



ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАМЧАТКИ ПО ДАННЫМ ВРЕМЕННЫХ И ПОСТОЯННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Татьяна Александровна Ступина^{1,✉}, Наталья Анатольевна Бушенкова²

^{1,2}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹StupinaTA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7489-9731>

²BushenkovaNA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8792-9060>

Аннотация. Работа посвящена изучению неоднородности коро-мантийной границы центрального района полуострова Камчатка. Для района исследований по данным 2019–2020 гг. плотной сети из 33 временных и 14 постоянных станций рассчитаны значения толщины земной коры и усредненные значения отношения V_P/V_S . Для определения глубины коро-мантийной границы (Мохоровичича, Мохо) использовался метод приемных функций, основанный на анализе разницы времен прихода прямой и обменных фаз сейсмических волн от телесейсмических событий. Инверсия приемных функций осуществлялась методом сеточного поиска в координатах H (толщины земной коры) и k (отношения V_P/V_S), в предположении, что земная кора – это однородный изотропный слой, лежащий на полупространстве. Результаты показали, что глубина границы Мохоровичича варьирует в пределах 30–35 км под станциями, расположенными в центральной области Камчатки с заглублением до 40 км в районе вулкана Авачинский. Для станций временной сети, установленной силами сотрудников ИНГГ СО РАН, и большинства привлеченных станций постоянной сети КФ ФИЦ ГС РАН результат получен впервые и в зонах пересечения согласуется с выводами в ранее опубликованных работах других авторов.

Ключевые слова: сейсмология, граница Мохоровичича, метод приемных функций, обменные продольные и поперечные волны

Финансирование: исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН (проект Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0017).

Благодарности: авторы выражают благодарность А.Д. Иванову и член-корр. РАН, д.г.-м.н. И.Ю. Кулакову за консультирование и помощь в алгоритмической реализации методики.

Для цитирования: Ступина Т.А., Бушенкова Н.А. Оценка мощности земной коры центральной Камчатки по данным временных и постоянных сейсмических станций // Геофизические технологии. 2025. № 2. С. 60–73. doi:10.18303/2619-1563-2025-2-60.

ESTIMATION OF THE EARTH'S CRUSTAL THICKNESS OF CENTRAL KAMCHATKA ACCORDING TO TEMPORARY AND PERMANENT SEISMIC STATIONS

Tatiana A. Stupina^{1,✉}, Natalia A. Bushenkova²

^{1,2}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

¹StupinaTA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7489-9731>

²BushenkovaNA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8792-9060>

Abstract. The work is devoted to the study of the heterogeneity of the boundary of the Earth's crust and mantle in the central region of the Kamchatka Peninsula. For the research area, according to a dense network of 33 temporary and 14 permanent stations for 2019–2020, the values of the thickness of the Earth's crust and the average V_P/V_S ratio were calculated. To determine the depth of the crust-mantle boundary (Moho), the receiver function method was used, based on the analysis of the difference in the arrival time of direct and exchange phases of seismic waves from teleseismic events. The inversion of the receiver functions was carried out using the grid search method in the coordinates H (crust thickness) and k (V_P/V_S ratio), assuming that the crust is a homogeneous isotropic layer on a half-space. The results showed that the Moho depth ranges from 30–35 km under the stations in the Kamchatka central region, with a deepening to 40 km in the area of the Avacha Volcano. For the stations of the temporary network that were set up by the IPGG SB RAS staff, and most of the stations of the KB GS RAS permanent network, the result was obtained for the first time and in the intersection areas is consistent with the conclusions contained in previously published works by other authors.

Keywords: seismology, Moho boundary, receiver function method, transformation of seismic P - and S -waves

Funding: The study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0017.

Acknowledgments: the authors are grateful to Andrey D. Ivanov and Ivan Yu. Koulakov for consulting and assistance in the algorithmic implementation of the methodology.

For citation: Stupina T.A., Bushenkova N.A. Estimation of the Earth's crustal thickness of central Kamchatka according to temporary and permanent seismic stations // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 2. P. 60–73. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-2-60.

ВВЕДЕНИЕ

Упругие свойства литосферы являются ключевыми параметрами для понимания протекающих в ней геодинамических процессов и могут быть оценены на основе анализа сейсмических записей. Одной из важнейших задач является определение глубин основных сейсмических границ, наиболее контрастной из которых является граница коры и мантии или граница Мохоровичича (также Мохо). Неоднородность этой границы связана с природой и эволюцией формирования блоков земной коры, поэтому является важным параметром для геодинамического моделирования. В настоящем исследовании рассматривается регион центральной Камчатки, для которого до недавнего времени не представлялось возможным детально изучить толщину коры в силу малого количества и плотности распределения сейсмостанций. Так, для рассматриваемой нами области центральной Камчатки в работе [Levin et al., 2002] представлены результаты по четырем станциям (относительно обоснованные для станций MIL и APA, приблизительные – для станций PET и ZUP). Результаты по трем станциям (IVS, PET и DAL) в области Авачинской группы вулканов содержатся в исследовании [Резниченко и др., 2023], а также для постоянных станций вдоль восточной части полуострова глубины отражающих горизонтов представлены в [Хритова и др., 2025] (в интервале центральной зоны Камчатки под станциями ASA, PET и AVH).

Благодаря данным временной сейсмической сети (более 30 станций), установленной в центральной части Камчатского региона на период 2019–2020 гг., стало возможным расширение площади исследований.

Основной метод определения глубинных границ базируется на использовании обменных сейсмических продольных (P) и поперечных (S) волн, когда в результате преломления или отражения на резких границах часть энергии волны уходит на формирование волны другого типа. Путем выполнения специальной процедуры обработки сейсмической записи от далекого (телесеismicкого) землетрясения возможно построить импульсные характеристики прихода различных обменных волн, называемых

приемными функциями или функциями приемника (метод приемных функций, Receiver Functions, RF [Vinnik, 1977; Langston, 1979; Винник, 2019]). Существует ряд алгоритмов, которые позволяют с использованием этих функций восстанавливать положение границ и распределение скорости в коре под приемником. Известно, что задача инверсии приемных функций нелинейная с неединственным решением, но из-за простоты реализации связанной прямой задачи линейная инверсия все еще широко применяется [Harland et al., 2009]. Один из наиболее общепризнанных подходов *H-k-stacking* [Zhu, Kanamori, 2000] направлен на определение глубины одной границы (главным образом Мохо) и отношения скоростей продольных и поперечных волн (V_P/V_S). В настоящем исследовании представлены результаты применения этого подхода к данным сейсмостанций постоянной и временной сетей в пределах центральной Камчатки за период с 2019 по 2020 г.

