



ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ СРЕДЫ ПО ВРЕМЕНАМ ПЕРВЫХ ВСТУПЛЕНИЙ

Г.М. Митрофанов^{1,2,3,✉}, Г.С. Чернышов^{1,2}, А.М. Камашев^{1,2}, А.А. Никитин^{1,2}, Е.В. Мосягин⁴

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,

³Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20, Россия,

⁴Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,

630091, Новосибирск, Красный просп., 67, Россия,

✉ Георгий Михайлович Митрофанов, MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4203-2740>

Аннотация. Приведены результаты тестирования алгоритма и созданного на его основе программного модуля. Алгоритм позволяет построить скоростную модель верхней части разреза по временам первых вступлений сейсмических сигналов, относящихся к рефрагированным волнам. В модуле реализовано две возможности определения времен, используемых при решении целевой задачи. Первая предполагает определение времен перед работой модуля. Вторая реализует автоматическое снятие времен по исходным сейсмограммам с применением нейронных сетей.

Ключевые слова: скоростная модель среды, сейсморазведка, времена первых вступлений, сейсмическая томография, учет скоростных вариаций в верхней части разреза

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания по проекту FWZZ-2022-0017.

Для цитирования: Митрофанов Г.М., Чернышов Г.С., Камашев А.М., Никитин А.А., Мосягин Е.В. Тестирование алгоритма определения скоростной модели верхней части среды по временам первых вступлений // Геофизические технологии. 2024. № 2. С. 4–16. doi:10.18303/2619-1563-2024-2-4.

TESTING THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE VELOCITY MODEL OF THE UPPER PART OF THE MEDIUM BASED ON THE FIRST TIMES ARRIVALS

G.M. Mitrofanov^{1,2,3,✉}, G.S. Chernyshov^{1,2}, A.M. Kamashev^{1,2}, A.A. Nikitin^{1,2}, E.V. Mosyagin⁴

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

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

³Novosibirsk State Technical University, K. Marks Ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia,

⁴Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Krasny Ave., 67, Novosibirsk, 630091, Russia,

✉ Georgy M. Mitrofanov, MitrofanovGM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4203-2740>

Abstract. The results of testing the algorithm and the software module created on its basis are presented. The algorithm allows us to build a velocity model of the medium upper part using the times of the first arrivals of seismic signals related to refracted waves. The module implements two possibilities of these times determination. The first involves determining the times before the module is starting. The second implements the automatic determination of such times from the original seismograms using neural networks.

Keywords: velocity model of medium, seismic exploration, first arrival times, seismic tomography, accounting for velocity variations in the upper part of the section

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: Mitrofanov G.M., Chernyshov G.S., Kamashev A.M., Nikitin A.A., Mosyagin E.V. Testing the algorithm for determining the velocity model of the upper part of the medium based on the first times arrivals // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 2. P. 4–16. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-2-4.

ВВЕДЕНИЕ

Тестируемый модуль может быть использован на различных этапах обработки от первичного анализа исходной сейсмической информации до построения окончательной глубинно-скоростной модели (ГСМ) среды. Он обладает замкнутостью по отношению к решаемой задаче. Постановка задачи в сейсмогеологическом контексте формулируется как определение скоростного строения верхней части разреза (ВЧР) для компенсации его влияния на сейсмические данные, полученные при проведении сейсморазведочных работ. Таким образом, с математической позиции мы имеем дело с обратной задачей, где всегда присутствуют данные и модель, а также некоторый метод перехода от данных к параметрам модели. Указанная выше замкнутость модуля определяется возможностью получения данных, которыми являются времена первых вступлений волн с их контролем качества, и последующим решением обратной задачи для получения скоростной модели среды.

Отметим, что рассматриваемая обратная задача является одной из наиболее традиционных в области сейсмических методов изучения Земли, начиная с работ Герглотца и Вихерта [Herglotz, 1907; Wiechert, 1910]. На ее решение были направлены усилия многих исследователей. Не останавливаясь на различных подходах, предлагавшихся для ее решения, укажем, что можно выделить два больших направления в этих подходах, которые опираются на сейсмические данные, наблюдаемые на поверхности. Первое направление использует информацию, содержащуюся во временах приходов отраженных волн, а второе использует времена первых вступлений волн. Второе направление является для нас основополагающим. Оно используется для решения широкого круга сейсмических задач: от построения моделей земной коры методами глубинного сейсмического зондирования [Селезнев, 1977; Соловьев, 1989] до картирования археологических объектов. Также важной задачей является построение неоднородных скоростных моделей верхней части разреза (ВЧР) при обработке данных сейсморазведки методом МОВ-ОГТ [Сысоев, 2011].

Основными методами построения скоростного разреза по данным времен первых вступлений являются: метод прямого лучевого моделирования [Беляшов и др., 2013], метод полей времен [Епинатьева и др., 1990], метод T0` в различных вариациях [Пузырев, 1992; Yilmaz, 2001], метод лучевой томографии [Koulakov, 2009; Seismic tomography..., 2012]. Методы имеют свои особенности и ограничения. В последние несколько десятилетий наблюдается значительное увеличение объема получаемых сейсморазведочных данных и, как следствие, возникает необходимость автоматизации методов их обработки. На этом уровне важным моментом является автоматическое снятие времен первых вступлений сейсмических сигналов. Здесь значительное развитие получают методы, использующие нейронные сети [Loginov et al., 2022].

СТРУКТУРА АЛГОРИТМА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ

В решении любой обратной задачи существенную роль играют данные, которые являются входными для алгоритма инверсии. При реализации модуля построения скоростной модели ВЧР (UPmod) авторы стремились обеспечить гарантированное качество входных данных, что является одним из важнейших элементов современных технологий мирового уровня. В структуре разработанного алгоритма реализовано объединение наиболее распространенных подходов к построению скоростной модели ВЧР. В частности, выделены два ключевых этапа: (1) пикировка времен первых вступлений и (2) инверсия полученных времен. Для автоматизации и ускорения этапа подготовки данных на первом этапе применялись нейронные сети, а на втором этапе использовался метод лучевой сейсмической томографии, разработанный в ИНГГ СО РАН [Nikitin et al., 2018; Чернышов и др., 2021, 2022; Chernyshov et al., 2022]. Объединение указанных этапов представлено блок-схемой, изображенной на рис. 1.

