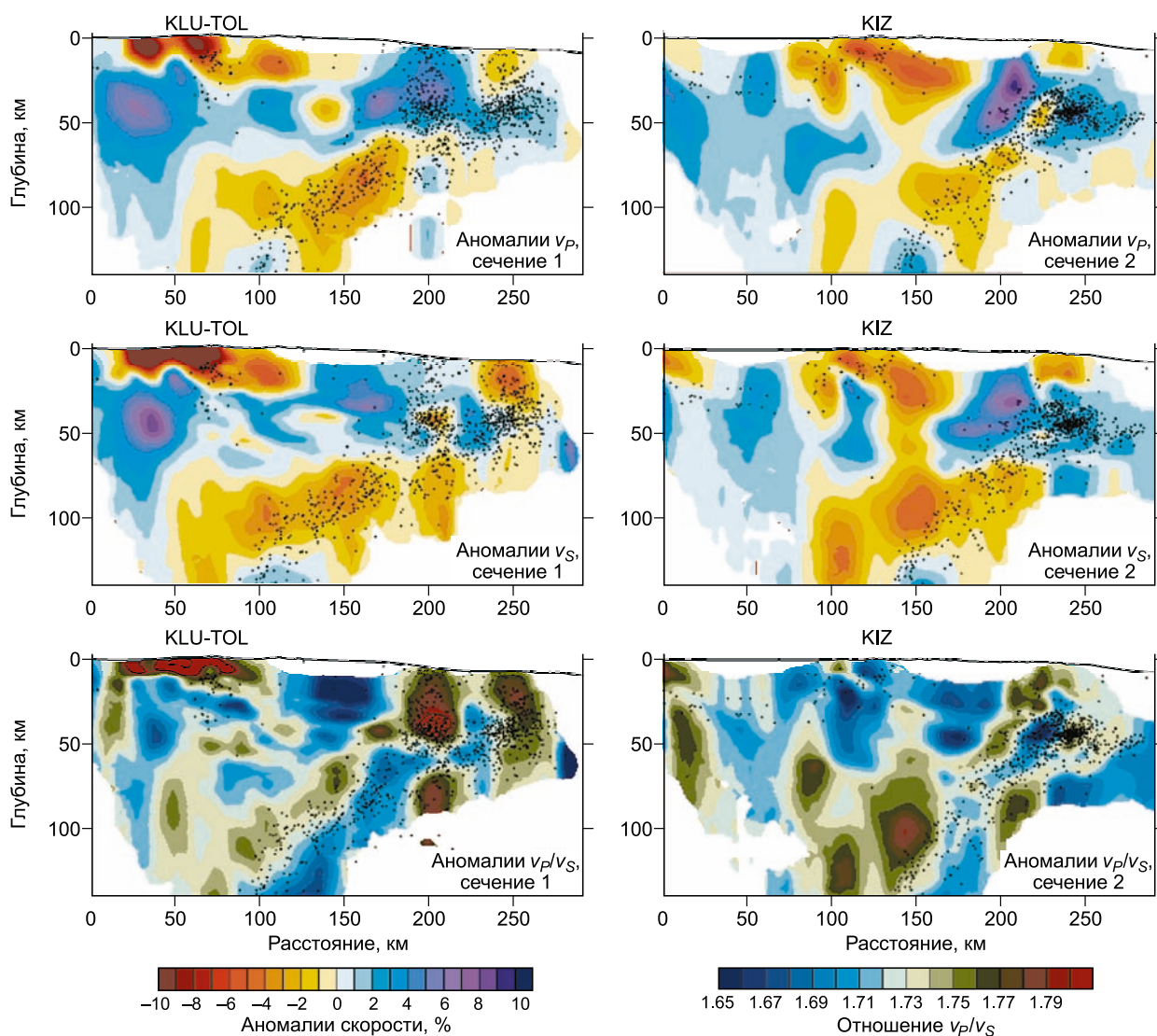


Рис. 4. Аномалии скоростей P - и S -волн и значение отношения v_P/v_S на двух вертикальных сечениях, положение которых показано на рис. 3.

Точки — проекции землетрясений на расстоянии не более 20 км от профиля. Сверху показана линия рельефа вдоль профиля с учетом сферичности Земли. Вулканические системы: KLU-TOL — Ключевской и Толбачик; KIZ — Кизимен.

чений свободных параметров инверсия обеспечивает схожие конфигурации наиболее значимых аномалий. Таким образом, формы основных структур, обсуждаемых ниже, представляются весьма устойчивыми, в то время как определение их амплитуды представляется менее достоверным. Также можно видеть существенные изменения модели для отношения v_P/v_S , что свидетельствует о менее устойчивом ее определении. Вместе с тем и здесь на качественном уровне можно выделить регулярные особенности, которые являются общими для всех случаев.

