



АНАЛИЗ ПОДХОДОВ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДВУХ АЛГОРИТМОВ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

К.Ю. Потапова^{1,2,✉}, С.С. Абраменков^{1,2}, Г.С. Чернышов^{1,2}, П.А. Дергач², И.В. Медведь^{1,2}, Т.А. Ступина²

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

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

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

✉ Кристина Юрьевна Потапова, PotapovaKY@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8410-4012>

Аннотация. Метод лучевой сейсмической томографии позволяет строить модели аномалий скорости сейсмических волн в среде и выдвигать гипотезы о ее геологическом строении. В процессе томографической инверсии выбранный способ и качество решения прямой задачи существенно влияют на итоговый результат, который для одного и того же набора данных может различаться. Цель данной работы состоит в исследовании влияния метода решения прямой задачи на результат инверсии на примере двух алгоритмов: PROFIT (трассирование методом изгиба луча) и ST3D (трассирование через решение уравнения эйконала) по полевым данным (п. Бельтир, Республика Алтай, 2021 г.).

Ключевые слова: сейсмическая томография, трассирование методом изгиба луча, решение уравнения эйконала, инверсия, сейсмическая структура, объемные волны

Благодарности: Авторы выражают благодарность д.г.-м.н., чл.-корр. РАН Кулакову И.Ю. и Никитину А.А. за предоставленные для работы алгоритмы сейсмической томографии и регулярные консультации по возникающим вопросам.

Финансирование: Обработка данных проведена в рамках государственного задания по проекту ФНИ FWZZ-2022-0017. Сравнительный анализ результатов был выполнен при поддержке проекта FSUS-2022-0019.

Для цитирования: Потапова К.Ю., Абраменков С.С., Чернышов Г.С., Дергач П.А., Медведь И.В., Ступина Т.А. Анализ подходов решения прямой задачи на основе сравнения результатов двух алгоритмов сейсмической томографии // Геофизические технологии. 2024. № 3. С. 46–64. doi:10.18303/2619-1563-2024-3-46.

ANALYSIS OF APPROACHES TO SOLVING A FORWARD PROBLEM BASED ON A COMPARISON OF THE RESULTS OF TWO SEISMIC TOMOGRAPHY ALGORITHMS

K.Yu. Potapova^{1,2,✉}, S.S. Abramnikov^{1,2}, G.S. Chernyshov^{1,2}, P.A. Dergach², I.V. Medved^{1,2}, T.A. Stupina²

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

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

✉ Kristina Yu. Potapova, PotapovaKY@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8410-4012>

Abstract. The seismic ray tomography method provides a way to construct models of velocity anomalies in the geological medium to provide hypotheses about structure beneath. In the tomographic inversion process the chosen approach and quality of the forward problem solution significantly affects final result which may vary for the same dataset. The aim of

this paper is to study the influence of the choice in forward problem solving method on the inversion result using two algorithms as an example: PROFIT (ray-bending technique) and ST3D (tracing via eikonal equation solution), using field data (Beltir, Altai Republic, 2021).

Keywords: seismic tomography, ray-bending tracing, eikonal equation solution, inversion, seismic structure, body waves

Acknowledgments: We express our sincere gratitude to Doctor of Geology and Mineralogy, Corresponding Member RAS Koulakov I.Yu. and to Nikitin A.A. for the seismic tomography algorithms provided for work and regular consultations.

Funding: The study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research (Project FWZZ-2022-0017) and within the framework of the state assignment of the Laboratory of Processing and Analysis of Seismic Data of NSU No. FSUS 2022-0019.

For citation: Potapova K.Yu., Abramnikov S.S., Chernyshov G.S., Dergach P.A., Medved I.V., Stupina T.A. Analysis of approaches to solving a forward problem based on a comparison of the results of two seismic tomography algorithms // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 3. P. 46–64. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-3-46.

ВВЕДЕНИЕ

Метод сейсмической томографии позволяет строить модели аномалий скоростей сейсмических волн в среде, используемые в дальнейшей геологической интерпретации. Данная работа посвящена двумерной лучевой сейсмической томографии, в основе которой лежит идея аппроксимации поля времен множеством сейсмических лучей. Существует множество алгоритмов сейсмической томографии, в основе которых используются различные методики решения прямой задачи лучевого трассирования. В такой ситуации закономерным становится вопрос – насколько существенное влияние на итоговый результат инверсии может оказать выбор того или иного подхода к лучевому трассированию? В случае ограниченности априорной информации, использование различных алгоритмов инверсии для имеющегося набора данных может дать более полную картину. Значительно отличающиеся результаты томографической инверсии добавляют неоднозначности последующей интерпретации.

