

**BUILDING A TOMOGRAPHIC VELOCITY MODEL FOR SAMOYLOV ISLAND AREA (LENA DELTA) FROM LOCAL SEISMOLOGICAL DATA FOR THE PERIOD OF 2019–2021**

P.A. Dergach ^{1,2✉}, L.Y. Eponeshnikova ^{1,2}, S.N. Ponasenko ^{1,2}, A.A. Kartoziia ^{1,2,3}, W.H. Geissler ⁴,
A.A. Duchkov ^{1,2}, S.V. Shibaev ⁵, G.Y. Zobnin ^{1,2}

¹ Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

³ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

⁴ Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, 12 Am Handelshafen, Bremerhaven 27570, Germany

⁵ Yakut Branch of the Federal Research Center of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 39 Lenin Ave, Yakutsk 677007, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

ABSTRACT. In our paper we present the results of seismotomographic inversion for the local seismological monitoring data obtained in the area of the Samoylov Island (Lena River delta) in 2019–2021. Tomographic velocity model was used for refining hypocenter locations of local earthquakes and for geological interpretation. The results are shown as maps of anomalies of seismic waves and V_p/V_s ratios for the 5 and 10 km depths. The velocity anomalies structure made it possible to interpret low V_p/V_s ratio as rocks related to the Siberian platform, and to compare between the boundary of the low V_p/V_s area and the trace of the known geological fault running along the Olenekskaya Channel.

KEYWORDS: local seismology; seismic tomography; geodynamical monitoring; local seismicity; hypocenter relocation; velocity model improvement; low-frequency deconvolution; geophone

FUNDING: Research project AAAA-A19-119102490050-2 of IPGG SB RAS and State assignment of IGM SB RAS.

SHORT COMMUNICATION

Received: December 8, 2021

Revised: January 25, 2022

Accepted: February 16, 2022

Correspondence: Petr A. Dergach, DergachPA@ipgg.sbras.ru

FOR CITATION: Dergach P.A., Eponeshnikova L.Y., Ponasenko S.N., Kartoziia A.A., Geissler W.H., Duchkov A.A., Shibaev S.V., Zobnin G.Y., 2022. Building a Tomographic Velocity Model for Samoylov Island Area (Lena Delta) from Local Seismological Data for the Period of 2019–2020. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0627. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0627

ПОСТРОЕНИЕ СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАЙОНА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ СТАНЦИИ «ОСТРОВ САМОЙЛОВСКИЙ» ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОГО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗА 2019–2021 гг.

П.А. Дергач^{1,2}, Л.Ю. Епонешникова^{1,2}, С.Н. Понасенко^{1,2}, А.А. Картозия^{1,2,3}, В.Х. Гайсслер⁴,
А.А. Дучков^{1,2}, С.В. Шибав⁵, Г.Ю. Зобнин^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

³Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

⁴Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, 27570, Бремерхафен, Ам Хандельсхафен, 12, Германия

⁵Якутский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 677007, Якутск, пр-т Ленина, 39, Республика Якутия, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе приведены результаты сейсмотомографической инверсии по данным локального сейсмологического мониторинга, полученным в районе научно-исследовательской станции «Остров Самойловский» (дельта р. Лены) в 2019–2021 гг. Полученная сейсмотомографическая модель была использована для уточнения гипоцентров локальных землетрясений и геологической интерпретации. Результаты приведены в виде скоростных аномалий Р- и S-волн, а также их соотношения V_p/V_s , для глубин 5 и 10 км. Анализ структуры скоростных аномалий позволил интерпретировать зону пониженного соотношения V_p/V_s как слой пород, относящийся к Сибирской платформе, а также сопоставить границу области пониженного V_p/V_s с известным геологическим разломом, проходящим вдоль Оленёкской протоки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: локальная сейсмология; сейсмическая томография; геодинамический мониторинг; локальная сейсмичность; уточнение параметров гипоцентров; уточнение скоростной модели; низкочастотная деконволюция; геофон