Особое внимание в работе уделяется выполнению синтетического моделирования. Реализация моделирования должна максимально точно повторять условия обработки реальных данных. Расчет синтетических времен осуществляется для тех же пар источник—приемник, что и при осуществлении инверсии реальных данных. Расчет времен производится трехмерным алгоритмом лучевого трассирования методом изгиба. К рассчитанным временам добавляется случайная ошибка со средним абсолютным отклонением 0.1 с. После этого мы «забываем» положения источников и начинаем процедуру восстановления модели абсолютно теми же алгоритмическими шагами и с теми же параметрами, что и в случае обработки реальных данных. В частности, расчет начинается с этапа абсолютной локализации источников. Такой подход моделирования позволяет исследовать такие проблемы, как неоднозначность

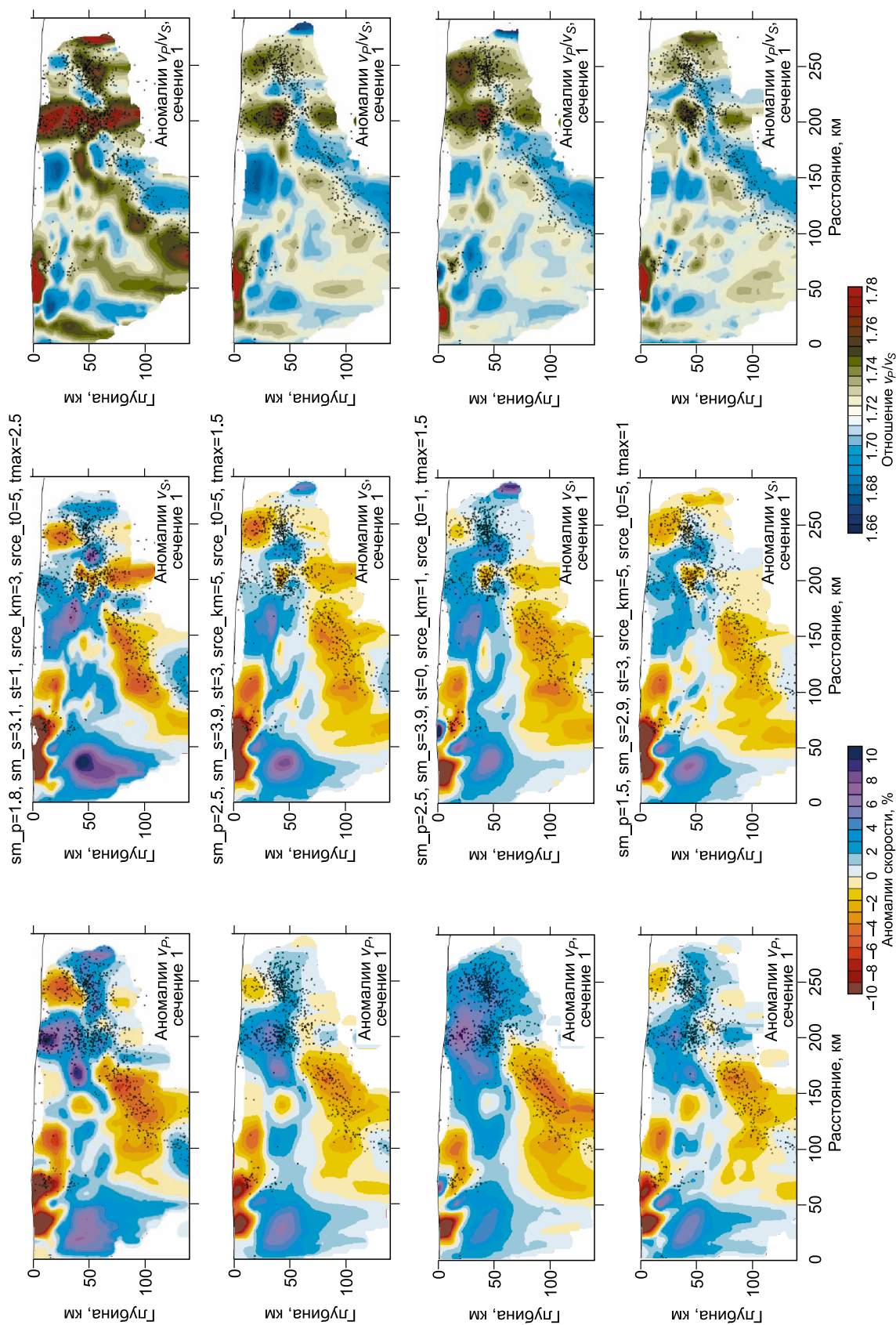


Рис. 5. Примеры результатов инверсии с различными значениями свободных параметров на профиле 1.

Показаны аномалии скоростей P - и S -волн и отношение v_p/v_s . Точки — проекции землетрясений на расстоянии не более 20 км от профиля. Значения параметров показаны над каждым рядом. Их обозначения описываются в тексте.

Таблица 2. Значения некоторых свободных параметров, использовавшихся для расчета четырех моделей, показанных на рис. 5

Параметр	Модель-1	Модель-2 (главная)	Модель-3	Модель-4
sm_p	1.8	2.5	2.5	1.5
sm_s	3.1	3.9	3.9	2.9
srce_km	3.0	5.0	1.0	5.0
srce_t0	5.0	5.0	1.0	5.0
st	1.0	3.0	0	3.0
tmax, s	2.5	1.5	1.5	1.0

определения параметров источников и скоростной модели, которые являются актуальными в случае пассивной сейсмологии.