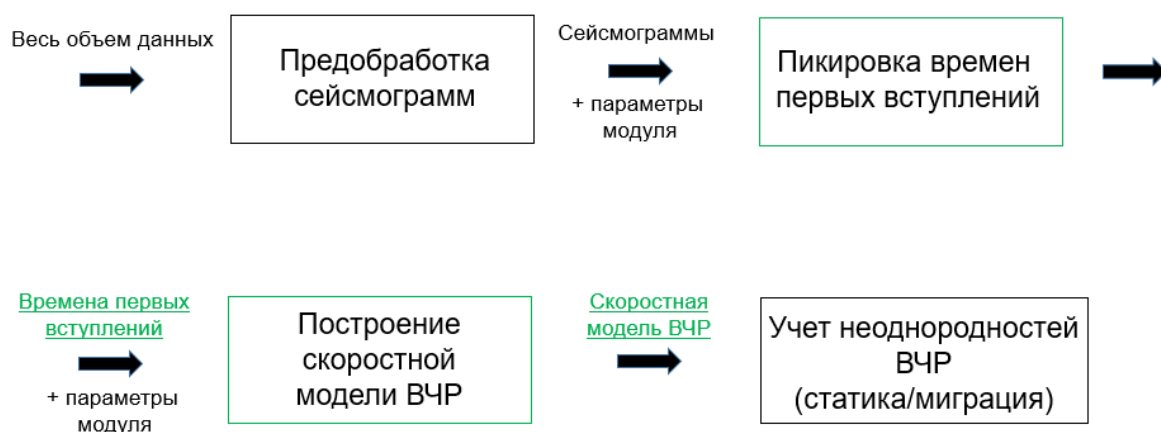


Рис. 1. Блок-схема применения автоматического пикировщика и лучевой томографии.

Согласно схеме, исходными данными алгоритма являются сейсмограммы; для устойчивости пикировки данные могут быть предобработаны (подавление шума/приведение к мин-фазовому виду). Лучевая томография будет принимать совокупность годографов по набору данных. Основным результатом применения двух методов становится сеточная скоростная модель ВЧР.

Кратко остановимся на алгоритме автоматической пикировки первых вступлений. В его основе лежит метод машинного обучения – сверточные нейронные сети [Logipov et al., 2019, 2022]. Для обучения нейронной сети были использованы 20 тыс. трасс с пикировкой из данных по восточной Сибири.

Алгоритм пикировки времен первых вступлений включает следующие этапы:

1. Потрассное применение сверточной нейронной сети для получения вероятности первого вступления для каждого отсчета.
2. Обнуление детектирующей функции на интервале времени меньше годографа прямой волны с эффективной скоростью заданной пользователем.
3. Выбор отсчета с максимальной вероятностью как время первого вступления.
4. Отбраковка выбросов.

Входом последующего алгоритма томографической инверсии являются:

- времена первых вступлений в формате: координата ПВ (x, y, z), координаты ПП (x, y, z), время первого вступления;
- количество итераций томографической инверсии;
- размер дискретизации модели (по x, y, z), для решения обратной задачи;
- параметр гладкости сеточной модели по горизонтали;
- параметр гладкости сеточной модели по вертикали;
- параметры градиента в начальной скоростной модели, значения скорости на отметках глубины $V(z)$.

Выходом алгоритма является сеточная скоростная модель с шагом дискретизации, заданным пользователем.

Как было указано выше, в модуле UPmod реализовано объединение двух указанных алгоритмов. В то же время алгоритмы могут быть разделены на уровне работы модуля. Поэтому модуль может быть использован только для построения скоростной модели, если времена первых вступлений были определены другим программным средством. Аналогично модуль может быть использован только для определения первых вступлений волн с построением скоростной модели другим программным средством.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ МОДУЛЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПИКIROВКИ

Набор данных был сформирован сотрудниками АО «СНИИГГиМС». Он представлял собой набор сейсмограмм 2D профиля и предварительную пикировку первых вступлений «по фазе» (default_picks). Данные в среднем хорошего качества, но присутствует высокоамплитудный шум сторонних источников (рис. 2). Ко всему набору был применен алгоритм автоматической пикировки первых вступлений (рис. 3), эффективная скорость задана 8000 м/с.

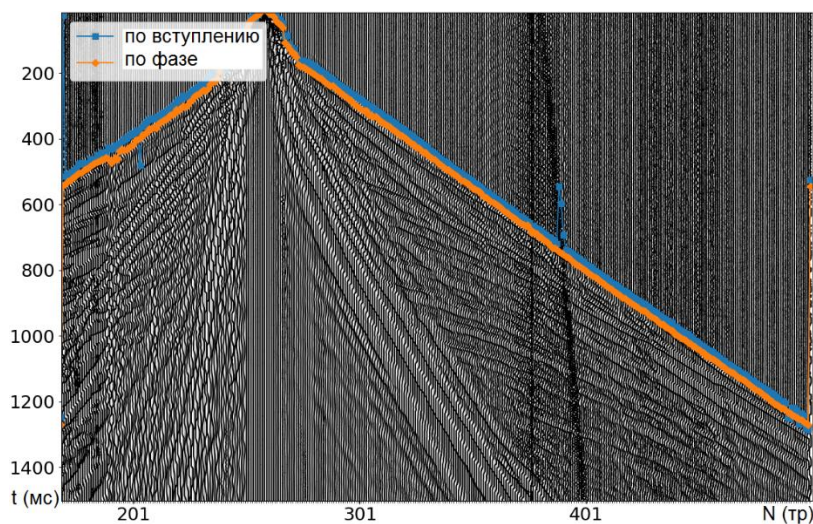


Рис. 2. Пример сейсмограммы с нанесенными временами первых вступлений, синим – времена ИНГГ СО РАН, оранжевым – времена АО «СНИИГГиМС».

Для детального сравнения результатов прослеживания времен первых вступлений преломленных волн, выполненных с применением алгоритмов ИНГГ СО РАН и АО «СНИИГГиМС», на рис. 3 показаны небольшие участки обрабатываемой сейсмограммы. Видно, что в значительном числе случаев алгоритмы

дают близкие значения с учетом некоторого постоянного смещения, определяемого фазовой разницей. В то же время в алгоритме ИНГГ СО РАН возникают некоторые выбросы, вызванные изменением формы первого вступления или помехой (см. правую часть рис. 3).

