

УДК 550.34

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ЗОНЫ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ МАНТИИ В РАЙОНЕ О. САХАЛИН ПО ДАННЫМ ОБМЕННЫХ ВОЛН

© 2025 г. А. Г. Гоев^{1,*}, С. И. Орешин², Д. В. Костылев^{3,4}, Н. В. Костылева⁴

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³Сахалинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

⁴Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: goev@idg.ras.ru

Поступила в редакцию 03.02.2025 г.

После доработки 14.02.2025 г.

Принята к публикации 18.02.2025 г.

В работе представлены оценки рельефа границ зоны фазовых переходов мантии на глубинах около 410 и 660 км по данным сети сейсмических станций о. Сахалин методом функций приемника. Проанализирован представительный набор данных, состоящий из 2500 индивидуальных PRF. Выявлено, что граница 660 испытывает опускание в центральной и северной частях острова. Граница 410 демонстрирует сильное поднятие в южной части о. Сахалин, с последующим опусканием ниже стандартных значений во всем регионе исследований. Высказано предположение о связи погружения границы 410 с присутствием в зоне фазовых переходов горячего вещества нижней мантии в северной части острова.

Ключевые слова: зона фазовых переходов, мантия, PRF, зона субдукции, Сахалин.

DOI: 10.31857/S0002333725020037, **EDN:** DKRXCVC

ВВЕДЕНИЕ

Активные континентальные окраины являются предметом изучения мировой сейсмологии, т.к. во многом они являются ключом для понимания процессов как активной современной, так и палеогеодинамики. В последние десятилетия в связи с развитием сетей сейсмических станций, а также методов обработки и анализа данных исследования зон субдукции в различных районах Земли активно развиваются [Mishra et al., 2019; Han et al., 2020; Bianchi et al., 2021]. В частности, были получены подтверждения гипотезы о существовании разрывов (или окон) в различных субдуцирующих Тихоокеанских слэбах (погружающихся частях океанической литосферы) [Mark et al., 2022; Lloyd et al., 2020; Fichtner et al., 2018]. Совсем недавно наличие

такого явления было показано в районе центральной Японии [Sun et al., 2022]. Глобальные томографические модели (например, [Fukao, Obayashi, 2013]) и геолого-геохимические данные [Авдейко и др., 2001] предполагают возможное наличие таких же нарушений (или возможных отрывов слэба) в Дальневосточном регионе РФ, однако из-за отсутствия современных локальных сейсмологических наблюдений эти гипотезы пока не нашли своих подтверждений либо опровержений.

Отдельное внимание в исследованиях уделяется взаимодействию слэба и границ зоны фазовых переходов верхней мантии [Ishii, Ohtani, 2022; Goes et al., 2022 и ссылки в них]. Зоной фазовых переходов мантии (MTZ) является слой, лежащий на глубинах, близких к 410–660 км.

Изучение характеристик этой области имеет важнейшее значение, т.к. она во многом контролирует массоперенос между верхней мантией и нижележащими частями Земли и существенно влияет на конвективные мантийные процессы. Оливин, основной минерал в составе верхней мантии, испытывает фазовый переход в вадслеит при P - T -условиях, существующих на глубине, близкой к 410 км, далее происходит переход вадслеита в рингвудит на глубине порядка 520 км, и рингвудитав бриджманит и магнезиевустит на глубине около 660 км [Ringwood, 1991]. Каждый из фазовых переходов сопровождается изменением кристаллической структуры вещества с увеличением плотности, особенно заметной для переходов на глубинах 410 и 660 км. Этот фактор, влияющий на скоростные характеристики среды, делает сейсмологические методы основными при изучении этих границ.

Глубины залегания границ 410 и 660 км, а также мощность MTZ варьируются для различных регионов и даже в пределах одного региона. Важным фактором, влияющим на характеристики зоны фазовых переходов, является температурный режим. Так, при погружении в MTZ холодной субдуцирующей литосферы граница 410 км поднимается вверх, тогда как граница 660 км опускается, в результате чего мощность зоны растет [Helffrich, 2000]. При повышении температуры (например, вблизи горячего плюма) наблюдается обратный эффект.