В первом случае мы исследуем традиционный для томографических работ тест под названием «Шахматная доска», результаты которого показаны на рис. 6. В этом случае задаются синтетические аномалии, имеющие квадратную форму в горизонтальном сечении и являющиеся неизменными по глубине. Цель такого теста — оценить горизонтальное разрешение, обеспечиваемое имеющейся системой наблюдения. В данном случае горизонтальный размер аномалий составлял 30 км, расстояние между

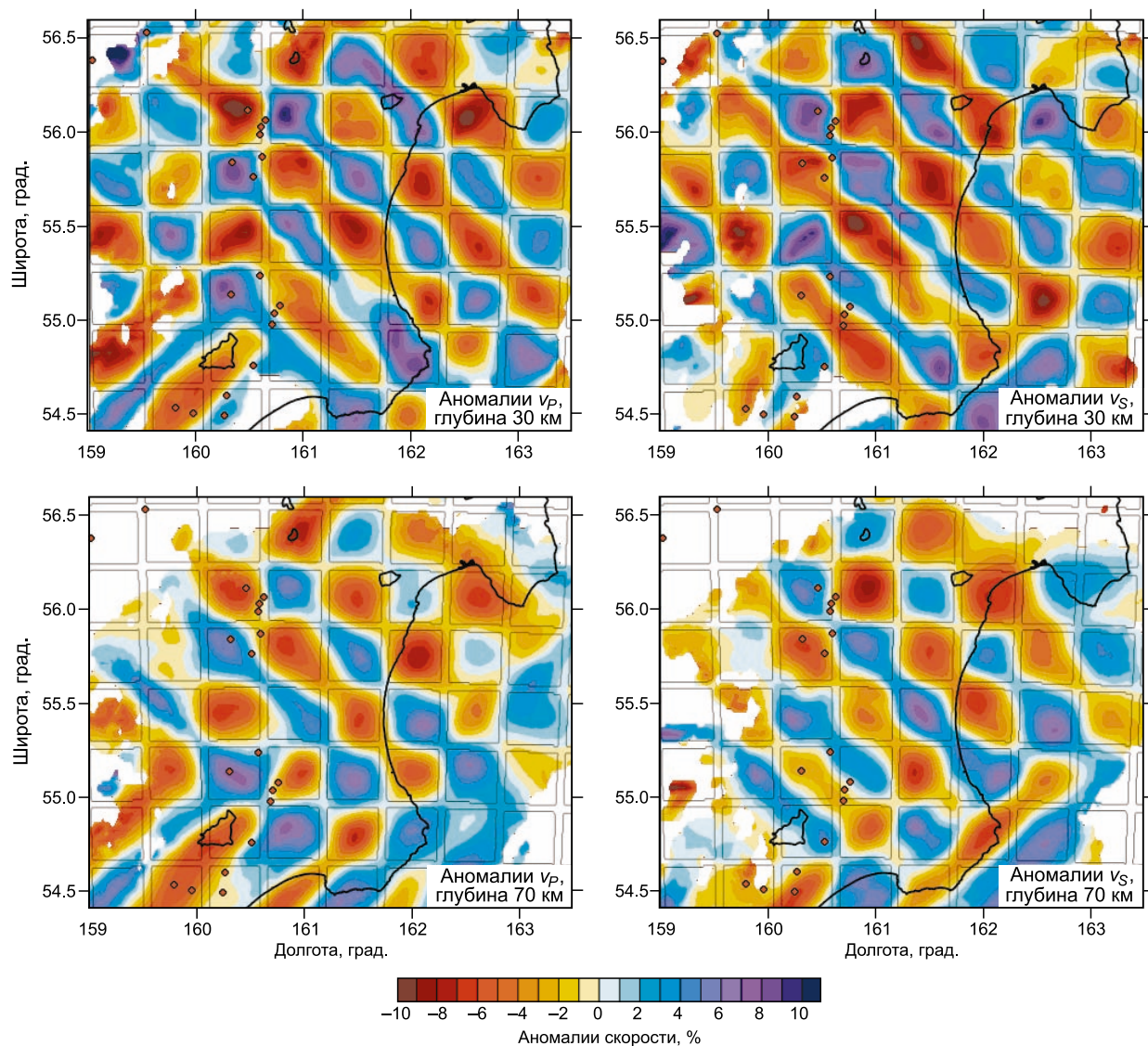


Рис. 6. Результат теста «Шахматная доска» с неизменными значениями аномалий по глубине.

Тонкие линии показывают конфигурацию синтетических аномалий. Красные точки — голоценовые вулканы.

аномалиями — 5 км. Амплитуда аномалий составляла 7 %, причем для скоростей P - и S -волн знаки аномалий были противоположные, что обеспечивало контрастные вариации отношения v_P/v_S . Можно видеть, что в районе Ключевской группы, где располагается максимальное количество станций, конфигурация клеток восстанавливается корректно. На юго-западе, между вулканической дугой и желобом, наблюдается некоторое размазывание аномалий, вызванное доминирующей направленностью лучей в ЮВ-СЗ направлении. На удивление хорошее разрешение достигается в морской области на востоке, где отсутствует достаточное покрытие станциями. По-видимому, чрезвычайно высокое количество событий в этой части компенсирует недостаточное количество станций. При выполнении теста производился подбор параметров инверсии для обеспечения максимально корректного восстановления амплитуды аномалий. Эти параметры в дальнейшем использовались для реализации инверсии реальных данных.

На рис. 7 приведен тест, который отличается от предыдущего тем, что в синтетической модели происходит изменение знака аномалий на противоположный на глубине 50 км. Известно, что в пассивной томографии, в связи с неоднозначностью определения параметров источников и скоростной модели, вертикальное разрешение обычно существенно хуже, чем горизонтальное. В данном случае мы видим, что смена знака надежно определяется в центральной части области между вулканами Ключевской группы и побережьем. Группа вулканов Кизимен располагается на границе разрешенной области. В результате этих тестов мы убедились, что имеющаяся система наблюдения позволяет надежно идентифицировать аномалии размером порядка 30 км.