В свете появления все новых алгоритмов и программного обеспечения, в основе которых лежат различные подходы, становится естественным появление работ, в которых проводится тестирование программных реализаций данных алгоритмов. Подобные исследования направлены на понимание как конкретных технических аспектов ПО (программное обеспечение), так и общих возможностей разрабатываемого инструментария. Примерами таких исследований могут служить работы [Kissling et al., 2001; Liu et al., 2006; Meléndez et al., 2015; Никитин и др., 2018; Chernyshov et al., 2022; Никитин и др., 2023]. Помимо сравнения программного обеспечения, специалисты проводят сравнительный анализ подходов решения прямой задачи и инверсии. Подобные исследования, как правило, направлены на понимание пригодности алгоритмов для изучения различных геологических структур [Sheehan et al., 2005a, b; Захаров и др., 2010; Powers, Burton, 2011; Никитин и др., 2017; Чеботарева, 2018]. В статье [Sheehan, 2005a] на примере восьми синтетических моделей, отражающих разные геологические условия, исследуются сильные и слабые стороны трех алгоритмов томографии (Rayfract, Seismager, GeoCT-II). В другой работе [Sheehan et al., 2005b] исследовалась эффективность алгоритмов для изучения определенного вида геологических структур с целью определения пригодности метода томографии для решения проблем, связанных с карстовыми областями. В аналогичном исследовании [Powers, Burton, 2011] оценивалась эффективность коммерческих программ для томографии не только на синтетических, но и на полевых данных.

В работе [Никитин и др., 2017] было проведено сравнительное тестирование методик трассирования луча методом изгиба из пакета программ сейсмической томографии LOTOS [Koulakov, 2009] (аналогично трассированию в программе PROFIT) и обратного лучевого трассирования на основе решения уравнения эйконала из разработанного авторами пакета ST3D. Тестирование выполнялось на синтетической градиентной трехмерной скоростной модели с аномалиями, размещенными в шахматном порядке. Результатом исследования стал вывод, что при наличии резких высококонтрастных аномалий или при высоком отношении количества источников к приемникам рекомендуется использовать обратное лучевое трассирование на основе решения уравнения эйконала для повышения точности и производительности решения прямой задачи лучевого трассирования. Однако подобного исследования на примере реальных данных для геологических структур не проводилось.

В данной работе мы поставили цель – на примере реальных полевых данных сравнить две методики решения прямой задачи и изучить их влияние на итоговый результат томографической инверсии. Были выбраны два отечественных алгоритма сейсмической томографии PROFIT и ST3D, ключевыми отличиями которых являются различные подходы к решению прямой задачи: методика трассирования изгибом луча (PROFIT) и метод обратного лучевого трассирования через решения уравнения эйконала (ST3D). В данной работе было проведено сравнение результатов томографической инверсии для набора данных активного сейсмического профилирования, выполненного на достаточно изученном геологическом объекте с априорной информацией о сильной латеральной неоднородности.

МЕТОДИКИ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ

Метод лучевой сейсмической томографии нацелен на решение обратной задачи в линеаризованной дискретной постановке путем подбора (нередко итеративного) модели с наименьшей невязкой между наблюдаемыми и рассчитанными временами пробега сейсмических волн. Расчет смоделированных времен пробега представляет собой процесс решения прямой задачи – получение теоретических значений физического поля (времен) по заданному распределению физических свойств среды (предполагаемая стартовая модель, обеспечивающая линеаризованную постановку). Таким образом, наилучшее соответствие между предполагаемой моделью и наблюдаемыми данными будет обеспечивать наименьшую невязку, следовательно, чем точнее решена прямая задача, тем вероятнее адекватность решения обратной задачи. Положенное в основу метода лучевое трассирование является эффективным способом решения прямой кинематической задачи, т. к. позволяет вычислять времена пробега одновременно с построением лучей [Cerveny, 2001]. Лучевое трассирование также позволяет эффективно визуализировать физический процесс распространения сейсмических волн в геологической среде, разделяя суперпозицию полного волнового поля на отдельные элементарные траектории распространения энергии определенной сейсмической фазы.