ОПИСАНИЕ РЕГИОНА

Активные океанические окраины, в том числе зоны субдукции, характеризуются наиболее интенсивными геодинамическими процессами на Земле. В этих районах наблюдаются максимальные значения скорости конвергенции литосферных плит, которые могут превышать 10 см в год. Центральная зона Камчатки, как и основная часть полуострова, находится под влиянием процессов Тихоокеанской субдукции (рис. 1, А). Интенсивные деформации, а также подъем флюидов и расплавов в относительно узкой полосе на границе плит вызывают чрезвычайно активные механические и химические процессы. Эти процессы ответственны за разнообразие наблюдаемых геологических структур.

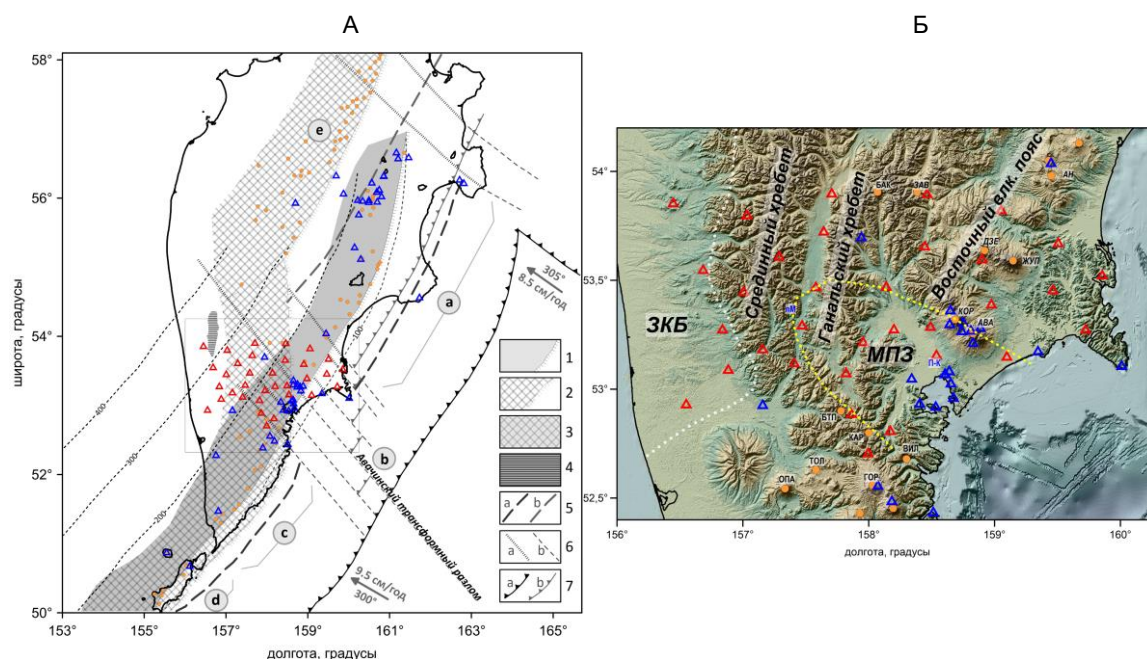


Рис. 1. Расстановка сейсмических станций в изучаемой области (на схеме А выделена прямоугольником): временных в центральной зоне Камчатки (эксперимент ИНГГ СО РАН 2019–2020 гг., красные треугольники) и постоянных станций (КФ ГС РАН, синие треугольники), оранжевыми точками показаны вулканы. А – схема разновозрастных вулканических дуг Курило-Камчатской островодужной системы по [Авдейко и др., 2003] с дополнениями: 1 – современная вулканическая дуга Восточной Камчатки и ее вулканический фронт; 2 – неогеновая вулканическая дуга Срединного хребта и Южной Камчатки и ее вулканический фронт; 3 – Курило-Южно-Камчатский участок наложения современной Курило-Камчатской дуги на неогеновую дугу; 4 – фрагменты предполагаемой палеогеновой вулканической дуги Западной Камчатки; 5–7 – выходы пород внутриплитного геохимического типа по [Volynets, 1994]: 5 – осевая зона современной тектонической (фронтальной) островной дуги (а) и реконструированная осевая зона неогеновой Срединно-Камчатской островной дуги (б); 6 – основные поперечные разломы на суше (а) и на море (б), вероятно

являвшиеся трансформными в неогене; 7 – ось современного глубоководного желоба (а) и предполагаемое положение оси палеопргиба неогеновой островодужной системы (b). Буквы в кружках обозначают сегменты новейшей дуги: а – Восточно-Камчатская, b – Малко-Петропавловская зона поперечных дислокаций, с – Южно-Камчатская, d – Северо-Курильская, e – Срединно-Камчатская дуга. Б – карта рельефа и основных геологических структур района исследований. Обозначения: вулканы Бакенин (БАК), Заварицкого (ЗАВ), Академии Наук (АН), Дзензурский (ДЗЕ), Жупановский (ЖУП), Корякский (КОР), Авачинский (АВА), Вилючинский (ВИЛ), Горелый (ГОР), Опала (ОПА), Карымшина (КАР), Толмачевский Дол (ТОЛ) и Большебанное термальное поле (БТП). Желтым пунктиром отмечена Малко-Петропавловская зона (МПЗ), белым пунктиром – Западно-Камчатский блок (ЗКБ). Аббревиатуры синего цвета: П-К – город Петропавловск-Камчатский, пМ – поселок Малки.

В центральной зоне Камчатки располагается Малко-Петропавловская зона (МПЗ, рис. 1, Б) поперечных дислокаций, по которой, как предполагается, проходит граница между двумя принципиально разными режимами субдукции на севере и юге полуострова [Бушенкова, Кучай, 2023]. Разрозненные разномасштабные результаты исследований предыдущих лет выявили морфологическое изменение рельефа и распространения вулканов на переходе между центральной и южной частями Камчатки, примерно соответствующем расположению МПЗ на широте $\sim 53^\circ \text{C}$ [Авдейко и др., 2006]. Сама МПЗ представляет собой грабенообразную структуру, перпендикулярную субдукционной дуге, с пониженной в сравнении с восточной окраиной Камчатки сейсмоактивностью [Государственная геологическая карта..., 2000; Шеймович, Сидоров, 2000; Гордеев и др., 2006].