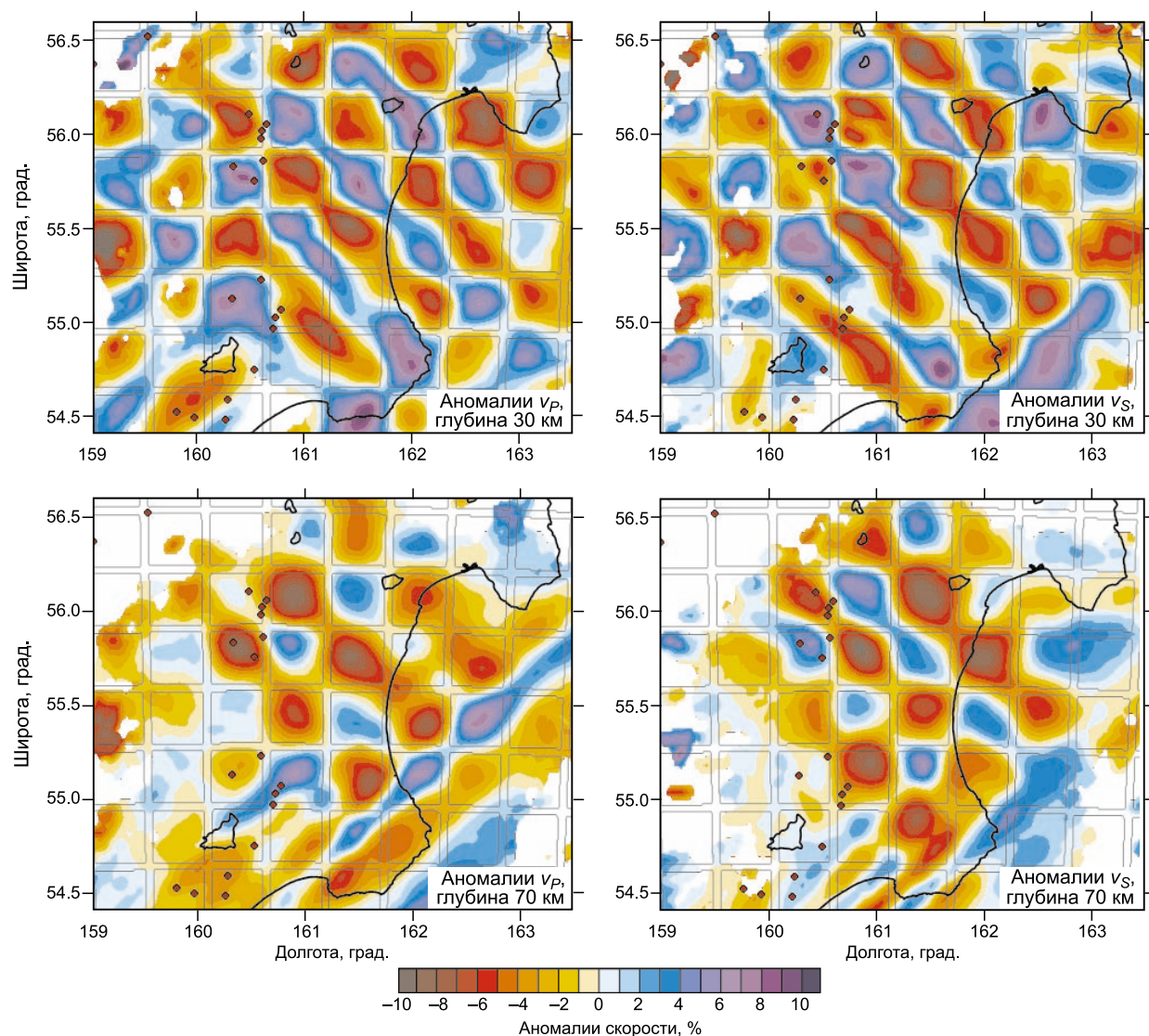


Рис. 7. Результат теста «Шахматная доска» с изменением знака аномалий по глубине 50 км.

Тонкие линии показывают конфигурацию синтетических аномалий. Красные точки — голоценовые вулканы.

