

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВАН В 2004 Г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

ИЮЛЬ № 3 2025 СЕНТЯБРЬ

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

академик РАН М.И. Эпов

Ответственный секретарь

канд. физ.-мат. наук А.А. Дучков

Члены редколлегии:

д-р физ.-мат. наук Ю.П. Ампилов, д-р физ.-мат. наук И.О. Баюк, д-р физ.-мат. наук М.Л. Владов,
д-р геол.-мин. наук А.Ф. Глебов, чл.-к. РАН, д-р физ.-мат. наук В.Н. Глинских, д-р техн. наук
Г.Н. Гогоненков, д-р физ.-мат. наук М.С. Денисов, д-р техн. наук И.Н. Ельцов, д-р техн. наук
А.Ф. Еманов, д-р техн. наук А.П. Жуков, д-р техн. наук Ю.И. Колесников, чл.-к. РАН, д-р геол.-мин.
наук В.А. Конторович, чл.-к. РАН, д-р геол.-мин. наук Ю.И. Кулаков, д-р техн. наук Э.Е. Лукьянов,
чл.-к. РАН, д-р физ.-мат. наук П.С. Мартышко, д-р физ.-мат. наук Г.М. Митрофанов, чл.-к. РАН,
д-р физ.-мат. наук И.Б. Петров, д-р геол.-мин. наук Е.В. Постпеева, д-р геол.-мин. наук В.С. Селезнев,
д-р геол.-мин. наук В.Д. Суворов, д-р техн. наук А.П. Сысоев, д-р техн. наук Г.М. Тригубович,
д-р физ.-мат. наук В.А. Чеверда, д-р техн. наук Г.А. Шехтман

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Основан в 2004	Периодичность 4 раза в год	№ 3	Июль–сентябрь 2025
----------------	-------------------------------	-----	-----------------------

СОДЕРЖАНИЕ

Бережнев Я.М., Беловежец Н.Н., Дергач П.А., Яблоков А.В. Определение средней дисперсионной кривой поверхностной волны Рэлея методом пассивной интерферометрии по данным локального профиля	4
Сердюков А.С., Дучков А.А. Перспективы сейсморазведки на основе монохроматических сейсмических источников	12
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.	27
Конторович В.А., Аюнова Д.В., Ибрагимова С.М., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Соловьев М.В., Филиппов Ю.Ф. Стратификация отражающих горизонтов, сейсмогеологические осадочные мегакомплексы северных и арктических регионов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.....	40

НОВОСИБИРСК

ИНГ СО РАН

2025

RUSSIAN JOURNAL OF GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES

Founded in 2004	Quarterly	No 3	July–September 2025
-----------------	-----------	------	------------------------

CONTENTS

Berezhnev Ya.M., Belovezhets N.N., Dergach P.A., Yablokov A.V. Estimation of the average Rayleigh surface wave dispersion curve from local profile data using passive interferometry method	4
Serdyukov A.S., Duchkov A.A. Prospects of seismic exploration based on monochromatic seismic sources	12
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	27
Kontorovich V.A., Ayunova D.V., Ibragimova S.M., Kalinin A.Yu., Kalinina L.M., Solovev M.V., Philippov Yu.F. Stratification of reflecting horizons, seismogeological sedimentary megacomplexes of the northern and arctic regions of the West Siberian oil and gas province ...	40



Геофизические технологии. 2025. № 3. С. 4–11.

www.rjgt.ru

Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 3. P. 4–11.

Научная статья / Original article

УДК 550.34

doi:10.18303/2619-1563-2025-3-4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДИСПЕРСИОННОЙ КРИВОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ РЭЛЕЯ МЕТОДОМ ПАССИВНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ

Ярослав Максимович Бережнев^{1,✉}, Надежда Николаевна Беловежец², Петр Александрович
Дергач³, Александр Викторович Яблоков⁴

^{1,2,3,4}Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

^{3,4}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹y.berezhnev@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0037-7871>

²n.belovezhets@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5730-5305>

³DergachPA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5672-7813>

⁴YablokovAV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3251-0289>

Аннотация. В работе впервые в России был применен метод пассивной интерферометрии к 60 часам непрерывных сейсмических записей, зарегистрированных локальным сейсморазведочным профилем с шагом между приемниками в 50 см. В результате применения метода были построены функции кросс-корреляции окружающего сейсмического шума между всеми парами приемников. Во всех построенных функциях кросс-корреляций выделяются поверхностьные волны Рэлея, распространяющиеся между приемниками. К ним был применен новый метод, основанный на преобразовании Стоквелла–Бесселя, для извлечения средней дисперсионной кривой фазовой скорости поверхности волны Рэлея, который показал свою эффективность при использовании на малом расстоянии между приемниками и малой длине установки. Успешное построение дисперсионной кривой позволяет рассматривать метод шумовой интерферометрии как один из возможных методов инженерной сейсморазведки.

Ключевые слова: шумовая сейсмическая интерферометрия, поверхностьные волны, фазовые скорости

Финансирование: работа была выполнена в рамках государственных заданий FSUS-2025-0015 и FWZZ-2022-0017.

Для цитирования: Бережнев Я.М., Беловежец Н.Н., Дергач П.А., Яблоков А.В. Определение средней дисперсионной кривой поверхности волны Рэлея методом пассивной интерферометрии по данным локального профиля // Геофизические технологии. 2025. № 3. С. 4–11. doi:10.18303/2619-1563-2025-3-4.

ESTIMATION OF THE AVERAGE RAYLEIGH SURFACE WAVE DISPERSION CURVE FROM LOCAL PROFILE DATA USING PASSIVE INTERFEROMETRY METHOD

Yaroslav M. Berezhnev¹, Nadezhda N. Belovezhets², Petr A. Dergach³, Alexandre V. Yablokov⁴

^{1,2,3,4}Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

^{3,4}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

¹y.berezhnev@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0037-7871>

²n.belovezhets@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5730-5305>

³DergachPA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5672-7813>

⁴YablokovAV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3251-0289>

Abstract. In this study, the passive interferometry method was applied for the first time in Russia to 60 hours of continuous seismic recordings acquired along a local seismic profile with a 50-cm receiver spacing. As a result of applying the method, cross-correlation functions of ambient seismic noise were constructed for all receiver pairs. The all constructed cross-correlations reveal Rayleigh surface waves propagating between the receivers. The new, Stokwell–Bessel transform based method was then applied to these waves to extract the average dispersion curve of the Rayleigh-wave phase velocity. It has proven effective for use in short receiver spacing and short spreads. The successful retrieval of the dispersion curve demonstrates that noise interferometry can be considered as a viable method for engineering seismic surveys.

Keywords: ambient seismic noise interferometry, surface wave, phase velocity

Funding: the study was carried out as part of government assignments to the Russian Academy of Sciences in basic research, Projects FSUS-2025-0015 and FWZZ-2022-0017.

For citation: Berezhev Ya.M., Belovezhets N.N., Dergach P.A., Yablokov A.V. Estimation of the average Rayleigh surface wave dispersion curve from local profile data using passive interferometry method // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 3. P. 4–11. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-3-4.

ВВЕДЕНИЕ

Метод шумовой интерферометрии был изначально разработан для изучения региональных геологических структур [Shapiro, Campillo, 2004; Sabra et al., 2005] и применялся для исследования различных регионов [например, Yao et al., 2006; Zheng et al., 2011]. Он основан на идеи выделения из окружающего сейсмического шума когерентных сейсмических волн, которые распространяются между сейсмическими приемниками с помощью построения функции кросс-корреляции (CCF) [Shapiro, Campillo, 2004]. В случае построения кросс-корреляции с использованием сейсмических данных, зарегистрированных на поверхностно расположенных станциях, в основном извлекаются поверхностные сейсмические волны из-за их доминирования в сейсмическом шуме [например, Moschetti et al., 2010]. В последние годы метод шумовой сейсмической интерферометрии начал активно применяться в малоглубинных прикладных задачах [например, Larose et al., 2015; Pasten et al., 2016; Luo et al., 2018]. Изучение приповерхностных геологических структур с помощью активных источников обычно затруднено в городских районах из-за высокой плотности населения и проблем безопасности в областях с суровыми климатическими условиями [Li et al., 2016]. В этих случаях использование шумовой интерферометрии крайне выгодно как с экологической, так и с экономической стороны. Кроме того, окружающий сейсмический шум может создаваться различными источниками, в том числе океаническими волнами и антропогенными источниками (транспорт, механизмы и т. д.), с частотами от нескольких десятков Гц до нескольких мГц, что позволяет исследовать среду на различных глубинах, иногда больших, чем при использовании активных источников [Picozzi et al., 2009; Cheng et al., 2016; Li et al., 2016].

Несмотря на преимущества пассивной интерферометрии ранее в России для задач малоглубинной геофизики этот метод не применялся. Таким образом, в настоящем исследовании впервые в России был применен метод пассивной интерферометрии к непрерывным сейсмическим данным с локального линейного профиля из 50 сейсмических станций Geospace GS-One LF 5 Гц с шагом приемников в 50 см, установленных в городской зоне на 60 часов с частотой дискретизации сейсмических записей 100 Гц.

ПОСТРОЕНИЕ КРОСС-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ

Для построения функций кросс-корреляций были использованы вертикальные компоненты непрерывных сейсмических записей за 60 часов наблюдений. Собственная частота использованных

сейсмических приемников не позволяет регистрировать сигналы, частота которых значительно ниже 5 Гц, а частота дискретизации ограничивает максимальную частоту сигнала 40 Гц. Таким образом, целевым был выбран диапазон частот 1–40 Гц. Обработка сейсмических записей состояла из следующей последовательности операций:

- разбиение сигнала на часовые интервалы с шагом в 30 минут для оптимизации вычислений;
- предварительная фильтрация записей в целевом диапазоне частот;
- разбиение каждого интервала сигнала на отрезки длительностью 10 мин с шагом в 5 мин;
- независимая на каждом приемнике нормализация получившихся отрезков в частотной и временной областях для подавления нестационарных сигналов и выравнивания вклада разных частот, согласно [Bensen et al., 2007]. В качестве нормализации в частотной области использовалось спектральное отбеливание путем нормализации амплитудного спектра на его сглаженную величину. Во временной области была применена нормализация сигнала на сглаженную огибающую сигнала;
- вычисление кросс-корреляции записей пар приемников для каждого отрезка часового сигнала и их линейное суммирование, что необходимо для оценки стабильности получаемого сигнала в течение времени наблюдения;
- линейное суммирование полученных для каждого часа на каждой паре приемников кросс-корреляций (рис. 1).

В условиях ограниченности данных вычисление кросс-корреляций в скользящем окне небольшой длительности с 50-процентным перекрытием необходимо для улучшения их сходимости к функции Грина и для увеличения соотношения сигнала к шуму. Это происходит за счет увеличения размера выборки и подавления некогерентных во времени шумов от нестационарных источников на получаемых кросс-корреляциях [Seats et al., 2012].

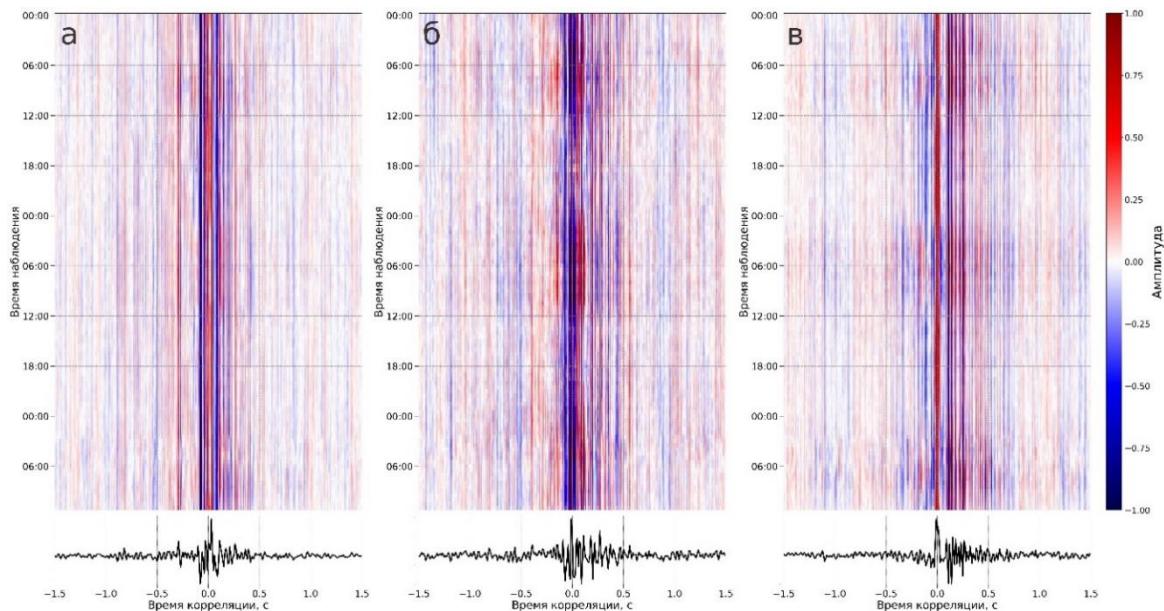


Рис. 1. Пример кросс-корреляций между парами приемников с расстоянием: а – 12 м, б – 17 м, в – 25 м за все время наблюдений. Внизу каждого рисунка показана суммарная кросс-корреляция.

На построенных за каждый час кросс-корреляциях на отрицательных и положительных временах корреляции отчетливо прослеживаются поверхностьные волны Рэлея в течение всего времени наблюдений (см. рис. 1). Кроме того, на суммарных кросс-корреляциях наблюдается согласованное

распространение поверхностной волны между всеми парами приемников (рис. 2). Можно отметить, что полученные кросс-корреляции не симметричны – с доминирующими поверхностными волнами на положительных временах корреляции. Это может говорить о том, что источники сейсмического шума располагались за первым приемником, а сейсмические волны распространялись от первого приемника к остальным. Однако из-за линейности расстановки приемников невозможно точно определить азимут на источники шума.

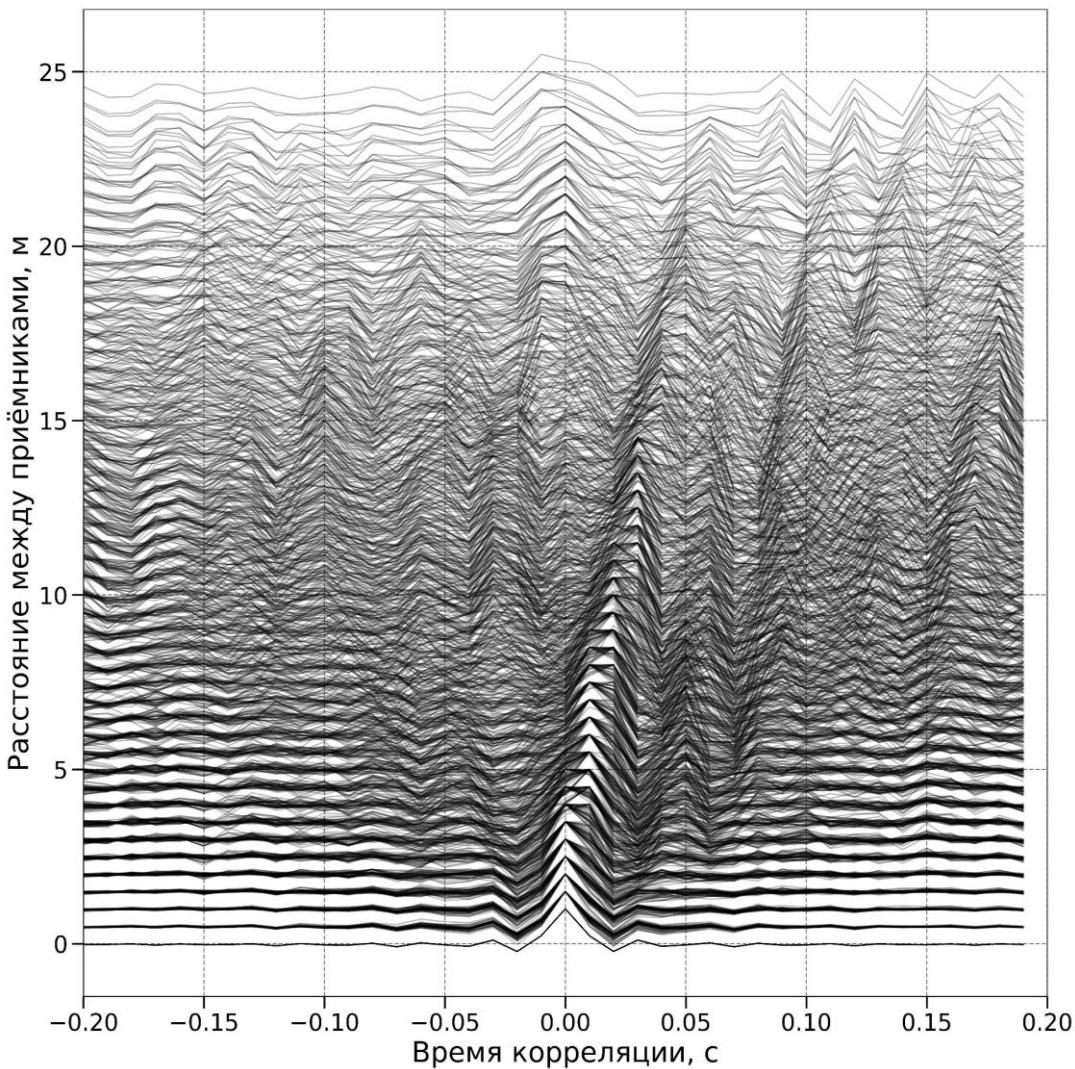


Рис. 2. Суммарные функции кросс-корреляции в зависимости от расстояния между приемниками.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ДИСПЕРСИОННОЙ КРИВОЙ

Для определения средней дисперсионной кривой поверхностной волны Рэлея был использован новейший метод на базе интегрального преобразования Стоквелла–Бесселя (SJ) [Zhang et al., 2025]. Данный подход основан на том факте, что в частотной области функция кросс-корреляции определяется следующим образом:

$$C(r, f) = U(x_1, f)U^*(x_2, f),$$

где $U(x, f)$ – это зарегистрированная вертикальная компонента сейсмической записи в точке x в частотной области, а r – расстояние между двумя станциями. Фурье-спектр CCF между двумя станциями на поверхности Земли аппроксимирует минимую часть функции Грина между этими станциями:

$$C(r, f) = A * \text{Im}[G(r, f)],$$

где A – это константа, а $G(r, f)$ – спектр вертикальной компоненты функции Грина для источника и станции на поверхности с расстоянием r между ними [Sánchez-Sesma, Campillo, 2006]. В частотной области функция Грина фундаментальной моды поверхности волны Рэлея как функция от частоты и расстояния между источником и приемником аппроксимируется функцией Бесселя нулевого порядка, зависящей от волнового числа и расстояния между источником и приемником:

$$C(r, f) \approx A_0(f) J_0(k_0 r),$$

где k_0 – волновое число фундаментальной моды волны Рэлея, J_0 – функция Бесселя нулевого порядка, $A_0(f) = \frac{1}{2\pi} \text{Im}[g_{ps}(f, k_0)]k_0$, где $g_{ps}(f, k_0)$ – ядро интегрального выражения для P - SV волн [Aki, 1957; Chen, 1993].

По аналогии с частотно-временным преобразованием Стоквелла;

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) |f| e^{-\pi(t-\tau)^2 f^2} e^{-2\pi i f \tau} d\tau,$$

где во временной области сигнал рассматривается как суперпозиция комплексных экспоненциальных функций для определения мгновенной частоты и амплитуды [Stockwell et al., 1996], в работе [Zhang et al., 2025] предлагается рассмотрение спектра кросс-корреляций как суперпозиции функций Бесселя нулевого порядка:

$$SJ(f, I) = \int_0^{\infty} C(r, \bar{f}) |I| e^{-\pi(f-\bar{f})^2 I^2} J_0(2\pi I \bar{f}) d\bar{f},$$

где $I = \frac{r}{c}$, C – фазовая скорость.

Результатом такого преобразования является диаграмма в пространстве “фазовая скорость–частота”, максимумы которой соответствуют фазовой скорости фундаментальной моды волны Рэлея.

Несмотря на то что в настоящий момент существует большое множество методов определения дисперсионных кривых фазовых скоростей поверхностных волн, выделенных с помощью пассивной интерферометрии как по индивидуальным парам станций (Image-Transform Technique, FTAN, Bessel Zero-Crossing), так и по всей сети (FJ-transform, MASW), SJ-метод обладает тремя важными преимуществами. Во-первых, он не использует аппроксимацию поверхностной волны плоской волной или суперпозицией плоских волн, которую традиционно используют для вычисления фазовой скорости поверхностной волны, поэтому его применимость не ограничивается использованием приемников с расстояниями между ними более двух длин волн (в случае использования кросс-корреляций окружающего шума один из приемников выступает в качестве источника), что позволяет оценить фазовые скорости на парах станций с расстояниями между приемниками до половины длины волны с точностью 1 % [Zhang et al., 2025]. Во-вторых, он применим как для определения индивидуальных, так и средних по сети дисперсионных кривых за счет суммирования дисперсионных изображений, получаемых для индивидуальных пар приемников. Наконец, он не требует подбора параметров, что делает его универсальным и удобным для применения на различных масштабах и условиях наблюдений.

В настоящем исследовании частотный диапазон определения фазовой скорости с помощью SJ-метода ограничивается снизу максимальным расстоянием между приемниками (25 м), в которое должна

укладываться как минимум половина длины поверхности волны. Так, при оценке фазовой скорости в 250 м/с, минимальная достижимая частота составляет 5 Гц, а при ограничении в одну длину волны – 10 Гц (рис. 3), согласно простой формуле, что частота равна скорости, деленной на длину волны. Чтобы избежать излишнего вклада нестабильных дисперсионных изображений, для которых минимальная частота превышает 10 Гц, кросс-корреляции с расстоянием между приемниками менее 10 м не были использованы для построения средней дисперсионной кривой. Дисперсионные изображения были определены по 435 парам приемников и суммированы взвешенно в зависимости от расстояния между приемниками, чтобы увеличить достоверность определения фазовых скоростей на низких частотах [Zhang et al., 2025]. В результате было получено среднее дисперсионное изображение (см. рис. 3), на котором уверенно прослеживается дисперсионная кривая фазовой скорости фундаментальной моды поверхности волны Рэлея, скорость которой варьируется в диапазоне 150–250 м/с в полосе частот 5–35 Гц, что является адекватным для верхней части геологического разреза.