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках проекта НИР АААА-А19-119102490050-2 ИНГГ СО РАН, а также по государственному заданию ИГМ СО РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Район дельты р. Лены приурочен к переходной зоне между континентальным и океаническим рифтогенезом в районе хребет Гаккеля – море Лаптевых. Непосредственно в самой дельте располагается контакт северо-восточной части Сибирской платформы и Западно-Верхоянской складчатой области, характеризующийся сложным блоковым строением. Сейсмическая активность подчеркивает продолжающиеся в настоящий момент смещения тектонических блоков разного возраста [Imaeva et al., 2019]. Данная область интерпретируется как зона надвига и/или сдвига согласно фокальным механизмам, определенным по телесейсмическим наблюдениям [Franke et al., 2000; Fujita et al., 2009]. Однако телесейсмические наблюдения не обеспечивают высокую точность определения параметров гипоцентров, а данных региональной сети оказалось недостаточно. Это, прежде всего, связано с малым количеством пунктов регистрации: с 1980-х гг. в районе Тикси действовало всего несколько стационарных сейсмических пунктов Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Ситуация изменилась, когда с 2016 г. на этой территории начала функционировать временная сеть локального сейсмологического мониторинга, установленная в рамках российско-немецкого проекта SIOLA [Geissler

et al., 2018]. В 2019 г. к работам присоединились специалисты ИНГГ СО РАН и НГУ [Geissler et al., 2021a], а с 2020 г. полевые наблюдения стали проводиться с использованием российского оборудования без непосредственного участия немецкой стороны [Dergach et al., 2022].

В данной работе приведены результаты построения сейсмотомографической модели с использованием данных, полученных в ходе сейсмологических наблюдений с августа 2019 г. по октябрь 2021 г.

2. СЕЙСМОЛОГИЧЕСКАЯ СЕТЬ

В 2019 г. локальная сеть в районе научно-исследовательской станции (НИС) «Остров Самойловский» состояла из десяти основных и трех дублирующих пунктов наблюдения. Регистрация сигналов от землетрясений на основных пунктах производилась с использованием короткопериодных сейсмометров MARK L-4C3D (1 Гц, 171 В/м/с), укомплектованных автономными регистраторами DATA-CUBE3. Наблюдения на трех вспомогательных пунктах дублировались аппаратурой ИНГГ СО РАН: низкочастотными геофонами GS-ONE LF (5 Гц, 100.4 В/м/с), укомплектованными автономными регистраторами SCOUT. Наблюдения на дублирующих пунктах носили методический характер и проводились

с целью обоснования возможности корректного использования геофонов с программно-расширенной частотной характеристикой [Dergach et al., 2019] для работ в данном районе. На примере сопоставления записей локальных и региональных землетрясений было показано, что геофоны с программно-расширенным частотным диапазоном записей полностью пригодны для работы на данной территории [Geissler et al., 2021b].

В 2020 г. были произведены демонтаж регистрационной аппаратуры проекта SIOLA и установка четырех сейсмологических пунктов ИНГГ СО РАН. Малое

количество пунктов обусловлено проблемами с поставками оборудования во время пандемии. В 2021 г. сеть была расширена до восьми пунктов наблюдения. Было принято решение сконцентрировать внимание на детальном исследовании северной части Хараулахского хребта, так как в 2019–2020 гг. там произошла серия сравнительно крупных землетрясений с магнитудами до 4.5 (M_L), часть из них попала в каталоги ФИЦ ЕГС РАН. На рис. 1 приведена конфигурация сейсмологической сети в период с 2019 по 2022 г., а также эпицентры землетрясений, полученные после

