

УДК 550.34

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-5-100-108

## СЕЙСМИЧЕСКАЯ СЕТЬ ЮЖНОГО СЕГМЕНТА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ ЗОНЫ РФ И ЕЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

Дмитрий Викторович Костылев<sup>1</sup>✉, Андрей Георгиевич Гоев<sup>2</sup>,  
Наталья Владимировна Костылева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия; Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия; Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия; d.kostylev@imgg.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-8150-9575>

<sup>2</sup> Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия; andr.goev@gmail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9477-5963>

<sup>3</sup> Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия; n.kostyleva@imgg.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3126-5138>

**Аннотация.** В работе представлены основные характеристики цифровой широкополосной сейсмической сети в южной части Дальневосточного региона РФ. Показано, что за последние 20 лет в инструментальном обеспечении сейсмических наблюдений в регионе произошел качественный скачок. Показано, что современная конфигурация сети отвечает не только своей непосредственной цели — мониторингу сейсмичности в регионе, но и предоставляет возможность исследовать особенности строения зоны фазовых переходов мантии. При анализе данных станции «Горный» методом Р-функций приемника были выявлены обменные волны от границ 410 и 660 км. Особенности наблюденных времен пробега могут быть объяснены либо пониженными сейсмическими скоростями относительно референтных согласно модели IASP91 либо аномалиями глубин залегания границ фаз.

**Ключевые слова:** Дальний Восток, субдукция, зона фазовых переходов мантии МТЗ, метод Р-функций PRF, обменные волны

**Для цитирования:** Костылев Д.В., Гоев А.Г., Костылева Н.В. Сейсмическая сеть южного сегмента Дальневосточной зоны РФ и ее возможности для изучения неоднородностей в верхней мантии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 5. С. 100–108.

## THE SOUTHERN RUSSIA FAR EASTERN SEISMIC NETWORK AND ITS CAPABILITIES FOR INVESTIGATING UPPER MANTLE HETEROGENEITIES

Dmitry V. Kostylev<sup>1</sup>✉, Andrey G. Goev<sup>2</sup>, Nataliya V. Kostyleva<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sakhalin Branch, Federal Research Center «Unified Geophysical Service» of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the RAS, Moscow, Russia; Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; d.kostylev@imgg.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-8150-9575>

<sup>2</sup> Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of the RAS, Moscow, Russia; andr.goev@gmail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9477-5963>

<sup>3</sup> Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; n.kostyleva@imgg.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3126-5138>

**Abstract.** This paper presents the key characteristics of a digital broadband seismic network in the southern part of the Russian Far East. It is shown that over the past 20 years, there has been a qualitative leap in the instrumental capabilities of seismic observations in the region. The modern configuration of the network not only fulfills its primary purpose — monitoring regional seismicity — but also enables the study of structural features in the mantle transition zone (MTZ). Analysis of data from the “Gorny” (GRNR) station using P-receiver functions (PRF) revealed converted waves from the 410 km and 660 km discontinuities. The observed travel time anomalies can be explained either by seismic velocities lower than those predicted by the IASP91 reference model or by anomalous depths of the MTZ boundaries.

**Keywords:** Far East, subduction, mantle transition zone MTZ, P-receiver functions PRF, converted waves

**For citation:** Kostylev D.V., Goev A.G., Kostyleva N.V. The southern Russia Far Eastern seismic network and its capabilities for investigating upper mantle heterogeneities. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 5: 100–108. (In Russ.).

**Введение.** Активные континентальные окраины играют ключевую роль в изучении современных и древних геодинамических процессов. В последние годы, благодаря расширению сетей сейсмических станций и совершенствованию методов обработки данных, исследования этих зон значительно активизировались [Mishra, et al., 2020; Han, et al., 2020; Bianchi, et al., 2021]. Предметом изучения являются характеристики субдуцирующих плит, а также особенности их взаимодействия с различными оболочками Земли. В частности, внимание исследователей уделяется характеристикам зоны фазовых переходов мантии (mantle transition zone, MTZ) на глубинах 410 и 660 км в области взаимодействия с погружающейся океанической литосферой [Ishii and Ohtani, 2021; Goes, et al., 2022]. Это взаимодействие принципиально важно для геодинамики, так как контролирует два цикла мантийной конвекции — вовлекающую все вещество мантии, или только верхнюю ее часть.

Сейсмические границы 410 и 660 км связаны с фазовыми переходами оливина в более плотные фазы, сопровождающиеся значимым скачком плотности и сейсмических скоростей. На основе теоретических и экспериментальных данных показано, что эти фазовые переходы контролируются  $P-T$  условиями на данной глубине. Таким образом, в зонах субдукции при погружении холодной океанической литосферы глубина залегания границы 410 км уменьшается, а 660 км растет [Ishii, Ohtani, 2022]. При этом возможны два варианта взаимодействия слэба с границей 660 км — он может двигаться субгоризонтально по этой границе, не проникая в нижнюю мантию до своего разрушения и подъема вещества (вызывая верхнемантийную конвекцию), либо возможен прорыв границы и опускание вещества слэба к внешнему ядру Земли (в слой D'') с последующим его подъемом мантийными плутонами. На основе глобальных томографических исследований показано, что в районе Охотского моря наблюдается разрыв границы 660 км и погружение слэба в нижнюю мантию, а в южной части Дальневосточного региона проникновение слэба в нижнюю мантию не наблюдается [Fukao, Obayashi, 2013].

