



РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ДЕЛЬТЕ Р. ЛЕНА В 2024–2025 ГГ.

П.А. Дергач^{1,2,✉}, Л.Ю. Епонешникова¹, С.Н. Понасенко¹, Г.Ю. Зобнин^{1,2}, А.А. Белоусов^{1,2},
Е.В. Степанова², Р.М. Туктаров^{1,3}, А.А. Сибирякова²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

³Якутский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 677007,
Якутск, просп. Ленина 39, Россия

¹DergachPA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5672-7813>

Аннотация. В статье приведены результаты детальных сейсмологических наблюдений в районе дельты р. Лена с использованием рекордного для этого района числа временных станций – 15. За период с августа 2024 по февраль 2025 г. из непрерывных записей удалось выделить и обработать сигналы от 326 землетрясений. Подавляющее число гипоцентров приурочено к разломным структурам, расположенным в северной части Хараулахского хребта. Наглядно продемонстрирован положительный эффект сгущения пунктов сети вокруг этой области: зарегистрировано большое число слабых землетрясений, а на вертикальных срезах отчетливо разделяются локальные зоны сейсмичности.

Ключевые слова: сейсмология, землетрясения, временные сейсмологические сети, сейсмическая томография, низкочастотная деконволюция, локализация гипоцентров, разломные структуры

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-17-00237).

Для цитирования: Дергач П.А., Епонешникова Л.Ю., Понасенко С.Н., Зобнин Г.Ю., Белоусов А.А., Степанова Е.В., Туктаров Р.М., Сибирякова А.А. Результаты сейсмологических исследований в дельте р. Лена в 2024–2025 гг. // Геофизические технологии. 2025. № 3. С. 27–39. doi:10.18303/2619-1563-2025-3-27.

THE RESULTS OF SEISMOLOGICAL OBSERVATIONS IN THE LENA RIVER DELTA IN 2024–2025

Petr A. Dergach^{1,2,✉}, Lyubov Yu. Eponeshnikova¹, Svyatoslav N. Ponasenko¹, Gleb Yu. Zobnin^{1,2},
Andrey A. Belousov^{1,2}, Ekaterina V. Stepanova², Rustam M. Tuktarov^{1,3}, Anna A. Sibiryakova²

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

³Yakutsk Branch of Federal Research Center Geophysical Survey of RAS, Lenin Ave., 39, Yakutsk, 677007, Russia,

¹DergachPA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5672-7813>

Abstract. The article presents the results of detailed seismological observations in the Lena River delta area using a record number of 15 temporary stations in this area. During the period from August 2024 to February 2025, signals from 326 earthquakes were isolated and processed from continuous recordings. The vast majority of hypocenters are confined to fault

structures located in the northern part of the Kharaulakh ridge. The positive effect of the network's thickening points around this area is clearly demonstrated: a large number of weak earthquakes have been recorded, and local seismicity zones are clearly separated on the vertical sections.

Keywords: seismology, earthquakes, temporary seismological networks, seismic tomography, geophones, low-frequency deconvolution, localization of hypocenters, fault structures

Funding: the study is supported by grant of the Russian Science Foundation (Project No. 23-17-00237).

For citation: Dergach P.A., Eponeshnikova L.Yu., Ponasenko S.N., Zobnin G.Yu., Belousov A.A., Stepanova E.V., Tuktarov R.M., Sibiryakova A.A. The results of seismological observations in the Lena River delta in 2024–2025 // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 3. P. 27–39. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-3-27.

ВВЕДЕНИЕ

Район дельты р. Лена является тектонически активной областью, приуроченной к зоне сочленения Сибирской платформы, Верхоянского складчато-надвигового пояса и рифтовой системы шельфа моря Лаптевых. Тектонические процессы в дельте р. Лена проявляются в наличии сложной системы активных разломов (рис. 1) и сопровождаются сейсмической активностью. Основная зона концентрации эпицентров землетрясений находится в южной части, в зоне сочленения Сибирского кратона и Верхоянского складчато-надвигового пояса. Эта зона прослеживается от залива Буор-Хая, через дельту р. Лена, к полуострову Таймыр [Fujita et al., 2009; Козьмин и др., 2014; Имаева и др., 2019]. Сейсмичность в дельте р. Лена в основном связана с зонами Оленекского, Булкурского, Терпейского, Арынского, Сардахского и Быковского разломов северо-западного простирания [Большаянов и др., 2014; Деев и др., 2025]. Согласно данным геологического картирования и фокальных механизмов очагов землетрясений отдельные сегменты этих разломов интерпретируются как сбросы с присутствием левосдвиговой компоненты, иногда как взбросы [Fujita et al., 2009; Козьмин и др., 2014; Имаева и др., 2019; Imaeva et al., 2019]. Район дельты р. Лена считается регионом с умеренной сейсмической активностью: подавляющее большинство землетрясений имеет $M < 4$ и не попадает в глобальные каталоги. Соответственно, для изучения активных тектонических процессов, происходящих в этом районе, требуется проведение сейсмологических наблюдений локального и регионального уровня.

Детальные сейсмологические наблюдения на территории дельты р. Лена ведутся с 2016 г. по настоящее время. До 2020 г. включительно они проводились в рамках совместного российско-немецкого проекта SIOLA [Plötz et al., 2025], а с 2021 г. на данной территории функционирует временная сейсмологическая сеть ИНГГ СО РАН [Дергач и др., 2022; Деев и др., 2025]. Летом 2024 г. было установлено рекордное для данного района количество сейсмологических пунктов – 15, что позволило значительно расширить каталог землетрясений, произошедших на исследуемой территории. За период с августа 2024 по февраль 2025 г. были обработаны записи от 326 землетрясений. Общее количество обработанных событий за период наблюдений с 2016 г. по настоящее время составляет 1489. Планирование мест установки новых сейсмологических пунктов производилось с использованием авторского подхода [Понасенко и др., 2025], позволяющего оптимизировать геометрию сети в условиях ограниченной доступности мест для установки оборудования. Сеть планировалась таким образом, чтобы обеспечить максимальную чувствительность и азимутальное покрытие зон активизации сейсмичности в северной части Хараулахского хребта, а также вдоль Оленекской протоки (рис. 1).

