

УДК 550.347

## ПРИМЕНИМОСТЬ ФУНКЦИЙ ПРИЕМНИКА В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ (АВАЧИНСКАЯ БУХТА)

© 2023 г. А. Г. Гоев<sup>1,\*</sup>, Р. А. Резниченко<sup>1</sup>, И. М. Алешин<sup>2</sup>

Представлено академиком РАН А.Д. Гвишиани 03.04.2023 г.

Поступило 03.04.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принято к публикации 04.04.2023 г.

В работе исследуются особенности волновых форм  $P$ - и  $S$ -функций приемника, построенных по записям трех компактно расположенных широкополосных сейсмических станций. Станции расположены у Авачинской бухты, вблизи погружающейся части тихоокеанской плиты. Последняя представляет собой наклонный слой с повышенными значениями сейсмических скоростей, который может вызвать формирование сложной картины сейсмических волн и, тем самым, исказить форму функций приемника. Чтобы выявить степень этого влияния, мы вычислили две пары функций приемника. Для расчета первой пары мы использовали события, в которых сейсмические волны прошли через погружающуюся океаническую плиту, а для второй — нет. Показано, что обменные и кратные волны, образованные на границах высокоскоростного слоя, существенно искажают форму  $P$ -приемных функций, начиная, приблизительно, с 30-й секунды после вступления основной фазы. Существенного влияния субдуцирующей плиты на записи  $S$ -функций приемника не выявлено. Это эмпирически подтверждает применимость локальных одномерных моделей для интерпретации функций приемника. При этом сейсмический шум, вызванный океанической плитой, ограничивает максимальную глубину таких моделей величиной около 200 км в изучаемом районе.

**Ключевые слова:** обменные волны, функции приемника, PRF, SRF, зона субдукции, Камчатка

**DOI:** 10.31857/S2686739723600686, **EDN:** WGNSHY

Активные континентальные окраины привлекают внимание специалистов-геофизиков возможностью изучения современных геодинамических процессов, влияющих на внутренние процессы в геосферах. Одним из таких регионов является Курило-Камчатская зона субдукции, в которой океаническая плита погружается в верхнюю мантию до глубин 600–800 км под углом около 45° (см., напр. [1]). Таким образом, океаническая плита проходит через все основные границы в верхней мантии — границу Мохо, кровлю, а возможно, и подошву зоны фазовых переходов, расположенных на глубинах около 410 и 660 км соответственно.

В настоящее время основными сейсмологическими инструментами изучения глубинного строения Земли являются методы сейсмической томографии и функций приемника. Они активно

применяются для изучения тектонически различных регионов Земли (например, [2, 3]). При изучении зон субдукции метод обменных волн обычно применяется в варианте “общей точки обмена” (Common Conversion Point, *CCP*), в котором переход из временного разреза в разрез по глубине требует выбора начальной скоростной модели. Очевидно, что параметры выбранной модели могут существенно повлиять на конечный результат. Кроме того, для получения устойчивых и хорошо разрешенных результатов методом *CCP* необходимы плотные сети широкополосных сейсмических станций, далеко не всегда доступные в исследуемом регионе. В этом случае глубинное скоростное строение земной коры и верхней мантии можно определить классическим методом функций приемника в его современной модификации (см. статью [4] и ссылки в ней). Метод используют для изучения регионов с различным геодинамическим режимом по данным, в том числе, одиночных сейсмических станций (см., например, [5, 6]), что, впрочем, не исключает его применения и для пространственно распределенной группы станций (см., например, [7, 8]). Однако применимость этого подхода в непосредственной близости от зоны субдукции требу-

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: andr.goev@gmail.com

**Таблица 1.** Основные характеристики сейсмических станций и количество отобранных функций приемника

| Название      | Код станции | Lat   | Lon    | Датчик | Полоса пропускания (Гц) | Год открытия | PRF | SRF |
|---------------|-------------|-------|--------|--------|-------------------------|--------------|-----|-----|
| Дальний       | DAL         | 53.03 | 158.75 | CMG6TD | 0.03–100                | 2009         | 119 | 34  |
| Институт      | IVS         | 53.06 | 158.60 | CMG3TB | 0.03–50                 | 2007         | 130 | 166 |
| Петропавловск | PET         | 53.02 | 158.64 | STS-1  | 0.002–10                | 1993         | 402 | 333 |