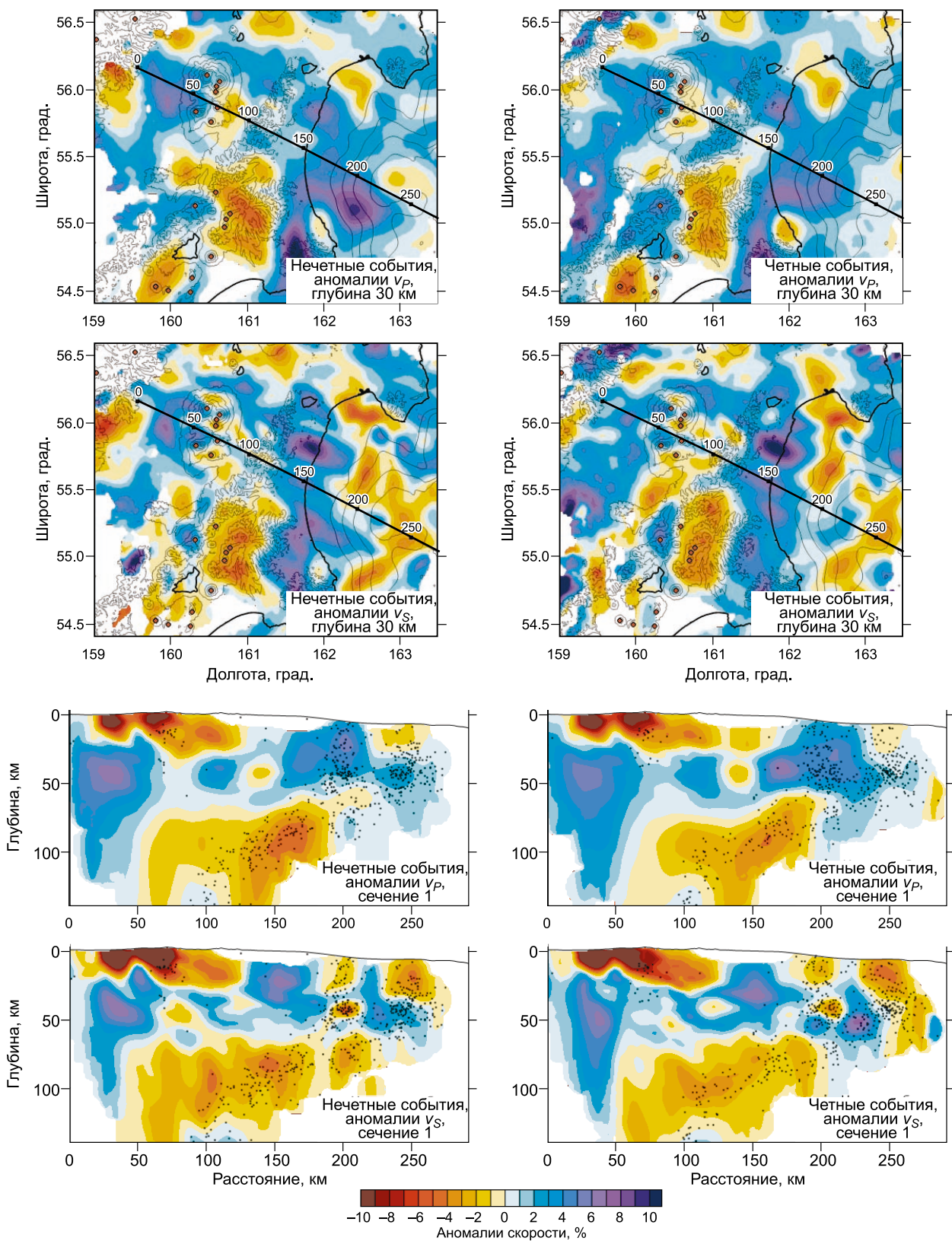


Рис. 8. Тест с четными и нечетными событиями.

Результаты инверсии двух независимых выборок данных, соответствующих данным с четными и нечетными номерами событий, показаны для аномалий скоростей P и S -волн на одном горизонтальном и одном вертикальном сечениях. Положение профиля указано на горизонтальном сечении. Прочие обозначения см. на рис. 3 и 4.

Для оценки влияния случайного шума использовался тест с независимой инверсией двух различных выборок данных. Для этого теста отбирались две группы данных, соответствующие четным и нечетным номерам землетрясений. Если бы случайный шум играл большую роль, различия между результатами, полученными на базе двух выборок, были бы существенными. Результаты этого теста показаны на рис. 8 для аномалий скорости P - и S -волн на глубине 30 км и одном вертикальном сечении, проходящем через Ключевскую группу вулканов. Как можно видеть, результаты независимой обработки двух поднаборов данных представляются практически идентичными. Некоторое сглаживание и понижение амплитуды по сравнению со случаем полного набора данных связано с изменением баланса между главной матрицей и дополнительным сглаживающим блоком при инверсии в случае двукратного уменьшения лучей. Таким образом, данный тест показал, что основные аномалии, которые будут обсуждаться в следующем разделе, являются устойчивыми по отношению к случайному шуму.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Основной результат данного исследования — трехмерная модель скоростей P - и S -волн в мантии и коре над субдущим слэбом в районе северной группы вулканов на Камчатке. Эти модели показаны в виде аномалий относительно одномерной референтной модели на четырех горизонтальных сечениях (см. рис. 3) и двух вертикальных профилях (см. рис. 4), проходящих через системы вулканов Ключевской—Толбачик (KLU-TOL) и Кизимен (KIZ). Серия тестов, приведенных выше, показывает устойчивость восстановления основных аномалий. Еще одним неформальным критерием достоверности является корреляция основных структур в моделях P - и S -аномалий. В большинстве случаев, региональные геологические структуры влияют на скорости продольных и поперечных волн схожим образом (например, горячие области всегда низкоскоростные, а прочные части литосферы — более высокоскоростные). При реализации расчетов с помощью программы LOTOS P - и S -аномалии лишь косвенно связаны друг с другом через параметры источников, поэтому они могут рассматриваться как практически независимые. Их схожесть может указывать на то, что они связаны с одними и теми же геологическими структурами и, значит, обладают достаточно высокой степенью достоверности.

Область вулканизма в районе Ключевской группы на малых глубинах проявляется как зона пониженных скоростей P - и S -волн и повышенным отношением v_p/v_s . Мы не наблюдаем явной корреляции с результатами [Koulakov et al., 2011, 2013], полученными на основании использования локальной сейсмичности непосредственно в районе Ключевской группы вулканов. Разница между моделями может быть связана с различием в системах наблюдений. В настоящей работе в коре под вулканами Ключевской группы доминируют вертикально направленные лучи от глубоких землетрясений, которые не могут обеспечить достаточное вертикальное разрешение на малых глубинах. Именно этим можно объяснить то, что мы не обнаруживаем резкую аномалию с повышенным отношением v_p/v_s на глубинах ниже 25 км, которая явилась главной особенностью в моделях, представленных в работах [Koulakov et al., 2011, 2013].