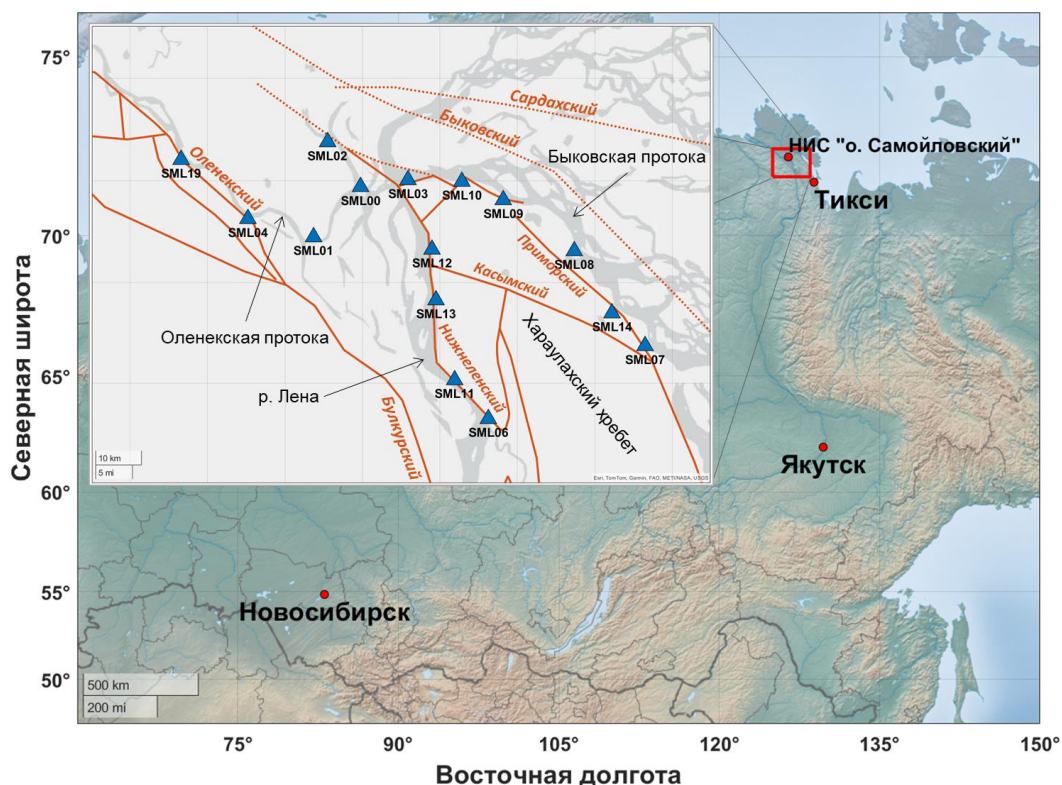


Рис. 1. Местоположение района исследований и схема взаимного расположения активных разломов и сейсмологических станций в период с августа 2024 по август 2025 г. Сплошные красные линии – достоверные активные разломы, пунктирные – предполагаемые, по данным [Деев и др., 2025].

Данные, полученные на исследуемой территории, позволили уточнить глубинную скоростную модель земной коры с помощью метода сейсмической томографии [Nolet, 2012]. Опорная сейсмотомографическая модель была построена по данным за период 2019–2021 гг. [Дергач и др., 2022], в дальнейшем она уточнялась по мере появления новых данных. В работе [Деев и др., 2025] авторы использовали результаты обработки записей от 613 землетрясений, зарегистрированных за период с 2018 по 2024 г. Использование томографической инверсии позволило не только уточнить скоростную модель района исследований, но и скорректировать положение гипоцентров сейсмических событий.

В статье приводится анализ результатов обработки непрерывных записей, полученных с использованием временной сейсмологической сети ИНГГ СО РАН в дельте р. Лена в период с августа 2024 по февраль 2025 г.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сейсмологическая сеть. В период наблюдений с августа 2024 по август 2025 г. временная сейсмологическая сеть ИНГГ СО РАН состояла из 15 пунктов наблюдения. Регистрация землетрясений производилась с использованием комплектов оборудования, состоящих из автономных сейсмических регистраторов «БАР-3.1» (входящих в состав бескабельной сейсмосистемы «SCOUT», АО «СКБ СП», Россия), укомплектованных 5-герцовыми геофонами «GS-ONE LF» (ООО «Геоспейс Технолджис Евразия», Россия). Питание сейсмологических станций осуществлялось с использованием батарей «Бакен ВЦ1», последовательно соединенных по шесть штук и упакованных в кейс с воздуховодом. Такое соединение батарей обеспечивало суммарную емкость 350 А·ч при напряжении 15.6 В, чего с запасом хватало для ведения непрерывной записи длительностью более года. Несмотря на сравнительно низкую

стоимость батарей «Бакен ВЦ1» в сравнении с аккумуляторными батареями, имеющими сопоставимые технические характеристики, они обладают существенным недостатком для использования в зимних условиях, а именно – необходимостью обеспечения постоянного притока воздуха. В связи с тем, что со временем воздухопроводы забиваются снегом, электропитание станций прекращается. Это стало причиной досрочного прекращения работы станций в феврале 2025 г. Чтобы обеспечить длительную бесперебойную регистрацию данных, летом 2025 г. батареи на восьми сейсмологических пунктах были заменены на 12.5-вольтовые аккумуляторы (LiFePO₄) емкостью 105 А·ч. С учетом того, что геофоны не требуют электропитания, по нашим расчетам, емкости морозостойких LiFePO₄-аккумуляторов должно хватить для непрерывной круглогодичной записи.

Обработка данных производилась с использованием как авторских алгоритмов и программного обеспечения [Дергач и др., 2018; Камашев и др., 2025], так и общепризнанных программных средств. На первом этапе все непрерывные записи и метаинформация о станциях загружались на сервер SeisComp, после чего проходили этапы рутинной обработки:

- поиск сигналов от локальных и региональных землетрясений в непрерывных записях;
- частотная коррекция записей 5-герцовых геофонов;
- определение времен прихода целевых *P*- и *S*-волн, а также их амплитуд;
- первичная локализация гипоцентров в модели IASP91 [Kennett et al., 1995] и расчет магнитуд.

Результаты рутинной обработки (времена прихода и амплитуды целевых *P*- и *S*-волн, а также предварительный каталог землетрясений) загружались в соответствующие базы данных.

Для автоматического поиска сигналов от землетрясений в непрерывной сейсмической записи использовался комплекс методов: авторские алгоритмы на основе STA/LTA и MER, а также нейросетевой детектор, основанный на модели SegPhase [Kato et al., 2025]. Данная модель построена на архитектуре Vision Transformer (ViT) и обучена для решения задачи определения времени первых вступлений целевых *P*- и *S*-волн. Архитектура ViT использует механизм самовнимания (self-attention) для выделения как локальных, так и глобальных признаков сейсмических сигналов. Это позволяет модели фокусироваться на наиболее важных участках записи, таких как моменты вступления *P*- и *S*-волн. На вход модели подавался 60-секундный фрагмент трехкомпонентного сигнала. На выходе формировался трехканальный массив, соответствующий вероятностям принадлежности каждого отсчета анализируемого фрагмента записи к одному из трех классов: первое вступление *P*-волны, первое вступление *S*-волны и шум. Вероятности определения времени прихода *P*- и *S*-волн были адаптированы для задачи детекции следующим образом: если вероятность наличия вступления *P*- и *S*-волн превышала 0.6 одновременно, то триггер-файл классифицировался как содержащий сигнал от землетрясения. При обнаружении сигнала более чем на пяти станциях временной участок отмечался как сейсмическое событие.