Одной из немногих работ, в рамках которой использовались и обсуждались прямые наблюдения особенностей зоны фазовых переходов южной части Дальневосточного региона РФ, является работа [Винник и др., 1997]. При этом в ней исследовался обширный регион, который также включал в себя территории Японии, Китая и Кореи (30–60° с. ш. и 110–150° з. д.). В ней, на основе метода функций приемника [Винник, 2019], показано, что мощность MTZ, а также рельеф границ 410 и 660 км существенно меняется в рамках исследуемой территории, однако качество (преимущественно аналоговые записи) и, небольшое для такого региона, количество использованных в работе данных не позволило авторам достичь приемлемого площадного разрешения. Дальнейшие экспериментальные исследования MTZ Дальневосточного региона РФ не проводились, а имеющиеся работы

[Тараканов и др., 2015] связаны с пересмотром результатов работы [Винник и др., 1997] ввиду отсутствия современных данных. В представленной работе приводятся новые современные данные о строении MTZ в районе о. Сахалин с использованием метода функций приемника на основе анализа представительного набора широкополосных сейсмических данных.

МЕТОДИКА

В работе для изучения характеристик зоны фазовых переходов в верхней мантии был использован метод приемных функций, основанный на анализе обменных волн P - S (метод PRF) [Винник, 2019]. При прохождении падающей волны через контрастную сейсмическую границу формируется обменная волна, амплитуда и время вступления которой зависят от характеристик границы и от глубины конверсии, соответственно. В частности, для границ 410 и 660 км амплитуда составляет порядка 2–4% от амплитуды первой падающей волны. В качестве источников возбуждения использовались телесейсмические события, находящиеся в диапазоне эпицентральных расстояний 40–100° (эпицентральные расстояния, соответствующие параметрам луча от 8.2 до 4.4 с/град) и с магнитудой более 5.5. Такие параметры обеспечивают достаточную глубину проникновения луча, а также различимость вступления первой падающей волны. Для дальнейшего анализа отбирались записи с отношением сигнал/шум более 3, а также близкие к импульсной форме вступления первой падающей волны. Последующий процесс расчета PRF стандартизован и включает в себя частотную фильтрацию, переход в лучевую систему координат и деконволюцию. В предложенном исследовании исходные сейсмограммы фильтровались полосовым фильтром Баттерворта второго порядка с полосой пропускания 5–30 с. Далее трехкомпонентные записи P -волн от землетрясения переводились вращением из стандартной географической системы координат (Z , N , E) в лучевую систему (L , Q , T), где L -компонента соответствует главному направлению движения в продольной волне, а Q и T соответствуют SV - и SH -компонентам. Далее осуществлялась стандартизация (деконволюция) L -, Q -, T -компонент в предположении, что L -компонента является функцией источника,

то есть с точностью до нормирующего коэффициента определяется формой P -волны, подошедшей к подошве исследуемой структуры под сейсмической станцией, и минимально зависит от самой структуры. L -компонента в результате деконволюции приближается к стандартному импульсному источнику типа дельта функции, а на Q -компоненте выделяются зарегистрированные обменные волны. Полученную таким образом Q -компоненту будем называть индивидуальной PRF.

Для выявления обменных волн от целевых сейсмических границ индивидуальные PRF суммируются с поправками, которые зависят от параметра луча данной падающей волны и глубины границы обмена (строится стек). На практике суммарные трассы рассчитываются для многих предполагаемых глубин конверсии. Все события приводятся к одним значениям параметра луча — 6.4 с/град, а затем для каждой целевой глубины и для каждого события рассчитываются индивидуальные временные поправки, на которые сдвигается каждая трасса перед суммированием.

Для пространственной локализации районов, к которым приурочены полученные результаты, проводилось суммирование индивидуальных PRF в соответствии с “точками обмена”. Для данного события и для данной глубины были вычислены области, в которых были сформированы обменные волны и, соответственно, области, которые они характеризуют. После этого индивидуальные PRF складывались по регионам в соответствии с ожидаемым взаимодействием субдуцирующей плиты и границ 410 и 660.

ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе были использованы записи девяти широкополосных сейсмических станций Сахалинского филиала Единой геофизической службы РАН (СФ ЕГС РАН), установленные на о. Сахалин, ближайшей к острову части материка и южной части Курильских островов (рис. 1). Суммарное количество волновых форм, соответствующих описанным выше критериям, составило около 2500. В табл. 1 приведены данные по использованным сейсмическим станциям, а также по количеству отобранных индивидуальных PRF.

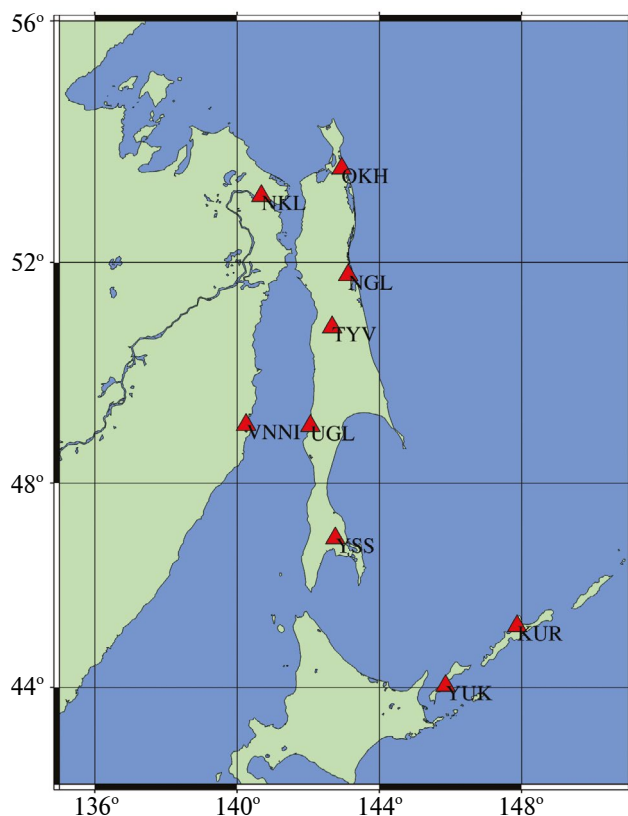


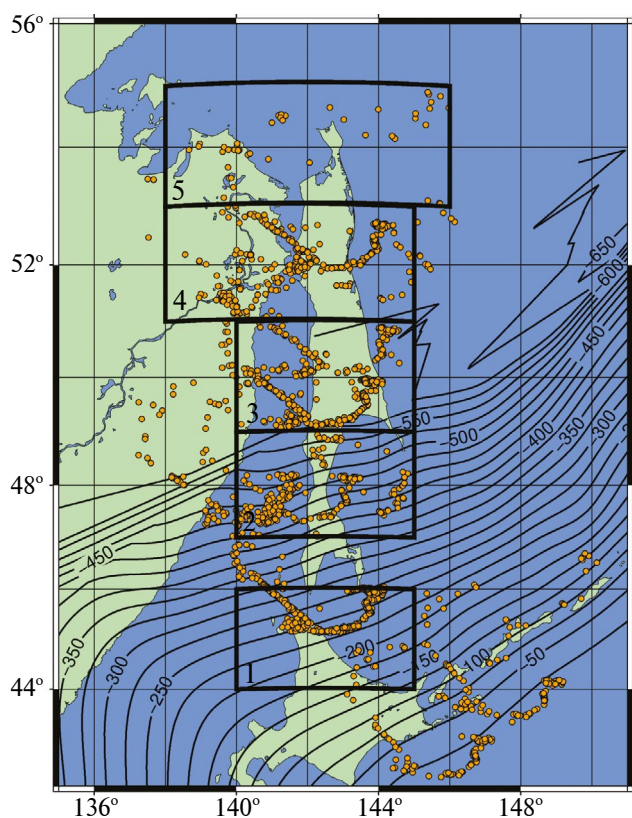
Рис. 1. Положение сейсмических станций, использованных в работе (красные треугольники).