В работах [Bushenkova et al., 2023; Бушенкова, Кучай, 2023] сделан вывод о том, 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 возраст плиты оценивается в 100–105 млн лет [Gorbatov et al., 1997; Syracuse, Abers, 2006].

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В обработке использовались трехкомпонентные сейсмические записи, 100 Hz, с временной сети из 33 станций (рис. 1, Б), установленной в период с июня 2019 по июль 2020 г. в районе центральной Камчатки в рамках проекта, объединяющего научно-исследовательские институты РАН (ИНГГ СО РАН, ИФЗ РАН, ИВиС ДВО РАН), Academia Sinica, Taiwan, и с постоянной сети КФ ФИЦ ГС РАН из 19 станций. Общая конфигурация приборов временной сети (CR01 – CR14, EH01 – EH11, WH02 – WH04, WR01 – WR05): сенсор Guralp CMG-6T и регистратор DataCube3 ext. BreakOut Box (1:10); сейсмостанция Guralp CMG-6TD; сенсор Trillium Compact 120s и регистратор DataCube3 ext. BreakOut Box (1:10); сейсмостанция Nanometrics Meridian Compact PH 120s (MC120-PH2). Для исследуемого центрального района Камчатки в обработке также использовались данные 8 длиннопериодных (APC, AVH, DAL, IVS, KRM, SBLV, SPN, UBL) и 11 короткопериодных (GNL, GRL, KRE, KRK, KRX, KRY, MTV, RUS, SDL, SMA, UGL) сейсмологических станций постоянной сети [Чебров и др., 2024].

Из каталога землетрясений Международного Сейсмологического Центра (International Seismological Centre, ISC) за период с августа 2019 по июль 2020 г. было отобрано 298 сильных землетрясений $M > 5.5$ и эпицентральной дистанцией от 30 до 100°. Теоретические времена вступления Р-фаз от каждого события для всех станций были определены на основе одномерной скоростной модели

Земли IASP91 [Kennett, Engdahl, 1991]. После визуального контроля качества волновых форм телесеизмических землетрясений и коррекции времен первых вступлений, с учетом различного рабочего периода временных сейсмических станций, в дальнейшей обработке осталась 31 станция с записями удовлетворительного качества не менее десяти событий по каждой из них. Распределение событий, отобранных для дальнейшего анализа, представлено на рис. 2. На рисунке 3 продемонстрирован пример принятой к дальнейшей обработке волновой формы телесеизмического события с $M = 6.6$, произошедшего в районе Фиджи.

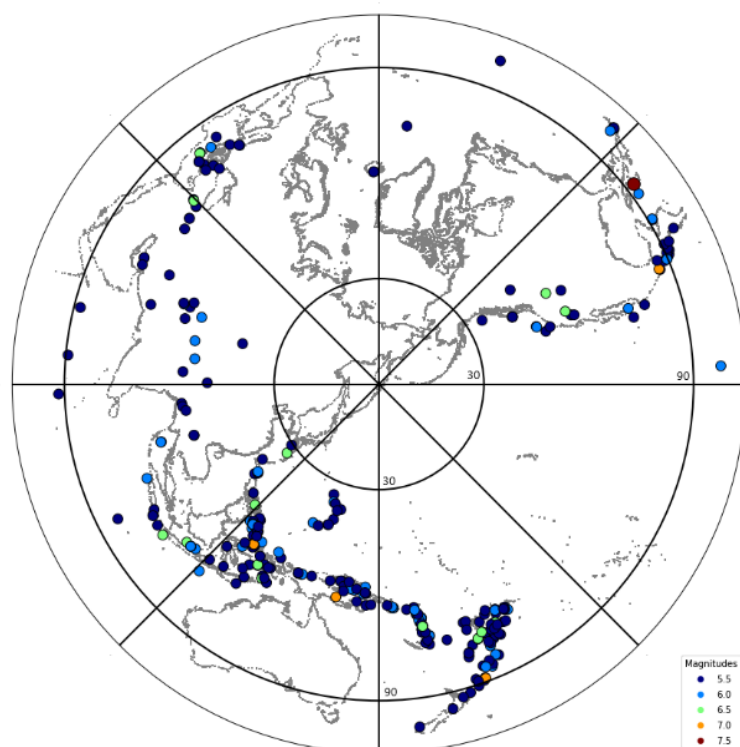


Рис. 2. Распределение телесеизмических землетрясений, используемых при построении приемных функций.

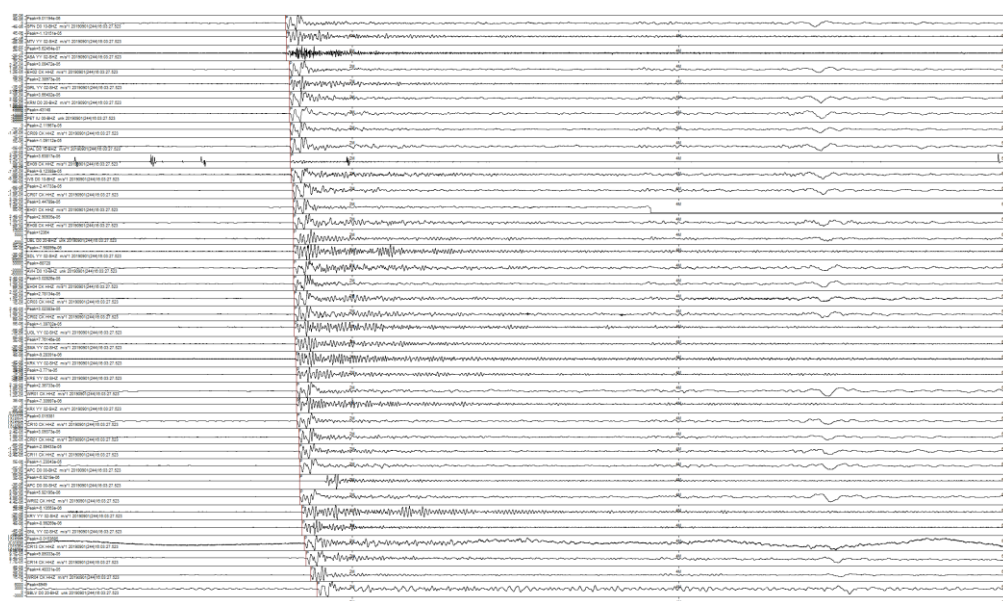


Рис. 3. Пример нефильтованной 8-минутной записи Z-компоненты телесеизмического землетрясения 2019-09-01 15:54, $M = 6.6$, глубина 591 км, широта 20.4(S) долгота 178(W), район Фиджи. Визуализация выполнена в программе DIMAS [Дроздин, Дроздина, 2010].