Для достоверной регистрации низкочастотных сигналов производилась частотная коррекция записей с использованием авторского алгоритма [Дергач и др., 2018]. У сильных землетрясений с магнитудами 3 и выше, частотный диапазон записей расширялся с 5 Гц вплоть до значения 0.1 Гц (рис. 2).

Данный пример наглядно демонстрирует возможность и необходимость частотной коррекции записей низкочастотных землетрясений, полученных с помощью 5-герцовых геофонов. Хорошо видно, что амплитуда сигналов после частотной коррекции (см. рис. 2, а) значительно увеличивается, особенно у *S*-волн. Благодаря этому упрощается процесс определения времен прихода *S*-волн, а также исключается занижение магнитуды сильных землетрясений.

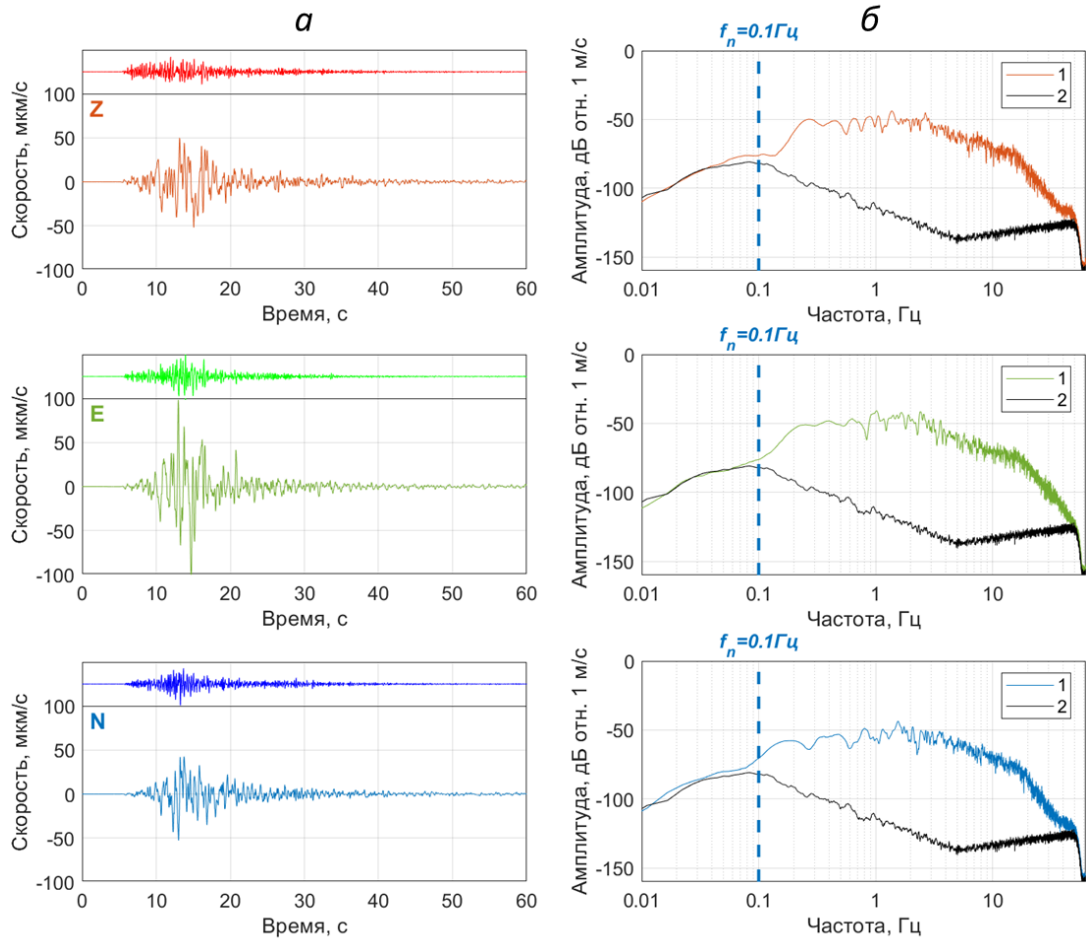


Рис. 2. Пример частотной коррекции трехкомпонентной записи землетрясения, произошедшего 19.11.2023 ($M 3.5$) до значения 0.1 Гц: а – сопоставление сигналов до и после частотной коррекции; б – сопоставление спектров соответствующей компоненты сигнала и аппаратного шума после частотной коррекции (черная линия).

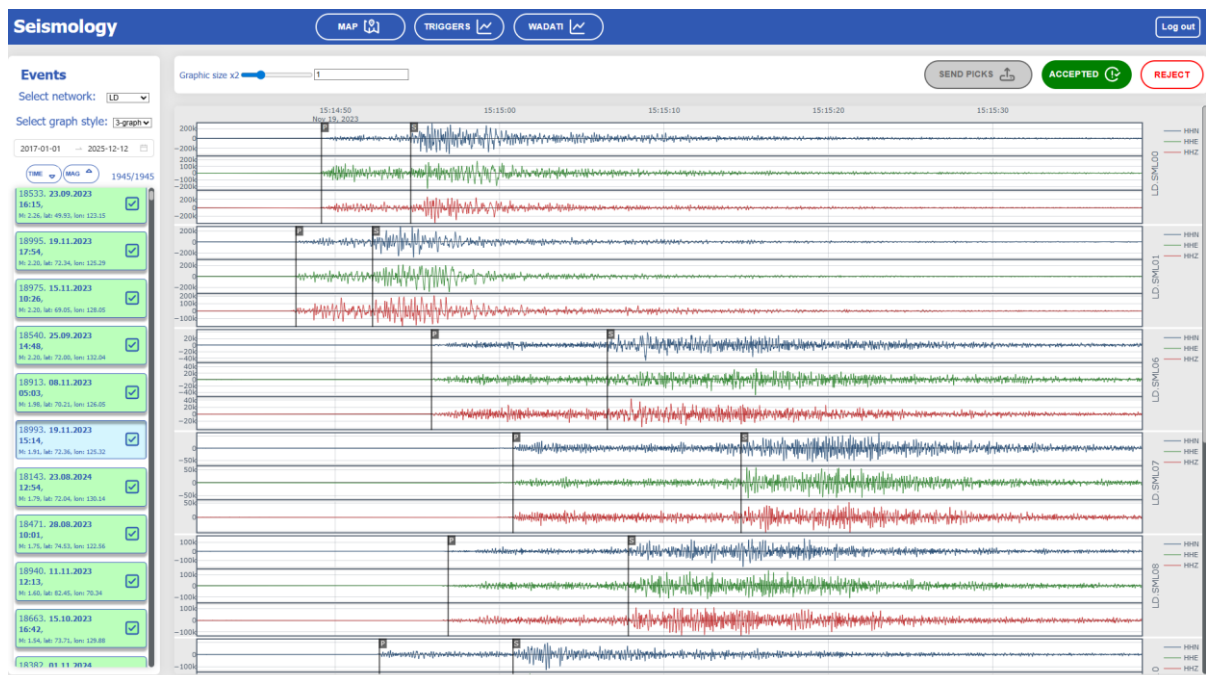


Рис. 3. Снимок экрана авторского веб-интерфейса для верификации результатов автоматического определения времен прихода P - и S -волн (алгоритмы на основе STA/LTA, MER и нейронных сетей), а также обработки записей в ручном режиме.