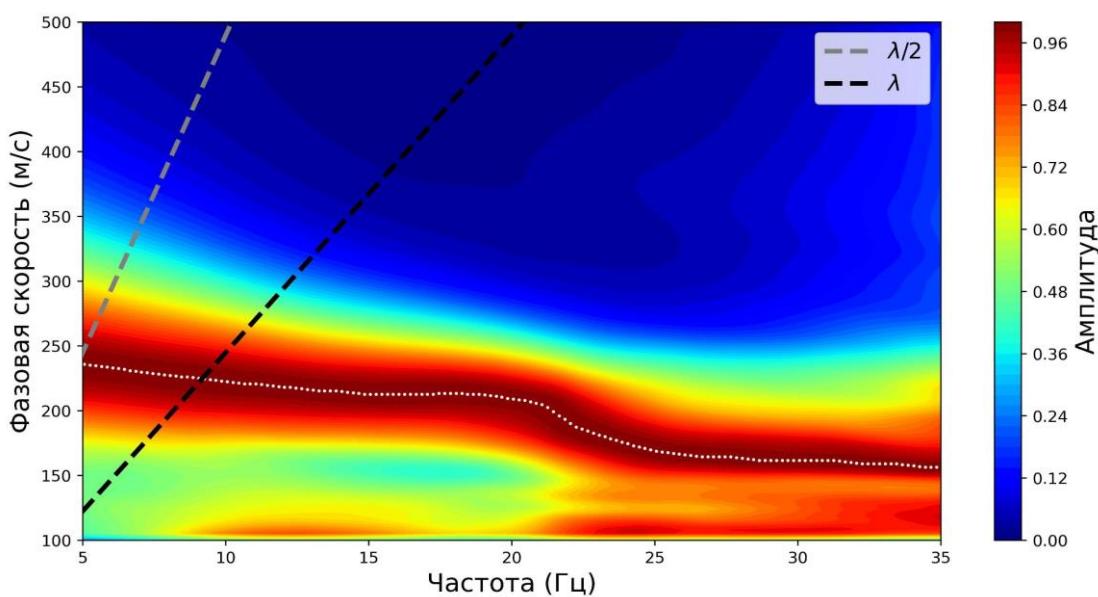


Рис. 3. Средняя дисперсионная кривая фазовой скорости поверхности волны Рэлея, построенная по 435 парам приемников. Серым пунктиром отмечена граница, соответствующая половине максимальной длины волны, а черным – одной длине волны. Белыми точками выделена полученная дисперсионная кривая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод пассивной интерферометрии был успешно применен к непрерывным сейсмическим данным, зарегистрированным в течение 60 часов 50 сейсмическими приемниками, установленными в городской области с полуметровым расстоянием между ними. В результате применения метода на всех парах приемников были выделены поверхностные волны Рэлея с помощью построения функций кросс-корреляций. К ним был применен современный метод на основе преобразования Стоквелла–Бесселя для определения средней дисперсионной кривой фазовой скорости поверхности волны, которую в дальнейшем планируется использовать для построения одномерного скоростного разреза. Полученный результат дает основание для дальнейшего изучения возможности применения метода шумовой интерферометрии к задачам малоглубинной геофизики, особенно в областях, где использование активных источников затруднено или невозможно, в том числе необходима верификация экспериментами с активными источниками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- Aki K.** Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors // Bulletin of the Earthquake Research Institute. 1957. Vol. 35. P. 415–456.
- Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Levshin A.L., Lin F., Moschetti M.P., Shapiro N.M., Yang Y.** Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // Geophysical Journal International. 2007. Vol. 169 (3). P. 1239–1260. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.
- Chen X.** A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space // Geophysical Journal International. 1993. Vol. 115 (2). P. 391–409. doi:10.1111/j.1365-246X.1993.tb01194.x.
- Cheng F., Xia J., Luo Y., Xu Z., Wang L., Shen C., Liu R., Pan Y., Mi B., Hu Y.** Multichannel analysis of passive surface waves based on crosscorrelations // Geophysics. 2016. Vol. 81. P. EN57–EN66. doi:10.1190/geo2015-0505.1.
- Larose E., Carriere S., Voisin C., Bottelin P., Baillet L., Gueguen P., Walter F., Jongmans D., Guillier B., Garambois S., Gimbert F., Massey C.** Environmental seismology: What can we learn on earth surface processes with ambient noise? // Journal of Applied Geophysics. 2015. Vol. 116. P. 62–74. doi:10.1016/j.jappgeo.2015.02.001.
- Li C., Yao H., Fang H., Huang X., Wan K., Zhang H., Wang K.** 3D near-surface shear-wave velocity structure from ambient-noise tomography and borehole data in the Hefei Urban Area, China // Seismological Research Letters. 2016. Vol. 87. P. 882–892. doi:10.1785/0220150257.
- Luo Y., Lin J., Yang Y., Wang L., Yang X., Xie J.** Joint inversion of active sources and ambient noise for near-surface structures: A case study in the Balikun Basin, China // Seismological Research Letters. 2018. Vol. 89. P. 2256–2265. doi:10.1785/0220180140.
- Moschetti M., Ritzwoller M., Lin F., Yang Y.** Crustal shear wave velocity structure of the western United States inferred from ambient seismic noise and earthquake data // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2010. Vol. 115. P. B10306. doi:10.1029/2010JB007448.
- Pasten C., Saez M., Ruiz S., Leyton F., Salomon J., Poli P.** Deep characterization of the Santiago Basin using HVSR and cross-correlation of ambient seismic noise // Engineering Geology. 2016. Vol. 201. P. 57–66. doi:10.1016/j.enggeo.2015.12.021.
- Picozzi M., Parolai S., Bindi D., Strollo A.** Characterization of shallow geology by high-frequency seismic noise tomography // Geophysical Journal International. 2009. Vol. 176 (1). P. 164–174. doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03966.x.
- Sabra K., Roux P., Kuperman W.** Emergence rate of the time-domain Green's function from the ambient noise cross-correlation function // Journal of the Acoustical Society of America. 2005. Vol. 118 (3). P. 3524–3531. doi:10.1121/1.4809069.
- Sánchez-Sesma F.J., Campillo M.** Retrieval of the Green's function from cross correlation: The canonical elastic problem // Bulletin of the Seismological Society of America. 2006. Vol. 96 (3). P. 1182–1191. doi:10.1785/0120050181.
- Seats K.S., Lawrence J.F., Prieto G.A.** Improved ambient noise correlation functions using Welch's method // Geophysical Journal International. 2012. Vol. 188 (2). P. 513–523. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05263.x.
- Shapiro N.M., Campillo M.** Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise // Geophysical Research Letters. 2004. Vol. 31. P. L07614. doi:10.1029/2004GL019491.

Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R.P. Localization of the complex spectrum: The S transform // IEEE Transactions on Signal Processing. 1995. Vol. 44 (4). P. 998–1001. doi:10.1029/2004GL019491.

Yao H., van Der Hilst R., Hoop M. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis – I. Phase velocity maps // Geophysical Journal International. 2006. Vol. 166 (2). P. 732–744. doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03028.x.

Zhang G., Chen X., Yu C., Feng X., Liu Q., Gao L., Song W. A Stockwell-Bessel transform based method for extracting broadband dispersion curve from seismic ambient noise data // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2025. Vol. 130 (7). P. e2024JB030311. doi:10.1029/2024JB030311.

Zheng Y., Shen W., Zhou L., Yang Y., Xie Z., Ritzwoller M.H. Crust and uppermost mantle beneath the North China Craton, northeastern China, and the Sea of Japan from ambient noise tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2011. Vol. 116. P. B12312. doi:10.1029/2011JB008637.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕРЕЖНЕВ Ярослав Максимович – младший научный сотрудник лаборатории обработки и анализа сейсмических данных Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: пассивная сейсмическая интерферометрия, мониторинг изменений сейсмических скоростей.

БЕЛОВЕЖЕЦ Надежда Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории обработки и анализа сейсмических данных Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: шумовая сейсмическая интерферометрия, поверхностно-волновая томография.

ДЕРГАЧ Петр Александрович – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмический мониторинг, локальная сейсмология, сейсмометрия, инженерная сейсморазведка.

ЯБЛОКОВ Александр Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, старший научный сотрудник Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: сейсморазведка, верхняя часть разреза, подавление поверхностных волн, спектральный анализ, прямая и обратная задача сейсмики, методы машинного обучения, численное моделирование

Вклад авторов: Обработка данных была произведена Н.Н. Беловежец и Я.М. Бережневым в рамках государственного задания FSUS-2025-0015. Сейсмический эксперимент и подготовка исходных сейсмических данных были проведены П.А. Дергачом и А.В. Яблоковым в рамках государственного задания FWZZ-2022-0017.

*Статья поступила в редакцию 9 декабря 2025 г.,
одобрена после рецензирования 12 декабря 2025 г.,
принята к публикации 12 декабря 2025 г.*



ПЕРСПЕКТИВЫ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ОСНОВЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Александр Сергеевич Сердюков^{1,✉}, Антон Альбертович Дучков²

^{1,2}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный пр., 54, Россия,

¹SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2726-6904>

²DuchkovAA @ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7876-6685>

Аннотация. В статье исследуется возможность расширения частотного диапазона наземной сейсморазведки в область низких частот за счет использования монохроматических источников сейсмических колебаний. Наличие низких частот особенно важно для применения полноволнового обращения (FWI) сейсмических данных. Генерация частот ниже 5 Гц представляет техническую сложность для современных гидравлических вибраторов. Авторы исследуют возможность использования для более низких частот дебалансных вибраторов в режиме монохромных сигналов. Реализован метод полноволнового обращения в частотной области. На численных экспериментах показана принципиальная возможность постепенного построения скоростной модели по монохромным сигналам с дискретным шагом по частоте с 2 Гц. Полученная скоростная модель оказывается лучше, чем стандартное обращение для данных от непрерывного свип-сигнала с 5 Гц. Показана перспективность использования монохроматических источников для расширения нижнего частотного диапазона сейсморазведки.

Ключевые слова: наземная сейсморазведка, дебалансные вибрационные источники, монохроматические сейсмические волновые поля, метод полноволнового обращения FWI, уравнение Гельмгольца, численные методы и эксперименты

Финансирование: исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН (проект Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0017).

Для цитирования: Сердюков А.С., Дучков А.А. Перспективы сейсморазведки на основе монохроматических сейсмических источников // Геофизические технологии. 2025. № 3. С. 12–26. doi:10.18303/2619-1563-2025-3-12.

PROSPECTS OF SEISMIC EXPLORATION BASED ON MONOCHROMATIC SEISMIC SOURCES

Alexandr S. Serdyukov^{1,✉}, Anton A. Duchkov²

^{1,2}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

¹N.A. Chinakal Institute of Mining, SB RAS , Krasny Ave., 54, Novosibirsk, 630091, Russia,

¹SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2726-6904>

²DuchkovAA @ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7876-6685>

Abstract. We study the possibility of expanding the low-frequency range of land seismic exploration using monochromatic seismic sources. Low frequencies are particularly important for the application of seismic full-wave inversion (FWI). Generating frequencies below 5 Hz presents a significant challenge for modern hydraulic vibrators. The authors investigate the possibility of using lower-frequency unbalanced vibrators in monochromatic signal mode. We implemented a

frequency-domain full-wave inversion for testing the fundamental possibility of gradually constructing a velocity model from monochromatic signals with an incremental frequency step of 2 Hz. The resulting velocity model is better than the standard FWI of data from a continuous sweep signal starting from 5 Hz. This study demonstrates the potential of using monochromatic sources to expand the lower frequency range of seismic exploration.

Keywords: seismic exploration, eccentric vibroseis sources, monochromatic seismic sources, full wave inversion (FWI) method, Helmholtz equation, numerical methods and experiments

Funding: the study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0017.

For citation: Serdyukov A.S., Duchkov A.A. Prospects of seismic exploration based on monochromatic seismic sources // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 3. P. 12–26. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-3-12.

ВВЕДЕНИЕ

Получение сейсмических данных на основе генерации свип-сигналов при помощи мощных виброисточников является стандартной практикой [Селезнев и др., 2013; Жуков и др., 2022]. В настоящее время эта методика по объему использования превышает применение взрывных источников. Кроме разведочных работ малогабаритные виброисточники набирают популярность в малоглубинной сейсморазведке [Яблоков и др., 2022]. Преимуществами использования вибрационных источников являются большая безопасность, меньший вред экологии, возможность контроля параметров зондирующего сигнала, ускорение проведения полевых работ. Качество получаемых данных, тем не менее, все еще уступает использованию взрывных источников [Фиников, Шалашников, 2021].

Одной из проблем является сложность генерации низких частот современными виброисточниками, что необходимо для повышения глубинности и разрешающей способности сейсморазведочных исследований. Современная вибросейсмика стремится к созданию «идеального» свип-сигнала линейной разверткой частоты в широком диапазоне частот с сохранением одинакового по силе воздействия на грунт на различных частотах. Это позволяет после корреляции виброграмм получать широкополосный импульс по аналогии со взрывной сейсморазведкой. Для современных гидравлических вибраторов возможность работать на полном приводе доступна с 5.4 Гц [Li et al., 2019]. Заметим, что дальнейшее расширение в область низких частот затруднено для гидравлических вибраторов по техническим причинам [Шнеерсон, Жуков, 2010].

В современной сейсморазведке углеводородов применяются исключительно гидравлические виброисточники, которые развиваются с 70-х годов прошлого века [Alekseev et al., 2005]. Как было сказано выше, современные тяжелые источники (20–30 тонн) позволяют довести нижнюю рабочую частоту до 5 Гц. В СССР также начиная с 70-х годов прошлого столетия развивался альтернативный подход механических (дебалансных) виброисточников [Alekseev et al., 2005; Чичинин, Сагайдачная, 2013]. Этот тип возбуждения позволил создавать рекордные по мощности источники (до 100 тонн) для региональных сейсмических исследований с регистрацией сигналов на выносах до 300 км [Alekseev et al., 2005]. Проводились также исследования¹ по возможности применения мощных виброисточников для интенсификации добычи нефти [Сердюков и др., 1991]. Эксперименты по использованию дебалансных источников для сейсмических исследований проводились и в других странах (США, Япония) [Ikuta et al., 2002; Saiga et al., 2006].

¹ Сердюков С.В. Результаты опытно-промышленных работ по вибросейсмическому воздействию с дневной поверхности на продуктивные пласти Северо-Салымского нефтяного месторождения. Отчет СКТБ ИГД СО РАН. Новосибирск, 1996. 281 с.

В целом дебалансные источники с точки зрения механики являются более дешевыми и простыми устройствами по сравнению с гидравлическими. Они идеально подходят для генерации монохроматических сигналов. Недостатком дебалансных источников является сложность обеспечения непрерывного изменения частоты с сохранением равномерного усилия на грунт в широком диапазоне частот, т. е. для генерации популярных в настоящее время широкополосных свип-сигналов. Видимо, по этой причине в настоящее время рынок полностью занят гидравлическими виброисточниками.

Следует отметить, что важный запрос на генерацию низких частот зондирующего сейсмического сигнала исходит от метода полноволнового обращения сейсмических данных (Full Waveform Inversion, FWI) [Virieux, Operto, 2009]. Этот метод позволяет использовать сейсмические трассы для прямого построения скоростной модели исследуемой среды. Интересно, что популярным подходом к реализации FWI является поэтапная инверсия частотных компонент данных от низких к высоким частотам; в англоязычной литературе этот подход иногда называют multiscale FWI [Bunks et al., 1995]. Он позволяет избегать попадания в локальные минимумы при оптимизации функционала невязки из-за так называемого эффекта «пропуска фазы» (cycle-skipping). В большинстве работ [Pratt et al., 1998; Virieux, Operto, 2009] multiscale FWI осуществляется путем применения к данным узкополосных фильтров, т. е. инверсия производится не для данных на одной выбранной частоте, а для узкополосного сигнала вокруг этой частоты, что все еще требует на входе данных с широким непрерывным спектром.

В настоящей статье мы исследуем возможность получения достоверного восстановления разрезов сейсмических скоростей при помощи обработки записей «чисто» монохроматических волновых полей методом FWI. Это позволит отказаться от генерации широкополосных свип-сигналов, используя вместо этого монохроматические волновые поля, генерируемые для небольшого набора частот (8–15 Гц), что позволит использовать дебалансные источники, характеристики которых оптимальным образом подбираются для генерации определенных частот. Наши численные эксперименты демонстрируют перспективность предлагаемой методики.

ДЕБАЛАНСНЫЕ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

Рассмотрим принцип работы и технические особенности дебалансных вибрационных источников. Усилие, передаваемое на грунт, достигается за счет инерции массы m , вращающейся вокруг оси (рис. 1, а). Пусть расстояние от центра массы до оси вращения равно r . Амплитуда возмущаемой (вибротяговой) силы будет определяться выражением:

$$F = 4\pi^2 f^2 M_s, \quad (1)$$

где M_s – статический момент, а f – частота генерируемых колебаний. Таким образом возникают, в том числе, и колебания в горизонтальном направлении, которые значительно осложняют применение виброисточника на практике. Горизонтальные вибрации можно подавить, используя два одинаковых вала, вращающихся в противоположных направлениях. Как видно из формулы (1), вибротяговая сила пропорциональна квадрату частоты. Для того чтобы выровнять усилие на различных частотах, в ходе генерации свип-сигналов, можно добавить еще один нижний ряд валов (см. рис.1, б), вращающихся с задержкой фазы относительно верхнего ряда. Амплитуда вибротяговой силы в этом случае дается соотношением:

$$F = 4\pi^2 f^2 M_s \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right),$$

где M_s – максимальный статический момент генератора колебаний, α – угол разведения дебалансов верхнего и нижнего рядов валов генератора колебаний между собой.

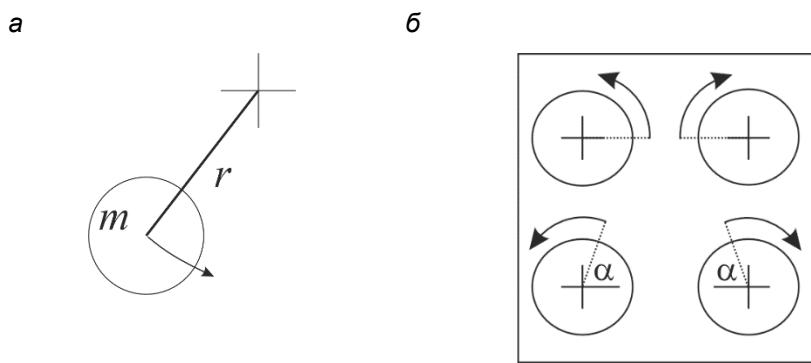


Рис. 1. Принципы работы вибрационного дебалансного источника: *а* – вращение массы вокруг оси (возникает инерционная сила), *б* – два ряда валов: компенсация горизонтальных колебаний и регулирование усилия за счет угла разведения верхних и нижних дебалансов.

Такая схема применяется в виброисточнике ВРП-30/120, широко использовавшегося в СССР в 80-х годах в качестве вибропогружателя для строительных работ. Приведем здесь некоторые характеристики ВРП-30/120. Система управления обеспечивает работу вибратора в гармоническом режиме и режиме линейной развертки частоты вибрации по времени. Генератор колебания весом 8 250 кг устанавливается на платформу весом 46 750 кг и площадью 20 м². Виброисточник ВРП-30/120 с такими параметрами позволяет развивать максимальное усилие, прилагаемое к грунту, порядка 45 т. Минимальная частота генерируемых колебаний составляет 4.0 Гц, а максимальная 8.7 Гц. Диапазон частот можно несколько расширить. Известно, что в ходе работ по изучению вибрационного воздействия на нефтяные месторождения [Сердюков и др., 1991] с использованием ВРП-30/120 максимальную частоту вибраций доводили до 16 Гц. В типичных данных сейсморазведки отраженных волн присутствуют и более высокочастотные компоненты. В то же время при увеличении частоты вращения валов вибрационных дебалансных источников повышается нагрузка на подшипники, что приводит к их быстрому износу. Этого можно избежать за счет уменьшения статического момента M_s , что, в свою очередь, приведет к избыточному уменьшению усилия на низких частотах. Менять M_s в ходе генерации свип-сигнала проблематично с технической точки зрения.

В то же время, если использовать виброисточник только в монохроматическом режиме, то положение центра масс маятника можно менять перед каждым запуском. Отметим, что даже при вращении валов с постоянной частотой, прилагаемое усилие на грунт, как функция от времени, не является косинусом и синусом в чистом виде. Дополнительные частоты в этом случае являются помехами и могут быть отфильтрованы применением простейшей цифровой фильтрации к записям.

Одной из задач при проведении сейсморазведки является снижение времени, затрачиваемого на проведение работ. Это позволяет увеличить плотность получаемых данных. Существуют методики

высокопроизводительных работ, заключающиеся в одновременном возбуждении свип-сигналов несколькими источниками, разделенными по времени (метод slip-sweep) [Rozamond, 1996] или расстоянию (метод DS3) [Bouska, 2010]. Применение таких методик негативно влияет на качество данных – необходимо применять дополнительные этапы обработки, направленные на разделение волновых полей разных возбуждений и подавление гармонических помех [Акуленко и др., 2023]. Если использовать несколько монохроматических дебалансных вибрационных источников, то можно их одновременно запускать на различных частотах – данные при этом разделяются без особых проблем простейшими методами цифровой фильтрации.

Таким образом, можно заключить, что дебалансные виброисточники с технической точки зрения являются перспективными для генерации сигналов на наборе отдельных частот. В этом случае значительно упрощается система их управления и минимизируется износ.

МЕТОД ПОЛНОВОЛНОВОГО ОБРАЩЕНИЯ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Полноволновое обращение сейсмических данных требует многократного решения прямой задачи – численное моделирование распространения сейсмических волн в моделях среды с заданными свойствами. В настоящей статье моделирование распространения волновых полей осуществляется в акустической постановке путем решения уравнения Гельмгольца:

$$\Delta u + \frac{(2\pi f)^2}{v^2(\mathbf{x})} u = h(f)\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s),$$

где $u(\mathbf{x})$ – давление (преобразование Фурье от давления как функции времени в точке \mathbf{x} на заданной частоте f), $v(\mathbf{x})$ – скорость распространения сейсмических волн, $h(f)$ – спектр инициализирующего импульса, δ – дельта-функция.

Для численного решения данного уравнения нами была реализована конечно-разностная схема, представленная в работе [Chen et al., 2013]. Для подавления отражений на границах расчетной области используются идеально согласованные поглощающие слои (PML).

Задача определения скоростной модели исследуемой геологической среды сводится к минимизации функционала невязки:

$$E[v(\mathbf{x})] = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{d}^\dagger \Delta \mathbf{d}, \quad \Delta \mathbf{d} = \mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{synth}, \quad (2)$$

где символ \dagger обозначает комплексное сопряжение и транспонирование, \mathbf{d}_{obs} – вектор-столбец наблюдаемых данных, \mathbf{d}_{synth} – вектор-столбец данных, численно рассчитанных с помощью метода конечных разностей для скоростной модели $v(\mathbf{x})$, $\Delta \mathbf{d}$ – компоненты вектора-столбца невязки между наблюдеными и модельными данными.

Минимизация функционала (2) производится итеративным методом отдельно для каждой частоты, начиная с самой низкой. Полученная в ходе оптимизации скоростная модель используется в качестве начального приближения при переходе к более высокой частоте.

Для поиска минимума функционала невязки (2) используется алгоритм Гаусса–Ньютона, который требует вычисления градиента и Гессиана [Tao, Sen, 2013].

Градиент является вектором и находится по формуле:

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{v}} = g(\mathbf{x}) = \sum_f \sum_{\mathbf{x}_r} \sum_{\mathbf{x}_s} \operatorname{Re} \left[\frac{-2\omega^2 h(f)}{v^3(\mathbf{x})} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, f) G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, f) \Delta d^*(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, f) \right], \quad (3)$$

где \mathbf{x} – вектор-столбец координат точки исследуемой области, $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, f)$ – функция Грина, т. е. решение уравнения Гельмгольца для источника в точке \mathbf{x}_s , символ * обозначает комплексное сопряжение.

Гессиан представляет собой матрицу:

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_f \sum_{\mathbf{x}_r} \sum_{\mathbf{x}_s} \operatorname{Re} \left[\frac{4\omega^4 |h(f)|}{v^3(\mathbf{x}) v^3(\mathbf{y})} G^*(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, f) G(\mathbf{y}, \mathbf{x}_s, f) G^*(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, f) G(\mathbf{y}, \mathbf{x}_r, f) \right], \quad (4)$$

где \mathbf{x} и \mathbf{y} независимо друг от друга «пробегают» всевозможные точки сетки исследуемой области.

На практике выражение для Гессиана (4), как правило, не используется из-за слишком большого объема вычислений и требуемой памяти (данная матрица уже не является разреженной). Вместо этого, во многих реализациях FWI используется только диагональная часть Гессиана [Tao, Sen, 2013]. Диагональные элементы матрицы определяются следующим образом:

$$H_0(\mathbf{x}) = \sum_f \sum_{\mathbf{x}_r} \sum_{\mathbf{x}_s} \operatorname{Re} \left[\frac{4\omega^4 |h(f)|^2}{v^6(\mathbf{x})} |G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, f)|^2 |G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, f)|^2 \right]. \quad (5)$$

На каждом шаге алгоритма Гаусса–Ньютона получение нового приближения осуществляется, согласно формуле:

$$v_k(\mathbf{x}) = v_{k-1}(\mathbf{x}) + \mu(H_0 + \lambda I)^{-1} g(\mathbf{x}), \quad (6)$$

где добавка λI ограничивает возрастание компонент обратной матрицы, т. к. компоненты Гессиана могут быть близки к нулю. Скалярный множитель μ в (6) выбирается в ходе каждой k -той итерации, исходя из условия минимальности целевого функционала (1) [Köhn, 2011]:

$$\mu_{opt} = \arg \min_{\mu} (E[v_k(\mu)]). \quad (7)$$

Для поиска оптимального множителя, согласно (7), будем предполагать, что в окрестности минимума целевой функционал (2) является квадратичной функцией от параметра μ :

$$E(\mu) = a\mu^2 + b\mu + c. \quad (8)$$

Для определения коэффициентов a , b , c рассчитаем значение функционала для трех пробных значений. Эти значения будем искать по формуле:

$$\mu_i = p_i \frac{\max(v_k)}{\max(\delta v)}, \quad (9)$$

где $\delta v = (H_0 + \lambda I)^{-1} g(\mathbf{x})$ – множитель из правой части выражения (6) определяет направление поиска минимума целевого функционала в многомерном пространстве моделей на текущей итерации. Скалярные

коэффициенты p_i , $i = 1, 2, 3$, задающие максимальное приращение к скоростной модели, выбираются следующим образом: $p_1 = 0.0025$ $p_2 = 0.005$ $p_3 = 0.01$. После нахождения соответствующих значений функционала (E_1 , E_2 , E_3) для нахождения коэффициентов параболы (8) решаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{pmatrix} \mu_1^2 & \mu_1 & 1 \\ \mu_2^2 & \mu_2 & 1 \\ \mu_3^2 & \mu_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}.$$

После решения этой системы получим оптимальное значение множителя в формуле (6):

$$\mu = -\frac{b}{2a}.$$

Несмотря на то что в предлагаемом способе линейного поиска множителя μ значение функционала E находится всего три раза, это все равно занимает значительное время – требуется прямое моделирование, поэтому вычисления целесообразно проводить не для всех пар источник-приемник, а только для какой-то их малой части, что практически не сказывается на точности нахождения оптимального шага обновления скоростной модели.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследуем возможности метода полноволнового обращения применительно к монохроматическим данным, рассчитанным для синтетической скоростной модели «Marmousi» [Versteeg, 1994], показанной на рис. 2, а.