Метод приемных функций характеризуется по типу основной P - или S -волны и возникающих на границах обменных фаз, P -функция (P Receiver Function, PRF) представляет собой волновую форму поперечных обменных волн (Ps), порождаемых телесейсмической P -волной, S -функция (S Receiver Function, SRF) образуется при конверсии поперечной волны в продольную. Поскольку данных с временной сети станций для расчета S -функций оказалось недостаточно, мы рассмотрели PRF-функцию и оценили импульсы четырех фаз, схематически представленных на рис. 4: Ps (преломленная на границе как S), $PpPs$ (преломленная на границе как P , отраженная от свободной поверхности как P и отраженная от границы как S) и $PpSs$ (преломленная на границе как P , отраженная от свободной поверхности как S и отраженная от границы как S). Многократно отраженные волны более высокого порядка обычно настолько слабы, что ими можно пренебречь. Методика вычисления индивидуальной приемной функции состоит из четырех основных этапов:

1. Частотная фильтрация трехканальной сейсмической записи полосовым фильтром в диапазоне 0.05–1.5 Гц.

2. Пересчет сейсмограммы из координат (Z, N, E) ориентации сейсмометра в лучевую систему координат (L, Q, T), где L -компонента параллельна главному направлению смещений в продольной волне, а компоненты Q и T соответствуют SV и SH направлениям.

3. Выполнение процедуры деконволюции трехкомпонентной записи в предположении, что L -компонента является функцией источника. Она реализовывалась двумя способами: 1) в частотной области делением спектров, $RF(\omega) = Q(\omega)/L(\omega)$, и далее с переходом во временную область обратным преобразованием Фурье; 2) во временной области применением итеративного подхода, в результате которого L -компонента приближалась к сигналу заданной формы, близкой к дельта-функции, с минимально предустановленной степенью схожести в 70 % [Ligorria, Ammon, 1999].

4. Выполнение процедуры суммирования с учетом кинематических поправок и лучевого параметра по всем PRF, вычисленным для одной станции.

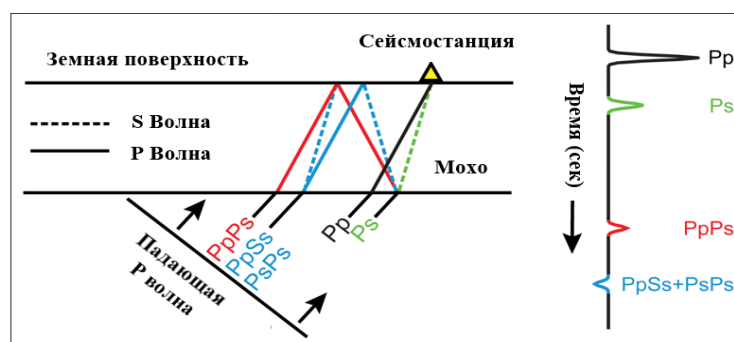


Рис. 4. Схематическое представление лучевых диаграмм основных сейсмических фаз, применяемых в вычислении P -функции приемника в H - k методе (слева), справа – синтетическая P -функция приемника.

Направление импульса на записи приемной функции (рис. 4) указывает на изменение скорости на границе отражения: положительный импульс демонстрирует увеличение скорости, отрицательный – уменьшение. Для комплексной интерпретации всех трех фаз и оценки мощности (глубины) земной коры мы использовали H - k stacking метод [Zhu, Kanamori, 2000], представляющий собой сеточный поиск абсолютного максимума целевого функционала $s(H, k)$ в координатах H (расстояние до границы) и k (отношение скоростей V_P/V_S) в предположении, что под станцией находится изотропный однородный слой

мощностью H над полупространством. В соответствии с этой моделью времена четырех фаз (см. рис. 4) относительно времени вступления P -волны определяются следующими формулами:

$$t_{P_s}(H, k, v_p, \rho) = H \left[\sqrt{\frac{k^2}{v_p^2} - \rho^2} - \sqrt{\frac{1}{v_p^2} - \rho^2} \right], \quad (1)$$

$$t_{P_P P_s}(H, k, v_p, \rho) = H \left[\sqrt{\frac{k^2}{v_p^2} - \rho^2} + \sqrt{\frac{1}{v_p^2} - \rho^2} \right], \quad (2)$$

$$t_{P_s P_s}(H, k, v_p, \rho) = 2H \left[\sqrt{\frac{k^2}{v_p^2} - \rho^2} \right], \quad (3)$$

$$s(H, k) = w_1 r(t_{P_s}) + w_2 r(t_{P_P P_s}) - w_3 r(t_{P_s P_s}). \quad (4)$$

где $r(t_i)$ – амплитуда радиальной компоненты приемной функции на рассчитанном в соответствии с уравнениями (1–3) времени прибытия i -ой фазы с параметрами (H, k, v_p, ρ) , H и k – перебираемые параметры в диапазонах $20 \leq H \leq 50$ км и $1.5 \leq k \leq 2.0$, константа $v_p = 6.5$ км/с – скорость P -волны в верхнем слое в соответствии с томографической моделью [Кулаков и др., 2011; Bushenkova et al., 2023], ρ – параметр луча и $w_1 \setminus w_2 \setminus w_3$ – нормированные весовые коэффициенты соответствующих фаз. Весовые коэффициенты подбирались итеративно с целью максимизации амплитуды целевого функционала $s(H, k)$ и минимизации неоднозначности решения. Для подавляющего большинства станций оптимальным оказался набор $0.4 \setminus 0.3 \setminus 0.3$. Точность решения оценивалась путем анализа стандартного отклонения для каждого параметра относительно радиуса центра тяжести целевого функционала [Zhu, Kanamori, 2000]. Обработка данных выполнена с использованием процедур из пакетов Obspy, Rf и Seispy [Xu, He, 2023] на языке программирования Python.