Необходимо отметить, что все времена прихода P - и S -волн, определенные алгоритмом на основе нейронной сети [Камашев и др., 2025], были верифицированы и, при необходимости, исправлены оператором в специально разработанном веб-интерфейсе (рис. 3), который подключен к базам данных SeisComp. Для расчета магнитуд использовалась формула, выведенная из номограммы Раутиан [Шибяев и др., 2021] с поправкой на магнитуду событий из глобальных и региональных каталогов.

На заключительном этапе обработки в программном пакете LOTOS [Koulakov, 2009] производилось уточнение сейсмотомографической скоростной модели [Деев и др., 2025] с последующей релокализацией гипоцентров на ее основе. В обработке методом сейсмической томографии использовались записи тех сейсмических событий, которые были зарегистрированы минимум на пяти пунктах наблюдения, удаленных от эпицентра не более чем на 300 км.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 4 приведены результаты обработки данных за интервал времени с августа 2024 по февраль 2025 г. На данный момент обработаны записи 326 землетрясений, произошедших в дельте р. Лена за этот период.

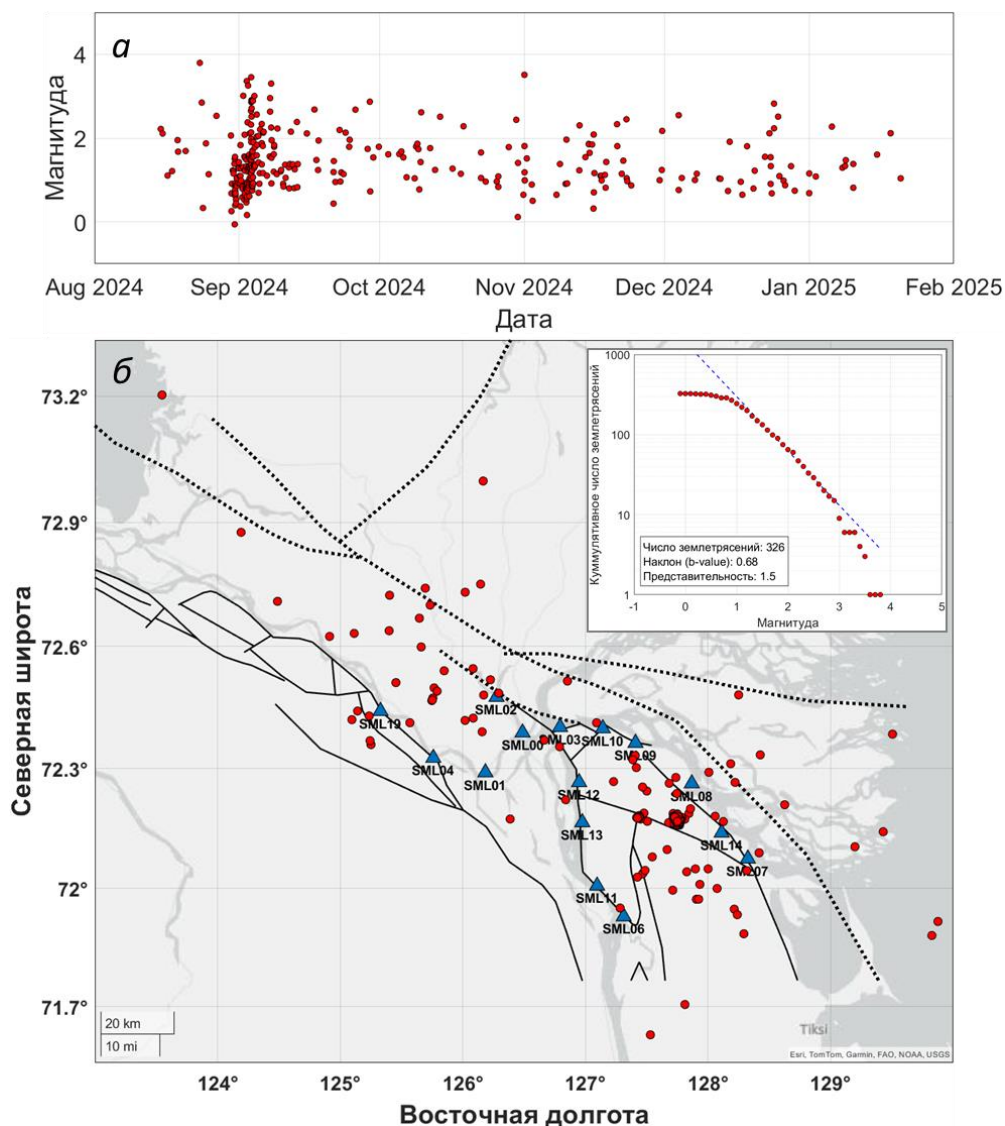


Рис. 4. Распределение магнитуд землетрясений на территории дельты р. Лены от времени (а) и карта с эпицентрами и станциями (б) за сезон 2024–2025 гг.

Как видно из графика зависимости магнитуд землетрясений от времени, с 29 августа начался процесс сейсмической активизации, в районе Хараулахского хребта длительностью около недели. При этом более 75 % (252 шт.) из всех обработанных землетрясений произошли именно в этой зоне. Проанализируем плотность распределения эпицентров землетрясений за весь период сейсмологических наблюдений с 2016 по 2025 г. (рис. 5).