Одним из способов лучевого трассирования является метод изгиба луча, основанный на принципе Ферма, согласно которому между двумя точками (источник и приемник) выбирается траектория, обеспечивающая наименьшее время [Julian, Gubbins, 1977]. Суть метода изгиба проиллюстрирована на схеме (рис. 1) и заключается в последовательном изгибе траектории луча и дроблении на все меньшие сегменты с итеративным вычислением времени пробега сейсмической волны в каждом варианте траектории. Например, в качестве подбираемого параметра выбирается амплитуда дуги косинуса между парой точек, в таком случае на первом шаге трассирования строятся траектории с единственным

сегментом и пара точек соответствует источнику и приемнику (см. рис. 1, а). Параметр амплитуды изгиба перебирается в заранее заданном диапазоне и для каждой траектории вычисляется время пробега (сумма произведений медленности в точке на шаг расчета вдоль полученной траектории). Далее выбирается траектория луча с наименьшим временем пробега, и данная траектория делится на два равных сегмента, для каждого из которых операция повторяется (см. рис. 1, б). Процедура повторяется (на третьем шаге траектория делится на три равных сегмента) до тех пор, пока размер сегмента не достигнет предопределенного значения, выбранного специалистом. В итоге для пары источник–приемник рассчитывается время пробега и некоторая криволинейная траектория луча.

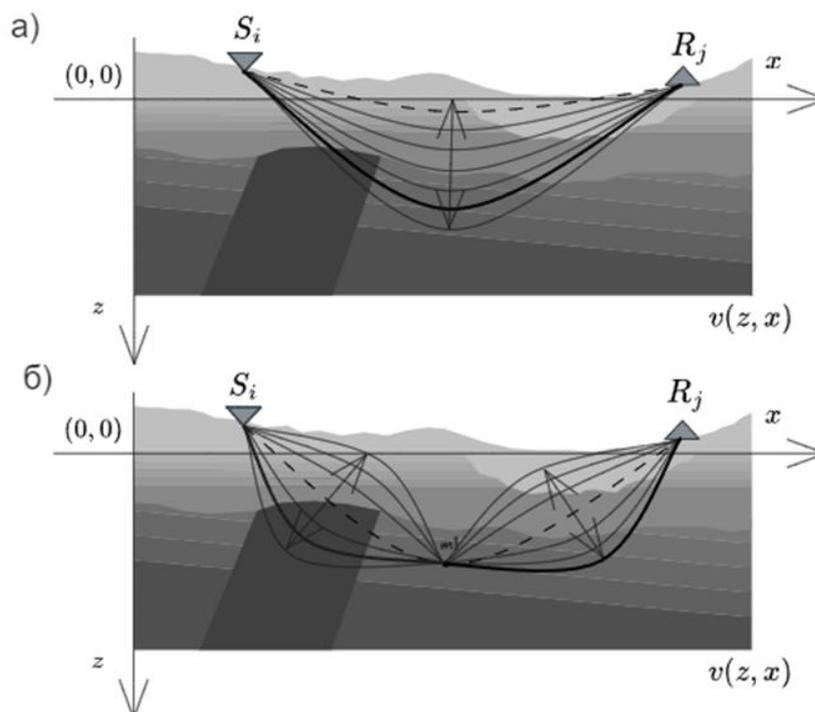


Рис. 1. Схема трассирования методом изгиба луча в PROFIT: а – траектории для различных величин параметров изгиба (амплитуда дуги косинуса) между источником (S_i) и приемником (R_j) на первом шаге трассирования; б – траектории на втором шаге трассирования.

Трассирование методом изгиба луча – процедура, выполняемая независимо для каждой пары источник–приемник. Такой подход эффективен для одновременного определения времени пробега и траекторий лучей, но имеет существенный недостаток: он не дает гарантии, что будет найден глобальный минимум времени пробега, т. к. может существовать не одна траектория луча, удовлетворяющая решению.