На рис. 9 мы представляем схематическую интерпретацию результатов на двух профилях, проходящих через две отдельные вулканические системы — Ключевскую и Кизимен. На фоне рисунков приведены аномалии скорости поперечных волн на вертикальных сечениях. В нашем случае аномалии скоростей P - и S -волн оказываются весьма похожими, однако мы выбрали модель скоростей S -волн,

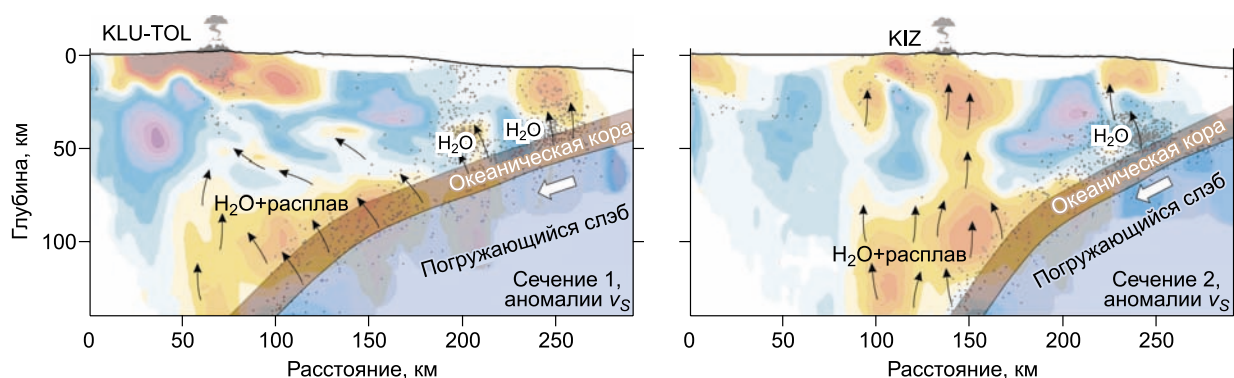


Рис. 9. Интерпретация результатов томографии.

На фоне показаны аномалии скоростей S -волн на сечениях 1 и 2, проходящих через Ключевскую группу (KLU-TOL) и Кизимен (KIZ). Черные стрелки указывают на возможные пути подъема флюидов и расплавов. Белая стрелка — направление погружения плиты. Океаническая кора показана схематически вдоль области максимальной концентрации землетрясений.

поскольку она более чувствительна к распределению расплавов и флюидов, что особенно важно для выявления путей питания вулканов.

Как видно на многих региональных томографических моделях зон субдукции, основная особенность строения глубинных структур связана с погружающимся высокоскоростным слэбом (например [Gorbatov et al., 1999; Кулаков и др., 2011]). Однако в настоящей работе на вертикальных сечениях (см. рис. 4) мы не наблюдаем никакой высокоскоростной аномалии, которую можно было бы связать с погружающейся тихоокеанской литосферой. Напротив, большая часть области вдоль кластера глубинной сейсмичности связана с низкоскоростными аномалиями. Мы предполагаем, что сейсмичность на этих глубинах в основном происходит в океанической коре, которая может иметь значительную толщину в данном сегменте Тихого океана и имеет пониженные скорости относительно областей мантии. Аналогичные особенности были обнаружены в недавней томографической модели зоны субдукции под о. Хоккайдо [Koulakov et al., 2015b]. Мы не имеем конкретной информации о толщине океанической коры под Камчаткой. На рис. 9 кора схематически показана коричневым цветом и проведена через область максимальной сейсмичности над слэбом.

Мы предполагаем, что ключевую роль в возникновении низкоскоростных аномалий над слэбом играют флюиды и расплавы, формирующиеся при погружении плиты вследствие фазовых переходов в водосодержащих породах [Poli, Schmidt, 1995; Чепуров и др., 2012]. Вода накапливается в океанической литосфере в большом количестве по мере ее эволюции от спрединга к субдукции. Значительное количество воды проникает в слэб механически за счет его изгиба перед погружением в зоне субдукции. Примерно 90—95 % этой воды выходит из слэба в интервале глубин от 10 км до примерно 300 км вследствие различных фазовых переходов, описанных, например, в работе [Peacock, 2003]. Предполагается, что на глубинах 10—30 км вода выделяется из цеолитов, на 30—70 км — из голубых сланцев и 80—120 км — из эклогитов [Winter, 2001]. Выделение воды из флогопитов происходит на глубине около 200 км. Наиболее глубокая реакция дегидратации, выделяющая существенное количество флюидов связана с трансформацией лавсонита [Winter, 2001]. Дегидратация серпентинита происходит в широком интервале глубин вдоль верхней границы мантийной части погружающейся литосферы. Именно с этой реакцией связывают наличие двойной сейсмической зоны, наблюдаемой во многих зонах субдукции [Peacock, 2001]. Эти и другие процессы дегидратации в зоне субдукции были воссозданы в численной модели в работе [Arcay et al., 2005]. В этих работах было отмечено, что именно флюиды, выходящие из слэба в интервале глубин от 80 до 150 км, больше всего ответственны за образование вулканических дуг. Поднимаясь по мантийному клину, они понижают температуру плавления пород, что приводит к образованию магматических источников в мантии и коре [Poli, Schmidt, 1995].