ет дополнительного обоснования. Дело в том, что в рассматриваемой модификации метода скоростная структура под станцией определяется обращением волновых форм обменных волн (т.е. решается обратная задача), которое производится в рамках латерально однородной модели. Чаще всего принимается, что непосредственно под станцией среда может быть описана слоистой пачкой на полупространстве. Это позволяет обратиться волновые формы в глубинный скоростной разрез, используя эффективные матричные методов расчета прямой задачи. Цель нашего исследования состоит в эмпирическом изучении влияния погружающейся океанической литосферы (слэба) на волновые формы функций приемника и получить аргументы в пользу применимости одномерных скоростных моделей для описания строения среды вблизи субдуктирующей плиты.

В основе методики функций приемника лежит использование данных об обменных волнах от удаленных сейсмических событий. Метод обычно разделяют на две составляющие по типам используемых обменных фаз —  $P$ -функция приемника (или  $PRF$ ) использует обменные и кратные волны  $P$ - $S$  ( $Ps$ ) и, соответственно,  $S$ -функция приемника (или  $SRF$ ), использующая обменные и кратные волны  $S$ - $P$  ( $Sp$ ) [9, 10]. Для получения индивидуальных функций приемника мы использовали подход, многократно апробированный и детально описанный в литературе [4, 11]. Кратко остановимся только на наиболее важных аспектах методики. Сейсмические события отбираются в соответствии с эпицентрными расстояниями, для  $PRF$  диапазон эпицентрных расстояний составляет 40–100°, для  $SRF$  — 65–100°. Для получения параметров анализируемых событий (времени в очаге, глубины и координат) использовался каталог Global Centroid Moment Tensor Catalog ( $CMT$ ) [12, 13]. Эмпирически установлено, что события с магнитудой менее 5.5 чрезвычайно редко пригодны для построения функций приемника. Потому землетрясения с меньшими магнитудами в обработке не участвовали. Для дальнейшей анализа отбирались события с импульсной формой колебания первой падающей волны ( $P$  для  $PRF$  и  $S$  для  $SRF$  соответственно) и высоким отношением сигнал/шум (3 и более). Для получения индивидуальных функций

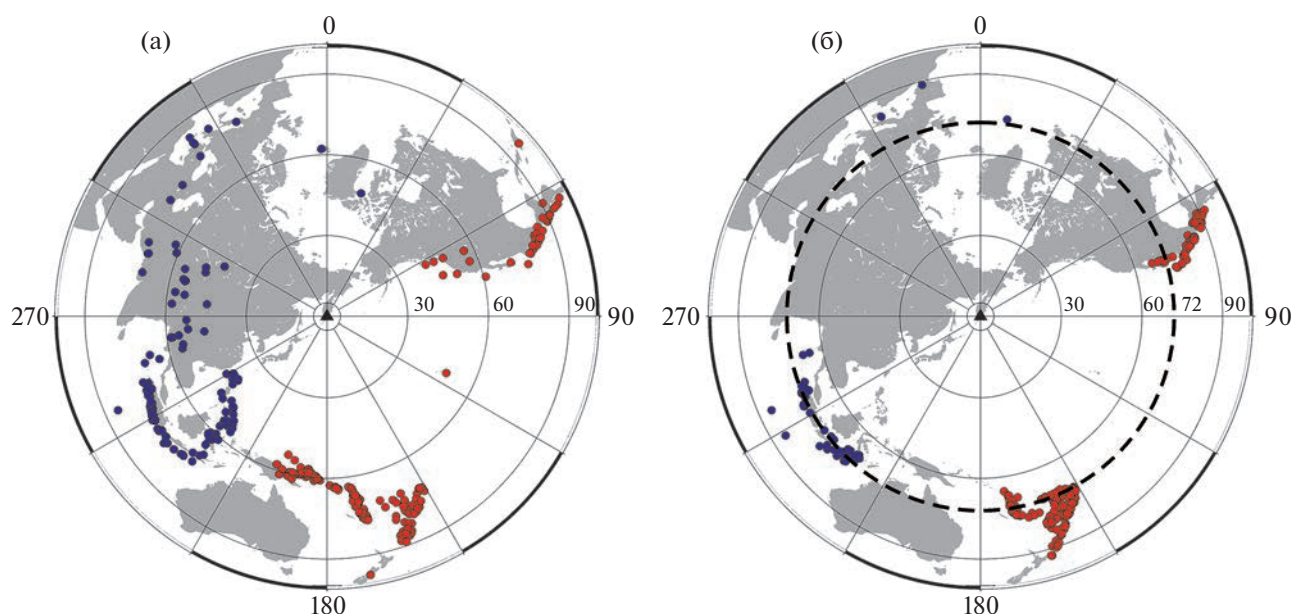
приемника к отобранным событиям применялся набор стандартных процедур, включающий в себя переход в лучевую систему координат, деконволюцию и частотную фильтрацию [4].