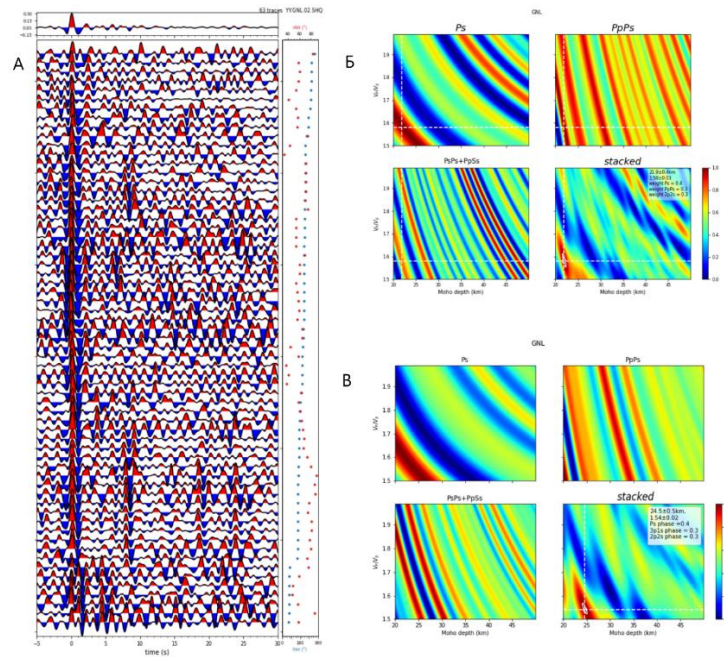


Рис. 5. Визуализация результатов применения H - k stacking к данным станции GNL: А – волновые формы индивидуальных и осредненной PRF (Q -компонента) от телесейсмических событий; Б – функция $s(H, k)$ на целевых фазах $P_s \setminus P_P P_s \setminus 2p2s$ (т. е. $P_s P_s + P_P P_s$) и стекированная с весами $0.4 \setminus 0.3 \setminus 0.3$ после применения фильтра Гаусса (0.5–1.5) и деконволюции в частотной области; В – после применения фильтра Гаусса (0.5–1.2) и итеративной деконволюции во временной области.

На рисунке 5 представлен пример H - k stacking метода инверсии PRF для станции GNL. Визуализированы ранжированные по азимуту (BAZ) волновые формы индивидуальных PRF от телесейсмических событий, их суммарная PRF и распределение значений функционала (4) с представлением по каждой фазе. Индивидуальные PRF дополнительно анализировались с целью улучшения качества определения вступлений целевых фаз и подбора весовых коэффициентов w_i .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты оцененных H - k staking методом значений мощности земной коры и осредненных значений отношения V_P/V_S под каждой из рассматриваемых станций представлены в табл. 1, на рис. 6 и 7. Среднее значение границы Мохоровичича под станциями, расположенными в центральном районе Камчатки, составило 31 км с вариацией от 23.4 до 40.1 км в районе Авачинской группы вулканов. Мощность коры в западной части полуострова 30–35 км со средней оценкой погрешности, не превышающей 0.5 км. В районе Авачинской зоны вблизи разлома наблюдается существенная вариация по глубине, значения изменяются от 23.4 км под станцией SDL до 40.1 км под станцией UGL.

Под станцией GNL, расположенной южнее вулканического комплекса Бакенин (в центре рассматриваемого района), расчетная глубина границы Мохоровичича составила 24.4 ± 0.5 км, отношение V_P/V_S составило 1.54 ± 0.02 , что несколько меньше среднего значения по всем станциям (см. табл. 1).

Таблица 1

Сейсмические станции: координаты, мощность земной коры и коэффициент отношения скоростей

Станция	Широта	Долгота	H , км	k	N
APC	52.9257	157.133	30.7 ± 0.9	1.71 ± 0.05	22
AVH	53.2642	158.7398	29.8 ± 0.6	1.70 ± 0.03	64
CR02	53.2836	158.4917	36.5 ± 1.5	1.86 ± 0.07	12
CR03	53.272	158.2004	34.0 ± 4.0	1.90 ± 0.19	12
CR04	53.1542	158.5382	32.1 ± 4.9	1.68 ± 0.21	10
CR06	53.0706	157.8194	28.5 ± 1.05	1.70 ± 0.07	8
CR09	52.7031	157.9948	28.1 ± 1.5	1.90 ± 0.03	11
CR11	53.2902	157.4711	29.4 ± 0.7	1.50 ± 0.02	11
DAL	53.0311	158.754	37.0 ± 1.4	1.79 ± 0.06	16
EH02	53.2705	159.7234	27.0 ± 4.1	1.81 ± 0.15	8
EH08	53.3858	158.976	38.6 ± 5.5	1.70 ± 0.21	12
EH09	53.1465	159.097	39.1 ± 1.1	1.87 ± 0.04	9
GNL	53.695	157.942	24.5 ± 0.5	1.54 ± 0.02	63
IVS	53.0659	158.608	26.5 ± 0.8	1.83 ± 0.05	10
KRE	53.304	158.749	27.2 ± 1.7	1.74 ± 0.11	16
KRK	53.296	158.643	34.8 ± 6.0	1.74 ± 0.23	19
KRM	52.8278	158.131	29.5 ± 5.1	1.96 ± 0.25	31
KRX	53.359	158.649	23.4 ± 0.8	1.62 ± 0.06	26
SBLV	54.3038	155.9611	35.8 ± 6.1	1.72 ± 0.24	9
SDL	53.278	158.887	23.7 ± 4.4	1.68 ± 0.12	24
SMA	53.266	158.812	25.9 ± 1.6	1.87 ± 0.08	27
SPN	53.1058	160.0114	26.2 ± 5.9	1.58 ± 0.25	13