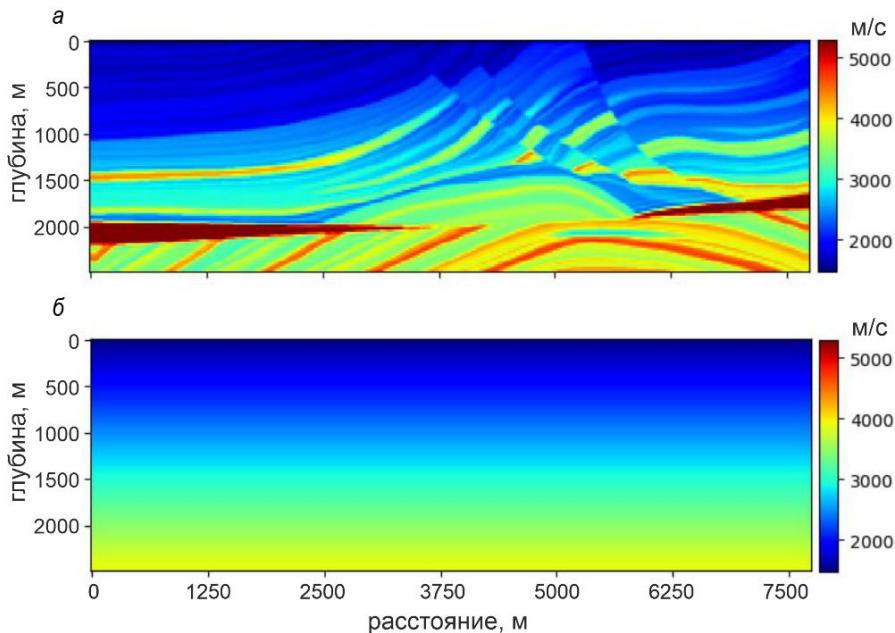


Рис. 2. Синтетическая скоростная модель «Marmousi» (а) и начальное приближение для FWI (б).

Эта геологическая модель представляет собой дельтовые отложения, залегающие на соленосной эвапоритовой толще. В восточной части разреза наблюдаются разломы, также присутствуют складчатые карбонатные отложения. Модель «Marmousi» традиционно применяется для тестирования алгоритмов

обработки сейсмических данных, в том числе и FWI. На рисунке 2, б представлена простая градиентная скоростная модель, использовавшаяся нами в качестве начального приближения.

Синтетические монохроматические данные рассчитывались при помощи конечно-разностной схемы [Chen et al., 2013]. В качестве примера на рис. 3, а приведена действительная часть решения уравнения Гельмгольца для частоты 8 Гц. Помимо применения FWI к монохроматическим полям нами для сравнения проводились эксперименты по FWI обращению волновых полей, генерируемых при помощи импульсных источников. Для этих экспериментов используем ту же самую программную реализацию FWI в частотной области. Расчеты проводятся для набора частот, а трассы во временной области получаются с помощью обратного преобразования Фурье. На рисунке 3, б приведена сейсмограмма для одного из пунктов возбуждения в случае использования импульса Рикера с центральной частотой 8 Гц. Форма этого зондирующего импульса и его спектр показаны на рис. 4, шаг по времени выбирался 1 мс, а длина сейсмической записи – 7 с. В соответствии с теоремой отчетов, моделирование сейсмограмм в данной ситуации требует решения уравнения Гельмгольца (1) на 160 отдельных частотах.

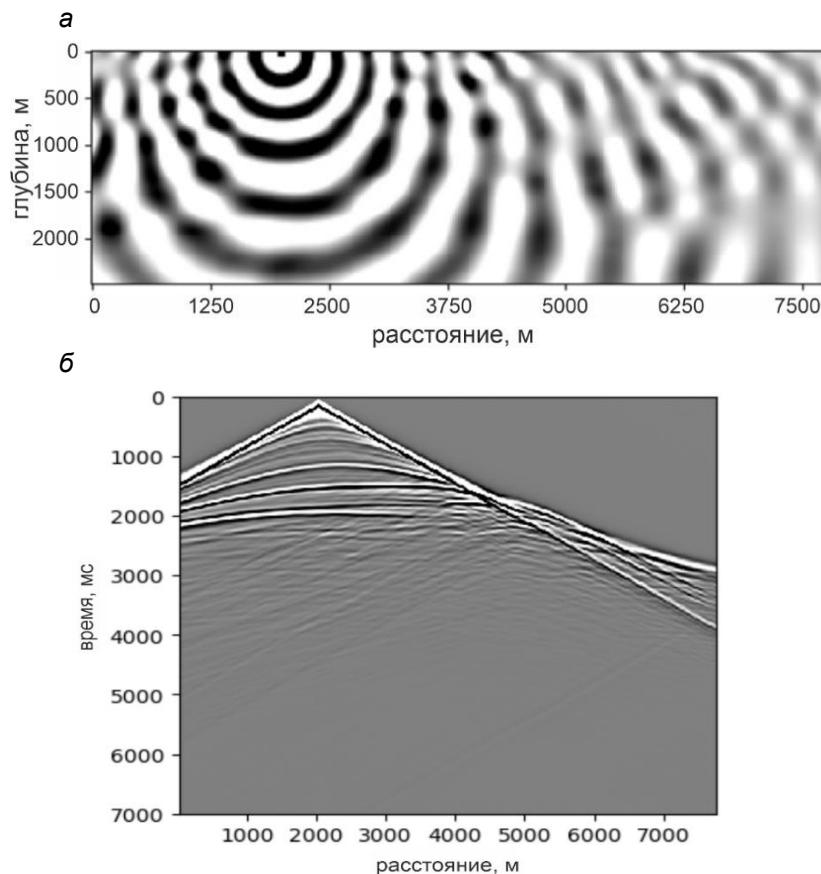


Рис. 3. Численное моделирование распространения сейсмических волн. Действительная часть решения уравнения Гельмгольца для частоты 8 Гц (а), одна из сейсмограмм общей точки возбуждения при использовании в источнике импульса Рикера с центральной частотой 8 Гц (б).

Заметим, что время подобного прямого моделирования в частотной области с применением последующего обратного преобразования Фурье соизмеримо с конечно-разностным решением соответствующей задачи для волнового уравнения во временной области (порядка 100 с для рассматриваемой модели с использованием Intel(R) Core(TM) i7-9700F CPU 3.00 GHz с оперативной памятью 32 Гб). В случае небольшого набора частот FWI монохроматических данных требует гораздо

меньшего машинного времени моделирования по сравнению с рассмотрением импульсных сейсмических источников. Решение уравнения Гельмгольца для рассматриваемой модели среды путем LU-разложения занимает 0.743 с (Intel(R) Core(TM) i7-9700F CPU 3.00 GHz, 32 Гб ОЗУ), а применение LU-разложения в ходе моделирования данных на одной частоте для многих положений источников – 0.0270 с (для одного источника с готовым LU).

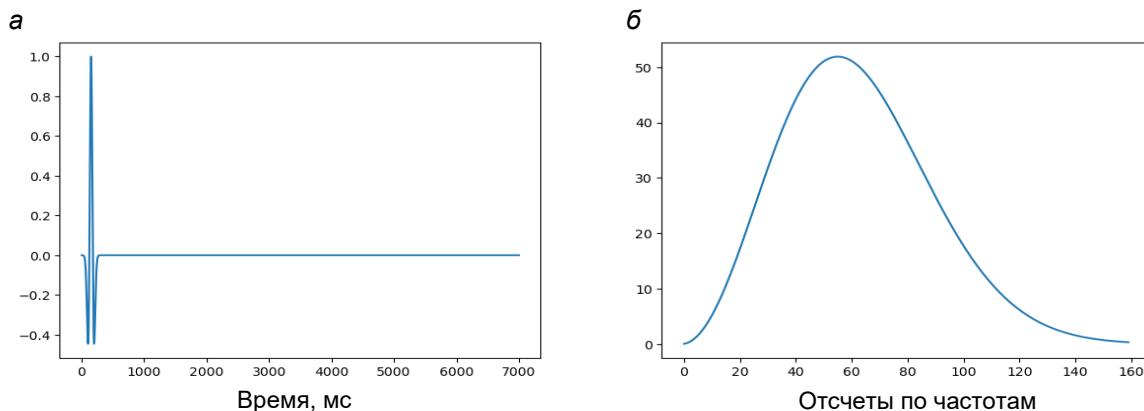


Рис. 4. Импульс Рикера с центральной частотой 8 Гц (а), частотный спектр импульса Рикера 8 Гц, снизу показано количество частотных отчетов (б).

Численные эксперименты по обращению синтетических данных проводились по двум схемам, которые мы далее назовем «монохроматическое FWI» и «FWI волновых полей импульсных источников»

Монохроматическое FWI. В качестве начального приближения используется скоростная модель, приведенная на рис. 1, б. Далее последовательно совершаются итерации FWI для монохроматических данных, переходя от одной частоты к следующей более высокой частоте. Итоговая скоростная модель, полученная на текущей частоте, используется далее в качестве начального приближения для итераций FWI на следующей частоте.

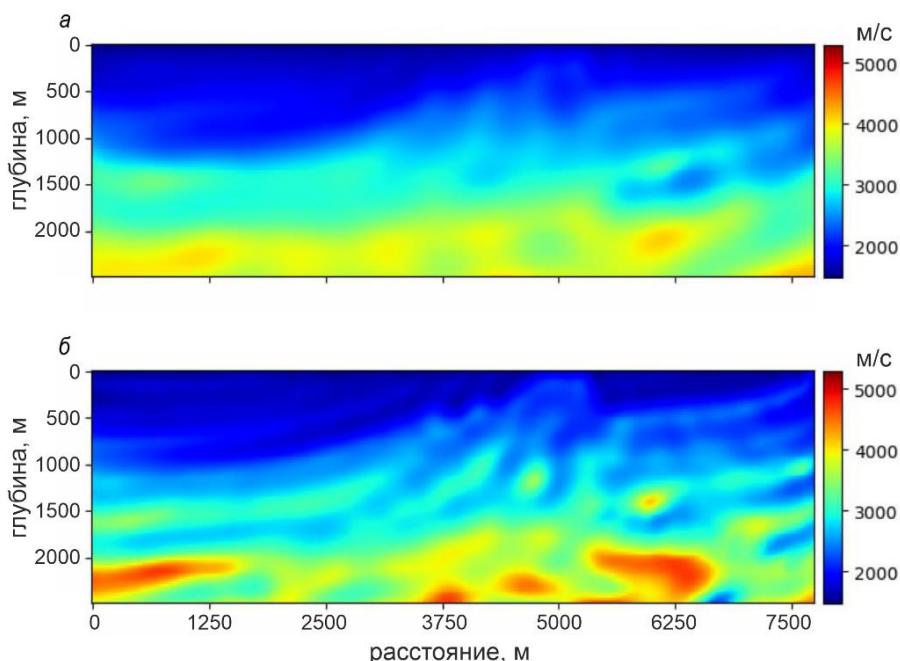


Рис. 5. Результаты FWI, полученные в низкочастотном диапазоне: а – результат восстановления после обращения монохроматических сейсмических данных частоты 2 Гц; б – результат восстановления после обращения монохроматических сейсмических данных частоты 4 Гц.

Были выбраны следующие частоты и количество итераций: 2 Гц – 8 итераций, 3 Гц – 10 итераций, 4 Гц – 10 итераций, 6 Гц – 14 итераций, 8 Гц – 15 итераций, 12 Гц – 20 итераций, 18 Гц – 20 итераций. Результаты инверсии показаны на рис. 5–7. Скоростная модель, полученная в качестве результата FWI на частоте 2 Гц, показана на рис. 5, а. Результат обращения после последовательных серий итераций на 2, 3 и 4 Гц приведен на рис. 5, б. Гладкую скоростную модель, полученную в этом низкочастотном диапазоне, можно уже использовать, например, при проведении процедуры миграции.

На рисунке 6 приведены результаты последующих итераций после обращения на частотах 6 и 8 Гц. Как видно из приведенных результатов, с каждым последующим этапом FWI получаемая скоростная модель становится более детальной – проявляются все более тонкие слои и структуры.

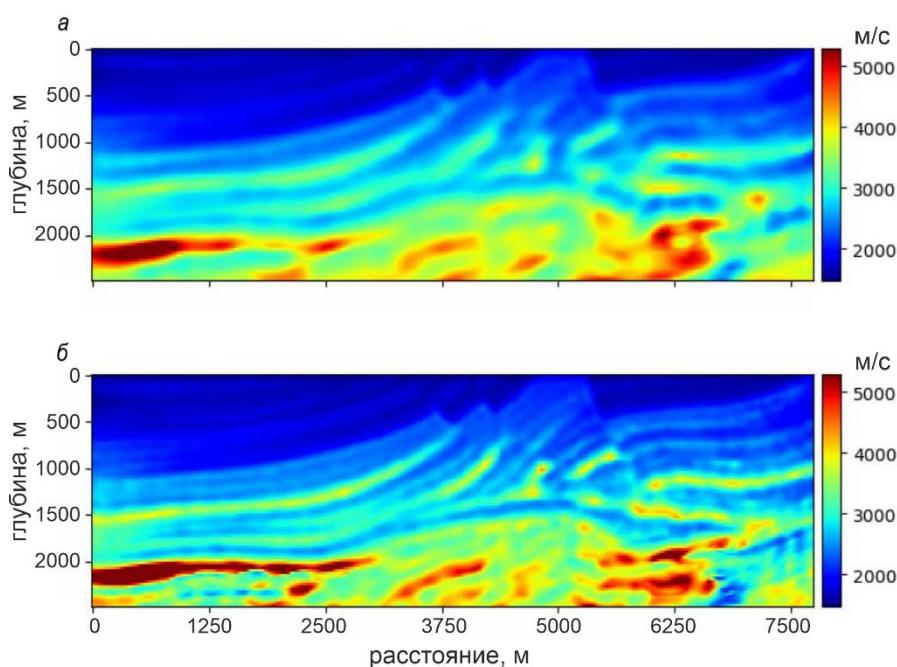


Рис. 6. Результаты FWI, полученные в диапазоне 6–8 Гц: а – результат восстановления после обращения монохроматических сейсмических данных частоты 6 Гц; б – результат восстановления после обращения монохроматических сейсмических данных 8 Гц.

Итоговый результат монохроматического FWI приведен на рис. 7, а. Для удобства сравнения на рис. 7, в мы еще раз приводим «истинную» скоростную модель. Результат монохроматического FWI получается достаточно достоверным, хотя и присутствуют заметные помехи. Нижняя часть скоростной модели, в особенности по краям, восстанавливается гораздо хуже по сравнению с верхней.

FWI волновых полей импульсных источников. Для сравнения рассмотрим стандартный подход к FWI, который требует данных отклика среды на свип-сигнал с линейной разверсткой. На практике для выполнения последовательного по частотам FWI к данным следует применять полосовые фильтры с полосой пропускания вокруг выбранных центральных частот. Здесь мы вместо этого рассмотрим в источниках импульсы Рикера с различной центральной частотой. Как уже упоминалось, низкие частоты важны для успешного применения FWI. Использование гидравлических виброисточников ограничивает эти частоты. В численном эксперименте будем использовать на первом этапе FWI импульс Рикера с центральной частотой 5 Гц. Конечно, спектр данного сигнала содержит и более низкие частоты, но здесь будем условно считать, что такие данные получить возможно.

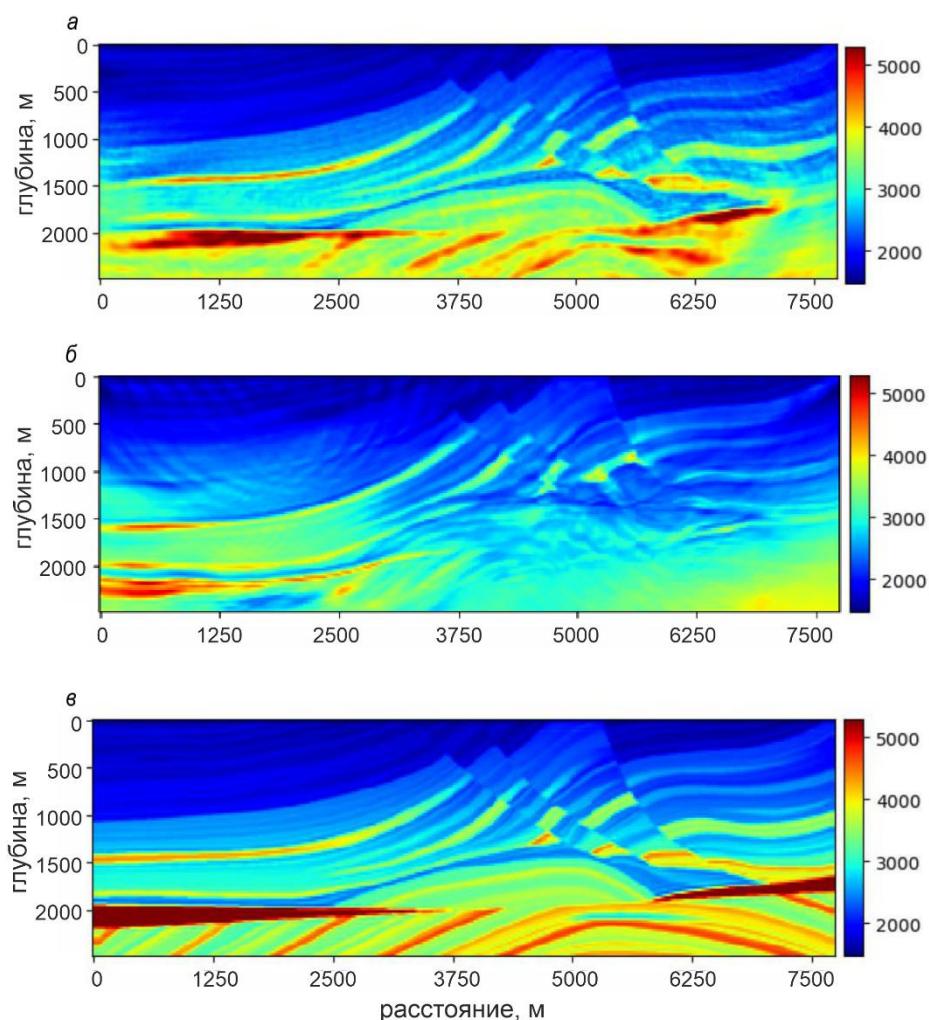


Рис. 7. Окончательный результаты FWI в сравнении с «истинной» скоростной моделью: *а* – результат восстановления после обращения монохроматических сейсмических данных частоты (вплоть до 18 Гц); *б* – итоговый результат FWI волновых полей импульсных источников начиная с 5 Гц; *в* – скоростная модель «Marmousi».

В качестве начального приближения, как и ранее, используется скоростная модель, приведенная на рис. 1, *б*. Далее последовательно совершаются итерации FWI для серии данных, полученных с использованием серии инициализирующих импульсов Рикера с повышающейся центральной частотой: 5 Гц – 10 итераций, 8 Гц – 10 итераций и 12 Гц – 10 итераций. Итоговый результат приведен на рис. 7, *б*. Видно, что результат получается значительно хуже по сравнению с FWI монохроматических данных, представленный на рис. 7, *а*. Это происходит из-за невосстановления именно макроскоростной гладкой составляющей скоростной модели на первых итерациях с использованием импульса Рикера 5 Гц. Последующие итерации на более высоких частотах позволяют уточнять отдельные структуры верхней части исследуемого разреза. Заметим, что большее количество итераций не позволяет улучшить результат – метод просто перестает сходиться.

Отметим также, что рассмотренное обращение данных импульсных источников требует в разы больше вычислений по сравнению с монохроматическими данными. Например, как видно из рис. 4, *б*, для прямого моделирования поля, возбужденного импульсом Рикера с центральной частотой 8 Гц, требуется численно решать уравнение Гельмгольца для разных частот 160 раз (вместо того, чтобы один раз промоделировать монохроматические данные 8 Гц).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование монохроматических сейсмических волновых полей является перспективным направлением развития методики наземной сейсморазведки из-за ряда причин. Для возбуждения таких волновых полей возможно использовать простые, с точки зрения технической реализации, дебалансные вибрационные источники, параметры которых будут подбираться оптимальным образом под каждый частотный диапазон. Для фильтрации полевых данных, в целях подавления нежелательных гармоник, возможно использовать простейшую цифровую фильтрацию. Благодаря простейшим приемам фильтрации возможно без потери качества разделять данные, генерируемые на различных частотах. Это позволяет ускорить проведение полевых работ за счет одновременной работы нескольких источников. Как показывают представленные численные эксперименты, для обработки серии монохроматических данных возможно использовать метод полевого обращения FWI в частотной области. Как показывают наши исследования, основной проблемой использования гидравлических приемников является отсутствие низких частот. В статье этот факт продемонстрирован путем применения FWI для серии синтетических данных, полученных с использованием импульсных источников Рикера, начиная с центральной частоты 5 Гц (что соответствует нижней границе получаемых с помощью современных гидравлических виброисточников данных). Результат обработки монохроматических данных получается значительно более информативным, к тому же обработка монохроматических данных методом FWI требует гораздо меньшего времени вычислений. Заметим, что метод FWI был нами реализован с использованием простого алгоритма Гаусса–Ньютона. Использование более сложных схем минимизации и дополнительных методов регуляризации может, по-видимому, позволить получать более качественные результаты обращения монохроматических данных. В этом направлении, возможно, и стоит сосредоточить дальнейшие исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Акуленко А.С., Гафаров Р.М., Сираев И.А.** Анализ эффективности технологий подавления эффектов наложения гармонических искажений, возникающих при выполнении сейсморазведочных работ методом Slip-Sweep // Приборы и системы разведочной геофизики. 2023. № 1. С. 15–28. EDN:NEIYYU.
- Вибропогружатель** ВРП 30/120 с регулируемыми параметрами. Техническое описание. М.: В/О «Лицензиторг», 1983.
- Жуков А.П., Скирта Д.А., Шехтман Г.А.** Пути повышения производительности вибросейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2022. № 2. С. 57–70. EDN:DZPJKN.
- Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Ефимов А.С., Сальников А.С., Чичинин И.С., Кашун В.В., Романенко И.Е., Елагин С.А., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е., Сережников Н.А., Максимов М.А.** Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем Востоке России // Проблемы информатики. 2013. № 3 (20). С. 30–41. EDN:PNVTXJ.
- Сердюков С.В., Кривопузкий В.С., Гамзатов С.М.** Исследования сейсмических и акустических полей при низкочастотном вибрационном воздействии на нефтяной пласт. Препр. ИГД СО АН СССР. Новосибирск, 1991. № 43.
- Фиников Д.Б., Шалашников А.В.** Способ сейсморазведки с вибрационными источниками // Геомодель 2021. Материалы 23-й конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и

газа, Геленджик, 06–10 сентября 2021 года. Москва: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2021. С. 18. doi:10.3997/2214-4609.202157025. EDN:GPIPQP.