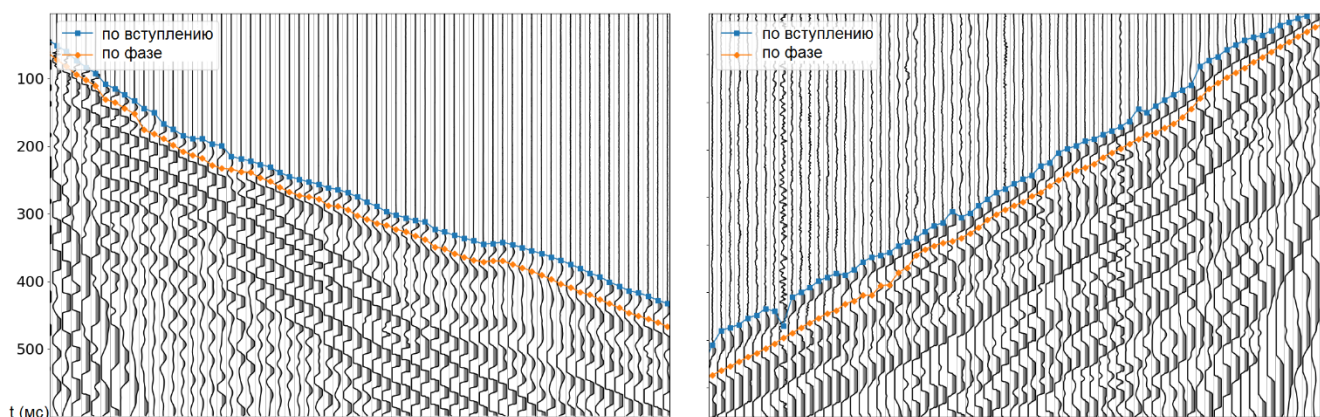


Рис. 3. Два участка сейсмограммы с нанесенными временами первых вступлений: синим – времена ИНГГ СО РАН, оранжевым – времена АО «СНИИГГиМС».

Для отбраковки ошибочно определяемых времен был задан интервал, вне которого времена считались выбросами (рис. 4). Общий набор данных включал 149 524 трасс. При этом выбросы составили 5000 значений (4.5 %).

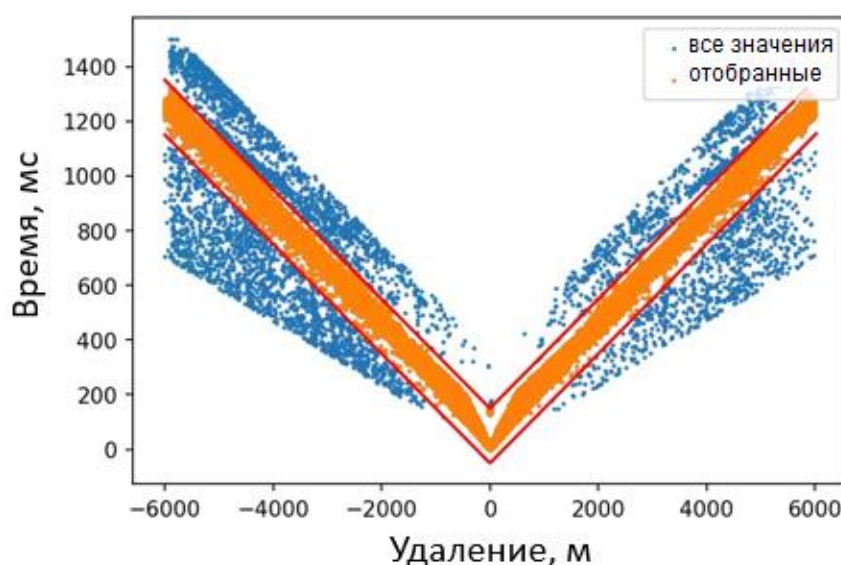


Рис. 4. Кросс-плот времен первых вступлений ИНГГ СО РАН, красным – доверительный интервал, синим – выбросы, оранжевым – времена первых вступлений после отбраковки.

Для анализа получаемых выбросов был выполнен статистический анализ результатов пикировки. Он включал определение вероятностных характеристик основных времен, которые в дальнейшем использовались для построения скоростной модели верхней части разреза, а также статистических характеристик выбросов, которые возникали при автоматической пикировке. На рисунке 5 показана гистограмма распределения выбросов относительно удаления. Ее структура имеет сложный, не унимодальный и не симметричный вид.

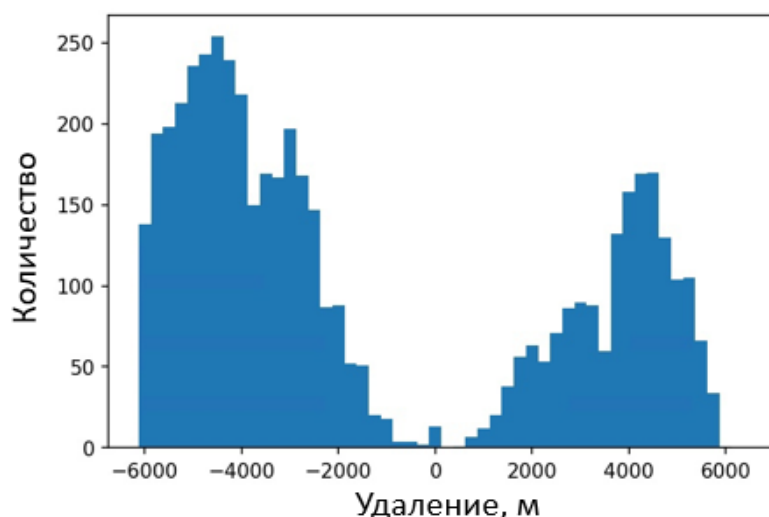


Рис. 5. Гистограмма распределения количества выбросов от удаления (пикировка ИНГГ СО РАН).