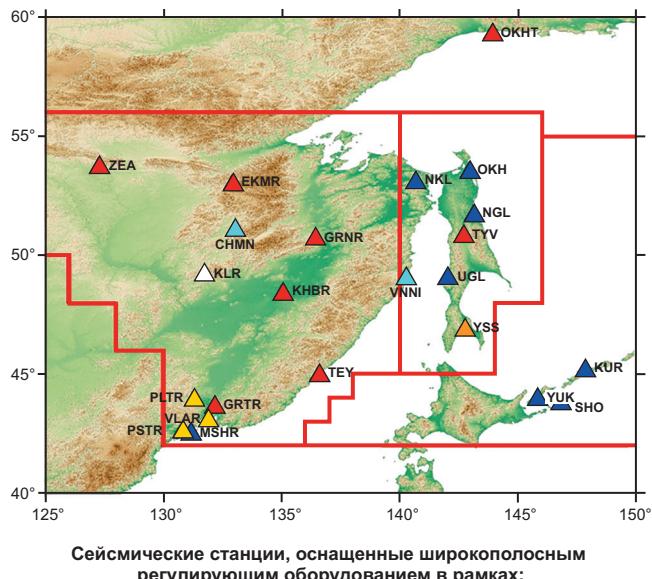
Долгое время проведение исследований MTZ в южной части Дальневосточной зоны РФ (ЮДВО РФ) сдерживалось отсутствием качественных сейсмических данных. Для проведения детальных работ по изучению рельефа границ 410 и 660 необходимы длительные ряды высококачественных широкополосных сейсмограмм зарегистрированных распределенной площадной сетью сейсмических станций, которая долгое время отсутствовала на территории ЮДВО РФ. Данных редких одиночных сейсмических станций, таких как «Южно-Сахалинск», несмотря на их высокое качество, недостаточно для решения поставленной задачи.

Начиная с 2004 г. сейсмическая сеть региона получила существенное развитие и теперь насчитывает 23 широкополосные станции, распределенные по

большой территории, что впервые позволяет решать задачу изучения взаимодействия погружающегося тихоокеанского слэба с границами 410 и 660 км в ЮДВО РФ. Представленная работа посвящена современным характеристикам этой сейсмической сети и ее возможностям при изучении особенностей MTZ.

**Создание и развитие цифровой сейсмической сети.** В настоящий момент мониторинговая широкополосная сейсмическая сеть Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) насчитывает 23 сейсмические станции, установленные на территориях Сахалинской области, Приморского и Хабаровского края, Амурской области, а также на побережье и островах северо-западной части Тихого океана, акваторий Охотского и Японского морей (рис. 1) [Sakhalin..., 2000]. Основной задачей сети является контроль за сейсмичностью территории, а также дискриминация регистрируемых сейсмических событий. При этом полученные архивы волновых форм могут быть использованы при решении широкого спектра задач структурной сейсмологии.

Сейсмическая сеть развивалась планомерно в течение многих лет в рамках различных между-



Сейсмические станции, оснащенные широкополосным регулирующим оборудованием в рамках:

- ▲ Российско-Японского проекта «Исследования сейсмотектоники Охотоморской плиты»
- ▲ ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в РФ до 2010 года»
- ▲ Российско-Корейской программы «Исследование геопасностей, вызванных землетрясениями»
- ▲ Российского сегмента Глобальной сейсмической сети (GSN). Станция «Южно-Сахалинск»
- ▲ Программы ДВО РАН «Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России»
- △ Российского сегмента сейсмической сети Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (СТВТО). Станция «Кульдур»

Рис. 1. Современное состояние цифровой широкополосной сейсмической сети в южной части Дальневосточной зоны РФ

народных проектов. Первым шагом к переходу к цифровым методам регистрации в исследуемом регионе стала установка в июне 1992 г. на сейсмической станции «Южно-Сахалинск» (YSS) [Hutt, 1993] цифровой широкополосной системы в рамках международной программы создания глобальной сети цифровых станций (Global Seismographic Network, GSN) исследовательского консорциума сейсмологии IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology). Станция «Южно-Сахалинск» стала одной из 12 станций на территории Российской Федерации, вошедших в эту программу [Старовойт, Чернобай, 1994]. Более чем за 30 лет эксплуатации оборудования IRIS на сейсмической станции «Южно-Сахалинск» неоднократно модернизировалась система регистрации сейсмических сигналов, но основным компонентом весь этот период оставался знаменитый сверхширокополосный сейсмометр Streckeisen STS-1, способный регистрировать удаленные землетрясения в частотном диапазоне 0,003–10 Гц [Wielandt, Streckeisen, 1982].

Сейсмопавильон сейсмической станции «Южно-Сахалинск» был построен в 1958 г. Имеет глубину основания подземной части — 3,75 м и обеспечивает регистрацию сейсмических сигналов в условиях поддержания постоянной температуры, что позволяет получать высококачественные материалы для исследований. В настоящем исследовании используется архив волновых форм станции «Южно-Сахалинск» с 1992 г.

Еще одним высококачественным источником данных для исследований традиционно являются записи, полученные на сейсмической станции «Кульдур» (KLR). Станция была открыта в 1955 г. для проведения сейсмического контроля за ядерными испытаниями [Адушкин и др., 2016] и в настоящее время является частью российского сегмента сейсмической сети согласно «Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний» (СТВТО). В 2010 г. на станции было установлено цифровое оборудование (сейсмометр Streckeisen STS-2), записи которого были доступны для настоящего исследования с 2014 г.