Согласно глобальной модели глубины погружения слэба, конфигурация мест установки выбранных сейсмических станций является оптимальной для изучения возможных аномалий глубин залегания границ зоны фазовых переходов при взаимодействии с холодным Тихоокеанским слэбом [Hayes et al., 2018]. С учетом его характерной мощности около 100 км можно ожидать взаимодействия с границей 410 в наиболее южной части о. Сахалин, с последующим проникновением в MTZ и погружением к границе 660 в центральной части о. Сахалин. С целью подробного исследования рельефа границ зоны фазовых переходов регион исследования был разделен на 5 областей. Для всех индивидуальных PRF были рассчитаны точки обмена для глубины 535 км и для каждой из областей было проведено суммирование (строились стэки) записей в соответствии с ними (рис. 2).

Суммарные PRF для каждого из пяти районов представлены на рис. 3. На стеках уверенно обнаруживаются обменные волны от границ 410 и 660. Критерием выделения этих волн являются характерные амплитуды около 1–2%

Таблица 1. Список использованных широкополосных сейсмических станций, а также количество индивидуальных PRF по каждой из них

Название станции	Код станции	Начало архива	Число PRF
Оха	OKH	2005	297
Николаевск-на-Амуре	NKL	2013	65
Ноглики	NGL	2012	180
Тымовское	TYV	2005	485
Ванино	VNNI	2012	138
Углегорск	UGL	2012	190
Южно-Сахалинск	YSS	1993	856
Южно-Курильск	YUK	2012	130
Курильск	KUR	2012	134

**Рис. 2.** Карта региона исследований. Оранжевыми точками показаны точки обмена PRF для глубины 535 км. Черными прямоугольниками показаны области, для которых производилось суммирование. Изолиниями показана глубина залегания кровли слэба согласно глобальной модели [Hayes et al., 2018].

от первой падающей волны P , наблюдаемые времена вступления, близкие к 44 с для 410 и 68 с для 660 (здесь и далее за 0 принимается время вступления первой продольной волны),

и обнаружение вступлений на суммированных трассах, близких к 400 и 700 км [Структура ..., 1988; Kennett, Engdahl, 1991]. На единственном стеке, соответствующем области № 4, из-за сильной помехи не удастся идентифицировать обменную волну от границы 410. В табл. 2 для каждого района представлены наблюдаемые времена вступлений целевых фаз, а также суммарное количество PRF.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Как уже отмечалось выше, в соответствии со стандартной кинематической моделью Земли IASP91 [Kennett, Engdahl, 1991] времена регистрации обменных волн P - S от границ 410 и 660 составляют 44 и 67.9 с. Наблюдаемые вариации времен вступления этих фаз на сейсмограммах могут быть объяснены двояко. С одной стороны, на времена вступления могут влиять локальные кинематические параметры среды над изучаемыми границами, которые практически наверняка не соответствуют средним параметрам модели IASP91. Так, например, при аналогичных исследованиях MTZ на щитах обычно наблюдаются синхронные уменьшения наблюдаемых времен P_{410s} и P_{660s} на 1–1.5 секунды, что объясняется средними повышенными скоростями в верхней мантии. Вторым возможным объяснением аномалий является изменение глубины залегания границы. Так, при погружении границы время вступления обменной волны будет увеличиваться, и наоборот.