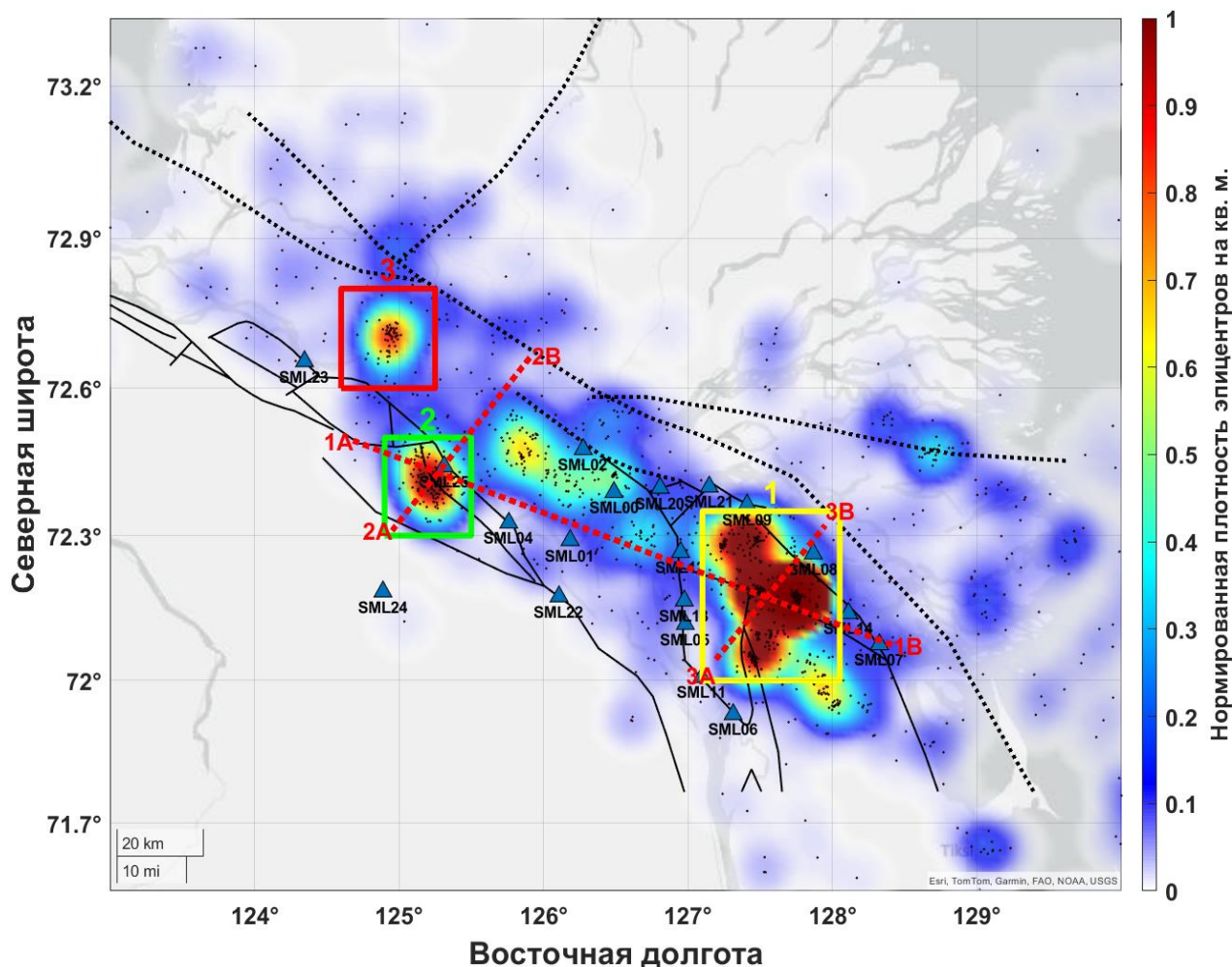


Рис. 5. Плотность распределения эпицентров землетрясений за период с 2016 по 2025 г. Желтым, зеленым и красным прямоугольниками выделены основные зоны сейсмической активизации. Красными пунктирными линиями обозначены профили, вдоль которых анализировались срезы по глубине. Сплошными и пунктирными черными линиями показаны подтвержденные и предполагаемые разломы по данным [Деев и др., 2025].

Явным образом выделяются три области повышенной сейсмической активности. В самую интенсивную область, расположенную в северной части Хараулахского хребта (желтый прямоугольник на рис. 5), попадает 38 % от общего числа зарегистрированных землетрясений (580 из 1489). Во вторую по интенсивности область (зеленый прямоугольник на рис. 5) – уже всего 7 % (105 из 1489). В третью – 4.5 % (67 из 1489). Очевидно, на количество регистрируемых слабых землетрясений влияет количество близлежащих станций – во второй и третьей зонах активизации их значительно меньше. Более того, близлежащие станции SML23 и SML24 функционировали на этом месте в рамках проекта SIOLA всего в течение одного сезона. Снижение чувствительности сети к слабым землетрясениям по мере удаления от станций наглядно иллюстрируют графики повторяемости для первой, второй и третьей зон сейсмической активизации (рис. 6, б–г соответственно).

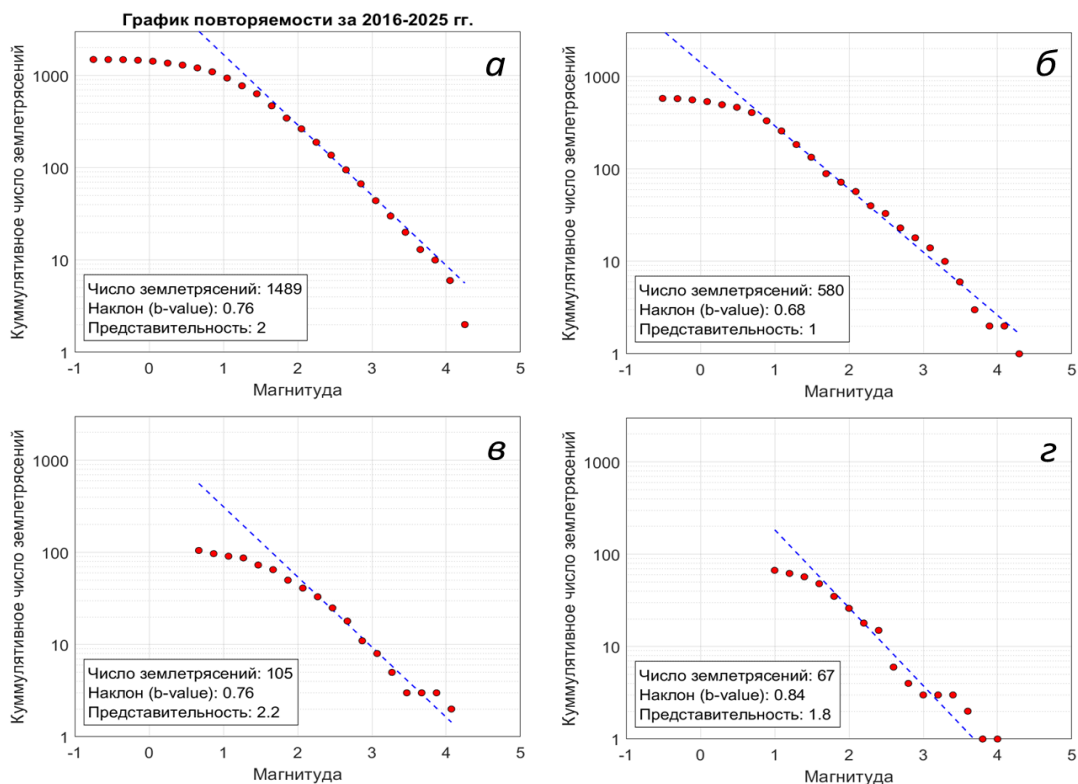


Рис. 6. Графики повторяемости землетрясений для дельты р. Лены (а), а также для областей № 1, 2 и 3, выделенных на рис. 5 желтым, зеленым и красным прямоугольниками (б–г).