Времена пробега и траектории лучей могут быть получены альтернативным способом, через решение уравнения эйконала [Боровских, 2003]. Уравнение эйконала – уравнение в частных производных первого порядка, описывающее поле времен (T), которое распространяется в неоднородной среде, в виде семейства поверхностей и лучей, ортогональных фронтам [White et al., 2020]. В общем виде уравнение эйконала представлено ниже:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2 = \frac{1}{v^2(x, y, z)}. \quad (1)$$

Функция $v(x, y, z)$ характеризует скорость распространения возмущения в точке (x, y, z) неоднородной среды. Соответственно уравнение эйконала позволяет описать кинематику сейсмических волн. Решение напрямую гарантирует, что будет найдено глобальное минимальное время пробега. Трассирование через решение эйконала не позволяет одновременно вычислять времена пробега и строить траектории лучей, поэтому сперва вычисляются времена, а потом строятся траектории. Уравнение эйконала описывает поле времен, по которому строится семейство поверхностей – изохрон (рис. 2, а). Изохроны описывают поверхность волнового фронта в среде в определенный момент времени. Траектории лучей между всеми парами источников и приемников в текущей скоростной модели строятся ортогонально семейству полученных изохрон (рис. 2, б).

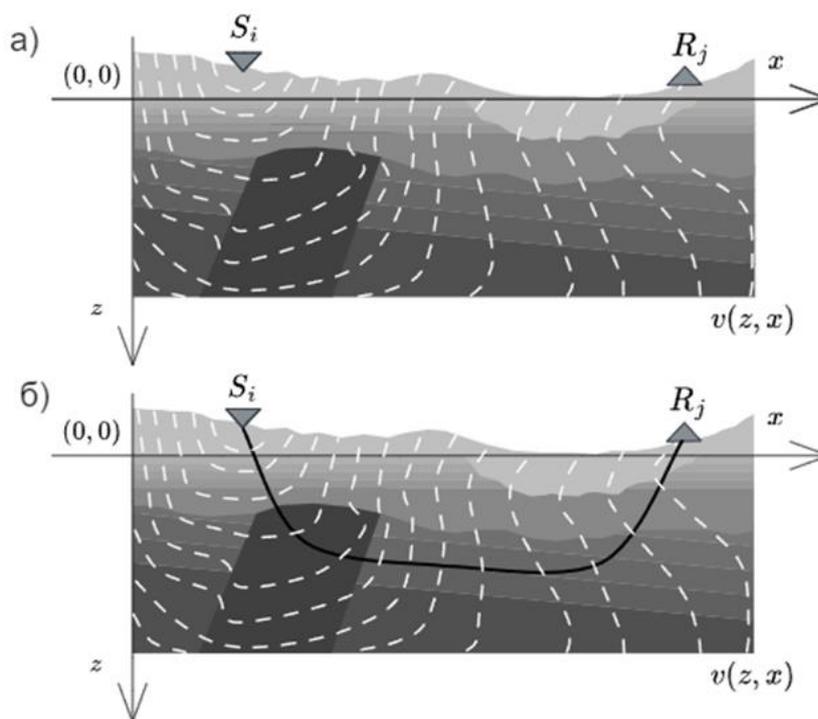


Рис. 2. Схема трассирования через решение уравнения эйконала в ST3D: а – семейство поверхностей – изохрон, описывающих поле времен; б – траектория луча, построенного перпендикулярно изохронам.

Многообразие подходов решения прямой задачи лучевого трассирования привело к развитию различных алгоритмов сейсмической томографии. Значительную часть программных реализаций составляют коммерческие разработки. Преимуществами коммерческого программного обеспечения являются в первую очередь техническая поддержка, подробная документация и наличие пользовательского интерфейса. Примеры таких программ описаны в работах Higuera-Díaz et al., 2007 (**GeoCT-II**), Toto et al., 2012 (**RAYFRACT**), Riad et al., 2017 (**SeisImager/2D**), Волчкова, Шишкина, 2021 (**Tomarys**). Лицензии для использования коммерческого ПО дорогостоящие и требуют значительных финансовых ресурсов. Альтернативой является использование программ с открытым исходным кодом. Примеры таких программ описаны в работах Koulov, 2009 (**PROFIT**), Guedes et al., 2022 (**Refrapy**).

ИНСТРУМЕНТЫ

Для сравнения и анализа подходов к решению прямой задачи в настоящей работе рассматриваются два отечественных алгоритма лучевой сейсмической томографии PROFIT и ST3D.

Программа PROFIT разработана чл.-корр. РАН, д.г.-м.н. И.Ю. Кулаковым и описана в статье [Koulakov, 2009]. Программа ST3D разработана сотрудником ИНГГ СО РАН А.А. Никитиным и описана в работе [Никитин и др., 2020]. Обе программные реализации активно используются научными сотрудниками РАН. Данные алгоритмы имеют одинаковые этапы расчетов и отличаются главным образом методикой решения прямой задачи (рис. 3).