Мы использовали сейсмограммы трех широкополосных сейсмических станций, расположенных в районе Авачинской бухты полуострова Камчатка. Расстояние от них до начала зоны погружения океанической плиты составляет около 200 км. Основные характеристики сейсмических станций, а также количество отобранных индивидуальных функций приемника, приведено в табл. 1. Станции удалены друг от друга на расстояния, не превышающие 20 км, что сравнимо с радиусом первой зоны Френеля на анализируемых периодах. Это позволяет, при расчете  $P$ - и  $S$ -функций приемника, объединить данные всех трех станций.

Исходный набор функций приемника составил 651  $PRF$  и 533  $SRF$ . Чтобы выделить влияние субдуцирующей плиты, весь имеющийся комплект индивидуальных данных был разделен по азимутам<sup>1</sup> в соответствии с азимутом простирающейся слэба, составляющим около 30°. Таким образом, эпицентр событий, сейсмические волны от которых не проходят через погружающуюся плиту, находятся в диапазоне азимутов 0–20° и 220–360°, тогда как волны от событий, пришедших с азимутов 40–200°, должны проходить через слэб и испытывать его влияние. С целью исключения возможных ошибок, события с азимутов 20–40° и 200–220° были удалены из рассмотрения. Распределение эпицентров использованных событий показано на рис. 1. В исходные выборки вошли 359  $PRF$  и 410  $SRF$  для группы событий, волны от которых прошли через слэб и 215  $PRF$  и 90  $SRF$  для группы записей, не испытывающих влияния слэба.

Для обнаружения обменных волн от изучаемых сейсмических границ с использованием обменных волн  $P$ - $S$ , индивидуальные  $PRF$  суммируются с поправками, которые зависят от параметра луча данной падающей волны и глубины границы обмена. На практике суммарные трассы

<sup>1</sup> Далее, для краткости, под азимутом мы имеем в виду обратный азимут — азимутальный угол, отсчитанный от сейсмостанции на источник.



**Рис. 1.** Распределение эпицентров использованных событий для PRF (а) и SRF (б). Синими кружками отмечены отобранные события, сейсмические волны от которых не прошли через субдуктирующую плиту, красными — те, которые прошли через нее. Расположение станций показано черным треугольником. Пунктирным кругом на (б) показано эпицентрального расстояния, являющееся предельным для формирования обменной *S-P*-волны от границы 410 на SRF.