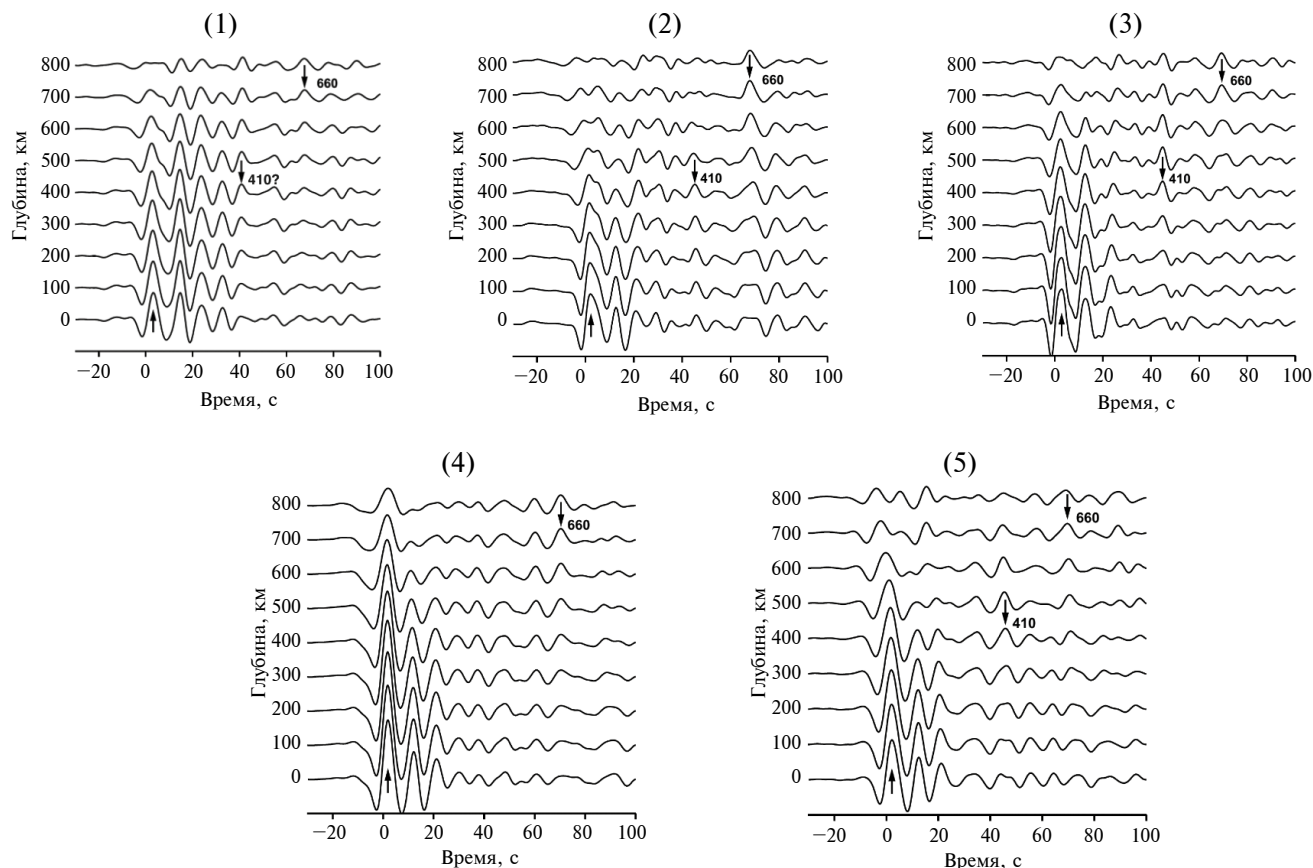


Рис. 3. Стеки, полученные суммированием индивидуальных PRF в соответствии с точками обмена. Номера над стеками соответствуют областям на рис. 2. Отмечены обменные волны от границ 410 и 660.

С учетом локальной тектоники зоны субдукции и наличия подтверждений выраженной топографии MTZ в регионе исследований мы будем интерпретировать наблюдаемые аномалии преимущественно изменениями глубин залегания границ 410 и 660 км.

Область № 1 (см. табл. 2), характеризующую самую южную часть о. Сахалин, выделяет яркая отрицательная аномалия времени вступления фазы P410s -3.2 с (здесь и далее мы будем вычитать теоретическое время из наблюдаемого, $t_{\text{набл}} - t_{\text{iasp91}}$). Эта аномалия свидетельствует в пользу существенного поднятия границы 410. При этом время вступления фазы P660s, с учетом характерной погрешности измерения ± 0.2 с, является стандартным. Такое поведение границ MTZ находится в полном соответствии с ожиданиями в соответствии с моделью субдукции (см. рис. 2), т.к. этот регион является областью проникновения слэба в зону фазовых переходов и взаимодействия его холодной погружающейся литосферы с границей 410.

Область № 2 отличается аномалией времени вступления фазы P410s обратного знака, составляющей $+1.2$ с, что может свидетельствовать о погружении границы 410. Как и для области № 1 не фиксируется взаимодействие слэба с границей 660.