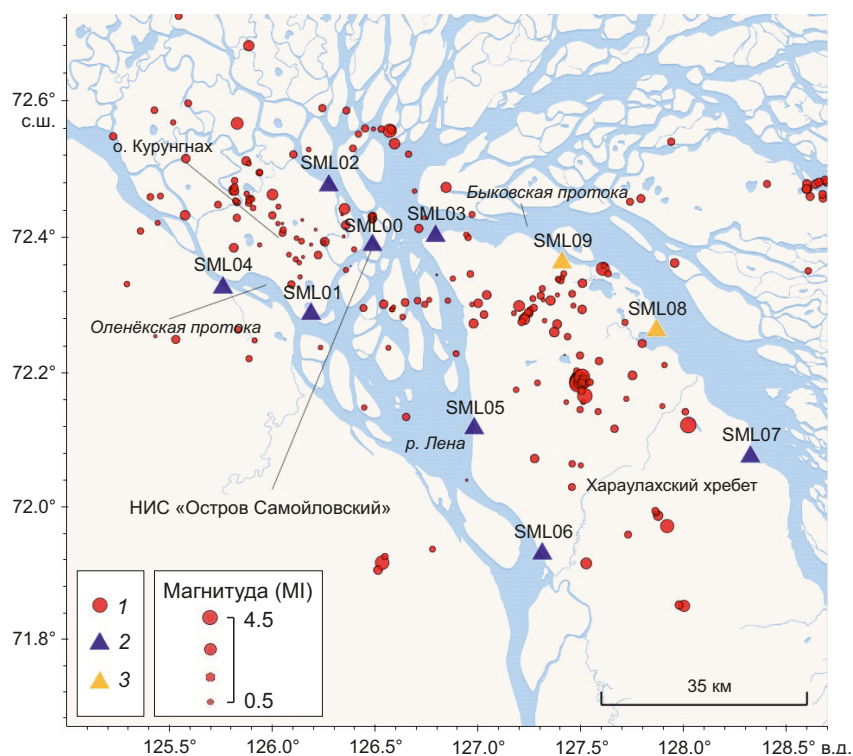


Рис. 1. Сейсмологическая сеть и эпицентры локальных землетрясений в 2019–2021 гг. 1 – эпицентры; 2 – сейсмологические пункты в 2019–2021 гг.; 3 – пункты, установленные летом 2021 г.

Fig. 1. Seismic network and epicenters of 2019–2021 local earthquakes. 1 – epicenters; 2 – seismological stations in 2019–2021; 3 – stations installed in summer 2021.

Таблица 1. Детальное описание конфигурации сейсмологической сети 2019–2022 гг.

Table 1. Detailed seismological network configuration for 2019–2022

№	Пункт	Широта, град.	Долгота, град.	Наличие сейсмологических станций		
				2019–2020 (SIOLA)	2020–2021 (ИНГГ)	2021–2022 (ИНГГ)
1	SML00	72.39	126.49	да	нет	да
2	SML01	72.29	126.18	да	да	да
3	SML02	72.48	126.27	да	да	нет
4	SML03	72.40	126.79	да	да	да
5	SML04	72.33	125.76	да	да	нет
6	SML05	72.12	126.98	да	нет	да
7	SML06	71.93	127.31	да	нет	да
8	SML07	72.07	128.32	да	нет	да
9	SML08	72.26	127.87	нет	нет	да
10	SML09	72.36	127.41	нет	нет	да
11	SAM02	72.38	126.51	да	нет	нет
12	SAM03	72.38	126.48	да	нет	нет

томографической инверсии. Синими треугольниками отмечены сейсмологические пункты, функционирующие в 2019–2021 гг, а желтыми – новые пункты, установленные летом 2021 г.

В табл. 1 приведено детальное описание сейсмологической сети с указанием периодов работы станций на различных пунктах наблюдения.

3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

Выделение сигналов от локальных землетрясений из непрерывных записей производилось с использованием алгоритма на основе сверточной нейронной сети [Dergach et al., 2021; Ulyanov et al., 2021]. Далее вручную определялись времена прихода P- и S-волн, амплитуды целевых волн, а также производилась первичная