Многие из описанных выше процессов происходят под Камчаткой и могут быть идентифицированы на основании новой томографической модели. На обоих вертикальных сечениях можно видеть, что значительная часть сейсмичности происходит на начальных этапах погружения слэба на глубинах от 30 до 50 км. Эта сейсмичность может быть связана с деформацией аккреционного клина над погружающейся литосферой, а также с активным выходом морской воды, накопленной в породах коры, схематически показанной стрелками на рис. 9. На этих глубинах еще не достигается высокая температура, поэтому выход воды не приводит к плавлению и образованию центров магматизма. Подъем воды на этом участке может происходить механически через трещины и поры. Частично вода на этих глубинах может образовываться за счет преобразования цеолитов и голубых сланцев [Winter, 2001].

Начиная с глубины 80 км, зоне сейсмичности соответствует низкоскоростная аномалия, которая схожим образом проявляется в *P*- и *S*-моделях. На рис. 4 видно, что, по крайней мере, для сечения 1, вдоль сейсмического кластера наблюдается протяженная зона с повышенным значением отношения v_p/v_s , которая может отражать наличие океанической коры, насыщенной флюидами. Согласно нашей интерпретации, схематически показанной на рис. 9, эти аномалии отражают процессы фазовых переходов в погружающейся плите, которые сопровождаются активным выделением флюидов и формированием зон расплавов.

Судя по конфигурации сейсмических аномалий в мантийном клине на двух сечениях, мы можем предположить, что глубинная система питания вулканов Ключевской группы и влк. Кизимен существенно отличаются. Несмотря на то, что конфигурация низкоскоростной аномалии в контактной зоне над слэбом сходна на двух профилях, ее положение относительно центров вулканизма различно. Кизимен расположен непосредственно над указанной аномалией, в то время как Ключевская группа сдвинута относительно нее на запад. Ключевская группа оказывается связанной со слэбом через серию довольно слабых наклонных аномалий. Точно такая же особенность наблюдалась ранее для влк. Мерапи на о. Ява [Koulakov et al., 2009a]. Причина такого невертикального подъема флюидов не совсем понятна. В случае Мерапи наклонную конфигурацию путей питания вулканов И.Ю. Кулаков с соавторами [Koulakov et al., 2009a] связывают с наличием сжимающих напряжений в литосфере, приводящих к образованию наклонных разломов, вдоль которых перемещаются флюиды. Альтернативным объяснением может служить миграция зоны субдукции.

Возможно, непосредственно под Ключевской группой существует также другой источник флюидов и расплавов из слэба, расположенный на глубине более 150 км, который доставляет дополнительный материал для формирования магматических очагов. Наличие соответствующей низкоскоростной аномалии на сечении 1 может служить подтверждением такой гипотезы. Не исключено, что именно наличие нескольких магматических источников, соответствующих различным сегментам слэба, определяет многообразие составов и режимов извержений вулканов Ключевской группы.

Под влк. Кизимен, который находится на расстоянии менее 60 км от Ключевской группы, конфигурация питающих каналов представляется совершенно другой. В этом случае наблюдается вертикальный канал, связывающий источники флюидов и расплавов на слэбе на глубине около 100 км с вулканической группой Кизимен. Аналогичная картина с наличием вертикального канала под вулканом наблюдалась в районе кальдеры Тоба на Суматре, который является одним из крупнейших супервулканов за последний миллион лет [Koulakov et al., 2009b]. Как и в случае первого профиля, здесь также прослеживается второй источник флюидов и расплавов, идущий с глубин около 150 км, однако, судя по отсутствию четких следов современного вулканизма над ним, он пока не достиг поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнена томографическая инверсия данных по временам пробега от региональных землетрясений, зарегистрированных сейсмостанциями Камчатского филиала Геофизической службы РАН с 2004 по 2014 г. В результате получены трехмерные модели скоростей *P*- и *S*-волн в мантийном клине под северной группой вулканов, включая комплексы Кизимен и Ключевской.

В результате трехмерной инверсии были переопределены координаты глубоких землетрясений в зоне субдукции, что позволило уточнить положение верхней границы погружающегося слэба. Установлено, что до глубины 100 км слэб прослеживается под углом около 30°, а затем погружение резко меняет угол на более крутой (около 45°). Это согласуется с предыдущими исследованиями по определению формы слэба под Камчаткой [Кулаков и др., 2011].

Основные результаты данного исследования касаются выявления структуры мантийного клина над погружающимся слэбом. Над сейсмической зоной вдоль верхней границы слэба наблюдается низкоскоростная аномалия, которая ассоциируется с океанической корой, погружающейся вместе с тихоокеанским слэбом, а также с активными фазовыми переходами в зоне субдукции, вызывающими выделение большого объема флюидов и расплавов. Под влк. Кизимен наблюдается четкая вертикальная аномалия, которую можно объяснить наличием явно выраженного канала, доставляющего к вулкану флюиды и расплавы с поверхности слэба на глубине около 100 км. Под Ключевской группой вулканов такого четкого канала не наблюдается, но отмечены относительно небольшие низкоскоростные аномалии, которые, возможно, отражают несколько путей миграции вещества с различных уровней надсубдукционной зоны. Вероятно, именно этим объясняется разнообразие составов и режимов извержений вулканов Ключевской группы.