Рис. 3. Этапы расчетов для алгоритмов лучевой сейсмической томографии PROFIT и ST3D.

Алгоритмическая схема выглядит следующим образом:

1. Решение прямой задачи лучевого трассирования – расчет времен пробега упругой рефрагированной волны (продольной или поперечной) и построение лучей в начальной скоростной модели, расчет невязок, как разница между смоделированными и наблюдаемыми временами;

2. Линеаризация – составление томографической матрицы с учетом выбранной параметризации задачи;

3. Регуляризация томографической задачи дополнением исходной матрицы блоками, отвечающими за гладкость и амплитуду аномалий (регуляризация Тихонова) [Тихонов и др., 1990];

4. Инверсия матрицы – решение системы линейных уравнений. В рассматриваемых алгоритмах система линейных уравнений решается методом наименьших квадратов (LSQR) [Paige, Saunders, 1982].

Рассмотрим подробнее специфику выбранных алгоритмов.

Алгоритм PROFIT

Алгоритм PROFIT (PROfile Forward and Inverse Tomography) создан для комбинированного прямого моделирования и томографической инверсии данных активного сейсмического профилирования. Программа реализована на языке программирования Fortran (в стандарте 1990 г.), с открытым исходным кодом находится на сайте автора (<http://www.ivan-art.com/science/PROFIT/>). В данном алгоритме решение

прямой задачи осуществляется с помощью трассирования методом изгиба луча. Таким образом, помимо параметров инверсии (величины амплитудного демпинга аномалий, горизонтального и вертикального сглаживания, а также количества итераций LSQR) в алгоритме имеется несколько контролирующих параметров, связанных с лучевым трассированием: минимальная длина изгибаемого сегмента, на которые дробится луч, максимальное и минимальное значение амплитуды изгиба луча, а также шаг интегрирования вдоль луча для вычисления времени пробега. Величины данных параметров определяют масштаб получаемых аномалий и минимальную величину достигаемой невязки. Алгоритм PROFIT зарекомендовал себя в научном сообществе и многократно был задействован для инверсии данных различных объектов: подводные горы в Тихом океане [Koulakov et al., 2010], зона субдукции в Чили [Koulakov et al., 2011], объекты для строительства железнодорожных путей в труднодоступных районах Сибири [Soloviev et al., 2012].

Алгоритм ST3D

Алгоритм сейсмической томографии ST3D создан для данных активного и пассивного профилирования и позволяет строить скоростные модели геологического разреза на основе данных времен пробега сейсмических волн. В программной реализации алгоритма применяется численное решение уравнения эйконала (1) для решения прямой задачи [Никитин и др., 2015]. Для вычислений используется алгоритм Block Locking Sweeping Method (BLSM), который был эффективно реализован на языке программирования C++ и позволяет производить расчеты в отдельных потоках на современных многопроцессорных аппаратных архитектурах [Nikitin et al., 2018]. Уравнение эйконала решается в начале каждой итерации томографической инверсии для вычисления поля времен сейсмических волн в скоростной модели текущей итерации. Далее, исходя из градиента поля времен, строится многообразие траекторий лучей, на основании которых формируется томографическая матрица. Полная матрица для инверсии также включает блоки регуляризации. В рамках настоящей работы использовалась версия алгоритма для работы с двумерными данными активного сейсмического профилирования. Программа ST3D разработана относительно недавно и реализована на языке программирования C++. Трехмерная версия алгоритма была успешно апробирована при построении томографических моделей по сейсмологическим данным, полученным на территории оз. Байкал [Никитин и др., 2023].

Основным результатом данных алгоритмов является двумерное распределение аномалий скоростей продольных или поперечных рефрагированных волн. В программных реализациях также имеется возможность визуализации рассчитанных и наблюдаемых годографов (для проверки качества решений), а также распределения абсолютных скоростей.