Наиболее представительные наработки были получены на основе данных цифровой сети станций, установленных в 2005–2006 гг. на Дальнем Востоке по проекту «Исследования сейсмотектоники Охотоморской плиты» между Сообществом Университетов Японии, Геофизической службой Российской академии наук и Институтами РАН. В рамках проекта в 2005–2007 гг. на станциях «Оха» (OKH), «Тымовское» (TYV) (Сахалинская область); «Хабаровск» (KHB), «Горный» (GRNR), «Охотск» (OKHT) (Хабаровский край); «Терней» (TEY), «Горнотаёжное» (GRTR) (Приморский край) и «Зея» (ZEA) (Амурская область) СФ ФИЦ ЕГС РАН установлены регистрирующие комплексы Datamark LS7000XT фирмы Hakusan Corporation (Япония) и широкополосные высокочувствительные

сейсмометры Streckeisen STS-2 [Miyamachi, et al., 2009]. Волновые формы, полученные установленной сетью, широко использовались в различных прикладных и фундаментальных научных работах: таких, как регистрация подземных ядерных взрывов в Северной Корее [Маловичко и др., 2010] или исследования уровня изменения сейсмического шума в период пандемии COVID-19 [Boginskaya, Kostylev, 2022]. В работах японских ученых, представленных на различных международных конференциях [Kasahara, et al., 2006; Suetsugu, et al., 2008; Obayashi, et al., 2009; Narita, et al., 2017], полученные данные были использованы, в том числе, для исследований строения литосферных плит и структуры верхней мантии, но, в сравнении с настоящей работой, материал этих исследований был ограничен значительно меньшим промежутком времени и был построен только по записям волновых форм сети этих восьми станций.

В настоящей работе использованы полные архивы сети станций с 2004 г. по настоящее время (для станции «Оха» до 2016 г., когда работа комплекта была остановлена) и именно они составили более 50% всего используемого материала. В связи с этим несколько подробнее остановиться на техническом оснащении и принципах работы сети. Сеть предназначена для регистрации в широком частотном диапазоне и оснащена, помимо широкополосного сейсмометра Streckeisen STS-2, также короткопериодными сейсмическими приборами (типа Sercel L4C-3D). Для обеспечения фильтрации возможных помех при питании от электросети используется специальный сглаживающий трансформатор, а для обеспечения автономной работы станции в случае отключения электроэнергии предусмотрены аккумуляторные батареи большой емкости, подзарядка которых производится цифровыми зарядными устройствами. Полная схема комплекта оборудования показана на рис. 2.

Проблемой для широкого применения материалов, получаемых станциями этой сети, являлось использование для хранения данных в регистраторах Datamark LS7000XT достаточно специфического формата *win*, разработанного в Earthquake Research Institute, The University of Tokyo и применение традиционной для сейсмических сетей Японии системы сбора и обработки данных [Urabe, Tsukuda, 1994]. Для конвертации данных формата *win* в общеизвестные форматы и дальнейшего их использования, в 2015 г. были разработаны программно-аппаратные методы [Костылев, 2016], позволившие обеспечить преобразование и передачу данных с оборудования сети станций в режиме близком к реальному времени на сервера информационно-обрабатывающего центра СФ ФИЦ ЕГС РАН с последующим архивированием данных, и таким образом, полностью интегрировать сеть станций Datamark в общую систему сбора сейсмологических данных [Костылев, 2021].

Важной характеристикой и показателем эффективности работы любой сейсмической станции

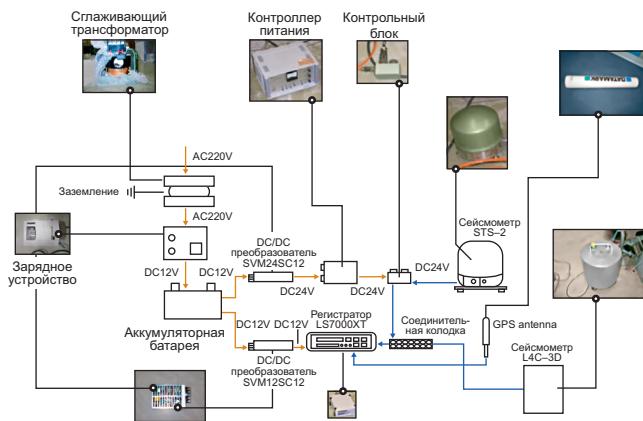


Рис. 2. Типичная схема организации работы мониторинговой сейсмической станции сети «Datamark»

является спектральная плотность сейсмического шума. Построение данной характеристики дает возможность оценить качество записей сейсмических событий, а также следить за исправностью оборудования. Для станций сети «Datamark» был проведён анализ уровня спектральной плотности мощности сейсмического шума относительно кривых существующей модели шума: NHNM (New High-Noise Model) и NLNM (New Low-Noise Model), являющихся ограничением допустимых значений [Peterson, 1993]. Чтобы построить график спектральной плотности мощности сейсмического шума используются записи сейсмического шума в ночной период для промежутков времени без зарегистрированных сейсмических событий и атмосферных явлений (порывы ветра, циклоны). Результаты представлены на рис. 3, где видно, что для станции «Охотск» (ОКНТ) в настоящее время наблюдается превышение эталонной модели высокого уровня шума (NHNM) на низких частотах, что, очевидно, связано с проблемами с оборудованием и затрудняет использование данных, получаемых от этой станции в исследовании.