В северной части о. Сахалин (области № 3–5) наблюдаются выраженные положительные аномалии глубины залегания границы 660, составляющие 1.6 – 2.5 с. Такие значения свидетельствуют о погружении этой границы. При этом наблюдаемые невязки недостаточно велики, чтобы предполагать прорыв этой границы слэбом и его проникновение в нижнюю мантию. В целом эти результаты не вступают в противоречие с данными сейсмической томографии [Fukao, Obayashi, 2013]. Неожиданными являются значения невязок фаз от границы 410, демонстрирующие стабильно положительные значения 0.8 – 1.8 с.

Граница 410 демонстрирует сложный рельеф. В диапазоне широт 44 – 46° она проявляет сильный

Таблица 2. Наблюдаемые времена вступлений обменных волн от границ 410 и 660 для каждого региона, а также суммарное количество индивидуальных PRF

Область	Широта (°)	Долгота (°)	PRF	t_{410} (с)	t_{660} (с)
1	44–46	140–145	647	40.8	67.7
2	47–49	140–145	374	45.2	67.9
3	49–51	140–145	563	44.8	69.5
4	51–53	138–145	399	—	70.4
5	53–55	138–146	51	45.8	69.6

подъем при прорыве ее слэбом. Такой результат, как уже отмечалось, вполне ожидаем, а локализация этого взаимодействия находит свое подтверждение в результатах сейсмической томографии [Liu, Zhao, 2016]. Однако, начиная с 53° северной широты и далее до 55°, вопреки ожидаемому возврату к стандартным значениям, представленные данные демонстрируют прогиб границы 410. Вероятнее всего, такой эффект вызван влиянием разогретого вещества нижней мантии.

На данный момент мы не можем предложить однозначной гипотезы возникновения этого разогретого вещества над слэбом. С нашей точки зрения, вероятными могут являться две гипотезы. В работе [Cui et al., 2023], на основе анализа данных о строении границы 660 в районе Курильских островов, высказано предположение о наличии перегретой, частично подплавленной мантии под субдуцирующим слэбом. Таким образом, если предположить наличие окна или трещины в слэбе в районе исследования (как, например, это продемонстрировано под Японией [Sun et al., 2022]), этот материал мог вступить во взаимодействие с границей 410 и вызвать ее опускание. С другой стороны, в работе [Guo, Zhou, 2021] показано, что для стагнирующих в MTZ слэбов может быть характерен захват горячего вещества нижней мантии над слэбом при перемещении его фронта по границе 660. Такой процесс также может объяснить представленные в работе данные. Для более уверенной интерпретации выявленных эффектов необходимо проанализировать данные станций, расположенных на материке.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет гранта РНФ № 25-27-00240 и с использованием данных, полученных

на уникальной научной установке — “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А. Современная тектоническая структура Курило-Камчатского региона и условия магмообразования. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский. 2001. 428 с.
- Бурмаков Ю.А., Винник Л.П., Косарев Г.Л. и др. Структура и динамика литосферы по сейсмическим данным. М.: Наука. 1988. 221 с.
- Винник Л.П. Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16–27.
- Винник Л.П., Косарев Г.Л., Петерсен Н.В. Передаточные функции мантии в дальневосточной зоне субдукции // Докл. РАН. 1997. Т. 353. № 3. С. 379–382.
- Тараканов Р.З., Веселов О.В., Андреева М.Ю. О возможной границе фазовых переходов на глубине 350 км для зоны перехода от континента к океану // Докл. РАН. 2015. Т. 460. № 5. С. 585–588.
- Bianchi M.B., Assumpção M., Koch C., Beck S. Effect of the cold Nazca Slab on the depth of the 660 km discontinuity in South America // Journal of South American Earth Sciences. 2021. V. 112. Part 1. 103607. DOI: 10.1016/j.jsames.2021.103607
- Cui Q., Zhou Y., Liu L., Gao Y., Li G., Shengfeng Zhang S. The topography of the 660-km discontinuity beneath the Kuril-Kamchatka: Implication for morphology and dynamics of the northwestern Pacific slab // Earth and Planetary Science Letters. 2023. V. 602. 117967.
- Fichtner A., van Herwaarden D.P., Afanasiev M., Simuté S., Krischer L., Çubuk-Sabuncu Y., Taymaz T., Colli L., Saygin E., Villaseñor A. et al. The collaborative seismic earth model: generation 1 // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. № 9. P. 4007–4016.
- Fukao Y., Obayashi M. Subducted slabs stagnant above, penetrating through, and trapped below the 660 km

discontinuity // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. V. 118. P. 5920–5938.