Чичинин И.С., Сагайдачная О.М. Невзрывные сейсмические источники с широким частотным спектром. Часть 2. Дебалансные вибраторы или что надо сделать, чтобы невзрывные сейсморазведочные источники имели широкий частотный спектр // Приборы и системы разведочной геофизики. 2013. Т. 45, № 3. С. 23–32. EDN:RPDKDV.

Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. Современные тенденции вибрационной сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. Т. 33, № 3. С. 19–25. EDN:OKVPYP.

Яблоков А.В., Дергач П.А., Сердюков А.С., Полозов С.С. Разработка и применение портативной вибрационной установки для сбора и анализа данных сейсмических поверхностных волн // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58, № 4. С. 5–18. doi:10.21455/si2022.4-1. EDN:DQUOGA.

Alekseev A.S., Chichinin I.S., Korneev V.A. Powerful low-frequency vibrators for active seismology // Bulletin of the Seismological Society of America. 2005. Vol. 95 (1). P. 1–17. doi:10.1785/0120030261.

Bouska J. Distance separated simultaneous sweeping, for fast, clean, vibroseis acquisition // Geophysical Prospecting. 2010. Vol. 58 (1). P. 123–153. doi:10.1111/j.1365-2478.2009.00843.x.

Bunks C., Saleck F.M., Zaleski S., Chavent G. Multiscale seismic waveform inversion // Geophysics. 1995. Vol. 60 (5). P. 1457–1473. doi:10.1190/1.1443880.

Chen Z., Cheng D., Feng W., Wu T. An optimal 9-point finite difference scheme for the Helmholtz equation with PML // International Journal of Numerical Analysis and Modeling. 2013. Vol. 10 (2). P. 389–410.

Ikuta R., Yamaoka K., Miyakawa K., Kunitomo T., Kumazawa M. Continuous monitoring of propagation velocity of seismic wave using ACROSS // Geophysical Research Letters. 2002. Vol. 29 (13). P. 5-1–5-5. doi:10.1029/2001GL013974.

Köhn D. Time domain 2D elastic full waveform tomography: PhD Thesis. Kiel: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2011. 177 p.

Li G., Qi W., Ding Y.-P., Huang Z.-Q., Lian Z.-H., Tao Z.-F., Yang X.-Y. Method and application of extending seismic vibrator bandwidth toward low frequency // Advances in Mechanical Engineering. 2019. Vol. 11 (10). doi:10.1177/1687814019884772.

Pratt R.G., Shin C., Hick G.J. Gauss–Newton and full Newton methods in frequency–space seismic waveform inversion // Geophysical Journal International. 1998. Vol. 133 (2). P. 341–362. doi:10.1046/j.1365-246X.1998.00498.x.

Rozemond H.J. Slip-sweep acquisition // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996. SEG, 1996. P. 64–67. doi:10.1190/1.1826730.

Saiga A., Yamaoka K., Kunitomo T., Watanabe T. Continuous observation of seismic wave velocity and apparent velocity using a precise seismic array and ACROSS seismic source // Earth, Planets and Space. 2006. Vol. 58 (8). P. 993–1005. doi:10.1186/BF03352604.

Tao Y., Sen M.K. Frequency-domain full waveform inversion with plane-wave data // Geophysics. 2013. Vol. 78 (1). P. R13–R23. doi:10.1190/geo2012-0267.1.

Versteeg R. The Marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set // The Leading Edge. 1994. Vol. 13. P. 927–936. doi:10.1190/1.1437051.

Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // Geophysics. 2009. Vol. 74 (6). P. WCC1–WCC26. doi:10.1190/1.3238367.

REFERENCES

- Akulenko A.S., Gafarov R.M., Siraev I.A.** Analysis of the efficiency of suppressing the harmonic distortion overlap during seismic exploration using the slip-sweep method // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. 2023. No. 1. P. 15–28 (In Russ.).
- Alekseev A.S., Chichinin I.S., Korneev V.A.** Powerful low-frequency vibrators for active seismology // Bulletin of the Seismological Society of America. 2005. Vol. 95 (1). P. 1–17. doi:10.1785/0120030261.
- Bouska J.** Distance separated simultaneous sweeping, for fast, clean, vibroseis acquisition // Geophysical Prospecting. 2010. Vol. 58 (1). P. 123–153. doi:10.1111/j.1365-2478.2009.00843.x.
- Bunks C., Saleck F.M., Zaleski S., Chavent G.** Multiscale seismic waveform inversion // Geophysics. 1995. Vol. 60 (5). P. 1457–1473. doi:10.1190/1.1443880.
- Chen Z., Cheng D., Feng W., Wu T.** An optimal 9-point finite difference scheme for the Helmholtz equation with PML // International Journal of Numerical Analysis and Modeling. 2013. Vol. 10 (2). P. 389–410.
- Chichinin I.S., Sagaydachnaya O.M.** Non-explosive seismic sources with a wide frequency spectrum. Part 2. Eccentric vibrators: what needs to be done for non-explosive seismic exploration sources to achieve a wide frequency spectrum // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. 2013. Vol. 45 (3). P. 23–32 (In Russ.).
- Finikov D.B., Shalashnikov A.V.** Seismic survey method with vibroseis sources // Geomodel 2021. Proceedings of the 23rd conference on geological exploration and development of oil and gas fields, Gelendzhik, September 06–10, 2021. Moscow: OOO «EAGE Geomodel», 2021. P. 18. (In Russ.). doi:10.3997/2214-4609.202157025.
- Ikuta R., Yamaoka K., Miyakawa K., Kunitomo T., Kumazawa M.** Continuous monitoring of propagation velocity of seismic wave using ACROSS // Geophysical Research Letters. 2002. Vol. 29 (13). P. 5-1–5-5. doi:10.1029/2001GL013974.
- Köhn D.** Time domain 2D elastic full waveform tomography: PhD Thesis. Kiel: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2011. 177 p.
- Li G., Qi W., Ding Y.-P., Huang Z.-Q., Lian Z.-H., Tao Z.-F., Yang X.-Y.** Method and application of extending seismic vibrator bandwidth toward low frequency // Advances in Mechanical Engineering. 2019. Vol. 11 (10). doi:10.1177/1687814019884772.
- Pratt R.G., Shin C., Hick G.J.** Gauss–Newton and full Newton methods in frequency–space seismic waveform inversion // Geophysical Journal International. 1998. Vol. 133 (2). P. 341–362. doi:10.1046/j.1365-246X.1998.00498.x.
- Rozemond H.J.** Slip-sweep acquisition // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996. SEG, 1996. P. 64–67. doi:10.1190/1.1826730.
- Saiga A., Yamaoka K., Kunitomo T., Watanabe T.** Continuous observation of seismic wave velocity and apparent velocity using a precise seismic array and ACROSS seismic source // Earth, Planets and Space. 2006. Vol. 58 (8). P. 993–1005. doi:10.1186/BF03352604.
- Seleznev V.S., Solovyev V.M., Emanov A.F., Efimov A.S., Salnikov A.S., Chichinin I.S., Kashun V.V., Romanenko I.E., Elagin S.A., Liseikin A.V., Shenmaier A.E., Serezhnikov N.A., Maksimov M.A.** Deep vibroseismic studies in the Russian Far East // Problems of Informatics. 2013. No. 3 (20). P. 30–41 (In Russ.).
- Serdyukov S.V., Krivoputskiy V.S., Gamzatov S.M.** Research on seismic and acoustic fields during low-frequency vibroseismic impact on oil reservoirs. Novosibirsk, 1991. Preprint IGB SO USSR Academy of Sciences, No. 43 (In Russ.).

Shneerson M.B., Zhukov A.P. Modern trends in vibroseismic exploration // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. 2010. Vol. 33 (3). P. 19–25 (In Russ.).

Tao Y., Sen M.K. Frequency-domain full waveform inversion with plane-wave data // Geophysics. 2013. Vol. 78 (1). P. R13–R23. doi:10.1190/geo2012-0267.1.

Versteeg R. The Marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set // The Leading Edge. 1994. Vol. 13. P. 927–936. doi:10.1190/1.1437051.

Vibratory Pile Driver VRP 30/120 with adjustable parameters. Technical description (In Russ.). VO Litsenzitor, Moscow, 1983.

Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // Geophysics. 2009. Vol. 74 (6). P. WCC1–WCC26. doi:10.1190/1.3238367.

Yablokov A.V., Dergach P.A., Serdyukov A.S., Polozov S.S. Development and application of a portable vibration source for acquisition and analysis of seismic surface wave data // Seismic Instruments. 2022. Vol. 58 (Suppl. 2). P. S195–S203. doi:10.3103/S074792392208014X.

Zhukov A.P., Skirta D.A., Shekhtman G.A. The enhance of vibroseismic seismological surveys efficiency // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. 2022. No. 2. P. 57–70 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СЕРДЮКОВ Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН и Института горного дела СО РАН. Основные научные интересы: геофизика, сейсморазведка, математическое моделирование, обработка сигналов, дифференциальные уравнения.

ДУЧКОВ Антон Альбертович – кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическая миграция, регуляризация сейсмических данных с помощью Гауссовских волновых пакетов, микросейсмический мониторинг гидроразрыва.

*Статья поступила в редакцию 8 декабря 2025 г.,
одобрена после рецензирования 14 декабря 2025 г.,
принята к публикации 15 декабря 2025 г.*



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, Koptyug 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., Ponashenko 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 [Большиянов 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 ИНГТ 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).

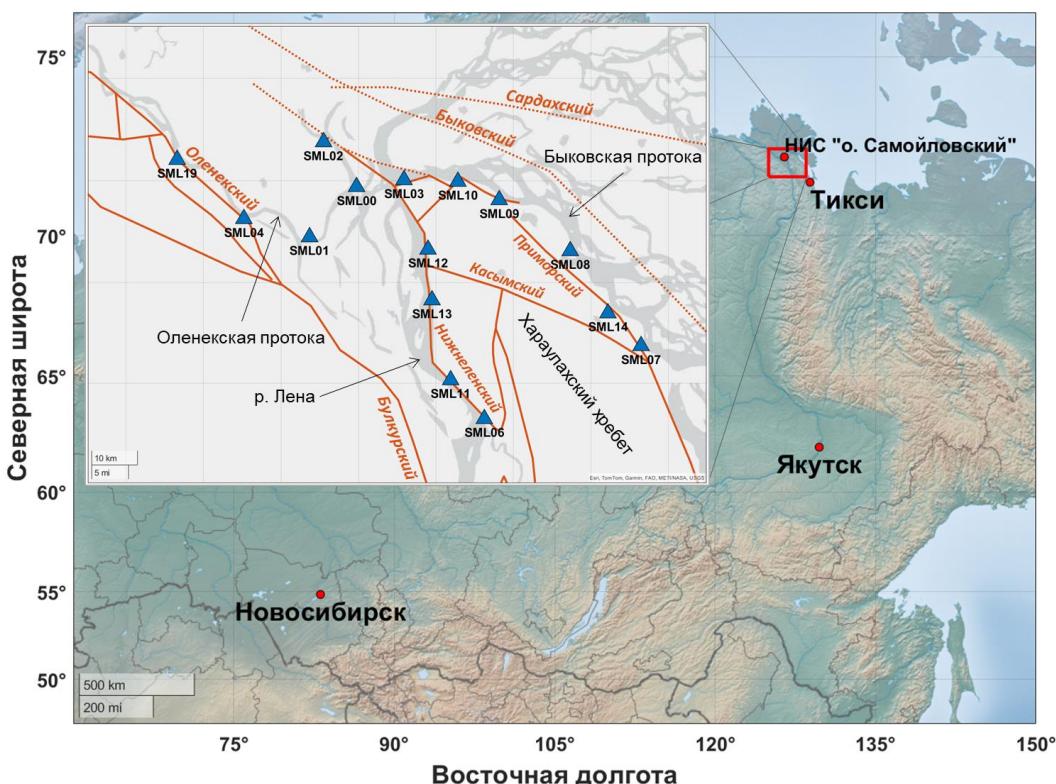


Рис. 1. Местоположение района исследований и схема взаимного расположения активных разломов и сейсмологических станций в период с августа 2024 по август 2025 г. Сплошные красные линии – достоверные активные разломы, пунктирные – предполагаемые, по данным [Деев и др., 2025].

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 Технолоджис 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 воздуховоды 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.

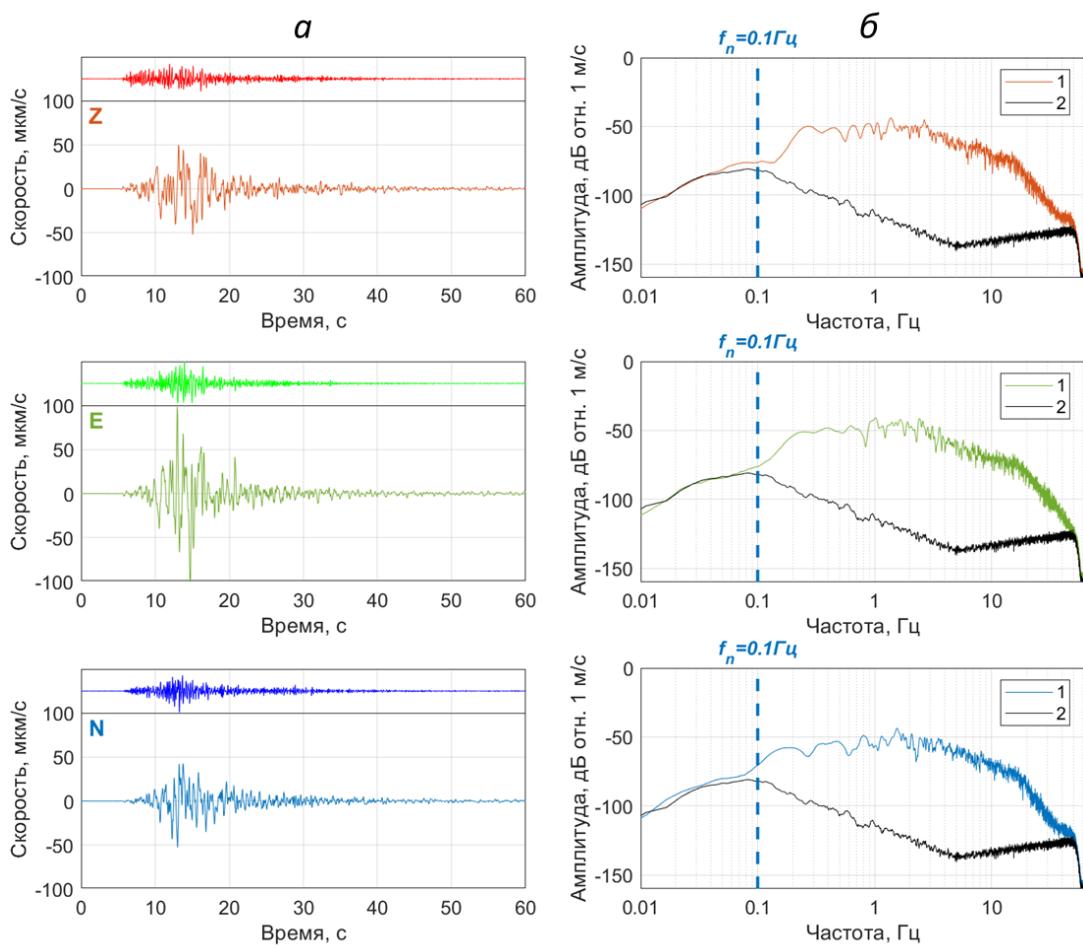


Рис. 2. Пример частотной коррекции трехкомпонентной записи землетрясения, произошедшего 19.11.2023 ($M = 3.5$) до значения 0.1 Гц: *а* – сопоставление сигналов до и после частотной коррекции; *б* – сопоставление спектров соответствующей компоненты сигнала и аппаратурного шума после частотной коррекции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

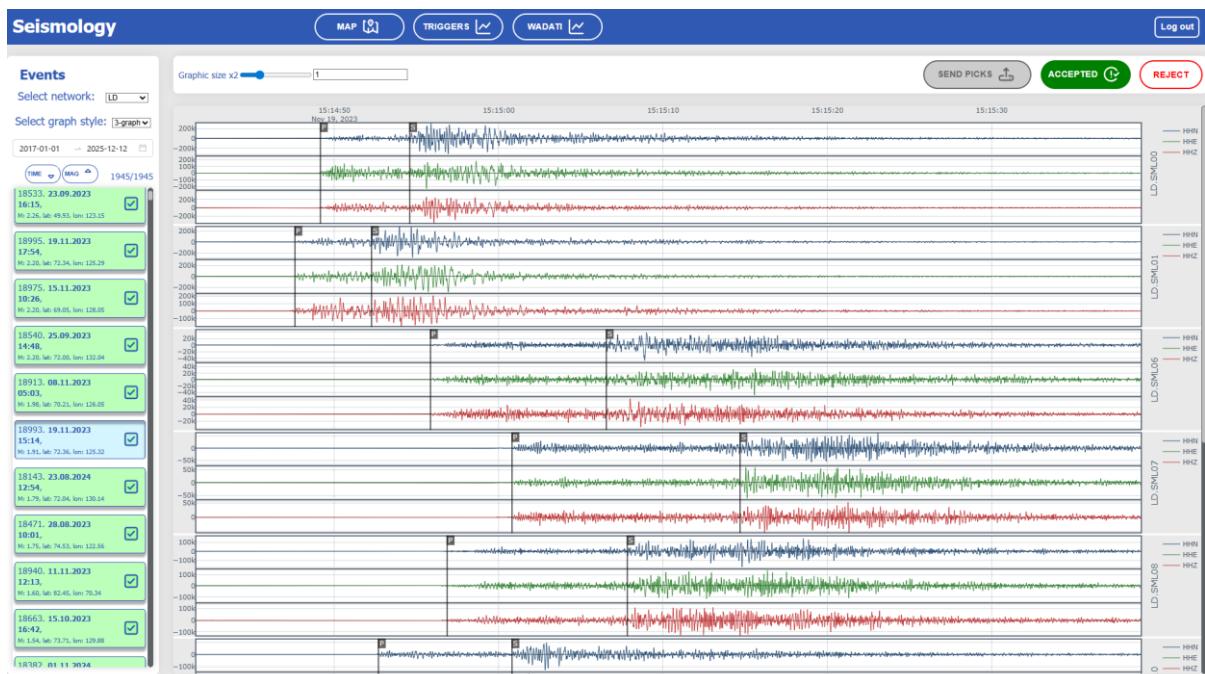


Рис. 3. Снимок экрана авторского веб-интерфейса для верификации результатов автоматического определения времен прихода P - и S -волн (алгоритмы на основе STA/LTA, MER и нейронных сетей), а также обработки записей в ручном режиме.

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 [Шибаев 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.

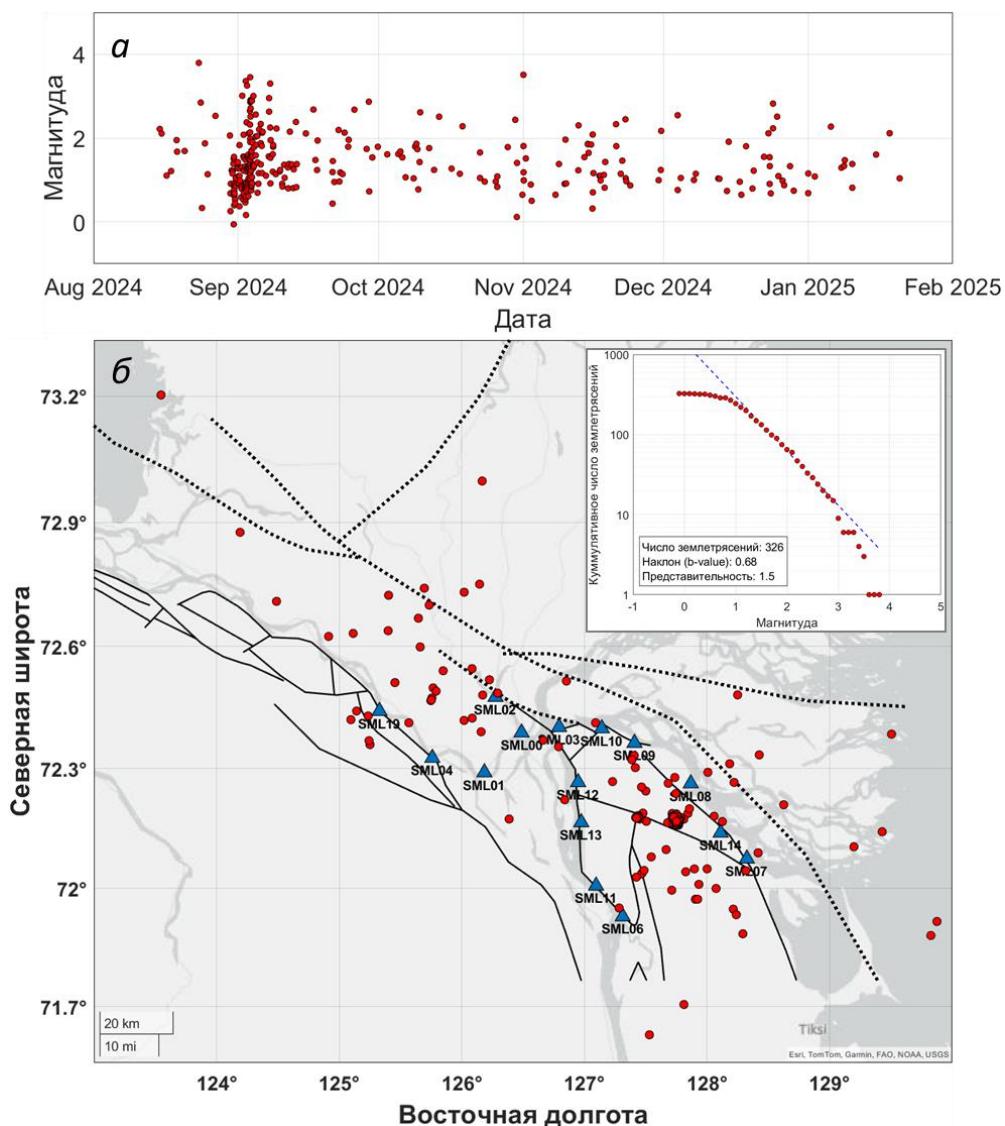


Рис. 4. Распределение магнитуд землетрясений на территории дельты р. Лены от времени (а) и карта с эпицентрами и станциями (б) за сезон 2024–2025 гг.

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).