Одним из способов повышения стабильности пикировки нейронными сетями является дообучение на актуальных данных. Было проведено обучение на 40 тыс. трасс из предоставленного набора с устойчивыми временами вступлений. Дообучение привело к сокращению количества выбросов в 2.5 раза, но понизилась точность пикировки на ближних удалениях (рис. 6, справа). Поэтому было решено использовать пикировку без дообучения. Решением проблемы стало включение в дообучающую выборку больше трасс ближних удалений. Более устойчивой пикировке будет способствовать и предобработка сейсмограмм, несмотря на то что полосовая фильтрация изменяет форму сигнала первых вступлений, такая погрешность может быть допустимой.

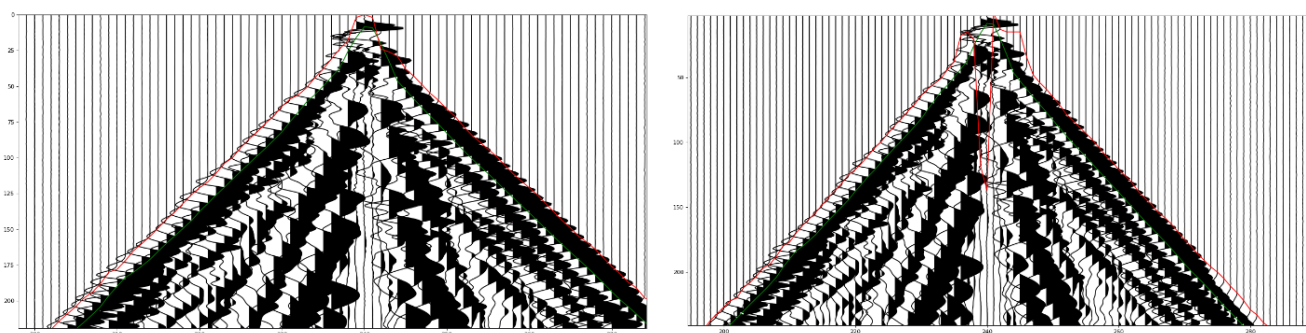


Рис. 6. Сейсмограммы с временами первых вступлений, слева без дообучения, справа с дообучением, красным – пикировка первых вступлений.

Пикировка АО «СНИИГГиМС» по фазе более устойчива (меньше выбросов) (рис. 7), но такая пикировка не учитывает длину волны и имеет постоянное смещение, что может приводить к ошибкам определения скоростей. Константный сдвиг сильно сказывается на оценке скорости прямой волны в верхнем слое и существенно занижает ее значения.

Была построена гистограмма разницы пикировки ИНГГ СО РАН и АО «СНИИГГиМС» (рис. 8). Отмечается постоянный сдвиг с некоторыми вариациями, связанными с изменением длины волны от удаления.

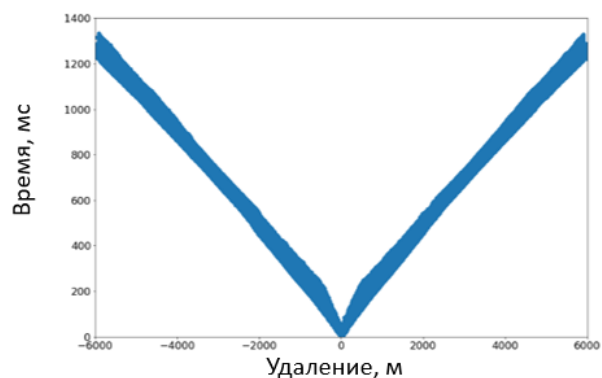


Рис. 7. Кросс-плот времен первых вступлений АО «СНИИГГиМС».

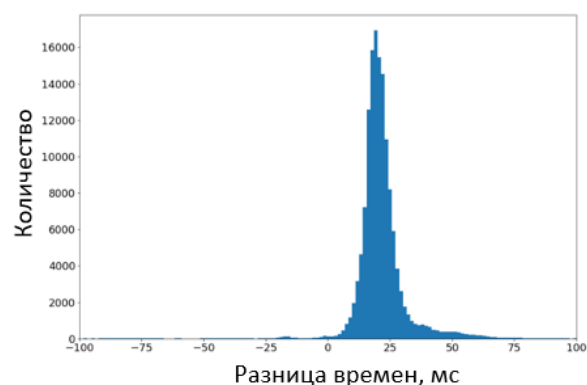


Рис. 8. Гистограмма разницы времен первых вступлений АО «СНИИГГиМС»–ИНГГ СО РАН.