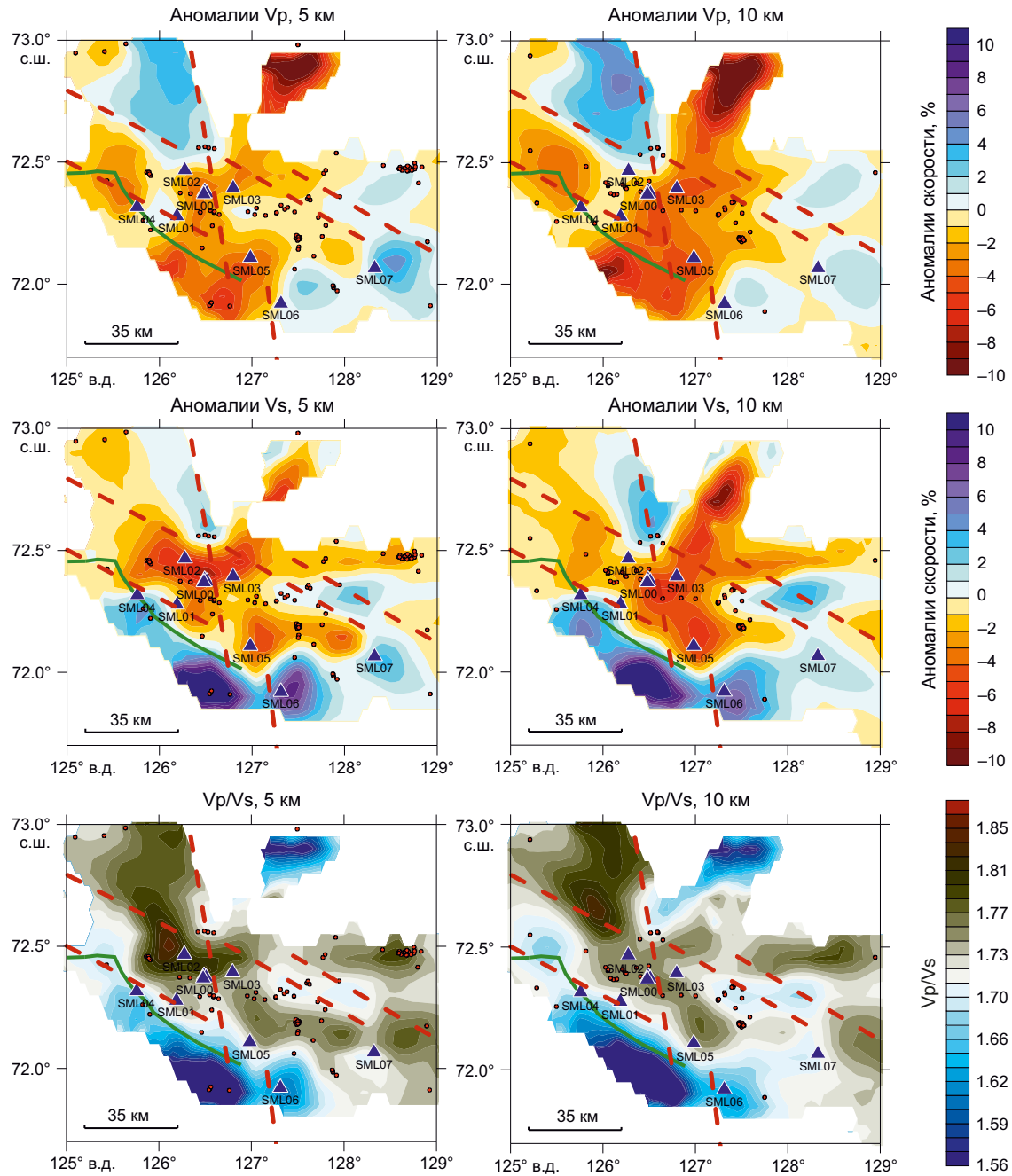


Рис. 2. Распределение скоростных аномалий и соотношения V_p/V_s , полученное по результатам сейстотомографии для глубин 5 и 10 км.

Красные точки – проекции гипоцентров на глубины срезов. Синие треугольники – сейсмические станции. Красные линии – разломы [Imaeva et al., 2019]. Зеленая линия – граница Сибирской платформы согласно [State Geological Map..., 2014].

Fig. 2. Distribution of the velocity anomalies and V_p/V_s ratio obtained from the results of tomographic data inversion for depths of 5 and 10 km.

The red dots stand for earthquake hypocenters at a given depth. Blue triangles are seismic stations. The red dotted lines show faults [Imaeva et al., 2019]. A green line is a boundary of the Siberian Platform [State Geological Map..., 2014].

локализация гипоцентров и расчет магнитуд в программе DIMAS [Droznin, Droznina, 2011] с использованием начальной скоростной модели IASP91 [Kennett, Engdahl, 1991].