UBL	52.8235	156.2821	32.5 ± 4.5	1.57 ± 0.13	9
UGL	53.21	158.8288	40.1 ± 5.5	1.84 ± 0.12	16
WH02	53.6065	157.289	35.8 ± 4.5	1.62 ± 0.12	17
WH03	53.4453	157.007	33.0 ± 1.3	1.60 ± 0.05	18
WH04	53.1807	157.158	29.9 ± 4.2	1.76 ± 0.07	11
WR01	53.0865	156.883	31.2 ± 1.6	1.68 ± 0.06	14
WR02	53.2707	156.8378	27.3 ± 2.8	1.52 ± 0.07	9
WR03	53.5451	156.685	28.9 ± 1.4	1.74 ± 0.08	9
WR04	53.8511	156.446	31.7 ± 0.7	1.63 ± 0.05	25

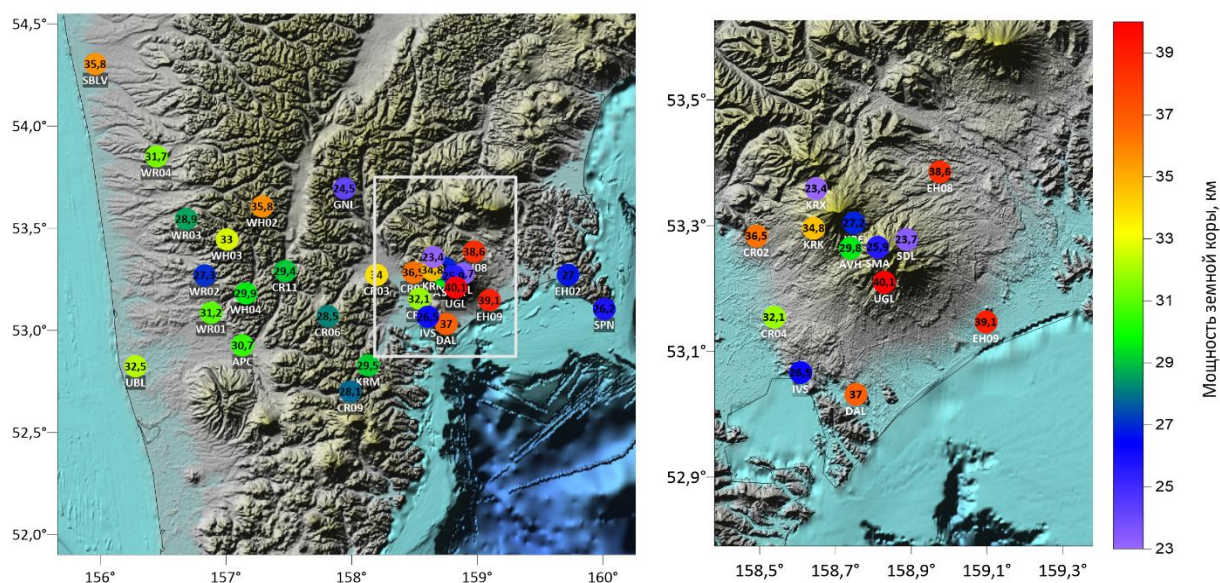


Рис. 6. Мощность земной коры в районе центральной Камчатки под сетью станций (см. табл. 1), оцененная $H-k$ методом.

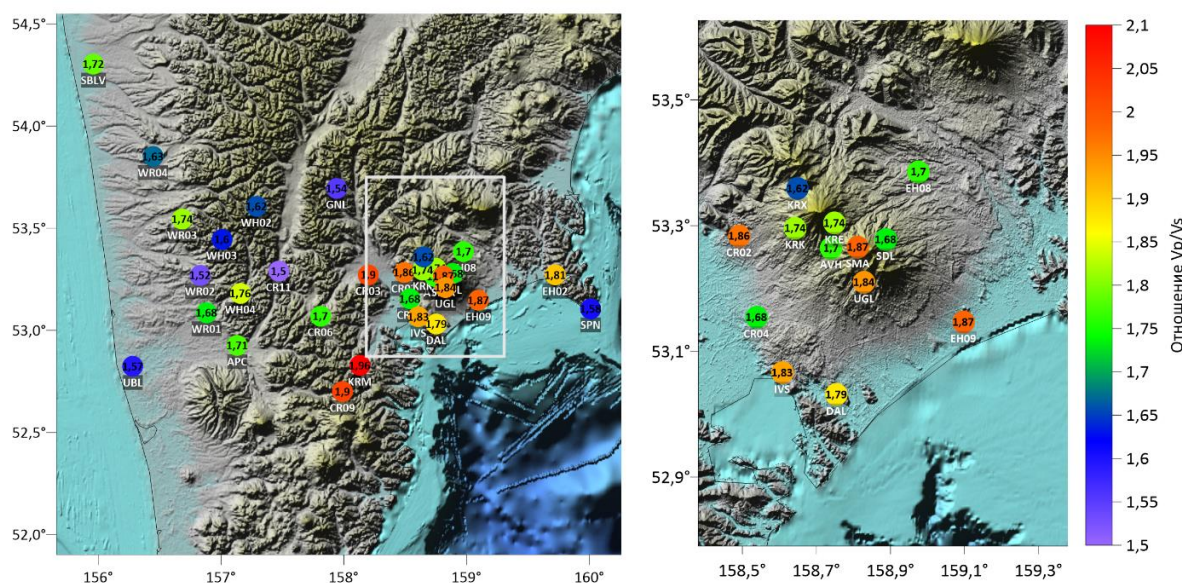


Рис. 7. Отношение V_p/V_s в районе центральной Камчатки под сетью станций (см. табл. 1).

Сравнивая значение мощности коры, 29.5 км под станцией KRM, полученное в настоящей работе, со значениями 30 км в работе [Гонтовая и др., 2007], 32 км в работе [Хритова и др., 2025] и 35 км в работе