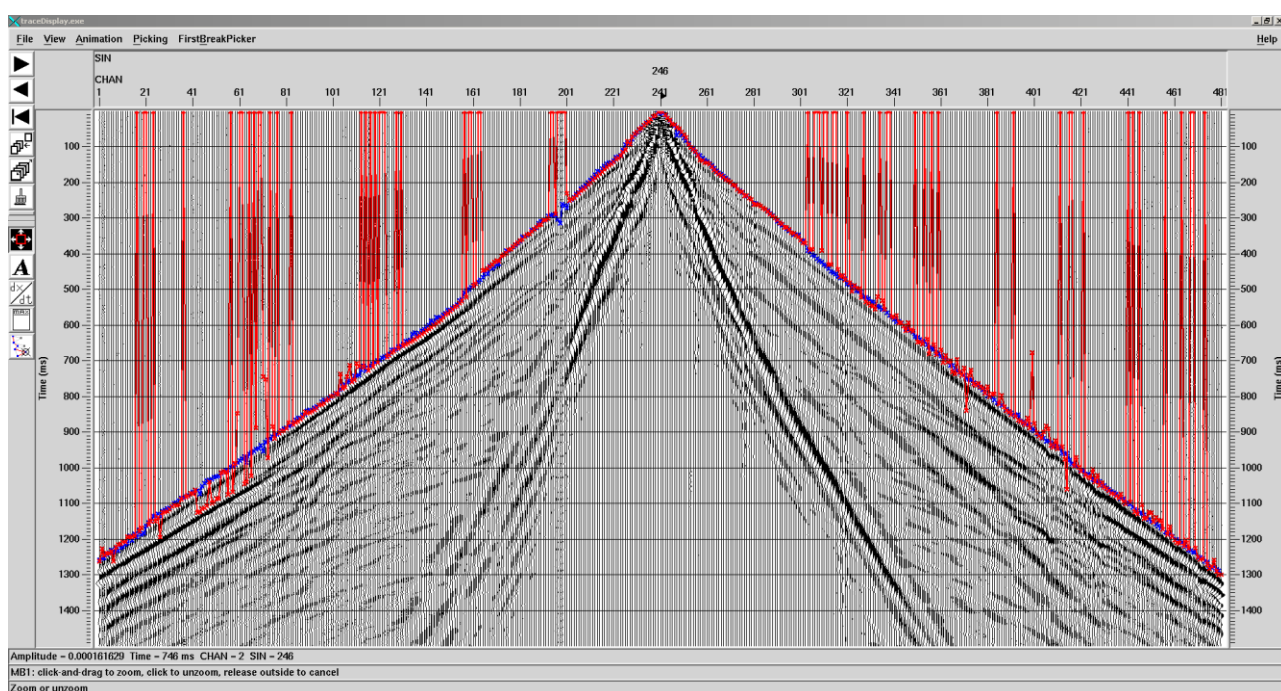


Рис. 9. Сейсмограмма с временами первых вступлений, красным – пикировка ИНГГ СО РАН (с нулевыми значениями в области автоматической отбраковки некорректных пиков), синим – пикировка АО «СНИИГГиМС» «по срыву».

Сотрудниками АО «СНИИГГиМС» была получена пикировка первых вступлений по срыву методом автоматической пикировки без использования нейронных сетей (рис. 9). Такая пикировка позволяет получить более устойчивый результат. Но метод будет неприменим к данным худшего качества. На рисунке 9 приведен пример сейсмограммы с большим количеством выбросов пикировки ИНГГ СО РАН.

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ СКОРОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ

В рамках тестирования были получены две модели: по пикировке АО «СНИИГГиМС» «по фазе», по пикировке ИНГГ СО РАН. Также имелась скоростная модель ВЧР, построенная в АО «СНИИГГиМС» в пакете TomoPlus (GeoTomo) по временам АО «СНИИГГиМС» «по фазе». Для расчета 2D модели было необходимо рассчитать координату вдоль профиля. Профиль имеет два изгиба (рис. 10), координата рассчитывалась вдоль линии приемников без дополнительного сглаживания.

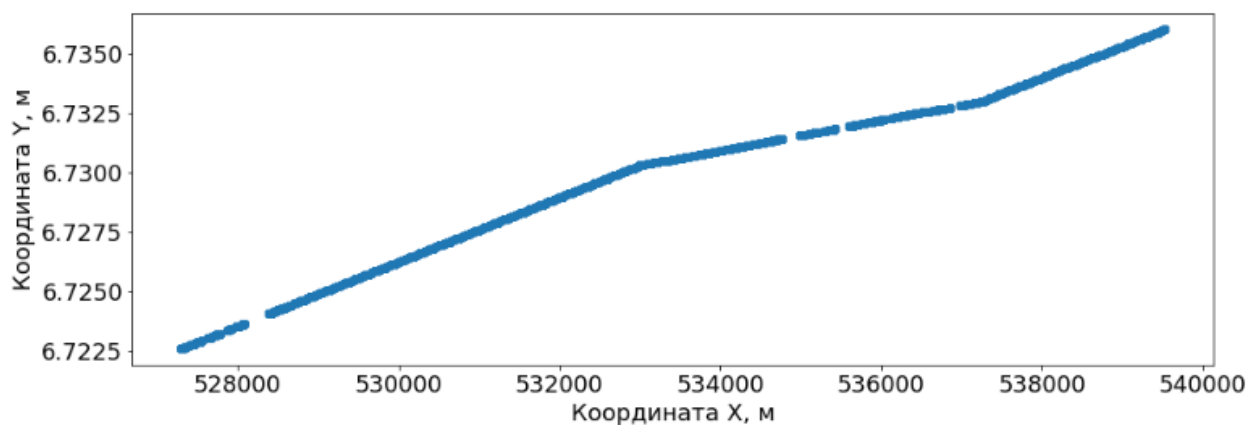


Рис. 10. Положение приемников на профиле.