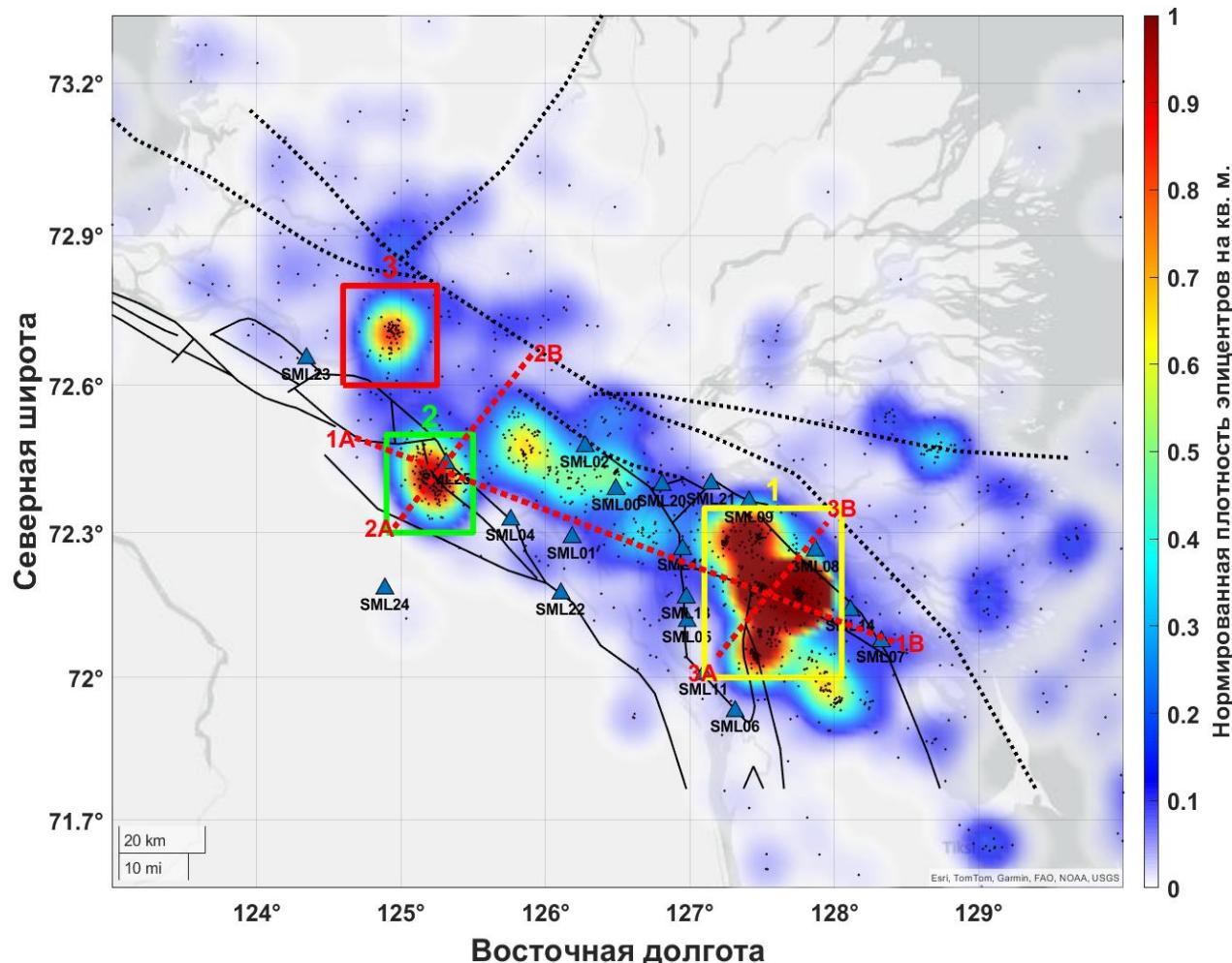


Рис. 5. Плотность распределения эпицентров землетрясений за период с 2016 по 2025 г. Желтым, зеленым и красным прямоугольниками выделены основные зоны сейсмической активизации. Красными пунктирными линиями обозначены профили, вдоль которых анализировались срезы по глубине. Сплошными и пунктирующими черными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

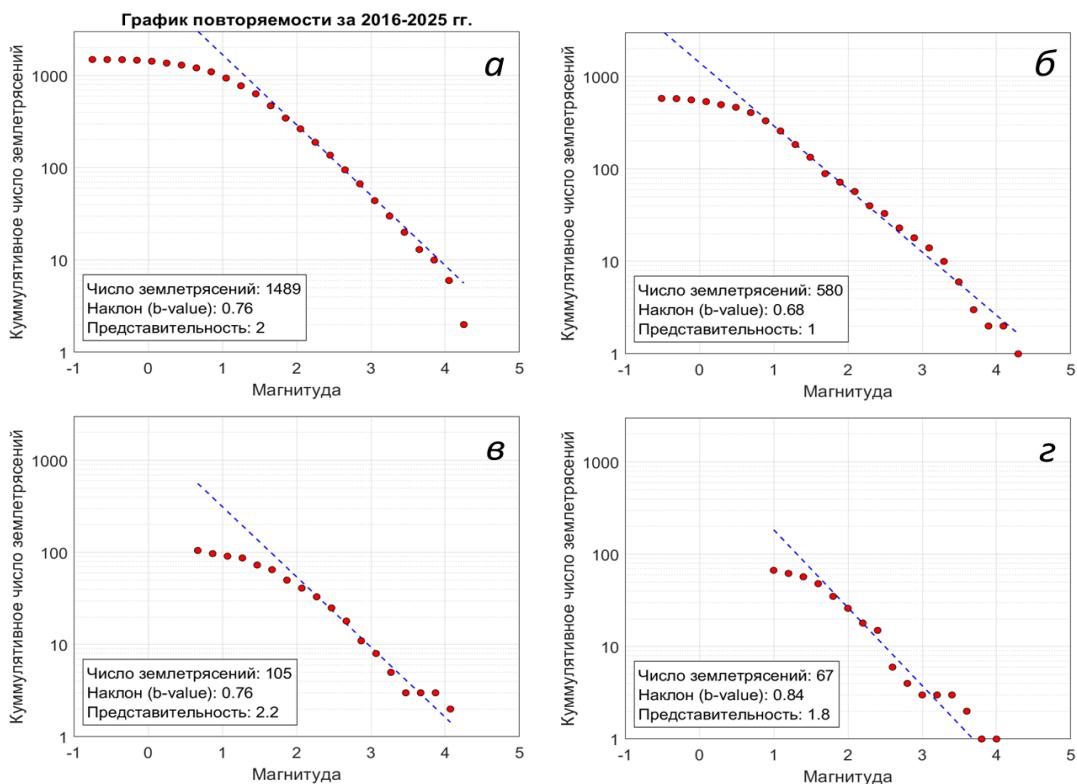


Рис. 6. Графики повторяемости землетрясений для дельты р. Лены (а), а также для областей № 1, 2 и 3, выделенных на рис. 5 желтым, зеленым и красным прямоугольниками (б–г).

Азимутальное покрытие вокруг зон сейсмичности, в свою очередь, очевидным образом влияет на точность локализации гипоцентров. На вертикальных срезах вдоль линий 1A–1B и 3A–3B (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).

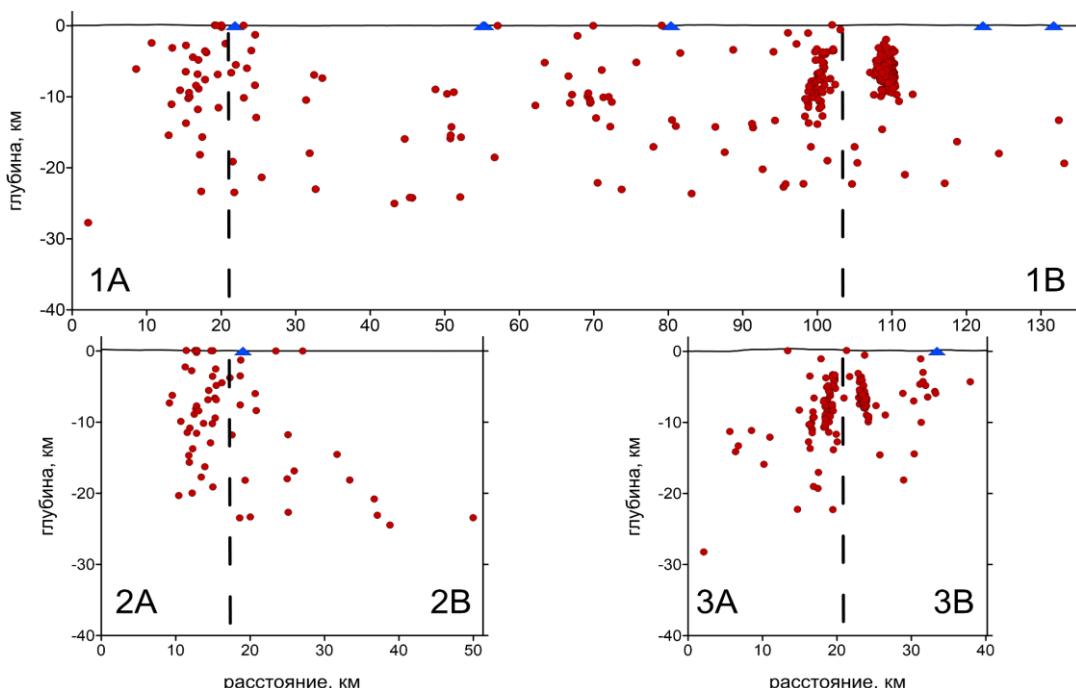


Рис. 7. Вертикальные срезы по профилям 1A–1B, 2A–2B и 3A–3B. Пунктирными линиями обозначены места пересечения профилей. Красными точками показаны проекции гипоцентров сейсмических событий в радиусе 5 км от плоскости среза.

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.

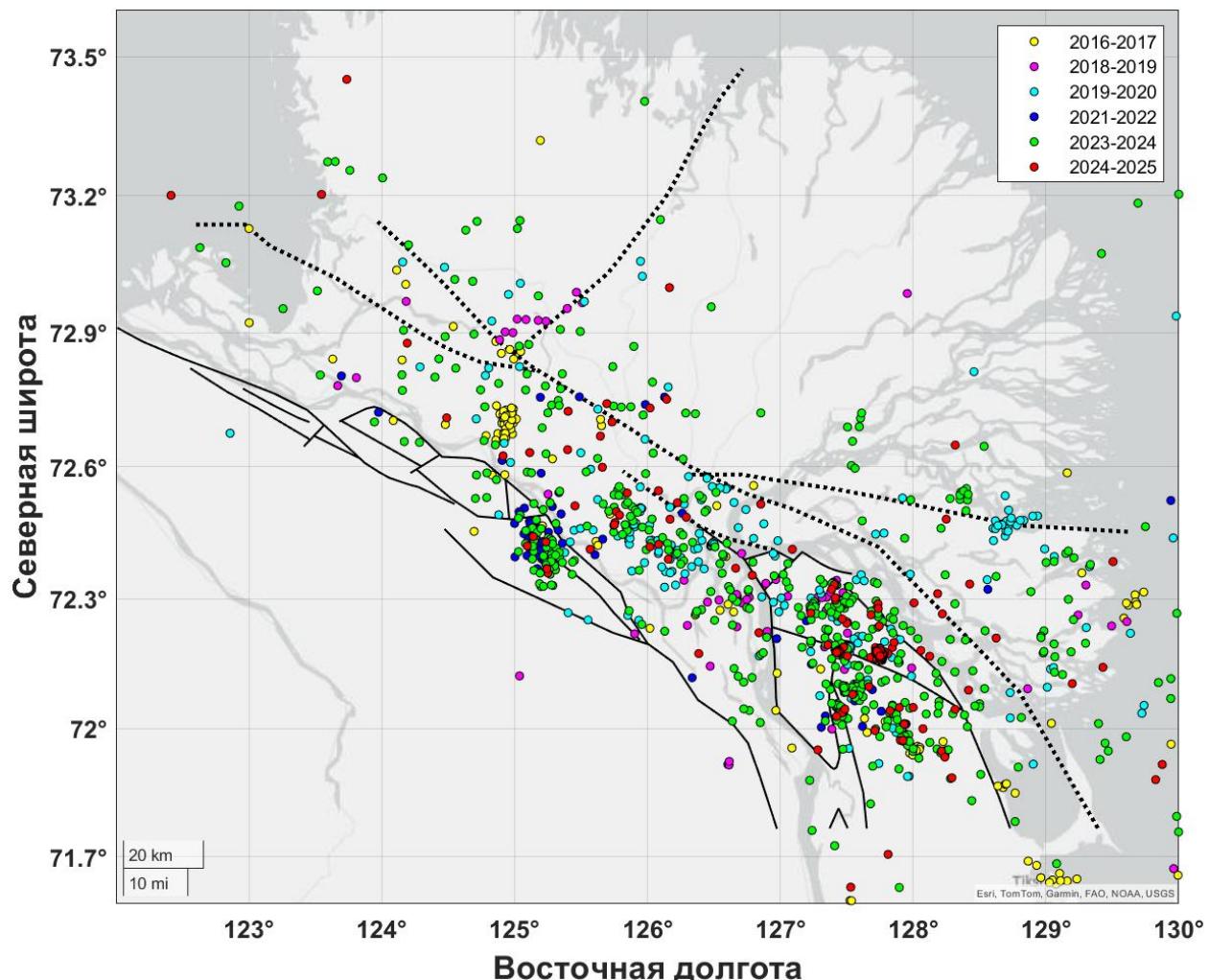


Рис. 8. Активные разломы и сейсмичность района дельты р. Лена. Эпицентры землетрясений показаны по данным локальных сейсмологических сетей за 2016–2025 гг. после уточнения их местоположений методом сейсмической томографии. Сплошные черные линии – достоверные активные разломы, пунктирные – предполагаемые,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

- Большиянов Д.Ю., Васильев Б.С., Виноградова Н.П., Гавриш А.В., Заварзина Г.А., Зинченко А.Г., Зуйкова О.Н., Кямаяя 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-Сиброморская. 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., Сафонов О.В., Понасенко С.Н., Туктаров Р.М., Шибаев 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:SEOBRJ.
- 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., Шибаев С.В., Зобнин Г.Ю.** Построение сейсмотомографической 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., Шибаев 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:SUFXYZ.

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.

Шибаев 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/smeps-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

Bolshiyanov D.Yu., Vasiliev B.S., Vinogradova N.P., Gavrilish 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., Kartozia 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 сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, старший научный сотрудник Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: сейсмический мониторинг, локальная сейсмология, сейсмометрия, инженерная сейсморазведка, разработка сейсмической аппаратуры.

ЕПОНЕШНИКОВА Любовь Юрьевна – младший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики 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 сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмология, геомеханика; *PonasenkoSN@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: сейсморазведка, 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.*



СТРАТИФИКАЦИЯ ОТРАЖАЮЩИХ ГОРИЗОНТОВ, СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСАДОЧНЫЕ МЕГАКОМПЛЕКСЫ СЕВЕРНЫХ И АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ

В.А. Конторович, Д.В. Аюнова, С.М. Ибрагимова, А.Ю. Калинин, Л.М. Калинина, М.В. Соловьев[✉], Ю.Ф. Филиппов

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Комтюга, 3, Россия,

SolovevMV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5279-0697>

Аннотация. Статья посвящена построению согласованных сейсмогеологических моделей геологического строения платформенных отложений северных и арктических регионов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, которые в административном отношении охватывают северные районы Ямало-Ненецкого автономного округа, северо-запад Красноярского края и шельф южной части Карского моря. Приведена характеристика реперных сейсмических горизонтов, контролирующих мезозойско-кайнозойские сейсмогеологические мегакомплексы, по объему отвечающие основным нефтегазоносным мегакомплексам. Выделяемые на сейсмических разрезах меловые реперные горизонты М, М₁ и Г, приуроченные к кровлям неокома, апта и сеномана, и горизонт Б, формирующийся на кровле юры, надежно стратифицированы с использованием данных СК-ВСП. В работе с использованием данных по сверхглубоким скважинам СГ-6, СГ-7 обосновано выделение отражающих горизонтов, формирующихся на геологических границах юра-триас, триас-палеозой, предложены региональные сейсмогеологические модели триасового и юрского мегакомплексов, а также верхнепротерозойско-палеозойских отложений Енисей-Хатангского регионального прогиба.

Ключевые слова: сейсмогеологические мегакомплексы, сейсмические горизонты, стратификация, палеозой, триас, юра, неоком, апт-альб-сеноман, нефтегазоносность, Западно-Сибирская провинция

Финансирование: работа выполнена в рамках научной темы FWZZ-2022-0009 «Цифровые геолого-геофизические модели и оценка перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов Арктической зоны Сибири и Республики Саха (Якутия); усовершенствование геолого-геофизических методов исследований».

Для цитирования: Конторович В.А., Аюнова Д.В., Ибрагимова С.М., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Соловьев М.В., Филиппов Ю.Ф. Стратификация отражающих горизонтов, сейсмогеологические осадочные мегакомплексы северных и арктических регионов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Геофизические технологии. 2025. № 3. С. 40–60. doi:10.18303/2619-1563-2025-3-40.

STRATIFICATION OF REFLECTING HORIZONS, SEISMOGEOLOGICAL SEDIMENTARY MEGACOMPLEXES OF THE NORTHERN AND ARCTIC REGIONS OF THE WEST SIBERIAN OIL AND GAS PROVINCE

V.A. Kontorovich, D.V. Ayunova, S.M. Ibragimova, A.Yu. Kalinin, L.M. Kalinina, M.V. Solovev[✉], Yu.F. Philippov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
SolovevMV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5279-0697>

Abstract. The article is devoted to the construction of coordinated seismogeological models of the platform deposits geological structure in the northern and Arctic regions of the West Siberian oil and gas province, which administratively cover the northern regions of the Yamal–Nenets Autonomous District, the northwest of the Krasnoyarsk Region and the shelf of the southern part of the Kara Sea. The characteristics of the reference seismic horizons that control the Mesozoic–Cenozoic seismogeological megacomplexes, corresponding in volume to the main oil-bearing megacomplexes, are presented. The Cretaceous reference horizons M, M₁ and G, identified on seismic sections and confined to the tops of the Neocomian, Aptian and Cenomanian, and the horizon B, formed on the top of the Jurassic, are reliably stratified using the seismic logging (SL) – Vertical Seismic Profiling (VSP) data. In the work, using data from the ultra-deep wells SG-6, SG-7, the identification of reflecting horizons formed at the geological boundaries of the Jurassic–Triassic, Triassic–Paleozoic is substantiated, regional seismogeological models of the Triassic and Jurassic megacomplexes, as well as Upper Proterozoic–Paleozoic deposits of the Yenisei–Khatanga regional trough are proposed.

Keywords: seismogeological megacomplexes, seismic horizons, stratification, Paleozoic, Triassic, Jurassic, Neocomian, Aptian–Albian–Cenomanian, oil and gas potential, West Siberian province

Funding: the work was carried out within the framework of the scientific topic FWZZ-2022-0009 “Digital geological and geophysical models and oil and gas potential assessment of sedimentary basins of the Arctic zone of Siberia and the Republic of Sakha (Yakutia); improvement of geological and geophysical research methods” of the State Program for Fundamental Scientific Research.

For citation: Kontorovich V.A., Ayunova D.V., Ibragimova S.M., Kalinin A.Yu., Kalinina L.M., Solovev M.V., Filippov Yu.F. Stratification of reflecting horizons, seismogeological sedimentary megacomplexes of the northern and arctic regions of the West Siberian oil and gas province // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 3. P. 40–60. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-3-40.

ВВЕДЕНИЕ

Северные и арктические регионы Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции в административном и нефтегазоносном отношении охватывают Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), на территории которого выделены Надым-Пурская, Пур-Тазовская, Ямальская и Гыданнская нефтегазоносные области (НГО), южную часть Карского моря и северо-западные районы Красноярского края, в пределах которых расположены Южно-Карская и Енисей-Хатангская НГО соответственно (рис. 1).

Арктические регионы Западной Сибири и южная часть Карского моря представляют собой уникальную газоносную субпровинцию в составе Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (НГП).

В настоящее время на территории ЯНАО открыто более 220 месторождений, в акватории Карского моря и Обской губе – 15 месторождений, в которых сосредоточено 97 % суммарных запасов свободного газа Западно-Сибирского осадочного бассейна.

В Ямало-Ненецком автономном округе на долю свободного газа приходится 91 % начальных суммарных извлекаемых запасов углеводородов, на шельфе Карского моря – 96 %. Подавляющее большинство газовых залежей сконцентрировано в апт-альб-сеноманском мегакомплексе: в Надым-Пурской, Пур-Тазовской, Ямальской и Гыданской НГО запасы свободного газа, локализованного в этих отложениях, составляют 63 % суммарных извлекаемых запасов УВ, в Южно-Карской НГО – 75 %. Все газовые залежи, локализованные в апт-альб-сеноманских песчаных резервуарах, контролируются антиклинальными структурами.

Результаты проведенных в Енисей-Хатангском регионе геологоразведочных и нефтегазопоисковых работ показали, что здесь наиболее перспективным в отношении нефтегазоносности является неокомский комплекс пород.

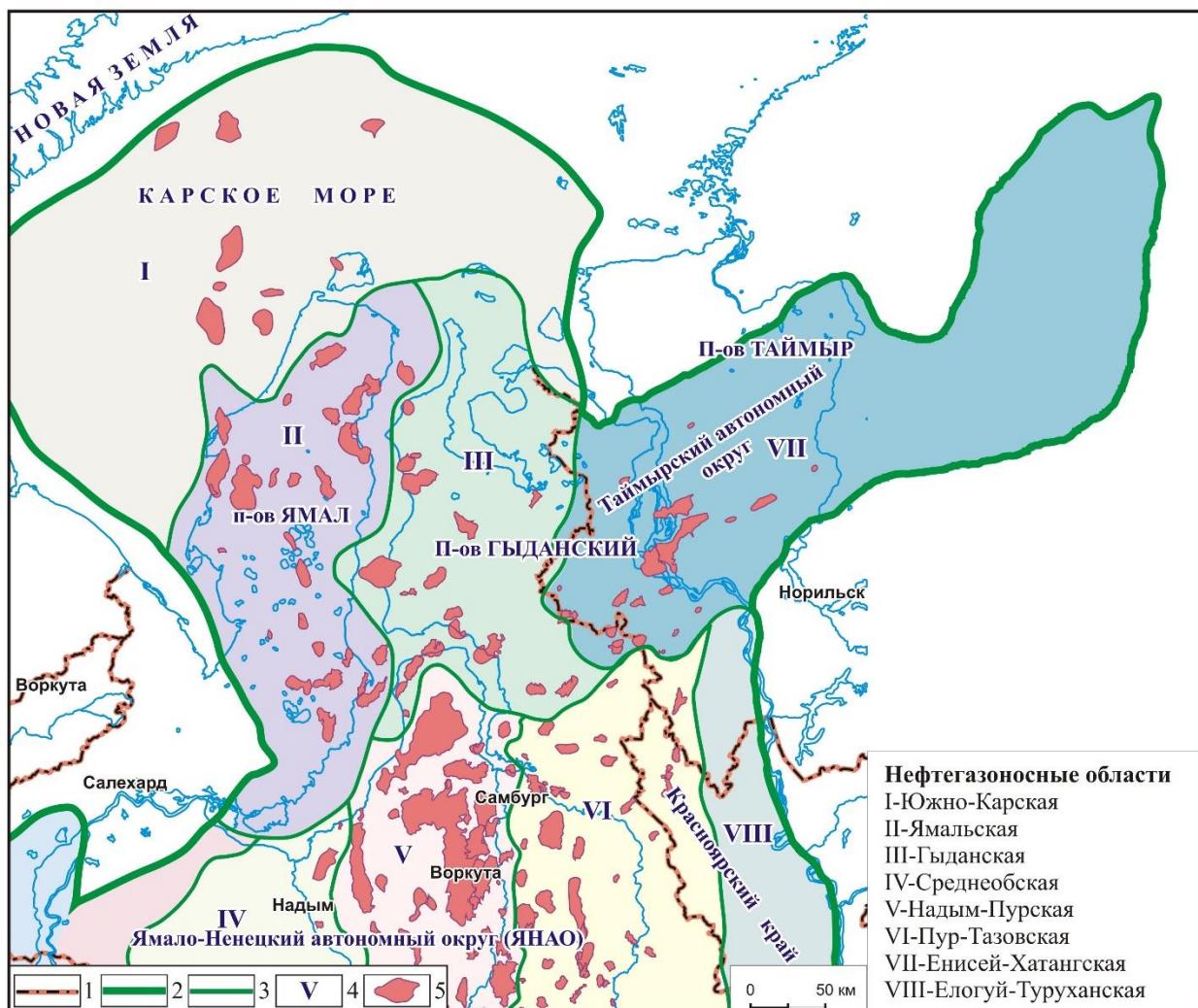


Рис. 1. Обзорная карта северных и арктических регионов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции: 1 – административные границы, 2 – граница Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, 3 – границы НГО, 4 – номера НГО, 5 – месторождения.

Нефтегазоносность Енисей-Хатангского регионального прогиба существенно отличается от сопредельных территорий Западной Сибири. В этом регионе в апт-альб-сеноманском комплексе залежи газа открыты на четырех площадях. Причем под туронским региональным флюидоупором, контролирующим уникальные залежи Медвежьего, Уренгойского и др. месторождений, открыта одна залежь на Казанцевском месторождении.

Всего в Енисей-Хатангской НГО открыто 20 месторождений, большая часть залежей на которых сконцентрирована в нижнемеловых песчаных горизонтах, три месторождения приурочены к верхней юре. Большинство месторождений газовые и газоконденсатные, нефтяные залежи открыты в неокомских отложениях на Пайяхской, Новосоленинской, Западно-Иркинской и Байкаловской площадях.

Согласно выполненным в ИНГГ СО РАН и ВНИГНИ количественным оценкам значительный ресурсный потенциал арктических регионов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции наряду с традиционными комплексами связан с глубокозалегающими юрскими и триасовыми отложениями, которые до настоящего времени остаются слабоизученными.

Настоящая работа посвящена построению согласованных сейсмогеологических моделей геологического строения платформенных отложений этого уникального региона.

РЕПЕРНЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ ГОРИЗОНТЫ, СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МЕГАКОМПЛЕКСЫ

В Западной Сибири наиболее крупные скопления нефти и газа содержатся в осадочных мегакомплексах, перекрытых выдержанными по мощности и латерали реперными глинистыми пачками – мегарегиональными флюидоупорами [Гуари и др., 1968; Карогодин, 1974; Геология ..., 1975; Конторович и др., 1981]. В мезозойско-кайнозойском осадочном чехле северных районов Западной Сибири выделяются четыре региональных нефтегазоносных мегакомплекса: триасовый перспективный (Т), юрский (J), неокомский (берриас-нижнеаптский) (K_1) и апт-альб-сеноманский (K_1-K_2). В верхней части разреза залегает турон-кайнозойский осадочный комплекс [Конторович и др., 2001; Конторович, 2009].

В кровле юрского мегакомплекса залегает баженовская свита и ее стратиграфические аналоги (верхняя юра, волжский ярус–низы берриаса), в кровле неокомского мегакомплекса – кошайская (на севере нейтинская) пачка (нижний мел, апт), в кровле апт-альб-сеноманского – кузнецова свита (верхний мел, турон). Исключение здесь составляет триасовый мегакомплекс, который чрезвычайно слабо изучен глубоким бурением.

Все мегарегиональные флюидоупоры имеют аномально низкие по отношению к вмещающим толщам акустические характеристики и «резонансные» толщины порядка 25–40 м. На кровлях и подошвах глинистых пачек, обладающих аномально низкими скоростными (V) и плотностными (ρ) характеристиками, происходит резкий перепад акустических жесткостей ($V \cdot \rho$), и к ним приурочены максимальные коэффициенты отражения (K). Если коэффициенты отражения записываются в виде $K = (V_2 \cdot \rho_2 - V_1 \cdot \rho_1) / (V_2 \cdot \rho_2 + V_1 \cdot \rho_1)$, то к кровлям этих пачек приурочены отрицательные, к подошвам положительные коэффициенты отражения.

При классической среднечастотной сейсморазведке с несущей частотой 30–40 Гц длительность одной фазы отраженного импульса во временном масштабе составляет порядка 15 мс. В Западной Сибири на уровне целевых юрско-меловых отложений при средних скоростях распространения продольных сейсмических волн порядка 1500–2500 м/с длительность одной фазы отраженной волны составляет 20–40 м. Если мощность реперной глинистой пачки лежит в этом диапазоне, вторая фаза импульса, отраженного от ее кровли квазисинфазно суммируется с первой фазой импульса, отраженного от ее подошвы, что приводит к усилению энергии интерференционного сигнала.

Под «резонансной» понимается такая толщина пачки, при которой происходит близкое к синфазному суммированию волн, отраженных от ее кровли и подошвы.

Поскольку, как было отмечено ранее, все мегарегиональные флюидоупоры обладают аномальными акустическими свойствами и резонансными толщинами, к ним приурочены наиболее энергетически выраженные реперные сейсмические горизонты, которые надежно прослеживаются на территории большей части Западно-Сибирского бассейна и позволяют выделить на временных разрезах серию сейсмогеологических мегакомплексов (рис. 2, табл. 1).

ХАРАКТЕРИСТИКА РЕПЕРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ГОРИЗОНТОВ

Отражающий горизонт Б, формирующийся на баженовской свите, приурочен к кровле юрского сейсмогеологического мегакомплекса.

Благодаря аномальности акустических свойств, выдержанности толщины свиты на значительных территориях и ее широкому распространению, этот горизонт является наиболее надежным сейсмическим репером в Западно-Сибирском осадочном бассейне. В то же время в пределах провинции энергетическая

выразительность горизонта неодинакова. Наиболее ярко он выражен в западных и центральных районах. В восточном направлении, по мере замещения баженовской свиты более мелководными отложениями, энергетический уровень горизонта падает, и его корреляция становится менее однозначной [Конторович, 2009].

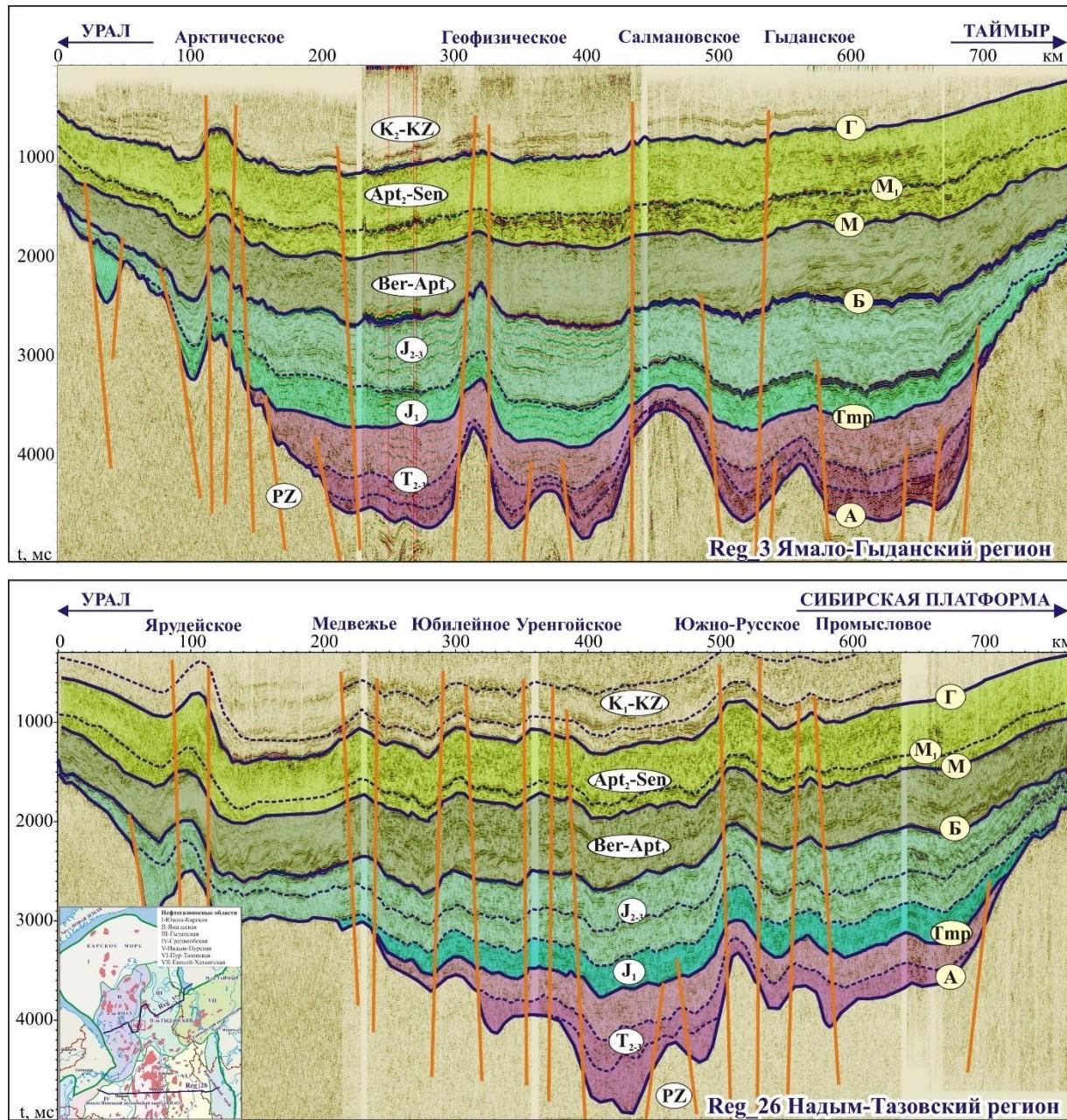


Рис. 2. Сейсмогеологические разрезы по профилям Reg_3 и Reg_26 (ЯНАО).

В частности, на севере бассейна по направлению к Енисейскому складчатому поясу и вглубь Енисей-Хатангского регионального прогиба баженовская и подстилающая ее георгиевская свиты замещаются яновстанской свитой, при этом толщина киммеридж-волжских отложений может возрастать в 10 раз, с 50–60 до 600–700 м. Такое изменение строения верхней юры находит отражение в волновых сейсмических полях. В зоне развития баженовской свиты волновой пакет Б имеет длительность порядка 30–40 мс и представлен трехфазным высокоамплитудным колебанием.

Таблица 1

Стратификация реперных отражающих горизонтов

Индексация отражающих горизонтов	Стратиграфическая приуроченность (Западная Сибирь)	Стратиграфическая приуроченность (Енисей-Хатангский региональный прогиб)
F	Кровля палеозоя	Кровля фундамента
PZ ₁ –PZ ₃		Внутри палеозоя
Tmp/Tr ₁	Кровля триаса, кровля тампейской серии	Кровля триаса, кровля тампейской серии
Tr ₂		Кровля нижнего триаса, кровля красноселькупской серии
A	Подошва MZ–KZ осадочного чехла	Подошва MZ–KZ структурного яруса / кровля палеозоя
Б	Кровля баженовской свиты и ее аналогов, верхняя юра, волжский ярус	Кровля гольчихинской / яновстанской свит
M	Кровля кошайской (нейтинской) пачки, нижний мел, апт	Подошва кошайской пачки, на 100 м ниже кровли малохетской свиты, нижний мел, апт
M ₁	Кровля танопчинской свиты, кровля апта	Кровля малохетской свиты, нижний мел, апт
Г	Кровля кузнецковской свиты, верхний мел, турон	Дорожковская свита, верхний мел, турон

При этом отражающий горизонт Б характеризуется высокой амплитудой, динамической выразительностью и устойчивостью, а сам волновой пакет характеризуется высокоамплитудной субпараллельной сейсмофацией. В восточном направлении, по мере возрастания мощности толщи, происходит увеличение длительности волнового пакета и падение амплитудных характеристик, входящих в него отраженных волн. При этом сам волновой пакет характеризуется косослоистым рисунком сейсмической записи – внутри пакета выделяются сейсмические горизонты, полого погружающиеся в западном направлении. На рисунке 3 приведены фрагменты сейсмических разрезов по профилям Reg_19 и Reg_40. Фрагмент профиля Reg_19 расположен в юго-восточной части ЯНАО в Пур-Тазовской НГО; профиль Reg_40 отработан в северной части ЯНАО, от Гыданской НГО на западе до Енисей-Хатангской НГО на востоке.

Отражающий горизонт М, формирующийся на кошайской (нейтинской) пачке, залегающей в кровле неокомского (берриас-нижеаптского) мегакомплекса, является наименее устойчивым сейсмическим репером в Западно-Сибирском осадочном бассейне. Для него характерна динамическая изменчивость и перераспределение энергии между отдельными фазами интерференционной волны и т. д.

На севере Западной Сибири выше горизонта М на сейсмических разрезах выделяется цуг высокоамплитудных отражений, формирующихся на глинисто-углистых отложениях танопчинской свиты, к кровле которых приурочен отражающий горизонт M₁. На севере провинции угленасыщенные аптские отложения рассматриваются в качестве газопроизводящей толщи, расположенной в верхней зоне газообразования и являющейся одним из источников метана, локализованного в сеноманских резервуарах.

В Ямальской и Гыданской НГО этот горизонт формируется на глинистой пачке, залегающей в нижней части яронгской свиты, которая является региональным флюидоупором для газовых залежей в аптских песчаных пластах группы ТП и, как правило, является более надежным сейсмическим репером, чем горизонт М.

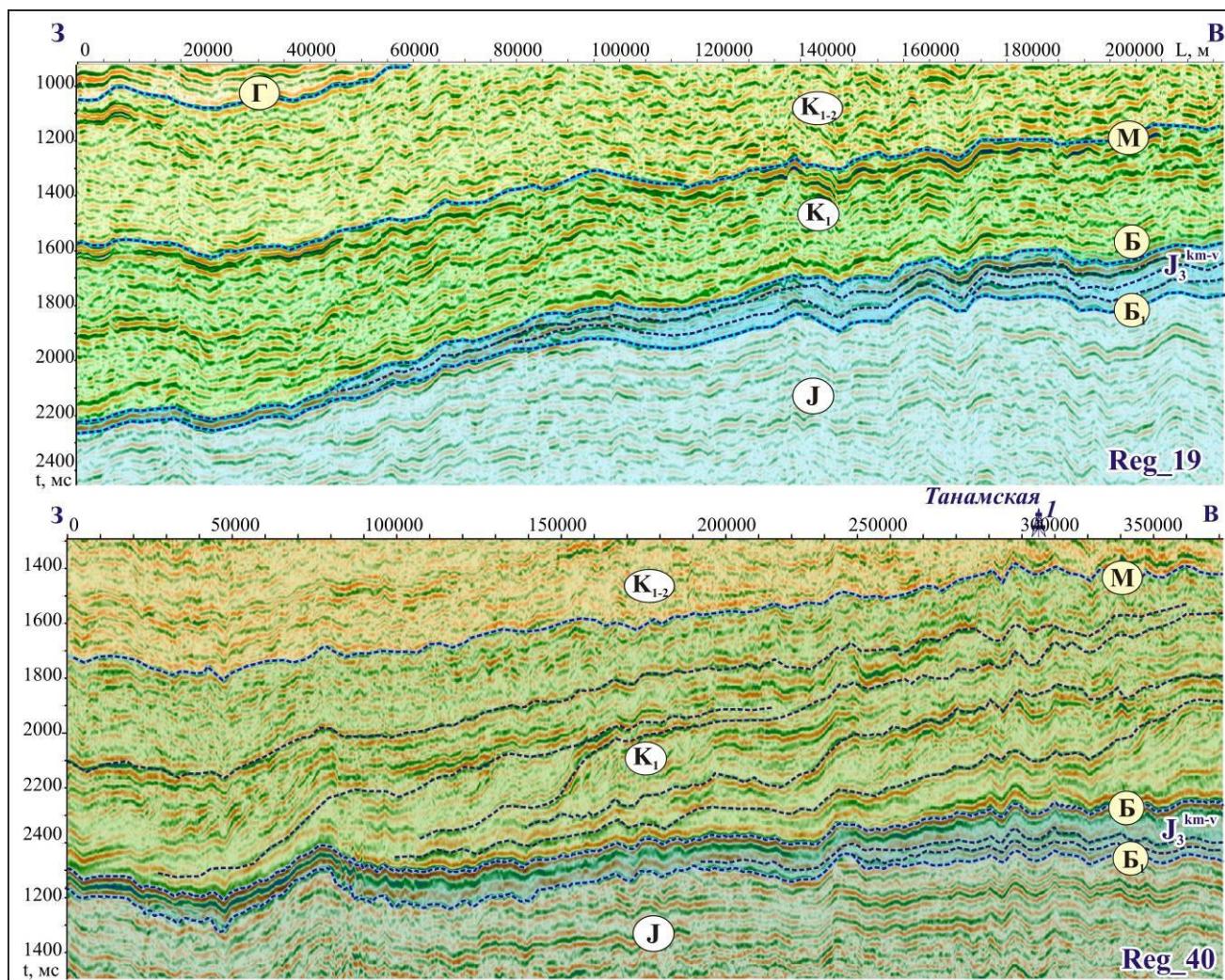


Рис. 3. Сейсмогеологическая характеристика киммеридж-волжских отложений в зоне «перехода» баженовской и георгиевской свит в яновстанскую.

Отражающий горизонт Г /IV/ (верхний мел, турон) на большей части Западной Сибири формируется на пачке низкоскоростных глин кузнецковской свиты, которая формировалась на этапе туронской трансгрессии и является надежным флюидоупором для уникальных сеноманских газовых залежей. На большей части бассейна горизонт Г является одним из наиболее надежных сейсмогеологических реперов, обладает высоким энергетическим уровнем и однозначно прослеживается на временных сейсмических разрезах. По направлению к Сибирской платформе и Таймырской складчатой области, по мере уменьшения глубины залегания и увеличения в туронских глинах песчано-алевритистого материала их экранирующие свойства ухудшаются, и энергетическая выразительность отражающего горизонта Г падает.

В Енисей-Хатангском региональном прогибе аналогами кошайской (нейтинской) пачки и кузнецковской свиты являются глинистые пачки, залегающие в верхних частях малохетской и дорожковской свит [Конторович и др., 2001; Конторович, 2009] (см. табл.1). В этом суббассейне на сейсмических разрезах также выделяются отражающие горизонты М, М₁ и Г, для них характерны все особенности, которые отмечены для восточных районов Западной Сибири.

Наличие значительного объема данных сейсмокаротажа (СК) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП) позволяют надежно стратифицировать меловые реперные горизонты и выделить

на сейсмических разрезах неокомский (берриас-нижеаптский) и апт-альб-сеноманский сейсмогеологические мегакомплексы, которые по объему совпадают с основными осадочными нефтегазоносными мегакомплексами Западно-Сибирского осадочного бассейна. Эти данные, а также наличие реперного отражающего горизонта Б, корреляция которого на большей части рассматриваемой территории является абсолютно однозначной, позволяют надежно «отбить» кровлю юрского мегакомплекса. Сложнее обстоит дело с базальными горизонтами мезозойско-кайнозойского осадочного чехла и с кровлей палеозоя.

БАЗАЛЬНЫЕ ГОРИЗОНТЫ МЕЗОЗОЙСКО-КАЙНОЗОЙСКОГО ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Выше было отмечено, что триасовые отложения Западной Сибири крайне слабо изучены глубоким бурением, что существенно затрудняет выбор на сейсмических разрезах отражающих горизонтов, приуроченных к подошве юры–кровле триаса. Сложность заключается еще и в том, что юрские и триасовые отложения сложены однотипными по литологическому составу и акустическим свойствам терригенными породами и не разделены жестким геологическим репером. В этой ситуации на границе юра-триас не будет существенного скачка акустических характеристик пород, и, следовательно, не будут формироваться энергетически выраженные сейсмические реперы, что и наблюдается на сейсмических разрезах.

В Западной Сибири наиболее полные разрезы триаса вскрыты скважинами СГ-6 и СГ-7, которые расположены в пределах Колтогорско-Уренгойского мегажелоба в Надым-Пурском междуречье. В этих скважинах триас вскрыт на глубинах 5655 и 6504 м соответственно и имеет двучленное строение.

Нижний триас, выделенный в составе красноселькупской (туринской) серии, в скважинах СГ-6 и СГ-7 залегает на глубинах 6422 и 6504 м. Нижняя подсвита красноселькупской серии сложена исключительно базальтами; верхняя – в скважине СГ-6 представлена трябъяхской свитой, залегающей на глубинах 6422–6510 м. В верхней части свита представлена 20-метровой пачкой базальтов с апобазальтовой метакорой выветривания в кровле. Ниже залегают песчаники с прослоями алевролитов и гравелитов. Мощность терригенной пачки составляет порядка 70 м. Залегающие ниже по разрезу коротчаевская и аймальская свиты представлены исключительно базальтами.

В скважине СГ-7 по Бочкареву В.С., Бородкину В.Н. [Бочкарев и др., 2010] в разрезе нижнего триаса трябъяхская свита отсутствует и непосредственно под юрой в интервале 6504–6921 м залегает более молодая тюрьхинская свита, представленная терригенными породами – песчаниками, алевролитами и аргиллитами; мощность свиты – 417 м. Ниже по разрезу также залегают эфузивные породы – базальты коротчаевской и аймальской свит.

Таким образом, в разрезах скважин СГ-6, СГ-7 мощности терригенных отложений, залегающих в верхней части триаса, составляют 855 и 1372 м соответственно, вскрытые мощности базальтов – 992 и 1329 м.

В рамках исследований, выполненных в ИНГГ СО РАН, с использованием данных СК-ВСП по скважинам СГ-6, СГ-7 на сейсмических разрезах были выделены и стратифицированы все отражающие горизонты осадочного чехла, в том числе и горизонты, формирующиеся на кровле и подошве терригенного триаса и определены интервальные скорости мегакомплексов.

На рисунке 4 приведены фрагменты сейсмогеологических разрезов по профилям Reg_25 и Reg_29, проходящим через скважины СГ-6, СГ-7, на которых показаны колонки, характеризующие во временном масштабе толщины средне-верхнетриасового, юрского, неокомского и апт-альб-сеноманского мегакомплексов. Временная мощность нижнетриасового комплекса, сложенного базальтами, показана в объеме вскрытых скважинами отложений.

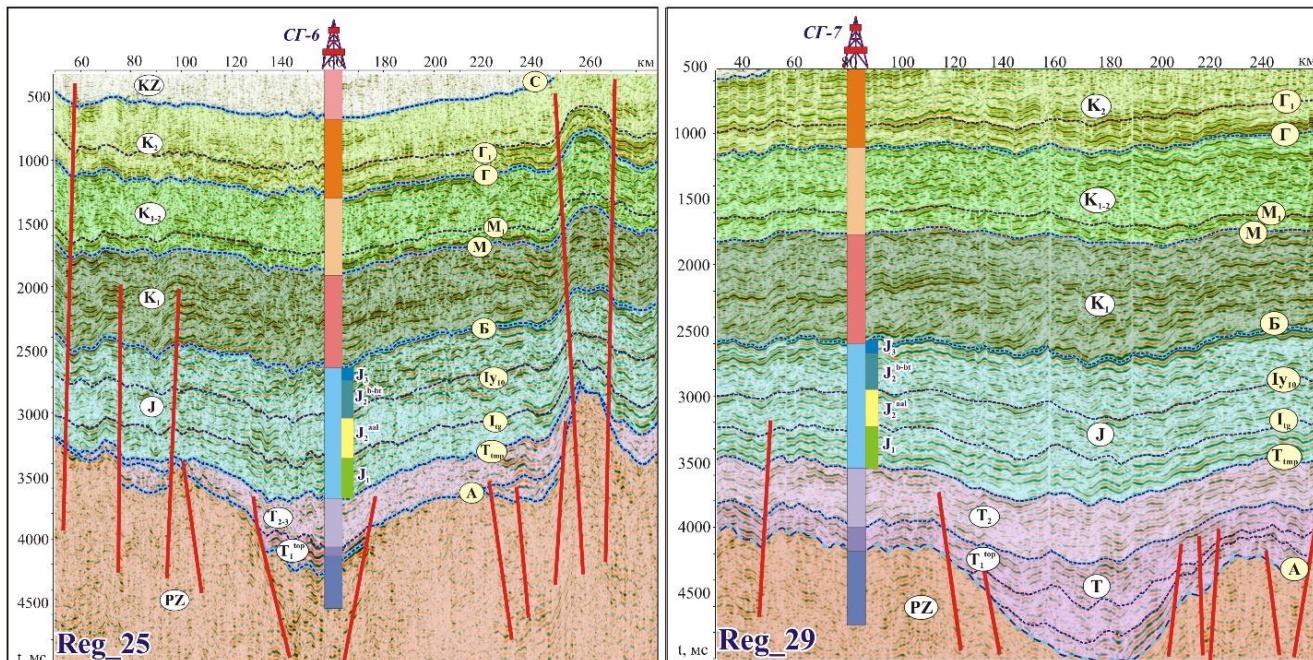


Рис. 4. Фрагменты сейсмогеологических разрезов по профилям Reg_25 и Reg_29, проходящим через скважины СГ-6, СГ-7.

В Западной Сибири базальты нижнего триаса отнесены к комплексу основания и рассматриваются в составе фундамента. Именно к подошве терригенного триаса в Надым-Пурском междуречье приурочен отражающий горизонт А, стратиграфически приуроченный к подошве осадочного чехла – кровле домезозойского основания, сложенного палеозойскими метаморфизованными толщами и базальтами нижнего триаса. На временных сейсмических разрезах ниже горизонта А фиксируется слабоамплитудный хаотический рисунок сейсмической записи (см. рис. 4).

Наличие региональных сейсмических профилей, связывающих Надым-Пурское междуречье с Ямальской и Гыданской НГО, позволило достаточно надежно прокоррелировать отражающие горизонты Тmp и А, выделить границу триасового и юрского сейсмогеологических мегакомплексов и подошву осадочного чехла в пределах всей арктической зоны Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, включая акваторию Карского моря. На рисунке 5 приведен сейсмогеологический разрез по региональному профилю Reg_105, пересекающему север Западной Сибири в меридиональном направлении и связывающему профиль Reg_26, расположенный в Надым-Тазовском междуречье, и профиль Reg_3, проходящий через полуострова Ямал и Гыданский (см. рис. 2).

Анализ сейсмических материалов показал, что все мезозойско-кайнозойские сейсмогеологические комплексы, выделяемые на временных разрезах Ямальской и Гыданской НГО, продолжаются в акваторию Карского моря (см. рис. 5) [Конторович и др., 2017; Конторович, Конторович, 2019].