Уточнение скоростной модели и последующая ре-локализация гипоцентров с ее использованием производились в программе сейсмотомаграфической инверсии LOTOS [Koulakov, 2009]. Для проведения инверсии необходимо знать координаты пунктов наблюдения, гипоцентры землетрясений, локализованных с использованием начальной скоростной модели, а также времена пробега P- и S-волн. В данном случае были использованы времена пробега P- и S-волн от 351 локального землетрясения, зарегистрированного на десяти пунктах наблюдения (в сумме 4091 шт.).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для удобства интерпретации результаты сейсмотомаграфии приводятся в виде распределения скоростных аномалий P- и S-волн относительно референтной модели, а также соотношения V_p/V_s . На рис. 2 приведены горизонтальные срезы на глубинах 5 и 10 км. Данным глубинам соответствуют скорости из стартовой модели: 5.54 и 6.12 км/с для P-волн, 3.18 и 3.52 км/с для S-волн. Дополнительно на срезы нанесены проекции разломов согласно работе [Imaeva et al., 2019] и граница Сибирской платформы согласно геологической карте дочетвертичных образований [State Geological Map..., 2014].

По мнению авторов, в структуре аномалий четко прослеживаются Сибирская платформа и Западно-Верхоянская складчатая область (пониженные значения V_p/V_s в южной части). Согласно [Dobretsov et al., 2017], пониженные значения V_p/V_s вследствие контрастной положительной аномалии V_s соответствуют наличию прочных консолидированных пород, преимущественно магматических. Уверенное прослеживание аномалии на 5 и 10 км свидетельствует о том, что она имеет глубинные корни. Данное предположение также подтверждается выводами из работы [State Geological Map..., 2014], согласно которым в районе контакта Сибирского кратона и Оленёкского разлома кристаллический фундамент залегает на глубинах 5 км и более и состоит из пород нижнепротерозойского возраста.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании было произведено построение сейсмотомаграфической модели в районе НИС «Остров Самойловский». Новая модель была использована для уточнения гипоцентров локальных землетрясений. Анализ структур аномалий позволил интерпретировать зону пониженного соотношения V_p/V_s как слой пород, относящийся к Сибирской платформе.

В силу ограниченности набора входных данных (время прихода P- и S-волн) у авторов не было возможности проверить устойчивость решения обратной задачи общепринятыми тестами по типу «четные и нечетные источники» [Koulakov, Sobolev, 2006], поэтому

полученные результаты рассматриваются как предварительные, которые будут проверяться и уточняться по мере поступления новых данных.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Dergach P.A., Loginov G.N., Yaskevich S.V., Ulianov N.A., Pyataev E.E., 2021. Neural Network-Based Detection of Signals from Weak Earthquakes for the Local Seismological Networks. In: Geomodel 2021. Proceedings of 23rd Conference on Geological Exploration and Development of Oil and Gas Fields (September 6–10, 2021). EAGE, p. 1–5 (in Russian) [Дергач П.А., Логинов Г.Н., Яскевич С.В., Ульянов Н.А., Пятаев Е.Е. Алгоритм детектирования сигналов от слабых локальных землетрясений на основе сверточной нейронной сети // Геомодель 2021: Тезисы докладов 23-й конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (6–10 сентября, 2021 г.). EAGE, 2021. С. 1–5]. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202157063>.

Dergach P.A., Ponasenko S.N., Eponeshnikova L.Y., Zobnin G.Y., Potapov V.V., Kartozhii A.A., Geissler W.H., Gukov S.A., Shibaev S.V., Tuktarov R.M., 2022 (in print). Seismological Observations in Samoylov Island Area of the Lena Delta. In: Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2021. Reports on Polar and Marine Research. Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven.

Dergach P.A., Tubanov C.A., Yushin V.I., Duchkov A.A., 2019. Features of Software Implementation of Low-Frequency Deconvolution Algorithms. Seismic Instruments 55, 345–352. <https://doi.org/10.3103/S0747923919030046>.

Dobretsov N.L., Simonov V.A., Koulakov I.Yu., Kotlyarov A.V., 2017. Migration of Fluids and Melts in Subduction Zones and General Aspects of Thermophysical Modeling in Geology. Russian Geology and Geophysics 58 (5), 571–585. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.09.028>.

Droznin D.V., Droznina S.Y., 2011. Interactive DIMAS Program for Processing Seismic Signals. Seismic Instruments 47, 215. <https://doi.org/10.3103/S0747923911030054>.

Franke D., Krüger F., Klinge K., 2000. Tectonics of the Laptev Sea – Moma "Rift" Region: Investigation with Seismologic Broadband Data. Journal of Seismology 4, 99–116. <https://doi.org/10.1023/A:1009866032111>.