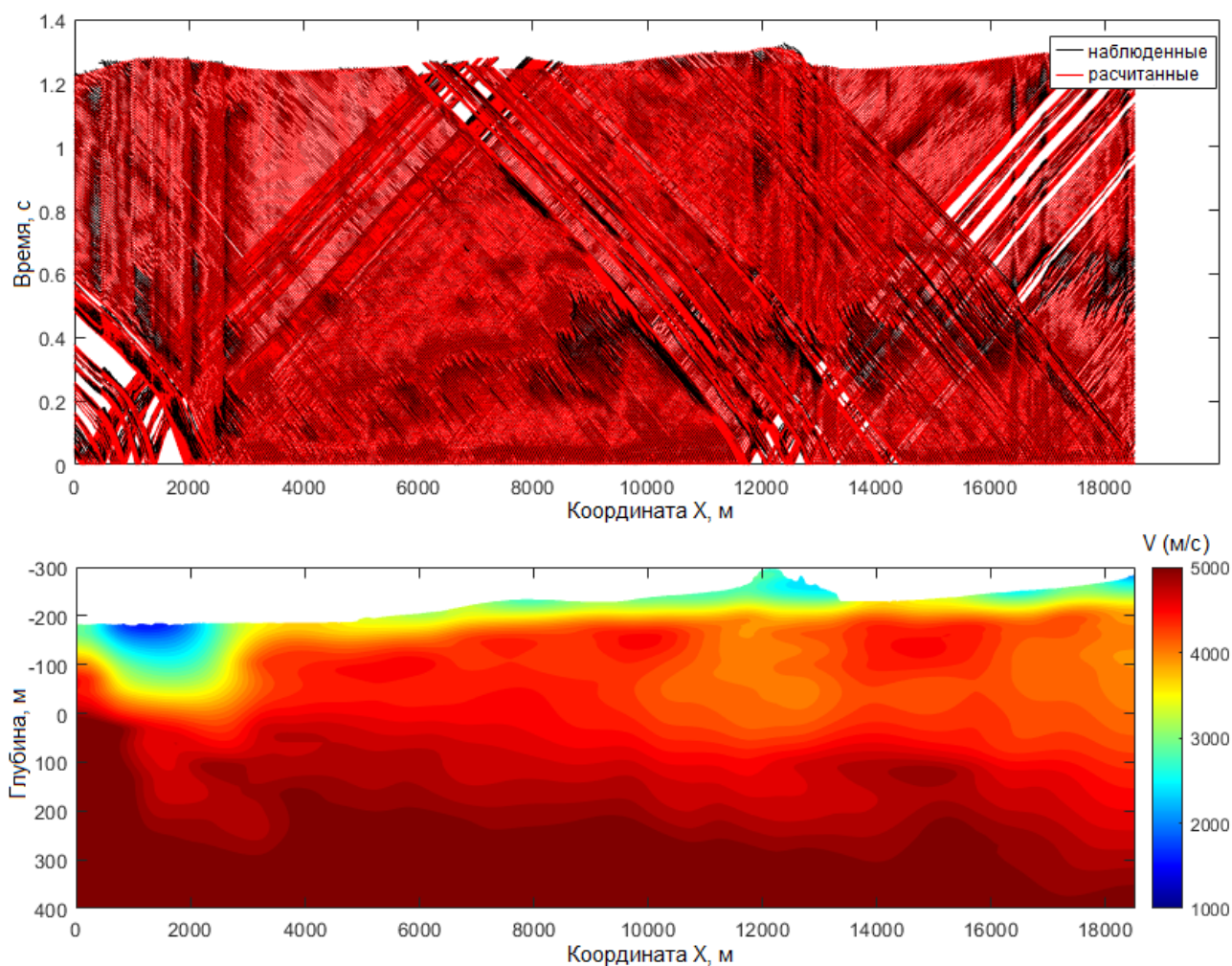


Рис. 11. Результат применения метода лучевой томографии, пикировка АО «СНИИГГиМС», совокупность годографов сверху, скоростная модель снизу.

Была выполнена томографическая инверсия со следующими входными параметрами:

- времена первых вступлений – АО «СНИИГГиМС»;
- количество итераций томографической инверсии – 10;
- размер дискретизации модели – $dx = 5$ м, $dy = 1$ м;
- параметр гладкости сеточной модели по горизонтали – 2;

- параметр гладкости сеточной модели по вертикали – 2.5;
- параметры градиента в начальной скоростной модели: минимальная скорость – 1000 м/с, градиент до высоты 100 м составлял 13.2 м/с на 1 м, ниже высоты 100 м градиент 3.5 м/с на 1 м.

В результате была получена скоростная модель (нижняя часть рис. 11) и совокупность годографов, рассчитанных по модели (верхняя часть рис. 11). Среднеквадратичная невязка наблюдаемых и рассчитанных в модели времен составила 4 мс.

Для контроля качества получаемой модели важным шагом является визуализация покрытия модели лучами рефрагированных волн (рис. 12).

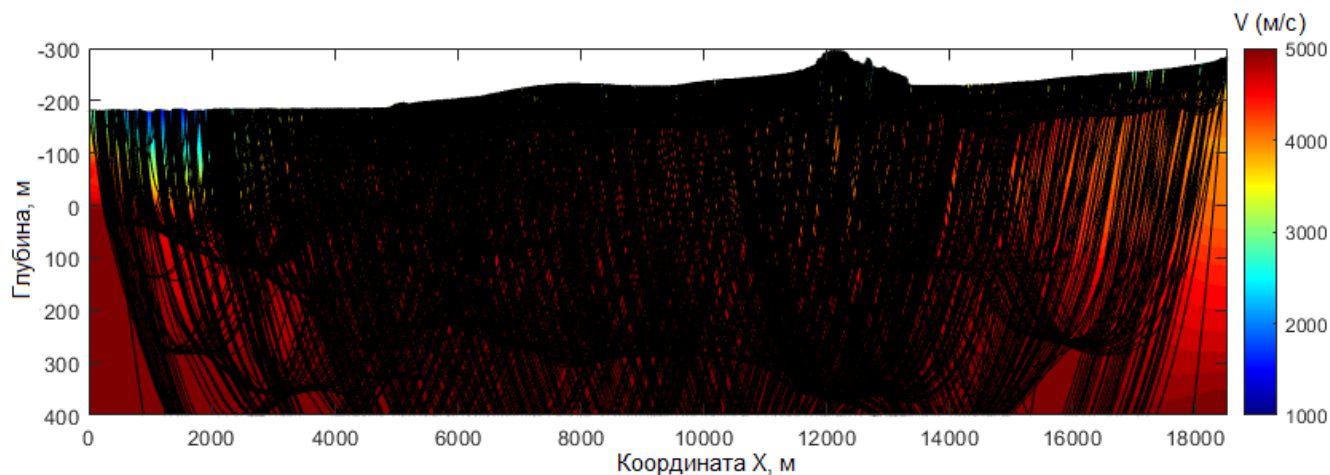


Рис. 12. Траектории лучей рефрагированных волн в полученной модели.