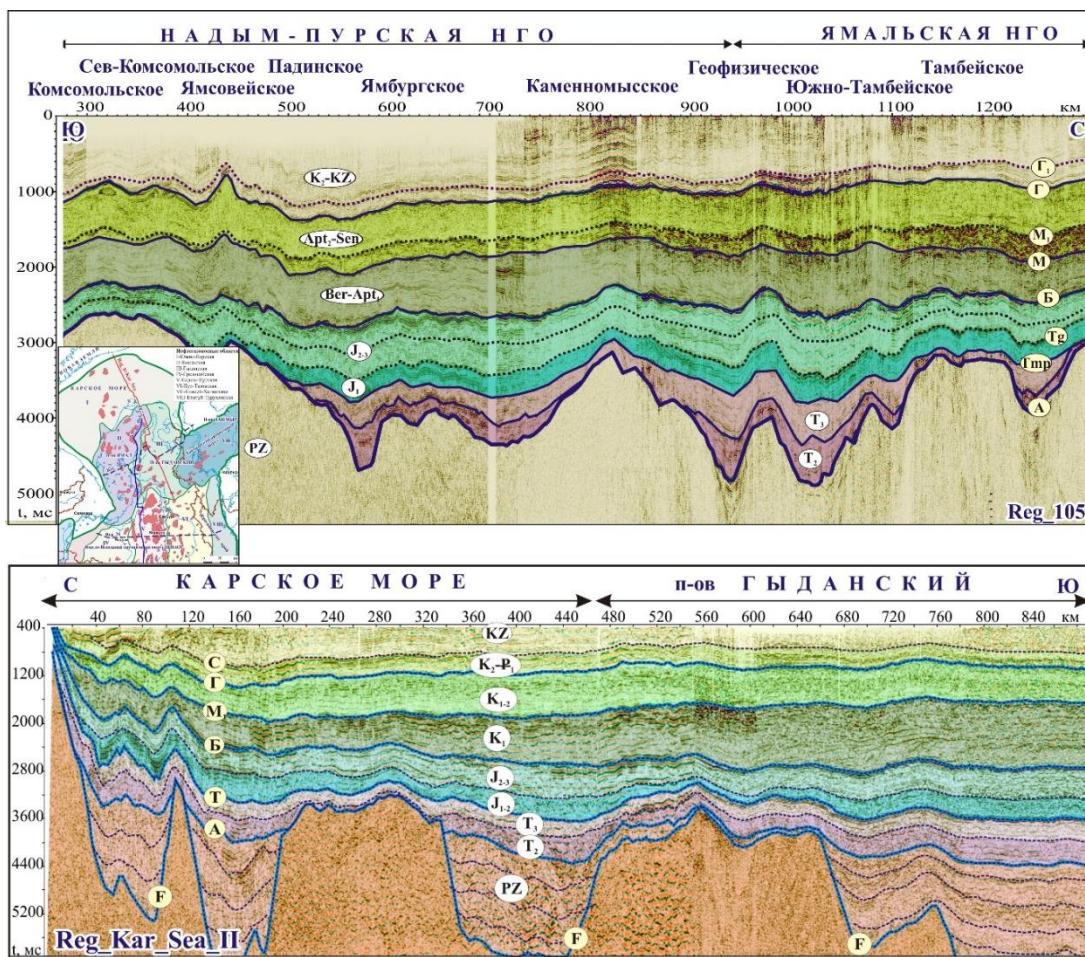


Рис. 5. Сейсмогеологические разрезы по профилям Reg_105 (ЯНАО) и Reg_Kar_Sea_II (Карское море – п-ов Гыданский).

БАЗАЛЬНЫЕ ГОРИЗОНТЫ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА, ГРАНИЦЫ ЮРА-ТРИАС, МЕЗОЗОЙ-ПАЛЕОЗОЙ ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКОЙ НГО

Существенно более сложная и неоднозначная ситуация в Енисей-Хатангском региональном прогибе. В настоящее время кондиционные сейсмические разрезы по профилям, пересекающим Енисей и связывающим северные районы Западной Сибири и Енисей-Хатангский региональный прогиб, отсутствуют, что существенно осложняет выделение границ юры и триаса, а также мезозоя и палеозоя в Енисей-Хатангской НГО.

В рамках классических тектонических схем Енисей-Хатангский региональный прогиб традиционно относится к Сибирской платформе. Связано это с тем, что в этом регионе палеозойские и мезозойские платформенные отложения залегают на древнем архейско-протерозойском фундаменте. Учитывая, что в классической тектонике границы плит и платформ определяются возрастом фундамента, это представляется абсолютно обоснованным.

В то же время в этом регионе образования древнего фундамента и верхнего протерозоя-палеозоя пере крыты мощной толщей мезозойско-кайнозойских платформенных отложений, геологическое строение которых аналогично отложениям мезозойско-кайнозойского осадочного чехла Западно-Сибирской геосинеклизы. Учитывая, что в этом регионе наибольший интерес в отношении нефтегазоносности представляют традиционные для Западной Сибири юрско-меловые отложения,

в плане нефтегазогеологического районирования Енисей-Хатангский региональный прогиб выделен в составе одноименной нефтегазоносной области Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции (см. рис. 1).

На рисунке 6 приведены сейсмогеологические разрезы по профилям Reg_IX и Reg_Диксон–Дудинка, которые пересекают Енисей-Хатангский региональный прогиб в широтном направлении; выше в табл. 1 приведена стратиграфическая приуроченность отражающих горизонтов и их индексы.

Анализ сейсмогеологических разрезов позволяет отметить, что в осевой, наиболее погруженной части Енисей-Хатангского регионального прогиба, выделяется серия квазипараллельно залегающих энергетически выраженных отражающих горизонтов, подчеркивающих платформенный облик осадков, временная мощность которых достигает 8–9 с, что составляет 15–20 км.

На сопредельных территориях Западной Сибири максимальная толщина мезозойско-кайнозойских платформенных отложений достигает 8–9 км. Как было отмечено ранее, в наиболее глубоких скважинах СГ-6, СГ-7, пробуренных в пределах осевой части Колтогорско-Уренгойского мегажелоба, толщина мезозойско-кайнозойского осадочного чехла составляет 6500–6900 м.

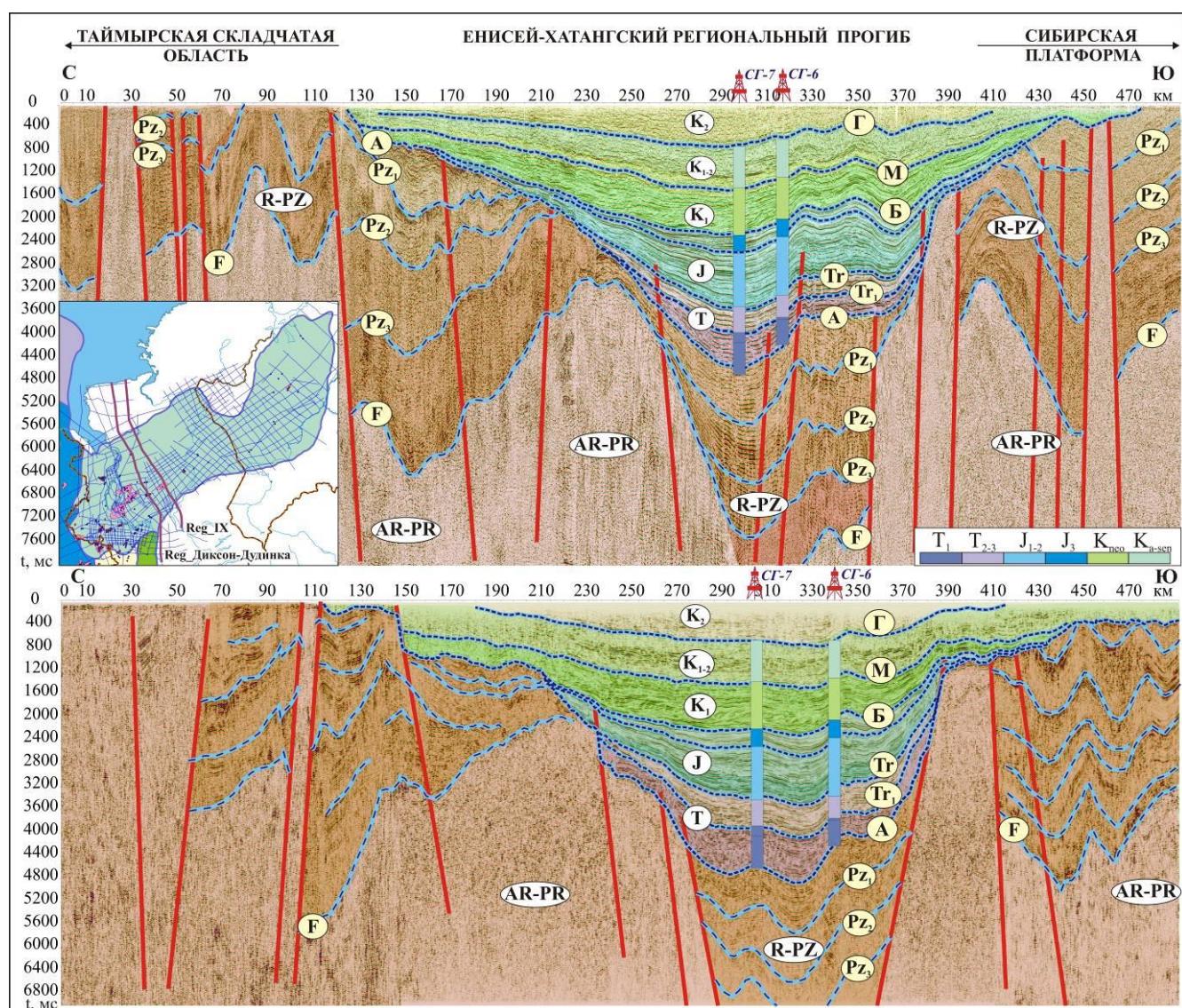


Рис. 6. Сейсмогеологические разрезы по профилям Reg_IX, Reg_Диксон–Дудинка.

Учитывая огромную мощность платформенных отложений в осевой части Енисей-Хатангского прогиба, которая минимум в два раза превышает толщину осадочного чехла в Западной Сибири, правомочно предположить, что в этой зоне платформенные отложения представлены как мезозойскими, так и палеозойскими платформенными отложениями. В этой зоне сейсмогеологические комплексы залегают квазисинхронно, без видимых перерывов, что позволяет сделать вывод о согласном залегании древних палеозойских и перекрывающих их более молодых мезозойских отложений.

В направлении структур обрамления (для мезозоя) Таймырской складчатой области и Курейской синеклизы (классической Сибирской платформы) мощности мезозойских сейсмокомплексов монотонно уменьшаются. При этом на бортах депрессии на сейсмических разрезах четко фиксируется региональное несогласие между палеозоем и мезозоем. В этих зонах палеозойские и мезозойские осадочные комплексы залегают несогласно, формируя в разрезе платформенных отложений два структурных яруса.

Следует также отметить, что палеозойские платформенные отложения, получившие развитие в осевой части Енисей-Хатангского регионального прогиба, в южной части Таймырского приподнятого блока и на Сибирской платформе, отделены двумя контрастными выступами архейско-протерозойского фундамента, которые на временных разрезах характеризуются слабоамплитудным хаотическим рисунком сейсмической записи [Конторович, Филиппов, 2021].

ГОРИЗОНТЫ БАЗАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МЕЗОЗОЙСКОГО СТРУКТУРНОГО ЯРУСА

На территории Енисей-Хатангской НГО пробурена 221 скважина, из которых кровля юры вскрыта в 127 скважинах, нижняя юра – в 40, триас – в 24, кровля палеозоя – в 14. При этом большинство скважин, вскрывших палеозой, пробурены на Усть-Портовском мегавыступе в зоне, где триас в разрезе отсутствует и палеозой перекрыт юрой. Все скважины, вскрывающие базальные горизонты мезозоя, расположены на бортах прогиба либо в пределах контрастных поднятий, осложняющих Балахнинский выступ, Рассохинский мегавал и Усть-Портовский мегавыступ. На рисунке 7 приведена построенная в рамках выполненных в ИНГГ СО РАН исследований структурная карта по кровле триаса, на которой показаны скважины, вскрывшие палеозой и триас.

Как отмечалось ранее, выделение горизонта А, приуроченного к границе палеозоя и мезозоя, на бортах прогиба не вызывает проблем. В то же время корреляция сейсмических горизонтов, приуроченных к кровлям базальных комплексов мезозоя и стратифицированных на бортах в погруженную часть прогиба, многовариантна и крайне неоднозначна.

В южных и центральных районах Западной Сибири базальные комплексы мезозойско-кайнозойского осадочного чехла (нижняя юра, аален и т. д.) резко выклиниваются на выступах фундамента («утыкаются в выступы»). В этих регионах уменьшение мощности юры происходит за счет последовательного выклинивания нижних комплексов на эрозионно-тектонические выступы. При этом толщина вышележащих комплексов меняется незначительно (рис. 8).

Это свидетельствует о том, что на момент формирования этих толщ рельеф палеозойского фундамента был уже значительно дифференцирован – существовали депрессионные зоны и выступы фундамента.

На севере провинции, в акватории Карского моря и в Енисей-Хатангском прогибе, ситуация иная. Здесь по направлению к структурам обрамления толщины юрских и триасовых сейсмокомплексов уменьшаются постепенно – осевая часть бассейна постепенно погружалась относительно структур обрамления в триасе и юре.

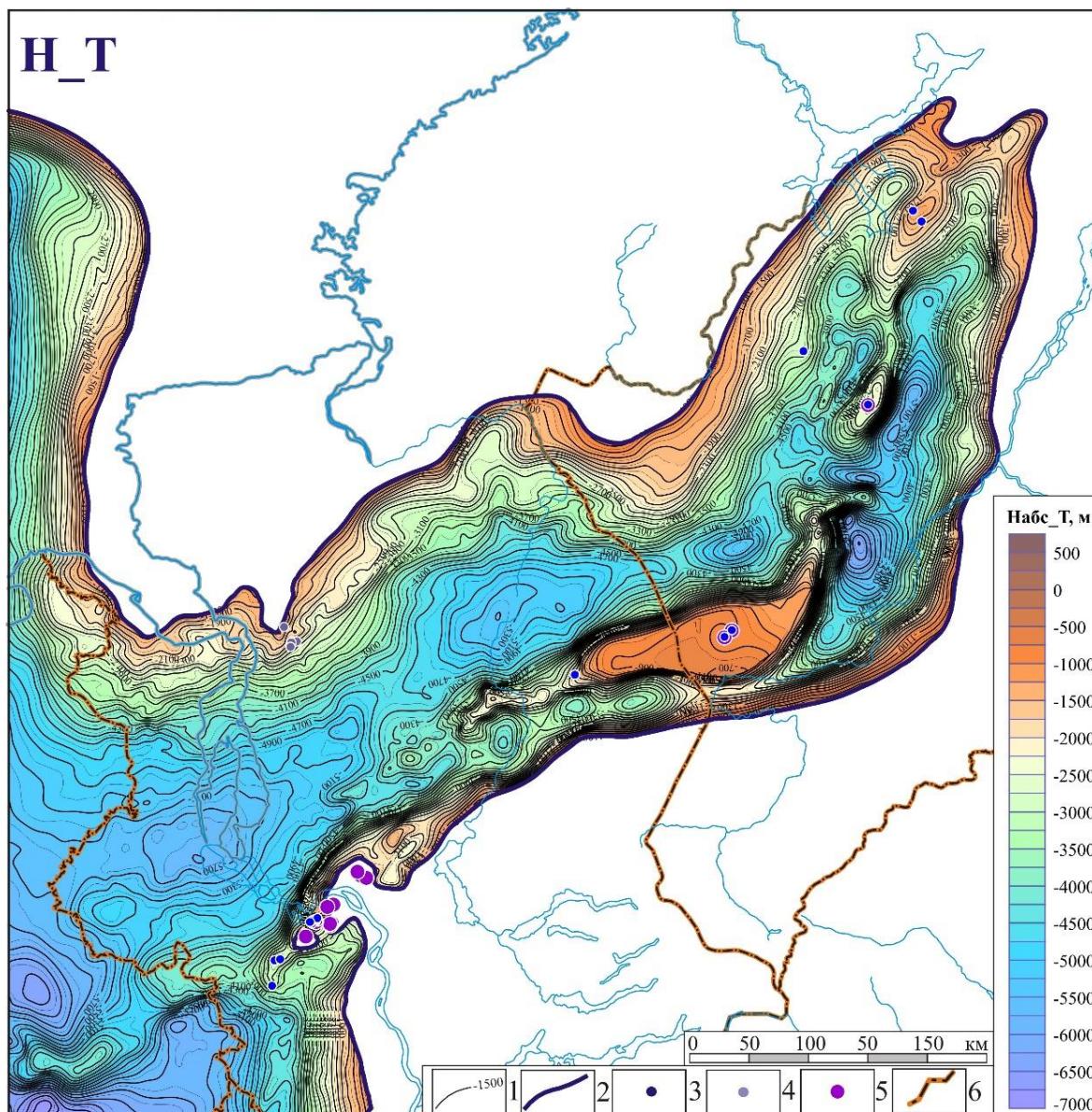


Рис. 7. Структурная карта по кровле триаса: 1 – изогипсы кровли триаса, 2 – граница распространения терригенного триаса; скважины: 3 – вскрывшие терригенный триас, 4 – вскрывшие базальты, 5 – вскрывшие палеозой, 6 – административные границы.

При этом мощность триасовых и юрских отложений на бортах прогиба может уменьшиться более чем в 2 раза, и при этом в разрезе будут присутствовать все триас-юрские комплексы, развитые в депрессионной части прогиба.

Сложность заключается еще и в том, что, как было отмечено ранее, юрские и триасовые отложения сложены однотипными по литологическому составу и акустическим свойствам терригенными породами. Если, опираясь на сейсмическую модель, полагать, что в осевой части прогиба мезозойские отложения согласно перекрывают палеозой, то в верхней части последнего будет залегать пермь, которая в Сибири также сложена, главным образом, терригенными породами – переслаивающимися песчаниками, аргиллитами и алевролитами.

В этой ситуации на границах юра-триас и триас-пермь не будет происходить существенного скачка акустических характеристик пород и не будут формироваться энергетически выраженные сейсмические реперы, что и наблюдается на сейсмических разрезах – в мощной толще платформенных отложений

выделяется серия квазипараллельных отражающих горизонтов, обладающих однотипными амплитудно-энергетическими характеристиками. Учитывая эти обстоятельства, в осевой части депрессии наиболее проблематичными для стратификации являются отражающие горизонты, приуроченные к кровле триаса и подошве мезозоя—кровле палеозоя.

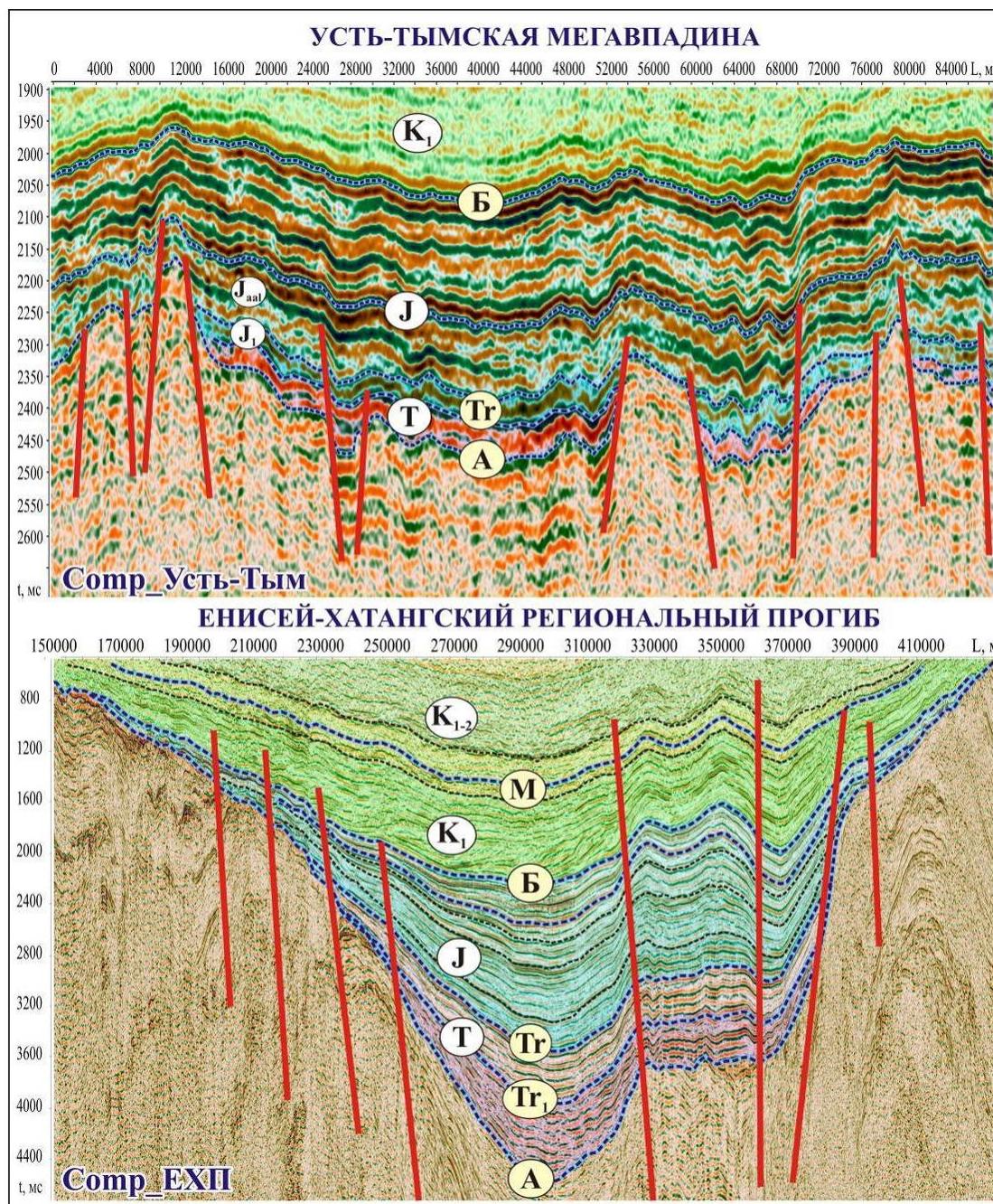


Рис. 8. Сейсмогеологическая характеристика зон выклинивания триасовых и юрских отложений в южных районах Западной Сибири и в Енисей-Хатангском региональном прогибе.

В этой ситуации была предпринята попытка пойти по пути аналогий с разрезами триаса, вскрытыми скважинами СГ-6 и СГ-7.

Подошва юры–кровля триаса. Анализ геолого-геофизических материалов показал, что толщины юрского, неокомского и апт-альб-сеноманского мегакомплексов в Колтогорско-Уренгойском желобе и в Енисей-Хатангском прогибе принципиально не отличаются. Так, мощность юры в скважинах СГ-6, СГ-7

составляет 1872 и 1709 м соответственно. В Енисей-Хатангском прогибе в осевой части подошва юры не вскрыта. В то же время в скважине Тундровая-1, расположенной на северном склоне Рассохинского мегавала, далеко не в депрессионной зоне, мощность юры составляет уже 1577 м. Анализ сейсмических данных позволяет уверенно утверждать, что по мере погружения рельефа в направлении осевой части прогиба мощность юры будет возрастать.

В скважинах СГ-6, СГ-7 толщины неокома (берриас-нижний апт) и апт-альб-сеномана составляют 945–1065 и 1458–1525 м соответственно, а, например, на Пайяхской площади – 968–989 и 1527–1593 м. Значения соизмеримы, что свидетельствует о том, что в юре, неокоме и апт-альб-сеномане Колтогорско-Уренгойский мегажелоб и Енисей-Хатангский региональный прогиб развивались по аналогичному сценарию и темпы погружения и осадконакопления в них были примерно одинаковые. Логично предположить, что в среднем-позднем триасе имела место такая же тенденция.