В 2008 г. в ДВО РАН была утверждена Комплексная программа фундаментальных научных исследований «Современная геодинамика, активные геоструктуры и природные опасности Дальнего Востока России». В рамках данной программы в Дальневосточном регионе предусматривалось создание инструментальной сети из семи пунктов непрерывных сейсмологических наблюдений на базе широкополосных сейсмических датчиков производства компании Refraction Technology (США) — RefTek 151-120 [Ханчук и др., 2011]. По различным причинам, часть пунктов так и не была открыта, а часть проработала непродолжительное время. В данном исследовании использованы материалы, полученные пунктами наблюдений «Ванино» (VNN) и «Чегдомын» (CHMN).

Окончательный переход на цифровые методы регистрации на о. Сахалин и Курильских островах произошел в рамках работ по Федеральной целевой программе (ФЦП) «Снижение рисков и смягчение

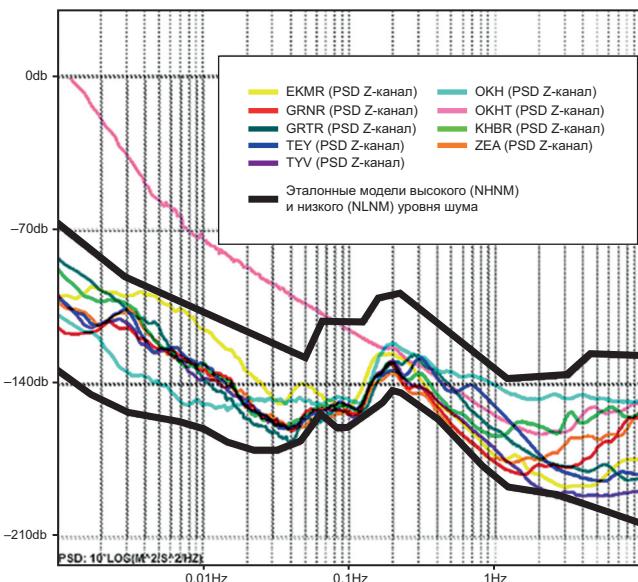


Рис. 3. Графики спектральной плотности мощности сейсмического шума в сопоставлении с модельными кривыми NLNM (черные кривые) по [Peterson, 1993] станций сети «Datamark» по состоянию на 01.01.2024

последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года». Геофизической службой РАН, в рамках работ по ФЦП, была создана сейсмическая подсистема Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России (СП СПЦ) [Чебров, 2007]. Первая очередь сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами была введена в опытную эксплуатацию в 2008 г., когда были созданы три региональных информационно-обрабатывающих центра (РИОЦ) Геофизической службы РАН («Петропавловск-Камчатский», «Южно-Сахалинск», «Владивосток») и сеть сейсмологических наблюдений, состоящая из опорных и вспомогательных станций, а также пунктов регистрации сильных движений [Чебров и др., 2009]. Все станции Сахалина и Курильских островов, вошедшие в СП СПЦ, были оснащены новейшим сейсмическим оборудованием [Мишаткин и др., 2011]. Основным оборудованием станций СП СПЦ стало хорошо зарекомендовавшее себя оборудование известных фирм: сейсмометры Guralp Systems Limited (UK) и регистраторы сейсмических сигналов GeoSIG Ltd (Switzerland). Для опорных станций СП СПЦ используются широкополосные сейсмометры с полосой пропускания до 120 с — Guralp CMG-3 (в различных исполнениях), а для вспомогательных станций — сейсмометры Guralp CMG-6T (с полосой пропускания 30 с). Кроме того, все станции сети дополнительно оснащены акселерометрами Guralp CMG-5T. Типовая блок-схема оснащения станций СП СПЦ представлена на рис. 4.

Несмотря на достаточно продолжительный период непрерывной эксплуатации в сложных природных условиях, сеть станций СП СПЦ и в настоящее время показывает высокие показатели надежности (в 2024 г. процент наличия данных по всем станциям