Азимутальное покрытие вокруг зон сейсмичности, в свою очередь, очевидным образом влияет на точность локализации гипоцентров. На вертикальных срезах вдоль линий 1А–1В и 3А–3В (см. рис. 5) на примере зоны сейсмичности в северной части Хараулахского хребта наглядно продемонстрировано, как хорошее азимутальное покрытие позволяет разделять локальные зоны сейсмичности (рис. 7).

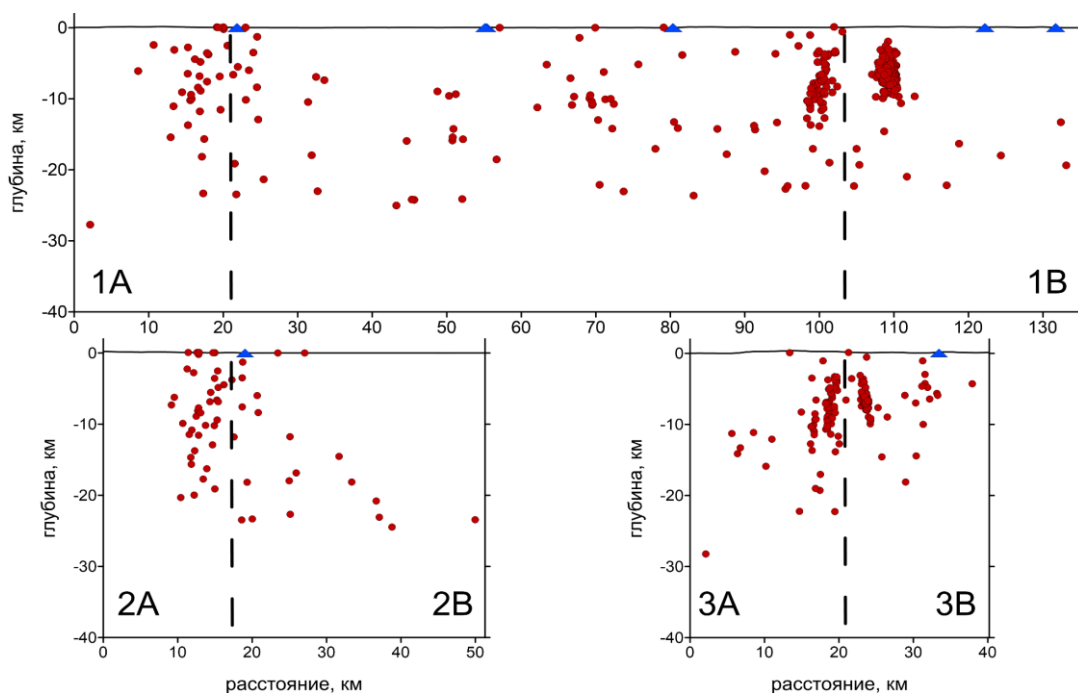


Рис. 7. Вертикальные срезы по профилям 1А–1В, 2А–2В и 3А–3В. Пунктирными линиями обозначены места пересечения профилей. Красными точками показаны проекции гипоцентров сейсмических событий в радиусе 5 км от плоскости среза.

В то же время для зоны сейсмичности № 2 (срезы 1А–1В и 2А–2В) облако гипоцентров «размывается» из-за худшего азимутального покрытия.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Летом 2024 г. в дельте реки Лены было установлено рекордное для этой территории количество сейсмологических пунктов временной сети ИНГГ СО РАН. За период с августа 2024 по февраль 2025 г. было зарегистрировано и обработано 326 землетрясений, выявленных автоматическими алгоритмами детекции (более 20 % от общего числа событий с 2016 г.). Несмотря на значительный прогресс в автоматизации обработки непрерывных данных, визуальный анализ записей показывает, что даже комплексный подход к автоматическому обнаружению сигналов от слабых землетрясений с использованием стандартных и нейросетевых алгоритмов не дает стопроцентного результата. Только за август 2024 г. при помощи визуального просмотра удалось обнаружить еще около 100 землетрясений, часть из которых возможно обработать. Таким образом, по-прежнему актуальной задачей остается совершенствование алгоритмов обнаружения слабых землетрясений в непрерывных сейсмологических записях.