Нижняя-средняя юра в Надым-Пурском междуречье и Енисей-Хатангском районе имеет аналогичное строение, а верхняя юра отличается принципиально. В скважинах СГ-6, СГ-7 верхнеюрский комплекс пород представлен васюганской, георгиевской и баженовской свитами, суммарная толщина которых составляет порядка 120 м. На северо-востоке Западной Сибири и в Енисей-Хатангском прогибе в разрезе верхней юры выделяются яневстанская и точинская свиты, суммарная мощность которых может достигать 1000 м и более. Так, на Пайяхской и Долганской площадях, расположенных в западной части прогиба, толщина верхней юры составляет 700–800 м, в скважине Новоякимовская-1, пробуренной в центральной части депрессии, достигает 1030 м. Такое увеличение мощности верхней юры на северо-востоке Западно-Сибирского бассейна не связано с тектоническими процессами, а определяется, главным образом, удаленностью рассматриваемых территорий от источников сноса. Увеличение толщины верхней юры происходит, в первую очередь, за счет волжских отложений, т. е. связано с этапом резкого недокомпенсированного прогибания осевой части Западно-Сибирского бассейна, предопределившее существенное увеличение темпов осадконакопления и положившего начало формированию неокомских клиноформ. Аналогичным образом в это время формировался и Енисей-Хатангский региональный прогиб, в котором неокомские клиноформы, последовательно погружающиеся в северном направлении, получили широкое распространение.

В рамках проведенных исследований построенные во временном масштабе и скорректированные с учетом увеличения мощности верхней юры колонки по скважинам СГ-6 и СГ-7 были совмещены с временными разрезами по профилям Reg_IX и Reg_Диксон–Дудинка (см. рис. 6). Анализ этих материалов показал, что границы мезозойских сейсмогеологических мегакомплексов, выделенных в осевой части Енисей-Хатангского прогиба и в Колтогорском мегажелобе, практически идеально совпадают. Эти данные, а также результаты классической корреляции и характер сейсмической записи на временных разрезах послужили основой для выделения отражающих горизонтов, приуроченных к подошвам юры и тампейской серии триаса. В настоящей работе этим горизонтам присвоены индексы Tr и Tr₁.

Подошва триаса–кровля палеозоя.

Выше было отмечено, что на моноклинальных бортах Енисей-Хатангского прогиба палеозойские и мезозойские отложения залегают несогласно, образуют различные структурные ярусы осадочного чехла, и в этих зонах выделение отражающего горизонта, формирующегося на границе палеозоя и мезозоя, не вызывает затруднений. Существенно более сложная ситуация в осевой части Енисей-Хатангского прогиба.

Если тампейская серия среднего-позднего триаса на севере Западной Сибири повсеместно сложена однотипными терригенными породами, то разрез красноселькупской серии представлен различными литологическими разностями.

На северо-востоке Западной Сибири в Тампейском фациальном районе, граничащим с Енисей-Хатангским региональным прогибом, средний-верхний нижний триас представлен подъяхинской свитой, нижняя подсвита которой сложена серыми аргиллитами, алевролитами и пестроцветными туфами; верхняя – темно-серыми аргиллитами с прослойями алевролитов [Казаков и др., 2002].

Как было отмечено ранее, в Енисей-Хатангском прогибе триас вскрыт в 24 скважинах. Палеозой вскрыт в 14 скважинах, в 10 из которых он перекрыт юрой, триас в разрезе отсутствует, подошва триаса охарактеризована в четырех скважинах.

В распоряжении специалистов ИНГГ СО РАН имеется описание керна нижнего триаса по 17 скважинам. В 14 скважинах, пробуренных на Балахнинской, Логатской, Малохетской, Семеновской, Тампейской и Тундровой площадях, нижний триас сложен терригенными породами.

В скважине Малохетская-6, расположенной на Усть-Портовском мегавыступе, и в скважине Тундровая-1, расположенной на Рассохинском мегавалу, и вскрывших кровлю палеозоя, мощность нижнего триаса составляет 800 и 866 м соответственно. Наиболее мощная толща терригенного триаса красноселькупской серии, вскрытая скважиной Владимирская-21, составляет 1380 м (подошва триаса не вскрыта).

Нижнетриасовые базальты вскрыты в четырех скважинах на Хабейской и Гольчихинской площадях, которые расположены практически в одной точке на северном борту Енисей-Хатангского прогиба (см. рис. 7). Вскрытая мощность базальтов на Хабейской площади составляет порядка 200 м, в скважине Гольчихинская-1 – 1576 м. Анализ волновых полей свидетельствует о том, что базальты нижнего триаса на Гольчихинской и Хабейской площадях не имеют ничего общего с триасовыми толщами, получившими развитие в осевой части Енисей-Хатангского прогиба.

В депрессионной зоне ниже горизонта Tr₁, приуроченного к подошве тампейской серии, согласно залегают однотипные по характеру сейсмической записи и энергетики отражающих горизонтов комплексы, мощности которых монотонно уменьшаются в направлении структур обрамления. Скважина Гольчихинская-1 вскрывает базальты ниже горизонта, приуроченного к перерыву в осадконакоплении, в локальной впадине. В подошве толща базальтов ограничена локально развитым сейсмическим отражением, которое снизу «втыкается в перерыв» и прослеживается несогласно вышележащим горизонтам мезозоя (рис. 9).

Это позволяет предполагать, что по аналогии с Тампейским фациальным районом в Енисей-Хатангском региональном прогибе нижний триас будет представлен преимущественно терригенными породами – переслаивающимися песчаниками, алевролитами и аргиллитами.

Вскрытые мощности триасовых отложений и характер волновых полей позволили условно выделить отражающий горизонт А, приуроченный к подошве мезозоя–кровле палеозоя в Енисей-Хатангском региональном прогибе. При этом учитывалось еще одно обстоятельство. Согласно геохронологической шкале, вошедшей в стратиграфический кодекс 2019 г. [Стратиграфический кодекс ..., 2019], триас имеет возраст 252–201 млн лет, юра – 145–201 млн лет; время формирования 51 и 56 млн лет соответственно. Если темпы осадконакопления на этих этапах развития принципиально не отличались, что в целом согласуется с имеющимся фактическим материалом, то мощности юрских и

триасовых отложений в Енисей-Хатангской зоне должны быть соизмеримы, что и получается при предложенном подходе.

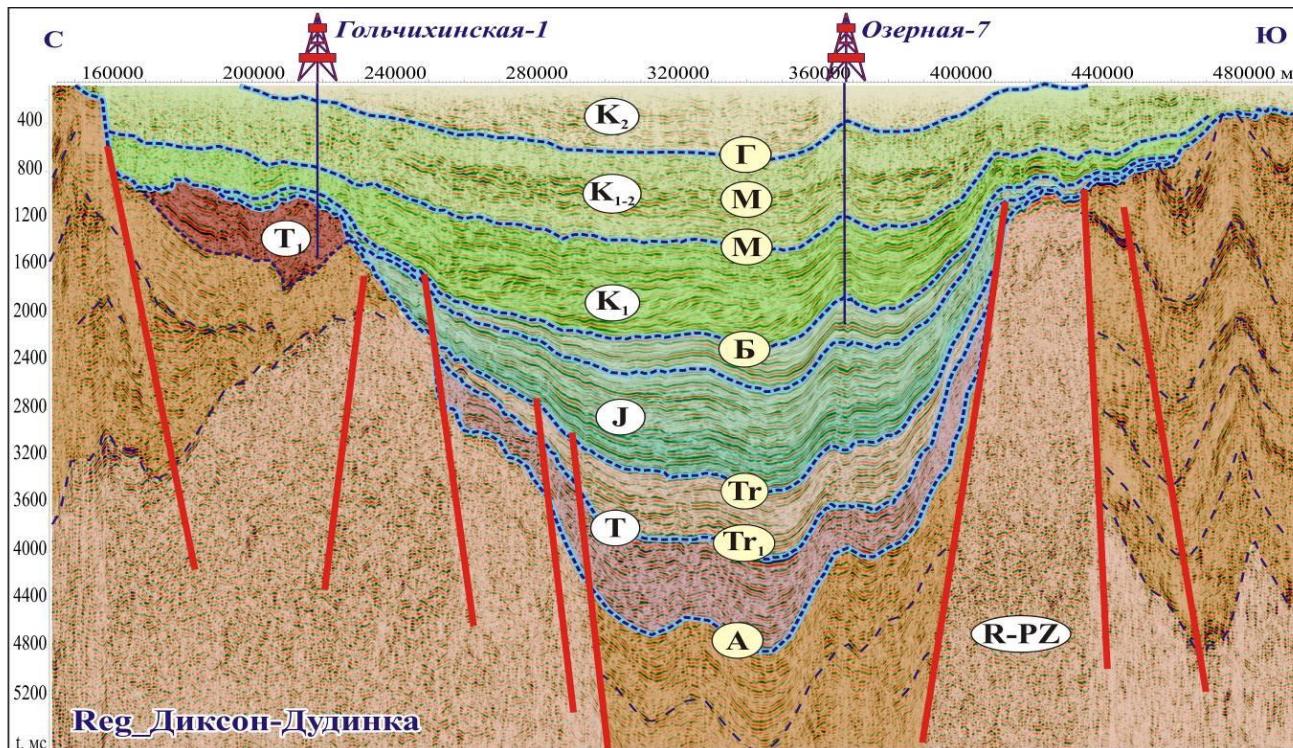


Рис. 9. Сейсмические образы триаса, сложенного терригенными породами и базальтами.

Если наша стратификация отражающего горизонта, приуроченного к подошве мезозоя—кровле палеозоя близка к реальной, то в осевой части Енисей-Хатангского регионального прогиба в разрезе палеозоя выделяется четыре сейсмокомплекса; в разрезе мезозоя – пять традиционных для Западной Сибири сейсмогеологических мегакомплексов – триасовый, юрский, неокомский (берриас-нижнеаптский), апт-альб-сеноманский и позднемеловой.

На сейсмических разрезах временные мощности палеозойских и мезозойских отложений достигают 5–6 с. При средних скоростях распространения продольных сейсмических волн 3.0–3.5 км/с в терригенных отложениях мезозоя и 4.5–5.5 км/с в терригенно-карбонатных отложениях палеозоя максимальные толщины мезозойского и неопротерозойско-палеозойского осадочных макрокомплексов Енисей-Хатангского регионального прогиба составляют 8–9 и 10–13 км соответственно; мощность осадочного чехла, залегающего на архейско-протерозойском фундаменте, 18–22 км.

Ранее отмечалось, что если в осевой части прогиба мезозойские сейсмокомплексы согласно перекрывают палеозой, то на южном и северном бортах прогиба, палеозой с перерывом перекрыт мезозойскими осадочными комплексами и в этих зонах в разрезе осадочного чехла выделяются два принципиально отличающихся по строению структурных яруса.

В частности, в южной части Енисей-Хатангского прогиба, на Усть-Портовском мегавыступе, Рассохинском мегавалу, Среднепясинском поднятии и т. д. выделяются инверсионные структуры – депрессиям, выделенным в рельефах палеозойских горизонтов, в структурных планах мезозойских комплексов отвечают контрастные поднятия (рис. 10).

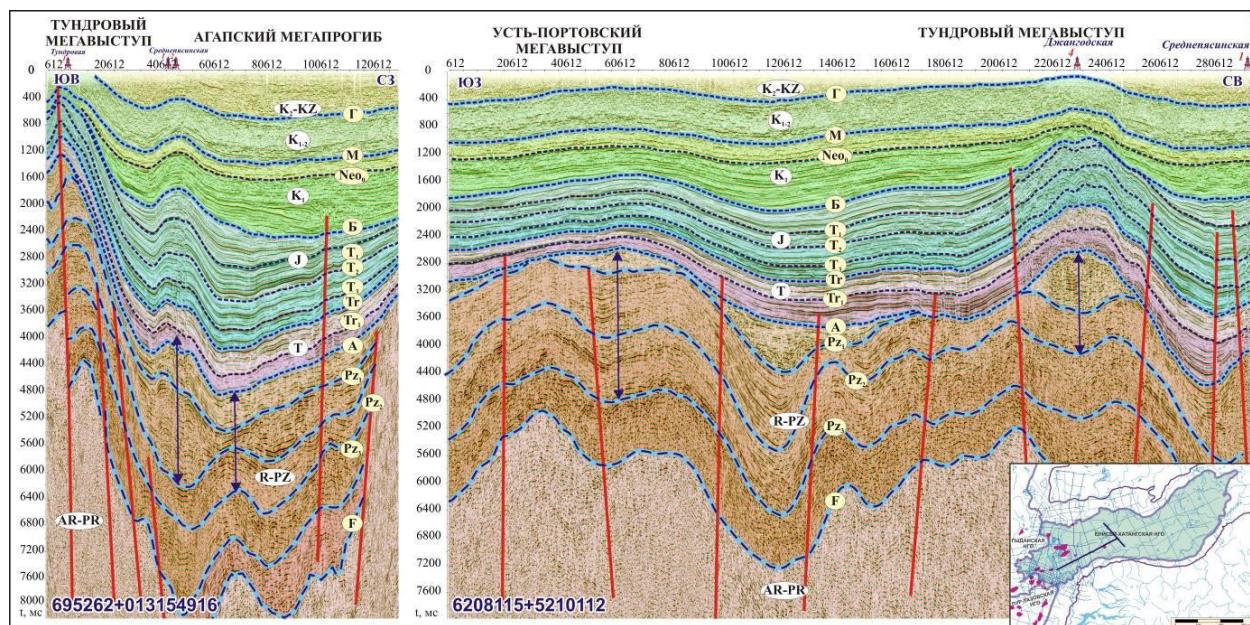


Рис. 10. Сейсмогеологическая характеристика инверсионных структур Енисей-Хатангского регионального прогиба.

Анализ геолого-геофизических материалов показал, что неопротерозойско-палеозойский комплекс платформенных отложений развит и на северо-востоке Западно-Сибирской геосинеклизы в Тагульско-Сузунской зоне, частично на полуострове Гыданский и в акватории Карского моря. Следует отметить, что на тектонической схеме Западной Сибири под редакцией В.С. Суркова в левобережье р. Енисей была выделена зона байкальской складчатости, охватывающая на севере эти территории [Сурков, Жеро, 1981].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа является составной частью крупного комплексного научного исследования по изучению геологического строения, оценке перспектив нефтегазоносности и уточнению ресурсного потенциала Сибирского сектора Арктической зоны России, которое выполняется в ИНГГ СО РАН на протяжении нескольких десятилетий. Статья посвящена построению согласованных сейсмогеологических моделей геологического строения платформенных отложений северных и арктических регионов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, которые в административном отношении охватывают северные районы Ямало-Ненецкого автономного округа, северо-запад Красноярского края и шельф южной части Карского моря.

В настоящее время на севере провинции к относительно хорошо изученным можно отнести апальб-сеноманские отложения, с которыми связаны уникальные газовые залежи Надым-Пурской, Пур-Тазовской, Ямальской, Гыданской и Южно-Карской НГО. К слабоизученным (недоизученным) следует отнести неокомские отложения, в которых в Западной Сибири сконцентрировано подавляющее большинство нефтяных залежей и которые являются наиболее перспективными в Енисей-Хатангской НГО.

Согласно выполненным в ИНГГ СО РАН и ВНИГНИ количественным оценкам значительный остаточный ресурсный потенциал арктических регионов Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции наряду с традиционными меловыми комплексами связан с глубокозалегающими юрскими и триасовыми отложениями, которые до настоящего времени остаются практически неизученными.

Обоснованные в настоящей работе принципы выделения отражающих горизонтов, формирующихся на границах юра-триас и триас-палеозой, региональные сейсмогеологические модели триасового и юрского мегакомплексов, а также верхнепротерозойско-палеозойских отложений Енисей-Хатангского регионального прогиба позволяют, на наш взгляд, уточнить структурные построения, более кондиционно оценить объем платформенных отложений и ресурсный потенциал осадочных мегакомплексов и суббассейнов в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Бочкарев В.С., Брехунцов А.М., Кочергин М.О., Нестеров И.И. (мл), Огнев Д.А.** Особенности геологического строения зоны сочленения Карского моря и Гыданского полуострова и прогноз ее нефтегазоносности // Горные ведомости. 2010. № 10. С. 6–18. EDN:QAWWRH.
- Геология нефти и газа Западной Сибири / Ред. А.Э. Конторович, И.И. Нестеров, Ф.К. Салманов, В.С. Сурков, А.А. Трофимук, Ю.Г. Эрвье.** М.: Недра, 1975. 679 с.
- Гуары Ф.Г., Гурова Т.Н., Казаринов В.П., Конторович А.Э., Нестеров И.И., Перозио Г.Н., Прозорович Г.Э., Ростовцев Н.Н., Сорокина Е.Г.** Литолого-геохимические факторы формирования и размещения залежей нефти и газа в мезозойских отложениях Западно-Сибирской плиты // Материалы по литологии и геохимии нефтегазоносных бассейнов Сибири. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1968. С. 5–10.
- Казаков А.М., Константинов А.Г., Курушин Н.И., Могучева Н.К., Соболев Е.С., Фрадкина А.Ф., Ядренкин А.В., Девятов В.П., Смирнов Л.В.** Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Триасовая система. Новосибирск: СО РАН, филиал «ГЕО», 2002. 322 с.
- Карогодин Ю.Н.** Ритмичность и осадконакопления и нефтегазоносность. М.: Недра, 1974. 196 с.
- Конторович А.Э., Фотиади Э.Э., Демин В.И., Леонтович В.Б., Растворин А.А.** Прогноз месторождений нефти и газа. М.: Недра, 1981. 350 с.
- Конторович В.А.** Мезозойско-кайнозойская тектоника и нефтегазоносность Западной Сибири // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 4. С. 461–474. EDN:JYJJRV.
- Конторович В.А., Конторович А.Э.** Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности шельфа Карского моря // Доклады академии наук. 2019. Т. 489, № 3. С. 272–276. doi:10.31857/S0869-56524893272-276. EDN:OTGEQG.
- Конторович В.А., Филиппов Ю.Ф.** Условия формирования и геологическое строение Енисей-Хатангского регионального прогиба // Геофизические технологии. 2021. № 4. С. 16–25. doi:10.18303/2619-1563-2021-4-16. EDN:JGQMCJ.
- Конторович В.А., Беляев С.Ю., Конторович А.Э., Красавчиков В.О., Конторович А.А., Супруненко О.И.** Тектоническое строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 11–12. С. 1832–1845. EDN:USJNNL.
- Конторович В.А., Аюнова Д.В., Губин И.А., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Конторович А.Э., Малышев Н.А., Скворцов М.Б., Соловьев М.В., Сурикова Е.С.** История тектонического развития арктических территорий и акваторий Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 3–4. С. 423–444. doi:10.15372/GiG20170307. EDN:YIREQF.
- Стратиграфический кодекс России.** Издание третье, исправленное и дополненное. СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2019. 96 с.
- Сурков В.С., Жеро О.Г.** Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. М.: Недра, 1981. 143 с.

REFERENCES

- Bochkarev V.S., Brekhuntsov A.M., Kochergin M.O., Nesterov I.I. (Jr), Ognev D.A.** Features of the geological structure of the junction zone of the Kara Sea and the Gydan Peninsula and the forecast of its oil and gas potential // Gornye Vedomosti. 2010. No. 10. P. 6–18. (In Russ.).
- Gurari F.G., Gurova T.N., Kazarinov V.P., Kontorovich A.E., Nesterov I.I., Perozio G.N., Prozorovich G.E., Rostovtsev N.N., Sorokina E.G.** Lithological and geochemical factors of formation and placement of oil and gas deposits in Mesozoic sediments of the West Siberian plate // Materials on lithology and geochemistry of oil and gas basins of Siberia (In Russ.). SNIIGGiMS, Novosibirsk, 1968. P. 5–10.
- Kazakov A.M., Konstantinov A.G., Kurushin N.I., Mogucheva N.K., Sobolev E.S., Fradkina A.F., Yadrenkin A.V., Devyatov V.P., Smirnov L.V.** Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. Triassic system (In Russ.). GEO, Novosibirsk, 2002. 322 p.
- Karogodin Yu.N.** Rhythmicity and precipitation and oil and gas bearing capacity (In Russ.). Nedra, Moscow, 1974. 196 p.
- Kontorovich A.E., Fotiadi E.E., Demin V.I., Leontovich V.B., Rastegin A.A.** Oil and gas reservoir forecasting (In Russ.). Nedra, Moscow, 1981. 350 p.
- Kontorovich V.A.** The Meso-Cenozoic tectonics and petroleum potential of West Siberia // Russian Geology and Geophysics. 2009. Vol. 50 (4). P. 346–357. doi:10.1016/j.rgg.2009.03.012.
- Kontorovich V.A., Kontorovich A.E.** Geological structure and petroleum potential of the Kara Sea Shelf // Doklady Earth Sciences. 2019. Vol. 489 (1). P. 1289–1293. doi:10.1134/S1028334X19110229.
- Kontorovich V.A., Philippov Yu.F.** Formation conditions and geological structure of the Yenisei-Khatanga regional through // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2021. No. 4. P. 16–25. doi:10.18303/2619-1563-2021-4-16. (In Russ.).
- Kontorovich V.A., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.E., Krasavchikov V.O., Kontorovich A.A., Suprunenko O.I.** Tectonic structure and history of evolution of the West Siberian geosyncline in the Mesozoic and Cenozoic // Russian Geology and Geophysics. 2001. Vol. 42 (11–12). P. 1832–1845.
- Kontorovich V.A., Ayunova D.V., Gubin I.A., Kalinin A.Yu., Kalinina L.M., Kontorovich A.E., Malyshev N.A., Skvortsov M.B., Solov'ev M.V., Surikova E.S.** Tectonic evolution of the Arctic onshore and offshore regions of the West Siberian petroleum province // Russian Geology and Geophysics. 2017. Vol. 58 (3–4). P. 343–361. doi:10.1016/j.rgg.2016.09.010.
- Stratigraphic** code of Russia. Third edition, revised and supplemented (In Russ.). VSEGEI, St. Petersburg, 2019. 96 p.
- Surkov V.S., Zhero O.G.** Foundation and development of the platform cover of the West Siberian Plate (In Russ.). Nedra, Moscow, 1981. 143 p.
- The Geology** of oil and gas of Western Siberia / Eds. A.E. Kontorovich, I.I. Nesterov, F.K. Salmanov, V.S. Surkov, A.A. Trofimuk, Yu.G. Hervier (In Russ.). Nedra, Moscow, 1975. 679 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТОРОВИЧ Владимир Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, член корреспондент РАН, главный научный сотрудник лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: комплексный анализ геолого-геофизических данных, построение моделей геологического строения месторождений нефти и

газа, выявление нефтегазоперспективных объектов, разработка геофизических методов поиска месторождений нефти и газа в различных осадочных комплексах Сибири; *KontorovichVA@ipgg.sbras.ru*, <https://orcid.org/0009-0007-3484-3769>.

АЮНОВА Дарья Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: сейсмогеологическая и структурно-тектоническая характеристики, нефтегазоносность мезозойско-кайнозойского комплекса Западной Сибири; *KontorovichDV@ipgg.sbras.ru*, <https://orcid.org/0009-0004-3638-8147>.

ИБРАГИМОВА Софья Михайловна – младший научный сотрудник лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: тектоническое строение, структурная характеристика, история тектонического развития, геологическое строение, перспективы нефтегазоносности мезозойско-кайнозойского комплекса арктических регионов Западной Сибири; *GusevaSM@ipgg.sbras.ru*, <https://orcid.org/0009-0000-5977-9758>.

КАЛИНИН Александр Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: разработка методических приемов картирования зон распространения и оценки качества коллекторов на базе комплексирования данных сейморазведки, ГИС и глубокого бурения; *KalininAY@ipgg.sbras.ru*, <https://orcid.org/0009-0007-0464-5980>.

КАЛИНИНА Людмила Михайловна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: анализ геологического строения, условия формирования и нефтегазоносность мезозойских и палеозойских отложений Западно-Сибирской геосинеклизы; *KalininaLM@ipgg.sbras.ru*, <https://orcid.org/0009-0003-5529-2928>.

СОЛОВЬЕВ Максим Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: комплексный анализ геолого-геофизических данных, построение моделей геологического строения месторождений нефти и газа, выявление нефтегазоперспективных объектов, разработка геофизических методов поиска месторождений нефти и газа в различных осадочных комплексах Сибири.

ФИЛИППОВ Юрий Федорович – доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории сейсмогеологического моделирования природных нефтегазовых систем ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: региональная геология Западной и Восточной Сибири, интерпретация геофизических данных и построение моделей геологического строения, изучение тектонической природы докембрийских и палеозойских комплексов, оценка перспектив их нефтегазоносности; *PhilipovYF@ipgg.sbras.ru*, <https://orcid.org/0000-0002-3316-9318>.

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2025 г.,
одобрена после рецензирования 18 декабря 2025 г.,
принята к публикации 19 декабря 2025 г.