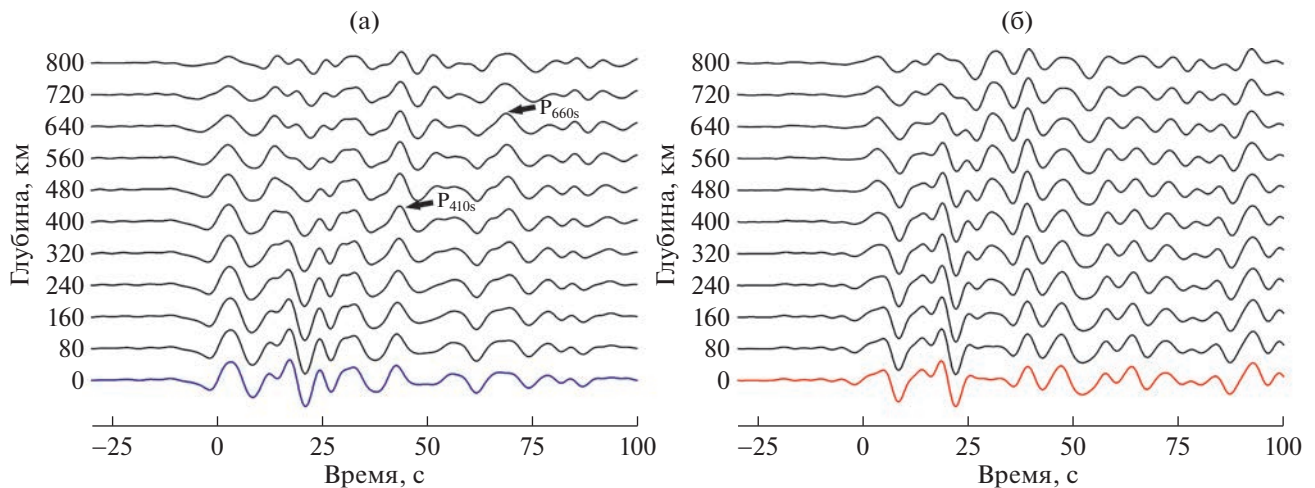
рассчитываются для многих предполагаемых глубин конверсии. Все события приводятся к одним значениям параметра луча — 6.4 с/град, а затем для каждой целевой глубины и для каждого события рассчитываются индивидуальные временные поправки, на которые “сдвигается” сейсмограмма перед суммированием. Процесс суммирования индивидуальных SRF несколько отличается и включает в себя присвоение каждой из записей весовых коэффициентов за уровень сейсмического шума и за отклонение поляризации данной *S*-волны от плоскости *P-SV*, с последующим суммированием относительно некоего (обычно среднего по выборке) эпицентрального расстояния [11]. Важным маркером качества полученных функций приемника является выделение обменных волн зоны фазовых переходов верхней мантии на глубинах около 410 и 660 км. Кроме того, анализ амплитуд и времен вступлений этих фаз представляет и самостоятельный интерес (например, см. [14]).

На рис. 2 а приведены трассы стека, построенные по волнам, не прошедшим через слэб. Аналогичное построение для волн, пересекающих слэб, изображено на рис. 2 б. Обращает на себя внимание отсутствие на рис. 2 б обменных волн от границ 410 и 660 км, тогда как на рис. 2 а эти фазы видны отчетливо, имеют характерные амплитуды (0.04 и 0.03), времена вступления (43.4 с и 68.7 с) и глубины фокусировки (400 и 640 км). С большой вероятностью можно предположить, что волны, генерируемые на контрастных границах