Авторы выражают благодарность М.И. Кузьмину и анонимному рецензенту за конструктивные замечания, которые позволили существенно улучшить содержание статьи.

Данное исследование поддержано междисциплинарным интеграционным проектом СО РАН № 20, а также совместным грантом по междисциплинарному проекту СО РАН и ДВО РАН № 42. И. Кулаков и Е. Кукарина поддержаны грантом РФФИ № 14-17-00430.

ЛИТЕРАТУРА

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

Действующие вулканы Камчатки / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М., Наука, 1991, т. 1, 302 с.; т. 2, 416 с.

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.

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.

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

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—40.

Чепуров А.И., Кулаков И.Ю., Сонин В.М., Кукарина Е.В. Миграция воды в субдукционном комплексе по данным сейсмической томографии и экспериментальной петрологии // *ДАН*, 2012, т. 442, № 4, с. 538—543.

Arcay D., Tric E., Doin M.P. Numerical simulations of subduction zones: Effect of slab dehydration on the mantle wedge dynamics // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2005, v. 149, № 1, p. 133—153.

Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R. Closing the gap between regional and global travel time tomography // *J. Geophys. Res., Solid Earth*, 1998, v. 103, № B12, p. 30055—30078.

Fukao Y., Obayashi M. Subducted slabs stagnant above, penetrating through, and trapped below the 660 km discontinuity // *J. Geophys. Res., Solid Earth*, 2013, v. 118, № 11, p. 5920—5938.

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. Intern.*, 1999, v. 137, № 2, 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, doi:10.1046/j.0956-540x.2001.01439.x.

Grand S.P. Mantle shear-wave tomography and the fate of subducted slabs // *Philos. Tran. R. Soc. London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2002, v. 360, № 1800, p. 2475—2491.

Jiang G., Zhao D., Zhang G. Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka // *Tectonophysics*, 2009, v. 465, № 1, p. 190—203.

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, p. ESE11.1—ESE11.16, doi:10.1029/2001JB001129.

Khubunaya S., Gontovaya L., Sobolev A., Nizkous I. Magmatic sources beneath the Kluchevskoy volcano group (Kamchatka) // *Volcanol. Seismol.*, 2007, v. 2, p. 22—42.

Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: benchmarks for testing tomographic algorithms // *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 2009, v. 99, № 1, p. 194—214.

Koulakov I., Sobolev S.V. A tomographic image of Indian lithosphere break-off beneath the Pamir—Hindukush region // *Geophys. J. Int.*, 2006, v. 164, № 2, p. 425—440.

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., Yulistira T., Luehr B.-G., Wandono. P. *S* velocity and v_p/v_s ratio beneath the Toba caldera complex (Northern Sumatra) from local earthquake tomography // *Geophys. J. Int.*, 2009b, v. 177, p. 1121—1139, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04114.x

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, № L09305, doi: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, doi: 10.1016/j.jvolgeor.2012.10.014.

Koulakov I., Jaxybulatov K., Shapiro N.M., Abkadyrov I., Deev E., Jakovlev A., Kuznetsov P., Gordeev E., Chebrev V. 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. Volcan. Geotherm. Res.*, 2014, v. 285, p. 36—46.

Koulakov I., Kuznetsov P., Gordeev E.I., Chebrev V.N. Evidences for high gas content beneath the Gorely volcano in Kamchatka (Russia) based on very low v_p/v_s ratio revealed from local earthquake tomography // *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2015a, v. 17, p. 5370.

Koulakov I., Kukarina E., Fathi I.H., El Khrepy S., Al-Arifi N. Anisotropic tomography of Hokkaido reveals delamination-induced flow above a subducting slab // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2015b, v. 120, № 5, p. 3219—3239, doi:10.1002/2014JB011823.

Lees J.M., Symons N., Chubarova O., Gorelchik V., Ozerov A. Tomographic images of Kliuchevskoi volcano *P*-wave velocity // *Volcanism and subduction: The Kamchatka Region* // *Geophys. Monogr. Ser.*, AGU, Washington, D. C. 2007, v. 172, p. 293—302.

Nolet G. Seismic wave propagation and seismic tomography // *Seismic tomography* / Ed. G. Nolet. Springer Dordrecht, Netherlands, 1987, p. 1—23.

Paige C.C., Saunders M.A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares // *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, 1982, v. 8, № 1, p. 43—71.

Peacock S.M. Are the lower planes of double seismic zones caused by serpentine dehydration in subducted oceanic mantle // *Geology*, 2001, v. 29, p. 299—302.

Peacock S.M. Thermal structure and metamorphic evolution of subducting slabs // *Inside the subduction factory*, *Geophys. Monogr. Ser.*, AGU, Washington, D. C. 2003, v. 138, p. 7—22.

Poli S., Schmidt M.W. H₂O transport and release in subduction zones: Experimental constraints on basaltic and andesitic systems // *J. Geophys. Res.*, 1995, v. 100, p. 22299—22314, doi:10.1029/95JB01570.

Um J., Thurber C. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing // *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 1987, v. 77, № 3, p. 972—986.

Winter J. An introduction to igneous and metamorphic petrology. Prentice Hall, New Jersey, 2001, 697 p.

Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics // *Phys. Earth Planet. Int.*, 2004, v. 146, № 1, p. 3—34.

*Поступила в редакцию
22 июля 2015 г.*