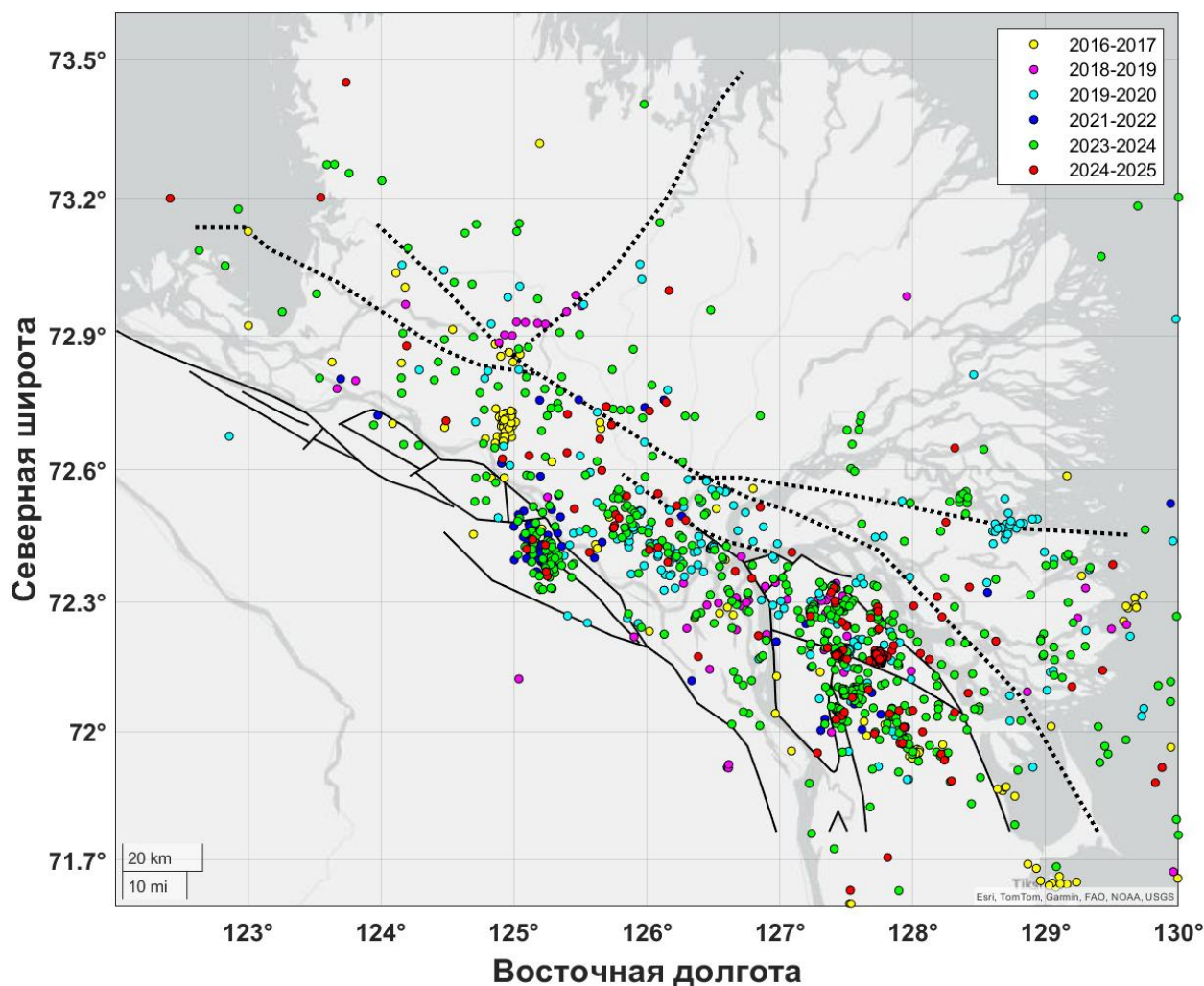


Рис. 8. Активные разломы и сейсмичность района дельты р. Лена. Эпицентры землетрясений показаны по данным локальных сейсмологических сетей за 2016–2025 гг. после уточнения их местоположений методом сейсмической томографии. Сплошные черные линии – достоверные активные разломы, пунктирные – предполагаемые, по данным [Деев и др., 2025].

На примере области сейсмической активизации, расположенной в северной части Хараулахского хребта, наглядно продемонстрирован положительный эффект от сгущения сейсмологической сети вокруг изучаемой зоны. Достигнутых значений точности локализации гипоцентров в этой области хватило, чтобы приурочить сейсмичность к Приморскому, Касымскому и Нижнеленскому сбросовым разломам. На наш взгляд, необходимо аналогичным образом изучить зоны активизации в других малоисследованных районах дельты (рис. 8), в частности, в доступной для судоходства западной части, расположенной вдоль Оленекской протоки.

На рисунке 8 показано распределение эпицентров землетрясений за весь период наблюдений (цветом обозначена сейсмичность в разные годы). Подавляющее большинство эпицентров попадает в пределы сейсмоактивной зоны сочленения Сибирского кратона и Верхоянского складчато-надвигового пояса, которая прослеживается от залива Буор-Хая через дельту р. Лены к полуострову Таймыр.

Результаты российско-немецкого проекта SIOLA за 2016–2017 гг. показали, что в западной части также присутствуют зоны сейсмической активизации, которые являются проявлением активных тектонических процессов. Однако расстановка станций на тот момент не позволила детально исследовать эти зоны. Наш опыт организации временной сети ИНГГ СО РАН показывает, что благодаря использованию современных геофонов, не требующих дополнительных источников электропитания, становится возможной оперативная установка высокоплотных сейсмологических сетей в труднодоступных регионах за счет значительного снижения веса и стоимости оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

Большаянов Д.Ю., Васильев Б.С., Виноградова Н.П., Гавриш А.В., Заварзина Г.А., Зинченко А.Г., Зуйкова О.Н., Кямря В.В., Мохов В.В., Нагайцева Н.Н., Нелюбин В.В., Радченко М.С., Саванин В.В., Проскурнин В.Ф., Рекант П.В., Солонина С.Ф., Шкарубо С.И., Шманяк А.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S-51 – Оленёкский зал., S-52 – дельта р. Лены. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 274 с.

Деев Е.В., Дучков А.А., Епонешникова Л.Ю., Дергач П.А., Заплавнова А.А., Потапов В.В., Сафронов О.В., Понасенко С.Н., Туктаров Р.М., Шибаяев С.В. Структура земной коры в районе дельты р. Лена: новые комплексные результаты геолого-геофизических исследований // Геология и геофизика. 2025. doi: 10.15372/GiG2025154. EDN:SEOB RJ.

Дергач П.А., Тубанов Ц.А., Юшин В.И., Дучков А.А. Особенности программной реализации алгоритмов низкочастотной деконволюции // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54, № 3. С. 22–34. doi:10.21455/si2018.3-2. EDN:SAHQHV.

Дергач П.А., Епонешникова Л.Ю., Понасенко С.Н., Картозия А.А., Гайсслер В.Х., Дучков А.А., Шибаяев С.В., Зобнин Г.Ю. Построение сейсмотомаграфической модели района научно-исследовательской станции «Остров Самойловский» по данным локального сейсмологического мониторинга за 2019–2021 гг. // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 2. С. 0627. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0627.

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. doi: 10.31857/S0016-853X2019562-77. EDN:XDTZFH.

Камашев А.М., Дучков А.А., Яскевич С.В. Определение времен прихода прямых *P*- и *S*-волн для слабых землетрясений при помощи машинного обучения // Вопросы инженерной сейсмологии. 2025. Т. 52, № 2. С. 55–71. doi:10.21455/VIS2025.2-4. EDN: KHVHBU.

Козьмин Б.М., Шibaев С.В., Петров А.Ф., Тимиршин К.В. Лено-Таймырская аномалия сейсмоактивной среды на шельфе моря Лаптевых // Наука и образование. 2014. № 2. С. 105–110. EDN: SUFCYZ.

Понасенко С.Н., Дергач П.А., Дучков А.А. Повышение чувствительности сейсмологической сети в районе дельты реки Лена // Вулканология и сейсмология. 2025. № 4. С. 101–112. doi: 10.31857/S0203030625040069. EDN: QFLRFG.

Шibaев С.В., Козьмин Б.М., Макаров А.А. Сейсмичность Якутии в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. 2021. № 24. С. 173–181. doi:10.35540/1818-6254.2021.24.16. EDN: TMGQEE.

Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G., Riegel S.A., McLean M.S., Imaev V.S. Seismotectonics of the Chersky Seismic Belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan District, Russia // Stephan Mueller Special Publication Series. 2009. Vol. 4. P. 117–145. doi:10.5194/smsps-4-117-2009.

Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M. Dynamics of the zones of strong earthquake epicenters in the Arctic–Asian seismic belt // Geosciences. 2019. Vol. 9 (4). P. 168. doi:10.3390/geosciences9040168.

Katoh S., Iio Y., Nagao H., Katao H., Sawada M., Tomisaka K. SegPhase: development of arrival time picking models for Japan's seismic network using the hierarchical vision transformer // Earth, Planets and Space. 2025. Vol. 77 (1). P. 118. doi:10.1186/s40623-025-02249-y.

Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // Geophysical Journal International. 1995. Vol. 122 (1). P. 108–124. doi:10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x.

Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: Benchmarks for testing tomographic algorithms // Bulletin of the Seismological Society of America. 2009. Vol. 99 (1). P. 194–214. doi: 10.1785/0120080013.

Nolet G. (Ed.). Seismic tomography: with applications in global seismology and exploration geophysics. Springer Science & Business Media. 2012. 385 p.