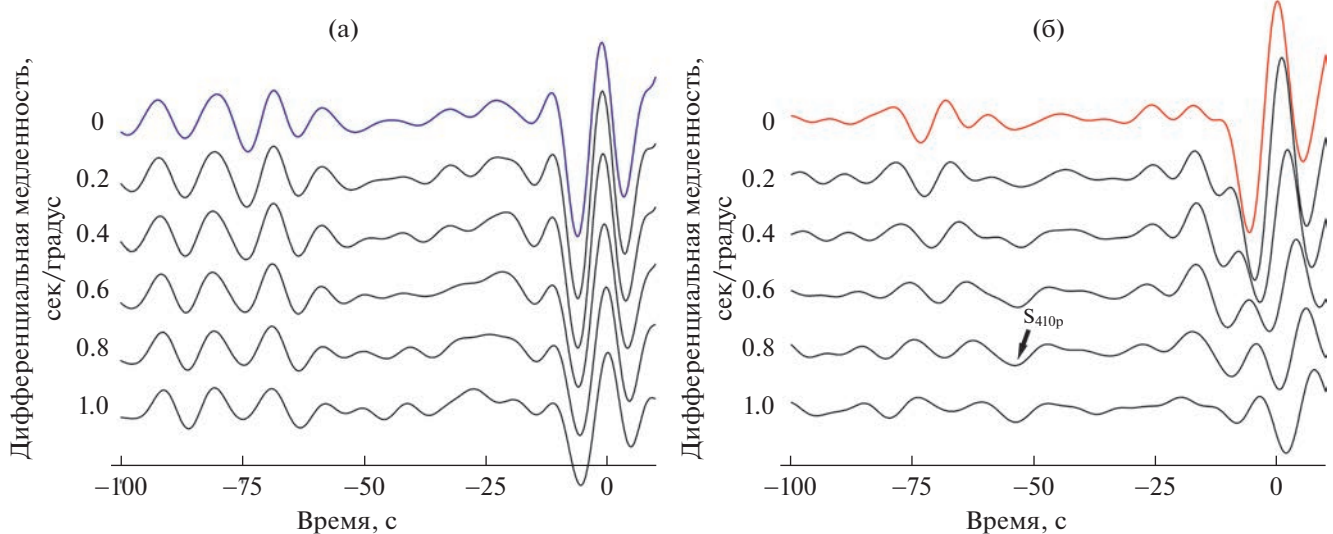
кровли и подошвы слэба, создают шум, которые маскируют сигналы от границ зоны фазовых переходов. Важно, что влияние слэба проявляется на всех трассах стека, начиная, приблизительно, с 30-й секунды после первого вступления *P*-волны.

Стеки, полученные суммированием индивидуальных *SRF* для обеих групп данных, приведены на рис. 3. Как и на предыдущем рисунке, волнам, прошедшим через слэб, соответствует панель “б”. На рисунке отсутствует регулярный сигнал, который можно было бы однозначно связать с наличием контрастного слоя. Вместе с тем на стеке отчетливо выделяется обменная волна *Sp* от границы 410 км. Отсутствие этой волны на стеке, полученных по волнам, не пересекающим зону субдукции, объясняется распределением эпицентральных расстояний событий, использованных при его построении. Нетрудно убедиться, что в Земле обменные волны *Sp* от границы 410 км не формируются на эпицентральных расстояниях меньше 72°. В данном же случае только 30 событий удалены на расстояние более 72°, и только 5 имеют эпицентральных расстояний более 75° (см. рис. 1 б).

Важной особенностью метода функций приемника является возможность получения устойчивых скоростных моделей земной коры и верхней мантии вплоть до глубин порядка 300 км. Зависимости от глубины абсолютных значений упругих параметров среды под станцией получают обращением волновых форм функций приемника и сопутствующих данных. Объем вычисле-



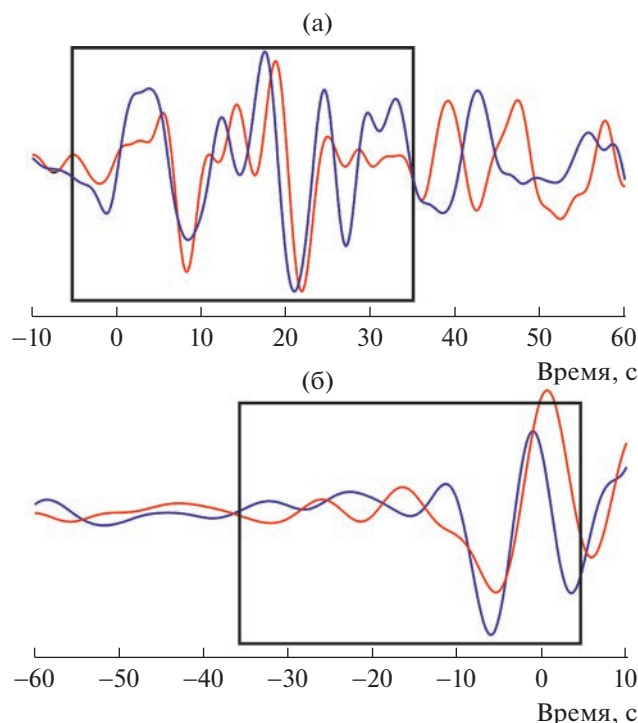
**Рис. 2.** Стеки, полученные суммированием индивидуальных PRF по записям волн, не прошедших через слэб (а) и прошедших через него (б). На (а) выявлены и показаны вступления обменных волн от границ 410 км (P410s) и 660 км (P660s). Цветом показаны трассы, соответствующие дневной поверхности и участвующие в инверсии.