[Резниченко и др., 2023], можно отметить практически полное совпадение в рамках интервального значения ошибки (см. табл. 1). Различие же по глубине, 26.5 ± 0.8 км, границы Мохо под станцией IVS, даже с учетом интервальной ошибки, при сравнении со значением, 33–35 км, в работе [Резниченко и др., 2023] можно объяснить различием как в методиках интерпретации приемных функций, так и в наборах данных по существенно раздробленной и неоднородной структуре коры, главным образом в грабеноподобной структуре МПЗ [Бушенкова, Кучай, 2023], как зоне вероятного влияния системы трансформных разломов в слэбе, особенно Авачинского (см. рис. 1). Тем не менее, полученные распределения сравниваемых значений достаточно близки к схеме мощности коры в исследовании [Гонтовая и др., 2007]. Выявленные региональные вариации мощности земной коры также согласуются с разрозненными результатами более ранних работ [Кузин, 1974; Levin et al., 2002].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящем исследовании значения глубин границы Мохоровичича под центральной зоной полуострова Камчатка, в совокупности с предыдущими результатами, расширяют и во многом дополняют информацию о неоднородности мощности коры этой области, особенно в зоне влияния Авачинского трансформного разлома. Установлено, что в центральной Камчатке мощность коры варьирует в диапазоне 23–40 км, с выраженным максимумом (~ 40 км) в районе Авачинской группы вулканов и минимумом (< 25 км) к югу от вулканического комплекса Бакенин. Наблюдаемая пространственная неоднородность согласуется с положением северо-восточного борта Малко-Петропавловской зоны разломов, что подтверждает ее глубинную природу и влияние на современную структуру коры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Авдейко Г.П., Савельев Д.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.** Принцип актуализма: критерии для палеотектонических конструкций на примере Курило-Камчатского региона // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. № 1. С. 32–59. EDN:HRSHTV.
- 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. EDN:HTQMVI.
- Андреев А.А.** Трансформные разломы земной коры северо-запада Тихого океана // Тихоокеанская геология. 1993. № 3. С. 14–20.
- Бушенкова Н.А., Кучай О.А.** Структура краевых областей Малко-Петропавловской разломной зоны по данным локальной сейсмотомографии и механизмам очагов землетрясений // Геология и геофизика. 2023. Т. 64, № 10. С. 1485–1496. doi:10.15372/GiG2023130. EDN:CPNMVS.
- Винник Л.П.** Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16–27. doi:10.31857/S0002-33372019116-27. EDN:BYXDGy.
- Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В., Попруженко С.В., Низкоус И.В.** Глубинная модель верхней мантии Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 1 (9). С. 90–104. EDN:IAGJHT.
- 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. EDN:HTUGUR.

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

Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 3. С. 22–34. EDN:NEAXOZ.

Кузин И.П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М.: Наука, 1974. 132 с.

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. EDN:NVUDEX.

Резниченко Р.А., Гоев А.Г., Алёшин И.М., Тарасов С.А., Гонтовая Л.И., Чебров Д.В. Глубинные скоростные разрезы района Авачинской бухты полуострова Камчатка, полученные методом функций приемника // Геофизические исследования. 2023. Т. 24, № 2. С. 25–38. doi:10.21455/gr2023.2-2. EDN:KBYGPRJ.

Хритова М.А., Мордвинова В.В., Кобелева Е.А. Структура земной коры и верхов мантии восточной части полуострова Камчатка по данным приемных функций продольных волн // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16, № 3. 0831. doi:10.5800/GT-2025-16-3-0831. EDN:FOLQDJ.

Чебров Д.В., Копылова Г.Н., Касимова В.А., Макаров Е.О. Комплексные геофизические наблюдения и информационные ресурсы Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН (полуостров Камчатка) // Российский сейсмологический журнал. 2024. Т. 6, № 2. С. 7–26. doi:10.35540/2686-7907.2024.2.01. EDN:IRMSEH.

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

Bushenkova N., Koulakov I., Bergal-Kuvikas O., Shapiro N., Gordeev E.I., Chebrov D.V., Abkadyrov I., Jakovlev A., Stupina T., Novgorodova A., Droznina S., Huang H.H. Connections between arc volcanoes in Central Kamchatka and the subducting slab inferred from local earthquake seismic tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. Vol. 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 // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1997. Vol. 102 (B8). P. 17883–17898. doi:10.1029/96JB03491.

Harland K.E., White R.S., Soosalu H. Crustal structure beneath the Faroe Islands from teleseismic receiver functions // Geophysical Journal International. 2009. Vol. 177 (1). P. 115–124. doi:10.1111/j.1365-246X.2008.04018.x.

Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. 1991. Vol. 105. P. 429–465. doi:10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x.

Langston C.A. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves // Journal of Geophysical Research. 1979. Vol. 84 (B9). P. 4749–4762. doi:10.1029/JB084iB09p04749.

Levin V., Park J., Brandon M., Lees J., Peyton V., Gordeev E., Ozerov A. Crust and upper mantle of Kamchatka from teleseismic receiver functions // Tectonophysics. 2002. Vol. 358 (1–4). P. 233–265. doi:10.1016/S0040-1951(02)00426-2.

Ligorria J.P., Ammon. C.J. Iterative deconvolution and receiver-function estimation // Bulletin of the Seismological Society of America. 1999. Vol. 89 (5). P. 1395–1400. doi:10.1785/BSSA0890051395.

- Syracuse E.M., Abers G.A.** Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2006. Vol. 7 (5). Q05017. doi:10.1029/2005GC001045.
- Vinnik L.P.** Detection of waves converted from P to SV in the mantle // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977. Vol. 15 (1). P. 39–45. doi:10.1016/0031-9201(77)90008-5.
- Volynets O.N.** Geochemical types, petrology and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island arc system // *International Geology Review*. 1994. Vol. 36 (4). P. 373–405. doi:10.1080/00206819409465467.
- Xu M., He J.** Seispy: Python module for batch calculation and postprocessing of receiver functions // *Seismological Research Letters*. 2023. Vol. 94 (2A). P. 935–943. doi:10.1785/0220220288.
- Zhu L., Kanamori H.** Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2000. Vol. 105 (B2). P. 2969–2980. doi:10.1029/1999JB900322.