НАБОР ДАННЫХ И ПОДГОТОВКА К ИНВЕРСИИ

Описание данных и объекта исследования. Для проведения исследования были выбраны данные, полученные в результате полевых работ в республике Алтай в 2021 г., недалеко от села Бельтир. Район исследования интересен тем, что там в сентябре 2003 г. произошло Чуйское землетрясение с магнитудой $M = 7.3$ по шкале Рихтера (по данным Геофизической службы СО РАН), в результате которого у южного подножья Чуйского хребта произошло изменение естественных форм рельефа, т. е. образовалась система тектонических нарушений земной поверхности. В зоне эпицентра образовался крупнейший разлом, который на поверхности представлен протяженным рвом длиной около 200 м, шириной 3–5 м и глубиной 1 м (рис. 4).



Рис. 4. Нарушение рельефа в результате Чуйского землетрясения, место проведения сейсморазведочных работ (фото П.А. Дергача, 2021).

Согласно геологическим исследованиям в этом районе [Буслов и др., 1999; Зольников и др., 2010] и геофизическим работам [Куликов и др., 2011; Деев др., 2012; Неведрова, Шалагинов, 2015] ожидался выраженный вертикальный контраст скоростей на границе образовавшегося разлома. Таким образом, выбранная геологическая обстановка позволит оценить влияние методик решения прямой задачи и тонкости их применения для геологической структуры с наличием резких вертикальных скоростных границ.

Методика проведения эксперимента, система наблюдения. Сейсморазведочные работы проводились в рамках полевой геофизической школы SEG «Field Camp-2021» в августе 2021 г. Сейсмический профиль длиной 355 м располагался с юго-запада на северо-восток у южного подножья Чуйского хребта, поперек разлома. Система наблюдения состояла из 70 пунктов приема (ПП) с шагом 5 м и пунктов возбуждения (ПВ) с шагом 20 м. Колебания возбуждались при помощи импульсного источника [Санфирова и др., 2012] в заполненных водой скважинах глубиной 0.5 м. Входной комплект информации для двух алгоритмов содержал времена первых вступлений продольных волн и координаты положения ПВ и ПП относительно профиля. Времена первых вступлений продольных волн были получены с использованием программного пакета SeisPro и предоставлены коллегами из Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Подготовка к инверсии.

1. *Стартовая скоростная модель.* В качестве данных были использованы годографы первых вступлений продольных волн. Стартовая скоростная модель была одинаковой для двух алгоритмов и представляла градиент скорости с глубиной. В обоих алгоритмах была задана одинаковая глубина слоя и скорость в этом слое (табл. 1), стартовая модель подбиралась исходя из вида наблюдаемых годографов.

Стартовая скоростная модель

Глубина, м	Скорость, км/с
0	0.2
6	1.0
10	2.0
60	4.0
80	4.6

2. *Количество итераций.* В настоящем исследовании для двух алгоритмов было выбрано одинаковое количество итераций – 25. Количество итераций должно быть таким, чтобы значение среднеквадратичной невязки стабилизировалось. В данном случае, опытным путем было установлено, что 25 итераций достаточно.

3. *Тип параметризации.* В нашей постановке задачи используется уравнение луча (2), которое может решаться либо через скорость, либо через медленность (величина обратная скорости).

$$S * x = t, \quad (2)$$

где S – длина луча, x – медленность, t – время вдоль этого луча. В рамках настоящего исследования был выбран один тип параметризации – по скорости. Параметризация по скорости позволяет лучше восстановить приповерхностные скоростные аномалии.

4. *Параметры инверсии.* Значительная роль в сейсмической томографии отведена параметрам инверсии. Некачественная обработка данных и нестабильная инверсия приводят к негладким решениям. Это происходит из-за того, что данных просто недостаточно для решения. Большинство алгоритмов сейсмической томографии сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Производная матрица обычно получается очень большая и разреженная. Кроме того, данные часто бывают искажены значительным количеством шума, что может сделать результаты инверсии нестабильными. Есть несколько способов преодолеть эти проблемы, но они требуют добавления набора управляющих параметров, сильно влияющих на решение. Влияние параметров инверсии на результат сейсмической томографии описано в статье [Кулаков, 2020]. В работе автор наглядно демонстрирует роль параметров демпфирования и сглаживания не зависимо друг от друга на результат инверсии. На серии тестов автор показывает, что использование небольшого демпфирования приводит к появлению артефактов (элементы в модели, которых не может быть), сильно ухудшающих модель, в то время как большое значение демпфирования позволяет преодолеть неустойчивость (появление неестественных элементов в модели), но делает амплитуды аномалий меньше, чем есть на самом деле. С помощью другой серии тестов проиллюстрировано влияние сглаживания на результат томографической модели. При больших значениях сглаживания на модели теряется часть деталей, томографическое изображение становится размытым, а при небольших значениях модель выглядит нестабильной, наблюдается множество резких элементов (артефактов). Приведенные тесты наглядно показывают необходимость сочетать регулирование параметров сглаживания и амплитудного демпфирования вместе для достижения оптимального и разумного результата инверсии. Зачастую в программных реализациях параметры регулируются вручную специалистом, это не формализованный процесс. Удачно подобранная