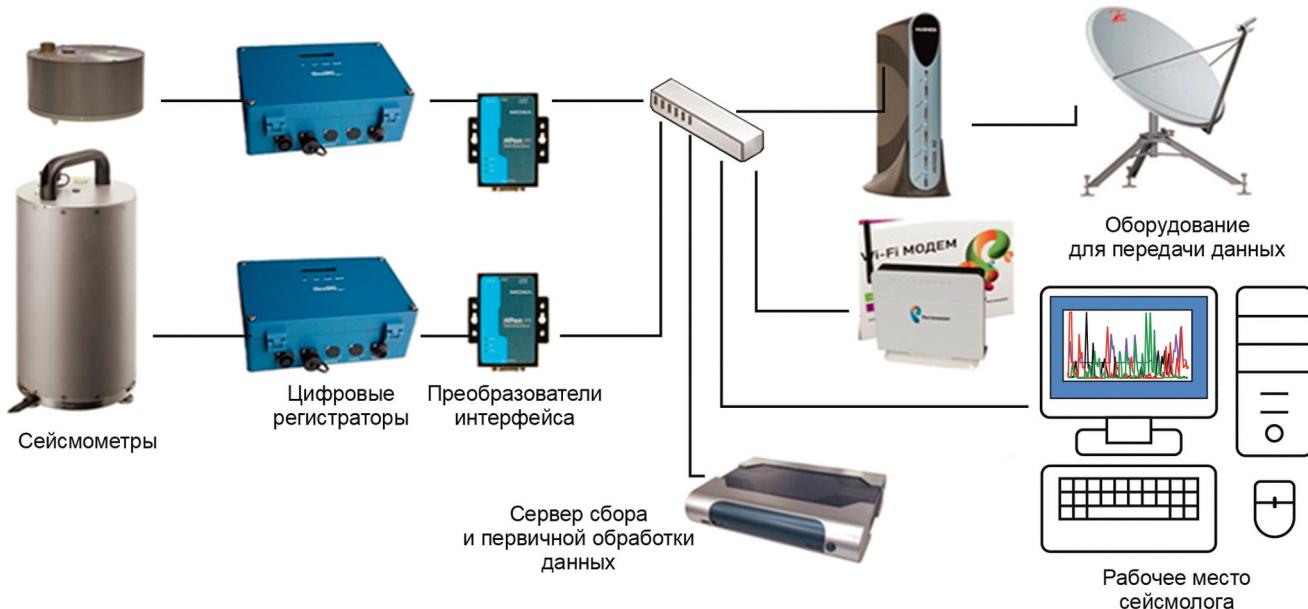


Рис. 4. Типовая блок-схема оснащения станций Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России

сети СП СПЦ составил 90%) и ее данные активно задействованы в исследовании положения границ 410 и 660 км.

Еще одной сейсмической сетью, ведущей регистрацию с использованием широкополосных сейсмометров, является сеть на юге Приморского края, установленная при реализации Российской-Корейской программы по «Исследованию геопасностей, вызванных землетрясениями» [Наумов, Овчаренко, 2021]. В рамках программы в 2014 г. специалистами Корейского института географии и минеральных ресурсов (KIGAM, Korea Institutes of Geoscience and Mineral Resources) на сейсмической станции «Владивосток» (VLAR) установлен сейсмометр Guralp CMG-40T (полоса пропускания до 30 с). В дальнейшем (в 2016–2018 гг.) специалисты Геофизической службы РАН и специалисты KIGAM ввели в строй сейсмические станции с аналогичным оборудованием в поселках Посыт (PSTR) и Полтавка (PLTR), а в декабре 2020 г. на станции «Посыт» был дополнительно установлен сейсмометр Nanometrics Trilium TH120-2 (с полосой пропускания до 120 с). Материалы данных станций, в сочетании со станцией СП СПЦ «Мыс Шульца» (MSHR) [Долгих и др., 2010], расположенной в том же районе, внесли значительный вклад в проводимое исследование, что особенно важно, учитывая их расположение в непосредственной близости к сочленению Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов.

Полная информация о станциях, используемом на них оборудовании и объеме архивных данных, полученных от каждой станции в данной работе, представлена в таблице.

В исследовании использовано более 75 000 часовых отрезков сейсмических событий, полученных по материалам записей волновых форм от всех станций, приведенных в таблице. Как и было указано выше,

наибольший вклад, учитывая продолжительность работы и число станций сети, внесли станции сети «Datamark» и сети СП СПЦ (рис. 5).

Сбор данных осуществлялся с использованием системы сбора, обработки и хранения данных СФ ФИЦ ЕГС РАН. Данная схема предусматривает возможность выполнения запросов к кольцевым буферам и серверам архивирования данных по выбранным станциям и периодам времени, после

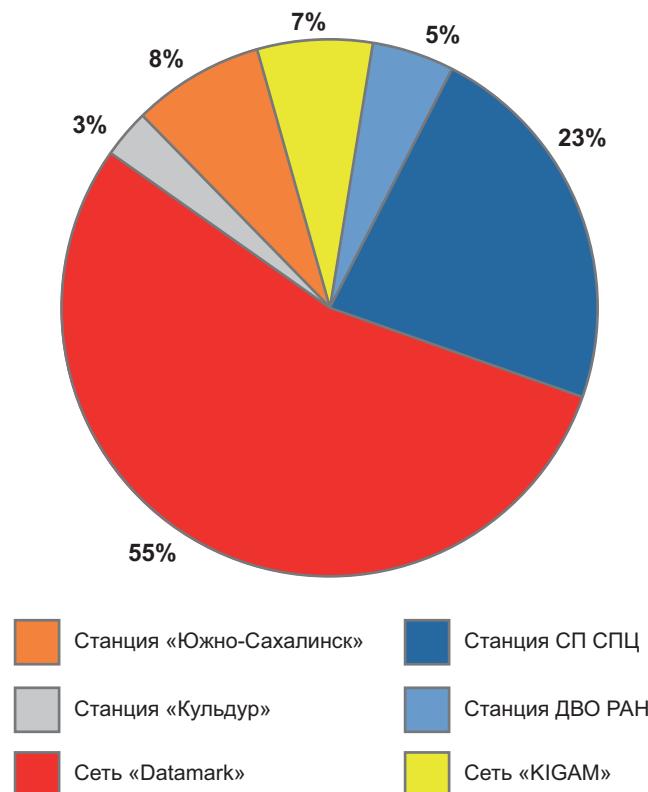


Рис. 5. Доля данных, полученных в рамках различных проектов к общему объему используемых данных