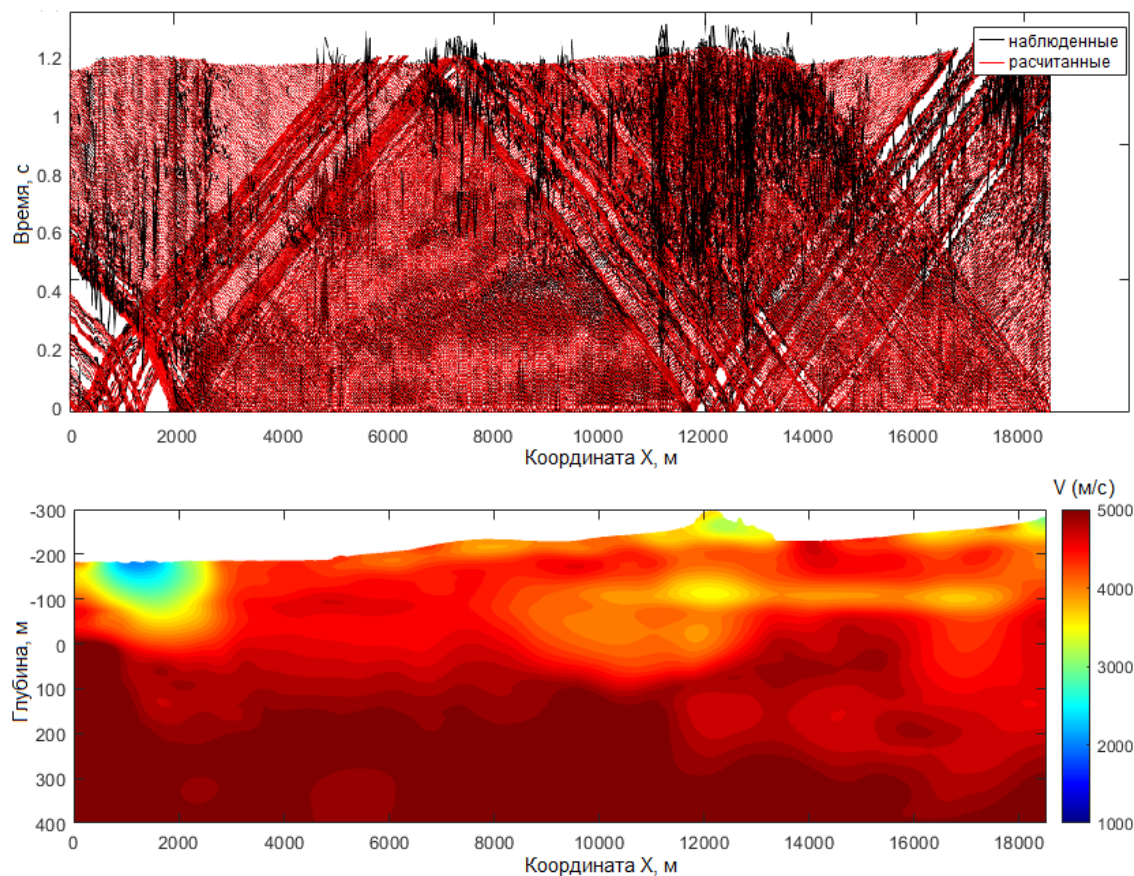


Рис. 13. Результат применения метода лучевой томографии, пикировка ИНГГ СО РАН, совокупность годографов сверху, скоростная модель снизу.

Была построена вторая скоростная модель с входными параметрами:

- времена первых вступлений – ИНГГ СО РАН;
- количество итераций томографической инверсии – 15;
- размер дискретизации модели – $dx = 5$ м, $dy = 1$ м;
- параметр гладкости сеточной модели по горизонтали – 2;
- параметр гладкости сеточной модели по вертикали – 1.5;
- параметры градиента в начальной скоростной модели: минимальная скорость – 1000 м/с, градиент до высоты 100 м составлял 13.2 м/с на 1 м, ниже высоты 100 м градиент 3.5 м/с на 1 м.

При ее построении было решено уменьшить гладкость модели по вертикали для получения более детального строения ВЧР (рис. 13). Для этой модели была получена среднеквадратичная невязка времен по снятым и рассчитанным годографам первых вступлений. Она составила 6.4 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предварительные результаты выполненного тестирования показывают, что разработанный модуль обладает значительным потенциалом и может выступать в качестве импортозамещающего элемента в программных комплексах. При тестировании также были определены важные особенности автоматических методов пикировки, которые требуется учесть при дальнейшем развитии алгоритма. В частности, для пикировки «по фазе» были отмечены проблемы, связанные с краевыми зонами, что приводит к проигрышу алгоритма по сравнению с ПО TomoPlus. Кроме того, реализованная пикировка нейронными сетями требует дообучения на актуальном наборе данных. В этом случае, как показывает практика, она лучше отрабатывает на плохих данных, чем методы автоматической пикировки. Все выявленные особенности и недостатки могут быть устранены на уровне развития алгоритмов.

Дальнейшие шаги по тестированию модуля предполагается выполнить на уровне определения статических поправок и применения построенных скоростных моделей в процедурах миграции. При выполнении тестирования будет проводиться сопоставление получаемых временных и глубинных разрезов, выступающих в роли критериев качества получаемых моделей ВЧР.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Беляшов А.В., Суворов В.Д., Мельник Е.А.** Сейсмическое изучение верхней части разреза на участке Семипалатинского ядерного испытательного полигона // Технологии сейсморазведки. 2013. № 3. С. 64–75.
- Епинатьева А.М., Голошубин Г.М., Литвин А.П., Павленкин А.Д., Петрашень Г.И., Старобинец А.Е., Шнеерсон М.Б.** Метод преломленных волн / Под ред. А.М. Епинатьевой. М.: Недра, 1990. 296 с.
- Пузырев Н.Н.** Методы сейсмических исследований. Новосибирск: Наука, 1992. 236 с.
- Селезнев В.С.** К интерпретации временных полей преломленных волн в случае многослойных сред // Геология и геофизика. 1977. № 4. С. 93–105.
- Соловьев В.М.** Повышение информативности глубинных сейсмических исследований при использовании динамических характеристик P - и S -волн // Развитие вибросейсмических исследований земной коры в Сибири: Сб. научн трудов. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1989. С. 163–170.
- Сысоев А.П.** Прикладные задачи компенсации неоднородности верхней части разреза при обработке и интерпретации сейсмических данных. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2011. 90 с.

Чернышов Г.С., Горевачев Н.А., Матвеев А.С., Дучков А.А., Митрофанов Г.М., Литвиченко Д.А. Построение скоростной модели по данным рефрагированных волн для учета неоднородной ВЧР // Интеллектуальный анализ данных в нефтегазовой отрасли. Вторая региональная конференция EAGE в России и странах СНГ. Новосибирск, 2021. С. 1–5.

Чернышов Г.С., Дучков А.А., Логинов Г.Н., Литвиченко Д.А., Никитин А.А. Подход к построению слоистой скоростной модели верхней части разреза по данным времен первых вступлений // Нефтяное хозяйство. 2022. № 1. С. 26–31. doi:10.24887/0028-2448-2022-1-26-31.

Chernyshov G.S., Duchkov A.A., Koulakov I.Yu. Choosing optimal model parameterization for improving the accuracy of refraction seismic tomography // Near Surface Geophysics. 2022. Vol. 20 (2). P. 135–146. doi:10.1002/nsg.12196.

Herglotz G. Über das Benndorfsche Problem der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenstrahlen // Zeitschrift für Geophysik. 1907. Vol. 8. P. 145–147.

Koulakov I. Code PROFIT for forward modeling and tomographic inversion based on active refraction seismic profiling data. Novosibirsk, 2009. 46 p.