REFERENCES

- Andreev A.A.** Transform faults of the Earth's crust, Northwestern Pacific // *Pacific Geology*. 1993. No. 3. P. 14–20. (In Russ.).
- Avdeiko G.P., Saveliev D.P., Popruzhenko S.V., Palueva A.A.** Principles of uniformitarianism: criteria for paleotectonic reconstructions by the example of the Kurile-Kamchatka region // *Vestnik KRAUNTS. Seriya Nauki o Zemle*. 2003. No. 1. P. 32–59 (In Russ.).
- Avdeiko G.P., Palueva A.A., Khleborodova O.A.** Geodynamic conditions of volcanism and magma formation in the Kurile-Kamchatka island-arc system // *Petrology*. 2006. Vol. 14 (3). P. 230–246. doi:10.1134/S0869591106030027.
- Bushenkova N., Koulakov I., Bergal-Kuvikas O., Shapiro N., Gordeev E.I., Chebrov D.V., Abkadyrov I., Jakovlev A., Stupina T., Novgorodova A., Droznina S., Huang H.H.** Connections between arc volcanoes in Central Kamchatka and the subducting slab inferred from local earthquake seismic tomography // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2023. Vol. 435. 107768. doi:10.1016/j.jvolgeores.2023.107768.
- Bushenkova N.A., Kuchay O.A.** The boundary areas structure of the Malko-Petropavlovsk fracture zone from local seismic tomography and earthquake foci mechanism data // *Russian Geology and Geophysics*. 2023. Vol. 64 (10). P. 1241–1250. doi:10.2113/rgg20234573.
- Chebrov D.V., Kopylova G.N., Kasimova V.A., Makarov E.O.** Integrated geophysical observations and information resources of the Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (Kamchatka Peninsula) // *Russian Journal of Seismology*. 2024. Vol. 6 (2). P. 7–26 (In Russ.). doi: 10.35540/2686-7907.2024.2.01.
- Droznin D.V., Droznina S.Ya.** Interactive DIMAS program for processing seismic signals // *Seismic Instruments*. 2011. Vol. 47 (3). P. 215–224. doi:10.3103/S0747923911030054.
- Gontovaya L.I., Gordienko V.V., Popruzhenko S.V., Nizkous I.V.** A depth model for the upper mantle of Kamchatka // *Vestnik KRAUNTS. Seriya Nauki o Zemle*. 2007. No. 1 (9). P. 90–104. (In Russ.).
- Gorbatov A., Kostoglodov V., Suárez G., Gordeev E.** Seismicity and structure of the Kamchatka Subduction Zone // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1997. Vol. 102 (B8). P. 17883–17898, doi:10.1029/96JB03491.
- Gordeev E.I., Gusev A.A., Levina V.I., Leonov V.L., Chebrov V.N.** Shallow earthquakes in the Kamchatka peninsula // *Volcanology and Seismology*. 2006. No. 3. P. 28–38. (In Russ.).

- Harland K.E., White R.S., Soosalu H.** Crustal structure beneath the Faroe Islands from teleseismic receiver functions // *Geophysical Journal International*. 2009. Vol. 177 (1). P. 115–124. doi:10.1111/j.1365-246X.2008.04018.x.
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R.** Traveltimes for global earthquake location and phase identification // *Geophysical Journal International*. 1991. Vol. 105. P. 429–465. doi:10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x.
- Khritova M.A., Mordvinova V.V., Kobeleva E.A.** Crustal and upper mantle structure in the eastern part of the Kamchatka Peninsula from *P*-wave receiver functions // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2025. Vol. 16 (3). 0831. (In Russ.). doi:10.5800/GT-2025-16-3-0831.
- Koulakov I.Yu., Dobretsov N.L., Bushenkova N.A., Yakovlev A.V.** Slab shape in subduction zones beneath the Kurile-Kamchatka and Aleutian arcs based on regional tomography results // *Russian Geology and Geophysics*. 2011. Vol. 52 (6). P. 650–667. doi:10.1016/j.rgg.2011.05.008.
- Kuzin I.P.** The focal zone and the upper mantle structure in the East Kamchatka region (In Russ.). Nauka, Moscow, 1974. 132 p.
- Langston C.A.** Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves // *Journal of Geophysical Research*. 1979. Vol. 84 (B9). P. 4749–4762. doi:10.1029/JB084iB09p04749.
- Levin V., Park J., Brandon M., Lees J., Peyton V., Gordeev E., Ozerov A.** Crust and upper mantle of Kamchatka from teleseismic receiver functions // *Tectonophysics*. 2002. Vol. 358 (1–4). P. 233–265. doi:10.1016/S0040-1951(02)00426-2.
- Ligorria J.P., Ammon. C.J.** Iterative deconvolution and receiver-function estimation // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1999. Vol. 89 (5). P. 1395–1400. doi:10.1785/BSSA0890051395.
- Markovskiy B.A.** (Ed.). State geological map of the Russian Federation. Scale of 1:200 000. South Kamchatka Series. Sheet N-57-XXVII (Petropavlovsk-Kamchatsky). Explanatory notes (In Russ.). VSEGEI, St. Petersburg, 2000. 303 p.
- Reznichenko R.A., Goev A.G., Aleshin I.M., Tarasov S.A., Gontovaya L.I., Chebrov D.V.** Deep velocity sections of the Avachinskaya bay area of the Kamchatka Peninsula obtained by the receiver function method // *Geophysical Investigations*. 2023. Vol. 24 (2). P. 25–38. (In Russ.). doi:10.21455/gr2023.2-2.
- Sheimovich V.S., Sidorov M.D.** South-eastern volcanic belt of Kamchatka: structure of the basement // *Volcanology and Seismology*. 2001. Vol. 22 (5). P. 505–514. EDN:LGUCZZ.
- Syracuse E.M., Abers G.A.** Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2006. Vol. 7 (5). Q05017. doi:10.1029/2005GC001045.
- Vinnik L.P.** Detection of waves converted from *P* to *SV* in the mantle // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977. Vol. 15 (1). P. 39–45. doi:10.1016/0031-9201(77)90008-5.
- Vinnik L.P.** Receiver function seismology // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019. Vol. 55 (1). P. 12–21. doi:10.1134/S1069351319010130.
- Volynets O.N.** Geochemical types, petrology and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island arc system // *International Geology Review*. 1994. Vol. 36 (4). P. 373–405. doi:10.1080/00206819409465467.
- Xu M., He J.** Seispy: Python module for batch calculation and postprocessing of receiver functions // *Seismological Research Letters*. 2023. Vol. 94 (2A). P. 935–943. doi:10.1785/0220220288.
- Zhu L., Kanamori H.** Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2000. Vol. 105 (B2). P. 2969–2980. doi:10.1029/1999JB900322.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СТУПИНА Татьяна Александровна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: геостатистика, обработка и анализ сейсмических данных, методы построения оценок качества моделей.

БУШЕНКОВА Наталья Анатольевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: структуры коры и мантии, тектонические процессы и закономерности, методы сейсмической томографии, комплексная интерпретация геофизических полей.

*Статья поступила в редакцию 24 ноября 2025 г.,
одобрена после рецензирования 2 декабря 2025 г.,
принята к публикации 3 декабря 2025 г.*