Plötz A., Krylov A., Geissler W.H., Shibaev S., Krüger F., Haberland C., Baranov B., Tuktarov R., Tsukanov N., Novikov M. Local seismicity along the Olenek Sector of the Lena-Anabar suture, SW Laptev Sea Rift System—Rift-related or reactivation of the former passive margin of the Siberian Craton? // Tectonophysics. 2025. Vol. 901. P. 230676. doi:10.1016/j.tecto.2025.230676.

REFERENCES

Bolshiyarov D.Yu., Vasiliev B.S., Vinogradova N.P., Gavrish A.V., Zavarzina G.A., Zinchenko A.G., Zuikova O.N., Kyamarya V.V., Mokhov V.V., Nagaitseva N.N., Nelyubin V.V., Radchenko M.S., Savanin V.V., Proskurnin V.F., Rekant P.V., Solonina S.F., Shkarubo S.I., Shmanyak A.V. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Laptev-Siberian Sea Series. Sheet S-51 – Olenek Bay, S-52 – Lena River Delta. Explanatory Note (In Russ.). VSEGEI, St. Petersburg. 2014. 274 p.

Deev E.V., Duchkov A.A., Eponeshnikova L.Yu., Dergach P.A., Zaplavnova A.A., Potapov V.V., Safronov O.V., Ponasenko S.N., Tuktarov R.M., Shibaev S.V. Structure of the Earth's crust in the Lena River delta: New comprehensive geological and geophysical data // Russian Geology and Geophysics. 2025. doi: 10.15372/GiG2025154.

Dergach P.A., Tubanov C.A., Yushin V.I., Duchkov A.A. Features of software implementation of low-frequency deconvolution algorithms // *Seismic Instruments*. 2019. Vol. 55 (3). P. 345–352. doi:10.3103/S0747923919030046.

Dergach P.A., Eponeshnikova L.Yu., Ponasenko S.N., Kartoziia A.A., Geissler W.H., Duchkov A.A., Shibaev S.V., Zobnin G.Yu. Building a tomographic velocity model for Samoylov Island area (Lena delta) from local seismological data for the period of 2019–2021 // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2022. Vol. 13 (2). 0627. (In Russ.). doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0627.

Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G., Riegel S.A., McLean M.S., Imaev V.S. Seismotectonics of the Chersky Seismic Belt, eastern Sakha Republic (Yakutia) and Magadan District, Russia // *Stephan Mueller Special Publication Series*. 2009. Vol. 4. P. 117–145. doi:10.5194/smmps-4-117-2009.

Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S. Dynamics of the relief and seismotectonic activity of the modern structures in the delta of the River Lena // *Geotectonics*. 2019. Vol. 53 (5). P. 588–600. doi:10.1134/S0016852119050029.

Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M. Dynamics of the zones of strong earthquake epicenters in the Arctic–Asian seismic belt // *Geosciences*. 2019. Vol. 9 (4). P. 168. doi:10.3390/geosciences9040168.

Kamashev A.M., Duchkov A.A., Yaskevich S.V. Determining the arrival times of direct *P*- and *S*-waves for weak earthquakes using machine learning // *Seismic Instruments*. 2025. Vol. 61 (3). P. 245–259. doi:10.3103/S0747923925700380.

Katoh S., Iio Y., Nagao H., Katao H., Sawada M., Tomisaka K. SegPhase: development of arrival time picking models for Japan's seismic network using the hierarchical vision transformer // *Earth, Planets and Space*. 2025. Vol. 77 (1). P. 118. doi:10.1186/s40623-025-02249-y.

Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes // *Geophysical Journal International*. 1995. Vol. 122 (1). P. 108–124. doi:10.1111/j.1365-246X.1995.tb03540.x.

Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: Benchmarks for testing tomographic algorithms // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2009. Vol. 99 (1). P. 194–214. doi:10.1785/0120080013.

Koz'min B.M., Shibaev S.V., Petrov A.F., Timirshin K.V. Lena-Taimyr anomaly of the seismically active medium on the Laptev Sea shelf // *Science and Education*. 2014. Vol. 2. P. 105–110. (In Russ.).

Nolet G. (Ed.). *Seismic tomography: with applications in global seismology and exploration geophysics*. Springer Science & Business Media. 2012. 385 p.

Plötz A., Krylov A., Geissler W.H., Shibaev S., Krüger F., Haberland C., Baranov B., Tuktarov R., Tsukanov N., Novikov M. Local seismicity along the Olenek Sector of the Lena-Anabar suture, SW Laptev Sea Rift System—Rift-related or reactivation of the former passive margin of the Siberian Craton? // *Tectonophysics*. 2025. Vol. 901. P. 230676. doi:10.1016/j.tecto.2025.230676.

Ponasenko S.N., Dergach P.A., Duchkov A.A. Enhancing the sensitivity of the seismological network in the Lena River delta // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2025. Vol. 19 (4). P. 390–396. doi:10.1134/S0742046325700162.

Shibaev S.V., Kozmin B.M., Makarov A.A. The seismicity of Yakutia in 2015 // *Earthquakes in North Eurasia*. 2021. No. 24. P. 173–181. (In Russ.). doi:10.35540/1818-6254.2021.24.16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЕРГАЧ Петр Александрович – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, старший научный сотрудник Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: сейсмический мониторинг, локальная сейсмология, сейсмометрия, инженерная сейсморозведка, разработка сейсмической аппаратуры.

ЕПОНЕШНИКОВА Любовь Юрьевна – младший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмология, сейсмическая томография; *EponeshnikovaLU@ipgg.sbras.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-6713-7480>.

ПОНАСЕНКО Святослав Николаевич – младший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмология, геомеханика; *PonassenkoSN@ipgg.sbras.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-7008-7621>.

ЗОБНИН Глеб Юрьевич – младший научный сотрудник Новосибирского государственного университета, аспирант Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсморозведка, разработка алгоритмов и программного обеспечения для сейсмической инверсии; *g.zobnin@g.nsu.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-1544-4355>.

БЕЛОУСОВ Андрей Андреевич – аспирант Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, инженер Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: разработка сейсмической аппаратуры; *belousov111222@gmail.com*, <https://orcid.org/0000-0002-9313-8513>.

СТЕПАНОВА Екатерина Викторовна – инженер-исследователь Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: нейронные сети, алгоритмы детекции и определения времен прихода сейсмических волн; *e.stepanova1@g.nsu.ru*, <https://orcid.org/0009-0005-1480-6624>.

ТУКТАРОВ Рустам Мингулович – ведущий инженер Якутского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». Основные научные интересы: сейсмология; *tuktarov.rust@mail.ru*, <https://orcid.org/0009-0001-3308-5931>.

СИБИРЯКОВА Анна Антоновна – студентка Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: сейсмология, калибровка магнитуд; *a.sibiryakova1@g.nsu.ru*, <https://orcid.org/0009-0008-4303-5883>.

*Статья поступила в редакцию 12 декабря 2025 г.,
одобрена после рецензирования 15 декабря 2025 г.,
принята к публикации 15 декабря 2025 г.*