Loginov G., Duchkov A., Litvichenko D.A., Alyamkin S.A. The first-break detection for real seismic data with use of convolutional neural network // 81st EAGE Conference and Exhibition 2019. EAGE Publications BV, 2019. Vol. 2019. P. 1–5. doi:10.3997/2214-4609.201901614.

Loginov G.N., Duchkov A.A., Litvichenko D.A., Alyamkin S.A. Convolution neural network application for first break picking for land seismic data // Geophysical Prospecting. 2022. Vol. 70 (7). P. 1093–1115, doi:10.1111/1365-2478.13192.

Nikitin A.A., Serdyukov A.S., Duchkov A.A. Cache-efficient parallel eikonal solver for multicore CPUs // Computational Geosciences. 2018. Vol. 22. P. 775–787. doi:10.1007/s10596-018-9725-9.

Seismic tomography: with applications in global seismology and exploration geophysics / Nolet G. (Ed.). Vol. 5. Springer Science & Business Media, 2012. 385 p.

Wiechert E. Bestimmung des Weges der Erdbebenwellen im Erdinnern. I. Theoretisches // Zeitschrift für Physik. Vol. 11. P. 294–304.

Yilmaz Ö. Seismic data analysis. SEG, Tulsa, 2001. Vol. 1. 1809 p.

REFERENCES

Belyashov A.V., Suvorov V.D., Melnik E.A. Seismic study of the Semipalatinsk test site area near-surface section // Seismic Technologies. 2013. Vol. 3. P. 64–75.

Chernyshov G.S., Goreyavchev N.A., Matveev A.S., Litvichenko D.A., Duchkov A.A., Mitrofanov G.M. Velocity model determining on refracted wave data for accounting of variations in upper part of seismic-geological section // Data Science in Oil and Gas. 2nd Scientific and Practical Conference. Novosibirsk, 2021. P. 1–5.

Chernyshov G.S., Duchkov A.A., Loginov G.N., Litvichenko D.A., Nikitin A.A. An approach to constructing a layered near-surface velocity model based on the first break times // Oil Industry. 2022. Vol. 1. P. 26–31. doi:10.24887/0028-2448-2022-1-26-31.

Chernyshov G.S., Duchkov A.A., Koulakov I.Yu. Choosing optimal model parameterization for improving the accuracy of refraction seismic tomography // Near Surface Geophysics. 2022. Vol. 20 (2). P. 135–146. doi:10.1002/nsg.12196.

- Epinateva A.M., Goloshubin G.M., Litvin A.P., Pavlenkin A.D., Petrashen G.I., Starobinets A.E., Shneerson M.B.** Seismic refraction method [in Russian]. Nedra, Moscow, 1990. 296 p.
- Herglotz G.** Über das Benndorfsche Problem der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenstrahlen // Zeitschrift für Geophysik. 1907. Vol. 8. P. 145–147.
- Koulakov I.** Code PROFIT for forward modeling and tomographic inversion based on active refraction seismic profiling data. Novosibirsk, 2009. 46 p.
- Loginov G.N., Duchkov A.A., Litvichenko D.A., Alyamkin S.A.** Convolution neural network application for first break picking for land seismic data // Geophysical Prospecting. 2022. Vol. 70 (7). P. 1093–1115, doi:10.1111/1365-2478.13192.
- Loginov G., Duchkov A., Litvichenko D.A., Alyamkin S.A.** The first-break detection for real seismic data with use of convolutional neural network // 81st EAGE Conference and Exhibition 2019. EAGE Publications BV, 2019. Vol. 2019. P. 1–5. doi:10.3997/2214-4609.201901614.
- Nikitin A.A., Serdyukov A.S., Duchkov A.A.** Cache-efficient parallel eikonal solver for multicore CPUs // Computational Geosciences. 2018. Vol. 22. P. 775–787. doi:10.1007/s10596-018-9725-9.
- Puzyrev N.N.** Seismic methods [in Russian]. Nauka, Novosibirsk, 1992. 236 p.
- Seismic tomography: with applications in global seismology and exploration geophysics / Nolet G. (Ed.).** Vol. 5. Springer Science & Business Media, 2012. 385 p.
- Seleznev V.S.** On interpretation of the time fields of refracted waves in the case of multilaminar media // Soviet Geology and Geophysics. 1977. Vol. 4. P. 93–105.
- Solov'ev V.M.** Increasing the information content of deep seismic studies using the dynamic characteristics of P- and S-waves // Development of vibroseismic studies of the Earth's crust in Siberia [in Russian]. Novosibirsk, 1989. P. 163–170.
- Sysoev A.P.** Applied problems of compensating for the heterogeneity of the upper part of the section when processing and interpreting seismic data [in Russian]. IPGG SB RAS, Novosibirsk, 2011. 90 p.
- Wiechert E.** Bestimmung des Weges der Erdbebenwellen im Erdinnern. I. Theoretisches // Zeitschrift für Physik. Vol. 11. P. 294–304.
- Yilmaz Ö.** Seismic data analysis. SEG, Tulsa, 2001. Vol. 1. 1809 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

МИТРОФАНОВ Георгий Михайлович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка методов и технологий обработки и интерпретации сейсмических данных.

ЧЕРНЫШОВ Глеб Станиславович – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: лучевая томография, обработка данных вибрационной сейсморазведки, контроль качества сейсмических данных, <https://orcid.org/0000-0002-7752-5898>.

КАМАШЕВ Александр Максимович – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разложение сейсмических изображений по волновым пакетам, методы подавления кратных отраженных волн, методы решения прямой задачи сейсморазведки, <https://orcid.org/0000-0001-8368-1144>.

НИКИТИН Александр Алексеевич – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: высокопроизводительные вычисления, вычислительная наука, сейсмические методы, сейсмическая томография, <https://orcid.org/0000-0003-4928-342X>.

МОСЯГИН Евгений Вячеславович – начальник отдела обработки и интерпретации данных сейсморазведки АО «СНИИГГиМС». Основные научные интересы: обработка и интерпретация сейсморазведочных данных методов МОВ-ОГТ, обработка речных данных, <https://orcid.org/0000-0003-1217-5599>.

*Статья поступила в редакцию 17 октября 2023 г.,
одобрена после рецензирования 25 декабря 2023 г.,
принята к публикации 26 декабря 2023 г.*