Таблица

## Основные сведения о сейсмических станциях сети

№	Сейсмическая станция	Код	Дата установки широкополосного оборудования (его демонтажа)	Координаты и высота над уровнем моря			Тип оборудования	Частотный диапазон	Начало архива
				Lat	Lon	h, м			
1	Ванино	VNNI	2009	49,091	140,255	91	RefTek 151-120 + 130-01	50 Гц — 120 с	2012
2	Владивосток	VLAR	01.06.2014	43,120	131,885	61	CMG-40T+Q330	50 Гц — 30 с	2017
3	Горнотаежное	GRTR	23.08.2006 (30.09.2022)	43,701	132,163	256	STS-2+LS7000XT	50 Гц — 120 с	2006
4	Горный	GRNR	13.08.2005	50,763	136,449	470	STS-2+ LS7000XT	50 Гц — 120 с	2005
5	Зея	ZEA	29.07.2006	53,757	127,286	273	STS-2+ LS7000XT	50 Гц — 120 с	2006
6	Кульдур	KLR	06.10.2010 (23.01.2020) 23.01.2020	49,236	131,738	486	STS-2 + EVROPA STS-2+Q330-HR	50 Гц — 120 с 50 Гц — 120 с	2014
7	Курильск	KUR	05.09.2010	45,231	147,873	40	CMG-3+ GSR-24	50 Гц — 120 с	2012
8	Малокурильское	SHO	30.11.2009	43,870	146,834	30	CMG-3+ GSR-24	50 Гц — 120 с	2012
9	Мыс Шульца	MSHR	01.10.2008	42,580	131,157	84	CMG-3+ GSR-24	50 Гц — 120 с	2012
10	Николаевск-на-Амуре	NKL	21.06.2013 (12.08.2016) 22.12.2016	53,146	140,681	15	CM3OC + UGRA CMG-6TD	15 Гц — 50 с 50 Гц — 30 с	2013
11	Ноглики	NGL	18.09.2010	51,783	143,126	9	CMG-6TD	50 Гц — 30 с	2012
12	Оха	OKH	29.06.2005 (22.06.2016) 28.11.2009	53,602	142,946	20	STS-2+ LS7000XT CMG-3+ GSR-24	50 Гц — 120 с 50 Гц — 120 с	26.06.2005–22.06.2016 с 2012
13	Охотск	OKHT	15.08.2007	59,360	143,236	5	STS-2+ LS7000XT	50 Гц — 30 с	2007
14	Полтавка	PLTR	01.02.2018	44,027	131,325	105	CMG-40T+ Q330-HRS	50 Гц — 30 с	2018
15	Посыт	PSTR	01.12.2016	42,651	130,804	41	CMG-40T+ Q330-HRS	50 Гц — 30 с	2017
16	Терней	TEY	30.09.2005	45,062	136,601	45	STS-2+ LS7000XT	50 Гц — 120 с	2005
17	Тымовское	TYV	26.06.2005	50,865	142,675	150	STS-2+ LS7000XT	50 Гц — 120 с	2005
18	Углегорск	UGL	12.09.2010	49,077	142,066	31	CMG-6TD	50 Гц — 30 с	2012
19	Хабаровск	KHBR	11.08.2005	48,473	135,052	58	STS-2+ LS7000XT	50 Гц — 120 с	2005
20	Чегдомын	CHMN	2009	51,137	133,041	482	RefTek 151-120 + 130-01	50 Гц — 120 с	2012
21	Экимчан	EKMR	21.09.2015	53,073	132,949	530	STS-2+ LS7000XT	50 Гц — 120 с	2015
22	Южно-Курильск	YUK	20.08.2010 (17.02.2016) 18.02.2016	44,035	145,861	23	CMG-3+ GSR-24 CMG-6TD	50 Гц — 120 с 100 Гц — 30 с	2010
23	Южно-Сахалинск	YSS	14.06.1992 (22.10.2013) 22.10.2013	46,959	142,760	110	STS-1+ Q680 STS-1 +Q330HR	10 Гц — 360 с 10 Гц — 360 с	1992

чего материалы, полученные в формате miniseed, на выделенной рабочей станции с использованием программного комплекса DIMAS [Дроздин, Дроздина, 2010] преобразовываются в формат SAC для проведения дальнейшего анализа в программном комплексе SeismicHandler — интерактивной программе анализа волновых форм, разработанной в сейсмологической обсерватории Грефенберг, Германия.

**Использование данных сейсмической сети СФ ФИЦ ЕГС РАН для исследований МТЗ на примере станции «Горный».** Одним из наиболее эффективных способов выявления особенностей залегания границ 410 и 660 км, основываясь на записях распределенных сейсмических сетей, является метод

P-функций приемника (PRF) [Vinnik, 1977]. Методика давно и успешно применяется в различных геодинамических обстановках и подробно описана в [Винник, 2019]. Главные аспекты теории таковы — анализируются обменные P-S волны, сформировавшиеся на контрастных сейсмических границах при прохождении через них продольных волн телесейсмических событий. Для анализа отбираются сейсмограммы землетрясений, произошедших на эпицентральных расстояниях 35–100° с магнитудой  $M > 5,5$ . Важно, чтобы записи первой падающей P-волны имели «импульсную» форму и отношение сигнал/шум не менее 3. Далее, в процессе обработки отобранные сейсмограммы фильтруются в диапазо-