комбинация значений параметров позволяет добиться решения задачи, которое будет соответствовать наблюдениям и предполагаемому распределению физических параметров в геологической среде. В настоящем исследовании параметры инверсии подбирались индивидуально для каждого алгоритма.

5. *Остальные параметры.* Поскольку в PROFIT трассирование лучей основано на методе изгиба луча, то к описанным выше параметрам добавляются параметры, касающиеся процесса изгиба луча, такие как: шаг интегрирования по лучу, минимальная длина изгибаемого сегмента, минимальное и максимальное значение изгиба луча. Значения параметров подбирались, исходя из размера аномалий, которые мы хотели восстановить. Таким образом, в программе ST3D использовалось меньше параметров, т. к. трассирование через решение эйконала не требует дополнительных параметров трассирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНВЕРСИИ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Основными результатами работы программ PROFIT и ST3D являются смоделированные алгоритмами годографы и распределение абсолютных скоростей, представленные на рис. 5 и 6 (на рис. 5, а – результаты работы PROFIT, на рис. 5, б – результаты работы ST3D) соответственно. Среднеквадратичное значение невязки RMSE (Root Mean Squared Error, корень из среднеквадратичной ошибки) на 25 итерации после этапа инверсии в алгоритме PROFIT составило 1.0 мс, согласно расчетам программы, а алгоритмом ST3D – 0.9 мс.

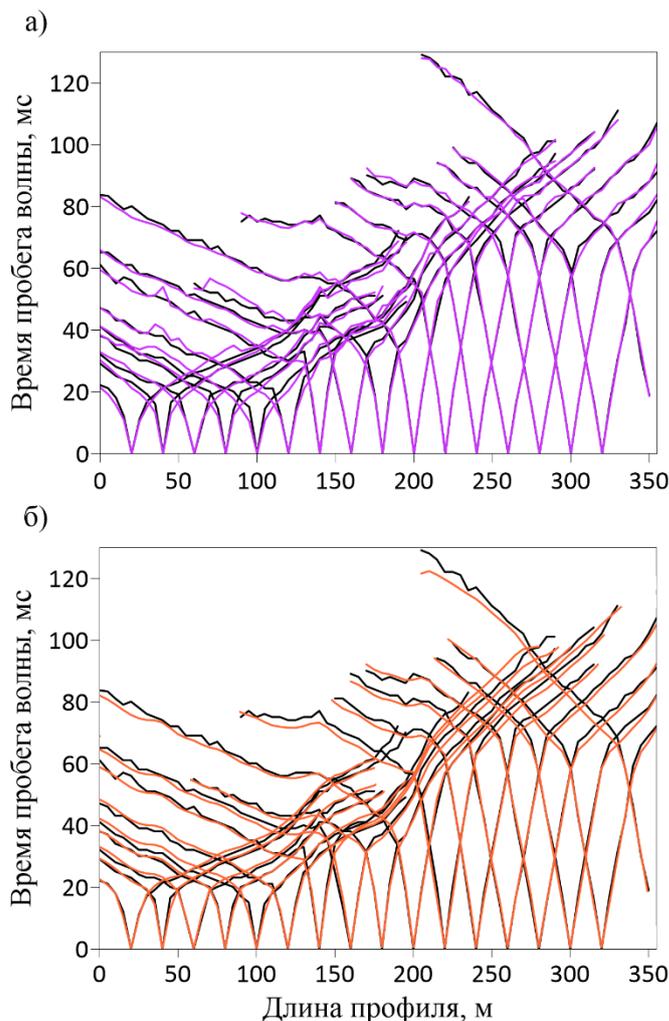


Рис. 5. Годографы: а – наблюдаемые (черные) и смоделированные (фиолетовые) в PROFIT, б – наблюдаемые (черные) и смоделированные (оранжевые) в ST3D.