**Рис. 3.** Стеки, полученные суммированием индивидуальных SRF по записям волн, не прошедших через слэб (а) и прошедших через него (б). На (б) уверенно выявляется волна, отвечающая границе 410 км (S410p). Цветом показаны трассы, соответствующие дневной поверхности и участвующие в инверсии.

ний, сопутствующий решению обратной задачи, позволяет получить решение только в терминах латерально однородных моделей среды. При изучении зон субдукции корректность такого приближения не очевидна и требует дополнительного обоснования, например, с привлечением численного моделирования. Однако качественные, эмпирические оценки можно сделать на основе анализа полученных волновых форм. На рис. 4 приведены трассы стеков, отвечающие дневной поверхности (трассы “0” на стеках на рис 2 и 3). На обеих панелях синим цветом показаны суммарные функции приемника для волн, не про-

шедших через слэб, красным — прошедших через него. На рис. 4 а видно, что существенные отличия записей *PRF* начинаются приблизительно с 30-й секунды. При этом на записях *SRF* сейсмический шум, вызванный наличием слэба, отсутствует (рис. 4 б). Как отмечалось выше, это определяется особенностями генерации сейсмических волн на границах субдуцирующей плиты. Важно, что вне регулярной помехи, создаваемой слэбом, волновые формы обменных волн как *PRF*, так и *SRF* подобны в интересующем нас диапазоне времени: от –5 с до 35 с для *PRF* и от –35 с до 5 с для *SRF*, в пределах которых произво-



**Рис. 4.** Суммарные P- (а) и S-функции (б) приемника, полученные суммированием волн, прошедших через слэб (красным) и не прошедших через него (синим). Рамками выделены временные интервалы, в пределах которых осуществляется инверсия.

дится инверсия [15]. Подобие волновых форм свидетельствует в пользу принципиальной применимости локальных одномерных моделей для интерпретации данных. В то же время отличие в деталях говорит о необходимости использования различных моделей для описания волн, пришедших с разных азимутов. Зашумленность сигнала PRF после 30 с после первого вступления первой падающей волны ограничивают максимальную глубину скоростного разреза величиной около 200 км.

Суммируя полученные результаты, можно сделать вывод о принципиальной возможности применения метода функций приемника для восстановления глубинного скоростного строения земной коры и верхней мантии в зонах субдукции. Как показывает анализ суммарных PRF и SRF, зарегистрированных в районе Авачинской бухты (около 200 км от зоны погружения океанической плиты), регулярный сейсмический шум, связанный со слэбом, проявляется на P-функции приемника, начиная с 28–30-й секунды, практически не оказывая влияния на форму S-приемных функций.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке — “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга

арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира”.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИДГ РАН (№ 122040400015-5) и ИФЗ РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 регионально томографии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 6. С. 830–851.
2. Kim H.J., Kawakatsu H., Akuhara T., Shinohara M., Shiobara H., Sugioka H., Takagi R. Receiver function imaging of the amphibious NE Japan subduction zone—Effects of low-velocity sediment layer // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2021. V. 126.
3. Zhao D., Fujisawa M., Toyokuni G. Tomography of the subducting Pacific slab and the 2015 Bonin deepest earthquake (Mw 7.9) // Sci. Rep. 2017. V. 7. № 44487.
4. Винник Л.П. Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16–27.
5. Vinnik L.P., Oreshin S.I., Makeyeva L.I. Siberian Traps: Hypotheses and Seismology Data // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2017. V. 53. № 3. P. 332–340.
6. Goev A.G., Sanina I.A., Oreshin S.I., Reznichenko R.A., Tarasov S.A., Fedorov A.V. Receiver-Function Velocity Structure of the Lithosphere beneath the Khibiny and Lovozero Massifs, Northeastern Baltic Shield // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2021. V. 57. № 5. P. 605–613.
7. Vinnik L.P., Reigber C., Aleshin I.M., Kosarev G.L., Kaban M.K., Oreshin S.I., Roecker S. Receiver function tomography of the central Tien Shan // Earth and Planetary Science Letters. 2004. Iss. 1–2. V. 225. P. 131–146.
8. Kraft H.A., Vinnik L.P., Thybo H. Mantle transition zone beneath central-eastern Greenland: Possible evidence for a deep tectosphere from receiver functions // Tectonophysics. 2018. V. 728–729. P. 34–40.
9. Kosarev G., Oreshin S., Vinnik L., Kiselev S., Dattatrayam R., Suresh G., Baidya P. Heterogeneous lithosphere and the underlying mantle of the Indian subcontinent // Tectonophysics. 2013. V. 592. P. 175–186.
10. Oreshin S., Kiselev S., Vinnik L.K., Prakasam Surya, Shyam S. Rai, Makeyeva L., Savvin Y. Crust and mantle beneath western Himalaya, Ladakh and western Tibet from integrated seismic data // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. V. 271. P. 75–87.
11. Farra V., Vinnik L. Upper mantle stratification by P- and S-receiver functions // Geophys. J. Int. 2000. V. 141. P. 699–712.
12. Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 2825–2852.

13. Ekstrom G., Nettles M., Dziewonski A.M. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13017 earthquakes // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2012. V. 200–201. P. 1–9.
14. Agius M.R., Rychert C.A., Harmon N., Tharimena S., Kendall J.M. A thin mantle transition zone beneath the equatorial Mid-Atlantic Ridge // *Nature*. 2021. V. 589. P. 562–566.
15. Аleshin И.М. Построение решения обратной задачи по ансамблю моделей на примере инверсии приемных функций // *Докл. РАН. Науки о Земле*. Т. 496. № 1. 2021. С. 63–66.

## RELEVANCE OF RECEIVER FUNCTION TECHNIQUE IN SUBDUCTION ZONE (AVACHA BAY)

A. G. Goev<sup>a,#</sup>, R. A. Reznichenko<sup>a</sup>, and I. M. Aleshin<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Sadovskiy Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup>*E-mail: andr.goev@gmail.com*

Presented by Academician of the RAS A.D. Gvishiani April 3, 2023

This paper elaborates on specific aspects of P- and S-receiver functions. The functions that are researched in this paper were calculated using waveforms obtained by three adjacent broadband seismic stations within the Avacha bay area in proximity to the subduction zone of the Pacific plate. The subduction zone in seismological context manifests as a layer of high seismic velocities, which are known to introduce a level of distortion to the receiver functions. To specify the level of this effect we parsed through two sets of P and S receiver functions in this research. The first set contains events that pass through and theoretically are affected by the subduction zone of the Pacific plate and the second set contains events that do not. The paper demonstrates that converted waves and their multiples formed at the boundaries of the high-velocity layer significantly affect P-receiver functions starting with 30-th second after the primary phase. However, no notable effects on S-receiver functions were revealed. Thus, we empirically confirm that [at least in the investigated area] local single-dimensional models are valid to be used for the inversion of the receiver functions to the depth of up to 200 km after which point the seismic noise produced by the subducting plate effectively limits the applicability of such models.

**Keywords:** converted waves, receiver function, PRF, SRF, subduction zone, Kamchatka