Fujita K., Koz'min B.M., Mackey K.G., Riege S.A., McLean M.S., Imaev V.S., 2009. Seismotectonics of the Chersky Seismic Belt, Eastern Sakha Republic (Yakutia and Magadan District, Russia). In: D.B. Stone, K. Fujita, P.W. Layer, E.L. Miller, A.V. Prokopiev, J. Toro (Eds), *Geology, Geophysics and Tectonics of Northeastern Russia: A Tribute to Leonid Parfenov*. Stephan Mueller Special Publication Series 4, 117–145. <https://doi.org/10.5194/smsps-4-117-2009>.

Geissler W., Baranov B., Shibaev S., Haberland C., Tsukanov N., Dozorova K., 2018. Russian-German Project "Seismicity and Neotectonics of the Laptev Sea Region". *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center"*. *Earth Sciences* 37 (1), 102–106 (in Russian) [Гайцлер В.Х., Баранов Б.В., Шибаев С.В., Хаберланд К., Цуканов Н.В., Дозорова К.А. Российско-германский проект «Сейсмичность и неотектоника Лаптевоморского региона» // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2018. Вып. 37. № 1. С. 102–106].

Geissler W.H., Dergach P.A., Kruger F., Gukov S.A., Haberland Ch., Tsukanov N.V., Peresypkin D., Zeckra M., Petrunin S., Eponeshnikova L.Y., Shibaev S.V., Baranov B.V., Ploetz A., Krylov A., Tuktarov R., Vollmer D., 2021a. Seismicity of the Laptev Sea Rift. In: *Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2019. Reports on Polar and Marine Research*. Vol. 749. Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, p. 121–129. https://doi.org/10.48433/BzPM_0749_2021.

Geissler W.H., Dergach P.A., Tuktarov R., Petrunin S., Gukov S.A., Kartoziia A., Potapov V., Haberland Ch., Baranov B.V., Shibaev S.V., Kruger F., Pravkin S., Tsukanov N.V., Ploetz A., Krylov A., Vollmer D., 2021b. Seismicity of the Laptev Sea Rift. In: *Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2020. Reports on Polar and Marine Research*. Vol. 756. Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, p. 37–43. https://doi.org/10.48433/BzPM_0756_2021.

Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S., 2019. Dynamics of the Relief and Sesmotectonic Activity of the Modern Structures in the Delta of the River Lena. *Geotectonics* 5, 62–77 (in Russian) [Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С. Динамика рельефа и сейсмотектоническая активизация новейших структур дельты р. Лена // Геотектоника. 2019. № 5. С. 62–77]. <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019562-77>.

Kennett B.L.N., Engdahl E.R., 1991. Traveltimes for Global Earthquake Location and Phase Identification. *Geophysical Journal International* 105 (2), 429–465. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x>.

Koulakov I., 2009. LOTOS Code for Local Earthquake Tomographic Inversion: Benchmarks for Testing Tomographic Algorithms. *Bulletin of the Seismological Society of America* 99 (1), 194–214. <https://doi.org/10.1785/0120080013>.

Koulakov I., Sobolev S.V., 2006. A Tomographic Image of Indian Lithosphere Break-Off beneath the Pamir Hindukush Region. *Geophysical Journal International* 164, 425–440. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02841.x>.

State Geological Map of the Russian Federation, 2014. *Laptev-Sibiromorsk Series*. Scale 1:1000000. Sheet S–51 (Olenek Bay), S–52 (Delta of the Lena River). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 274 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Лаптево-Сибироморская. Масштаб 1:1000000. Лист S–51 (Оленёкский зал.), S–52 (дельта р. Лены): Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2014. 274 с.].

Ulyanov N.A., Yaskevich S.V., Dergach P.A., Yablokov A.V., 2021. Detection of Records of Weak Local Earthquakes Using Neural Networks. *Russian Journal of Geophysical Technologies* 2, 13–23 (in Russian) [Ульянов Н.А., Яскевич С.В., Дергач П.А., Яблоков А.В. Детекция записей слабых локальных землетрясений с использованием нейронных сетей // Геофизические технологии. 2021. № 2. С. 13–23]. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2021-2-13>.