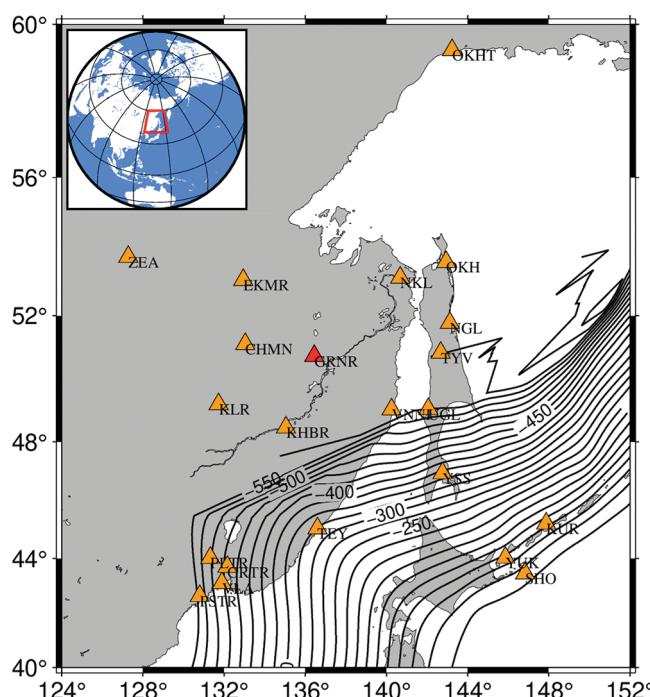


Рис. 6. Карта исследований Южной части Дальневосточной зоны РФ. Оранжевыми треугольниками показаны станции сейсмической сети; красным — анализируемая станция GRNR. На врезке изучаемый регион выделен красным. Изолиниями приведена глубина залегания кровли субдуцирующего Тихоокеанского слоя согласно стандартной модели [Hayes, et al., 2018]

не периодов 5–30 с, стандартизуются посредством деконволюции и суммируются.

Для выявления обменных волн от глубинных границ индивидуальные PRF суммируются с поправками, которые зависят от параметра луча данной падающей волны и глубины границы обмена (строится стек). С целью усиления амплитуды обменной волны от сейсмической границы на данной глубине, индивидуальные PRF 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. Согласно стандартной модели строения Земли IASP91 [Kennett, Engdahl, 1991], обменные волны от границ 410 и 660 км для данного параметра луча должны наблюдаться на сейсмограмме на временах 44 и 67,9 с, соответственно [Структура..., 1988]. Здесь и далее за 0 принимается время вступления первой продольной волны. Таким образом, целевые обменные волны можно идентифицировать и анализировать с целью выявления характеристик МТЗ.

В качестве примера использования методики PRF к данным ЮДВО РФ была выбрана сейсмическая станция GRNR (рис. 6). Выбор обусловлен тем, что станция работает достаточно давно и архив сейсмограмм включает записи за период около 20 лет, кроме того, станция была установлена в рамках сети «Datamark», на которую приходится более половины имеющегося архива данных (рис. 6).

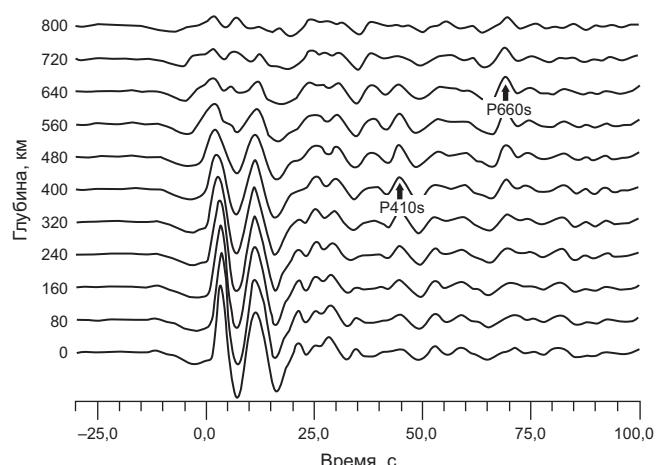


Рис. 7. Стек записей PRF для станций GRNR. Отмечены фазы обменных волн Ps от границ зон фазовых переходов 410 и 660 км

В результате анализа и обработки архива данных станции GRNR было отобрано несколько тысяч волновых форм, отвечающих приведенным выше критериям, и по ним было рассчитано 820 индивидуальных PRF. Такой объем данных свидетельствует о высоком качестве используемого сейсмического материала. По полученным данным был построен стек (рис. 7), на котором уверенно выделяются обменные волны от целевых границ 410 и 660 км. Более того, наблюдается «фокусировка» — максимизация амплитуд на трассах, отвечающих ожидаемым глубинам. Такой эффект свидетельствует о широком диапазоне эпицентральных расстояний в отобранном наборе данных. Обменные волны P410s и P660s наблюдаются на временах 44,8 и 69,1 с, соответственно (за 0 принимается время вступления первой P-волны). Каждая из целевых фаз регистрируется значимо позже ожидаемых времен, составляющих 44,0 и 67,9 с. Их разность, составляющая с учетом ошибки 24,3 с, близка к «стандартному» значению 23,9 с. Такие результаты могут свидетельствовать либо о существенно меньших скоростях в верхней мантии, либо об аномалии в глубинах залегания границ 410 и 660 км. Для более точных выводов необходима обработка и систематизация данных остальных сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН (рис. 1).

**Выводы.** Современная конфигурация сейсмической сети в южной части Дальневосточного региона РФ представляет из себя площадную сеть из 23 постоянно действующих широкополосных сейсмических станций, установленных в рамках различных российских и международных проектов. Большая часть станций функционируют около 20 лет, что обеспечивает наличие существенного архива данных.

На примере сейсмической станции «Горный» (GRNR) показана возможность применения метода  $P$ - $T$ -функций приемника для выявления и анализа особенностей залегания границ МТЗ на глубинах, близких к 410 и 660 км. На суммарных трассах индивидуальных PRF уверенно выявлены обменные

волны от искомых границ. Каждая из целевых фаз регистрируется значимо позже ожидаемых времен с невязками около 1 с, при этом их разность близка к «стандартному» значению 23,9 с. Особенности наблюденных времен пробега могут быть объяснены либо пониженными, относительно референтных согласно модели IASP91, сейсмическими скоростями,

либо аномалиями глубин залегания границ MTZ. Анализ данных остальных станций сети позволит сделать более однозначные выводы о особенностях этих границ.