Fukao Y., Obayashi M. Subducted slabs stagnant above, penetrating through, and trapped below the 660 km discontinuity // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. V. 118. P. 5920–5938.

Goes S., Yu C., Ballmer M.D. et al. Compositional heterogeneity in the mantle transition zone // *Nature Review Earth & Environment*. 2022. V. 3. P. 533–550

DOI: 10.1038/s43017-022-00312-w

Guo Z., Zhou Y. Stagnant slabs and their return flows from finite-frequency tomography of the 410-km and 660-km discontinuities // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2021. V. 126. e2020JB021099.

Han R., Li Q., Huang R., Zhang H. Detailed structure of mantle transition zone beneath southeastern China and its implications for thinning of the continental lithosphere // *Tectonophysics*. 2020. V. 789. 228480.

DOI: 10.1016/j.tecto.2020.228480

Hayes G.P., Moore G.L., Portner D.E., Hearne M., Flamme H., Furtney M., Smoczyk G.M. Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model // *Science*. 2018. V. 362. P. 58–61.

DOI: 10.1126/science.aat4723

Helfrich G. Topography of the transition zone seismic discontinuities // *Rev. Geophys.* 2000. V. 38. № 1. P. 141–158.

Ishii T., Ohtani E. Dry metastable olivine and slab deformation in a wet subducting slab // *Nature Geoscience*. 2021. V. 14. P. 526–530.

DOI: 10.1038/s41561-021-00756-7

Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // *Geophys. J. Int.* 1991 V. 105. P. 429–465.

Liu X., Zhao D. P and S wave tomography of Japan subduction zone from joint inversions of local and teleseismic travel times and surface-wave data // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2016. V. 252. P. 1–22.

DOI: 10.1016/j.pepi.2016.01.002

Lloyd A.J., Wiens D.A., Zhu H., Tromp J., Nyblade A.A., Aster R.C. et al. Seismic structure of the Antarctic upper mantle imaged with adjoint tomography // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2020. V. 125. № 3. 2019JB017823.

DOI: 10.1029/2019JB017823

Mark H.F., Wiens D.A., Ivins E.R., Richter A., Mansour W., Magnani M.B. et al. Lithospheric erosion in the Patagonian slab window, and implications for glacial isostasy // *Geophysical Research Letters*. 2022. V. 49. e2021GL096863.

DOI: 10.1029/2021GL096863

Mishra S., Prajapati S., Teotia S. S. Mantle Transition Zones (MTZ) discontinuities beneath the Andaman Subduction Zone // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020.

DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.104102

Ringwood A. E. Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1991. V. 55. P. 2083–2110.

Sun M., Yu Y., Gao S., Liu K. Stagnation and tearing of the subducting northwest Pacific slab // *Geology*. 2022. V. 50. № 6. P. 676–680.

Features of the Sakhalin Mantle Phase Transition Zone Based on Converted Wave Data

A. G. Goev^{a,*}, S. I. Oreshin^b, D. V. Kostylev^{b,c}, and N. V. Kostyleva^d

^a*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^c*Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

^d*The Institute of Marine Geology and Geophysics of the far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

*e-mail: goev@idg.ras.ru

Received November 11, 2024; revised December 1, 2024; accepted December 25, 2024

Abstract — The research presents the phase transition zone boundaries' topography estimates at the depths of about 410 and 660 km on the basis of data set obtained by Sakhalin island seismic station network using receiver function method. A representative data set consisting of 2500 individual PRFs was analyzed. We revealed a depression in the 660 km boundary in the central and northern parts of the island. The 410 km boundary is significantly elevated in the south Sakhalin, while within the rest of the island it is depressed in comparison to the expected standard depth. It has been suggested that the subsidence of the 410 boundary is connected with the presence of hot lower mantle matter in the phase transition zone in the northern part of the island.

Keywords: phase transition zone, mantle, PRF, subduction zone, Sakhalin