**Финансирование.** Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда (грант № 25-27-00240).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. «Михнево»: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. 2016. № 1. С. 108–119.

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.

Долгих Г.И., Долгих С.Г., Чебров В.Н., Шевченко Ю.В. Геофизический полигон «Мыс Шульца» // Вестник ДВО РАН. 2010. № 5(153). С. 165–169.

Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 3. С. 22–34.

Костылев Д.В. Состояние сейсмологической сети Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XI Международной сейсмологической школы. Чолпон-Ата, Кыргызстан, 12–16 сентября 2016 г. Обнинск: Единая геофизическая служба РАН, 2016. С. 169–172.

Костылев Д.В. Формирование единой системы сбора сейсмологической информации в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3, № 1. С. 41–53.

Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Коломиец М.В. Особенности волновой картины подземного ядерного взрыва в Северной Корее 25 мая 2009 года по данным регистрации российскими сейсмическими станциями // Вестник НЯЦ РК. 2010. № 3. С. 45–52.

Мишаткин В.Н., Захарченко Н.З., Чебров В.Н. Технические средства сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47, № 1. С. 26–51.

Наумов С.Б., Овчаренко В.В., Jeong B.S., Kim Y.W. Развитие сети сейсмических станций в Приморье // Физика геосфер: Материалы конф. Владивосток, 6–10 сентября 2021 г. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2021. С. 77–80.

Старовойт О.Е., Чернобай И.П. Участие России в международных проектах по сейсмическим наблюдениям // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. М.: МЧС РФ и РАН, 1994. № 2. С. 33–40.

Ханчук А.И., Коновалов А.В., Сорокин А.А. и др. Инструментальное и информационно-технологическое обеспечение сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 3(157). С. 127–137.

Чебров В.Н. Развитие системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле. 2007. № 1(9). С. 27–36.

Чебров В.Н., Гусев А.А., Гусяков В.К. и др. Концепция развития системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45, № 4. С. 41–57.

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 // J. South American Earth Sci. 2021. Vol. 112. Pt. 1. 103607.

Boginskaya N.V., Kostylev D.V. Change in the level of microseismic noise during the COVID-19 pandemic in the Russian Far East // Pure and Applied Geophysics. 2022. No. 179. P. 4207–4219.

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

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

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. Vol. 789. 228480.

Hayes G.P., Moore G.L., Portner D.E., et al. Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model // Science. 2018. Vol. 362. P. 58–61.

Hutt C. Installation of Yuzhno-Sakhalinsk // IRIS Newsletter. 1993. Vol. 12, No. 1. P. 12–17.

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

Kasahara M., Miyamachi H., Ivashchenko A., et al. New Broad-Band Seismic Network for Imaging the Stagnant Slab beneath the Far Eastern Russia // Abstracts of Japan Geoscience Union Meeting. Chiba, Japan, 14–18 May 2006. P. I222–P2020.

Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. 1991. Vol. 105. P. 429–465.

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.

Miyamachi H., Ichiyanagi M., Maeda T. Construction of the broadband seismic network in Far Eastern Russia for imaging the stagnant slab // Geophysical Bulletin of Hokkaido University. 2009. No. 72. P. 37–49.

Narita R., Hamada K., Yoshizawa K., et al. 3-D upper mantle structure beneath the Sea of Japan with inter-station surface-wave analysis using multiple seismic arrays // Abstracts of JpGU-AGU Joint Meeting 2017. Chiba, Japan, 20–25 May 2017. P. SIT29–P04.

Obayashi M., Yoshimitsu J., Suetsugu D., et al. Slab image improved by Stagnant Slab Project seismic networks // Abstracts of JpGU-AGU Joint Meeting 2017. Chiba, Japan, 20–25 May 2017. P. SIT29–P04.

stracts of Japan Geoscience Union Meeting. Chiba, Japan, 16–21 May 2009. P. I131-P012.

Peterson J. Observations and modeling of seismic background noise // U.S. Geological Survey Open-File Report. 1993. 93–322.

Sakhalin Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences. Sakhalin Regional Seismic Network of the Russian Federation [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks, 2000. DOI: 10.7914/2w5r-ea46.

Suetsugu D., Kasahara M., Takahashi H., et al. The mantle discontinuity depths beneath the Russian Far East as determined by Japan–Russia cooperative broadband network // Abstracts of the 7th General Assembly of Asian Seismological

Commission and Seismological Society (ASC 2008). Tsukuba, Japan, 24–27 November 2008. P. 102.

Urabe T., Tsukuda S. WIN-A program on workstation for support of manual phase picking process on seismograms recorded by microearthquake observation network // Programme and Abstract. Seismological Society of Japan. 1994. No. 2. P. 41.

Vinnik L.P. Detection of waves converted from P to S in the mantle // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1977. Vol. 15. P. 39–45.

Wielandt E., Streckeisen G. The Leaf-Spring Seismometer: Design and Performance // Bulletin of the Seismological Society of America. 1982. Vol. 72, No. 6. P. 2349–2367.

Статья поступила в редакцию 18.05.2025,  
одобрена после рецензирования 23.05.2025,  
принята к публикации 30.10.2025