На рисунке 6, а представлено распределение ошибок (невязок) между наблюдаемыми и смоделированными временами в алгоритме ST3D, на рис. 6, б – алгоритмом PROFIT. На рисунке 6, в представлено распределение ошибок между смоделированными алгоритмами временами. Минимальная ошибка составила 0 мс, максимальная – 11 мс (очевидно, случай выброса), практически по всей выборке (пункты приема) объема 687, ошибка по алгоритму PROFIT меньше 6 мс, по алгоритму ST3D меньше 4 мс.

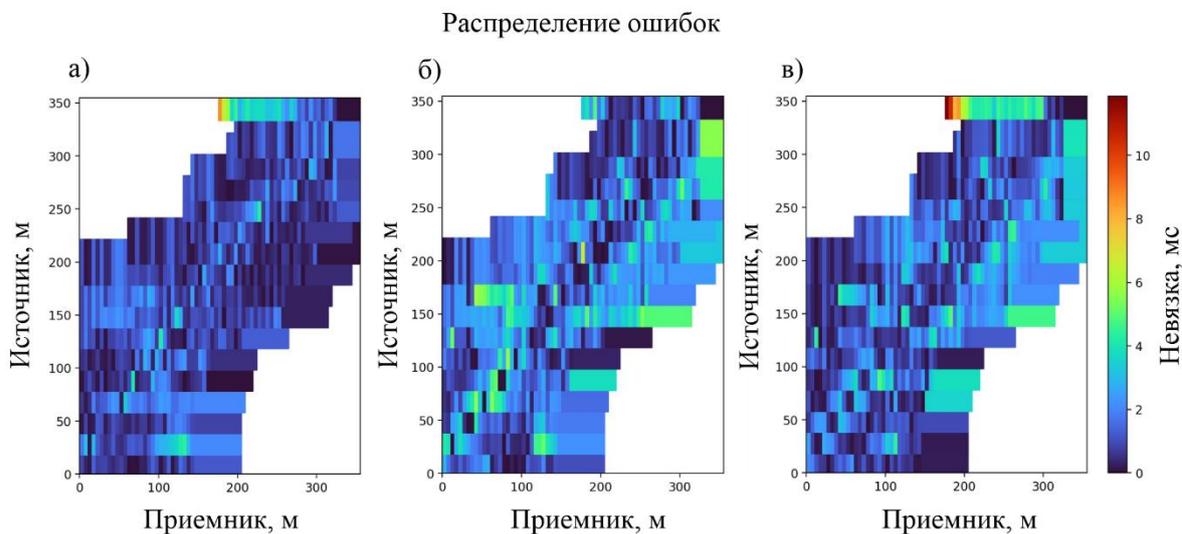


Рис. 6. Результаты пространственного распределения ошибок: а – пространственное распределение ошибок между наблюдаемыми временами и смоделированными в ST3D, б – пространственное распределение ошибок между наблюдаемыми годографами и смоделированными в PROFIT, в – пространственное распределение ошибок между смоделированными годографами в PROFIT и ST3D.

На рисунке 7 представлена статистика по распределению ошибок: абсолютная ошибка MAE (Mean Squared Error) и RMSE, вычисленные по невязкам, не превышающим заданного значения, общее число которых отражено на графиках рис. 7, а, в (красная линия) и графиках плотности распределения (рис. 7, б, г). Например, для алгоритма ST3D 86 % выборки не превышает 2 мс, RMSE меньше 0.95 мс, MAE меньше 0.79, для алгоритма PROFIT 60.3 % выборки не превышает 2 мс, RMSE меньше 1.15, MAE меньше 0.97.

Можно сказать, что алгоритмом ST3D была подобрана модель с точностью до 2 мс на объеме выборки больше, чем алгоритмом профит, что повышает его статистическую достоверность. Скорее всего это связано с тонкостью настроек параметров и уход в локальный экстремум в алгоритме PROFIT. Отметим, что модели, посчитанные двумя алгоритмами, с точностью до 2 мс совпадают между собой на практически 70 % выборки (см. рис. 6, в).

На рисунке 8, а, б показаны модели абсолютных скоростей продольных волн, полученные после 25 итерации алгоритмов PROFIT и ST3D. Для удобства визуального восприятия и сравнительного анализа были выбраны одинаковые палетки. Несмотря на то что использовалась одномерная стартовая скоростная модель, оба алгоритма показали устойчивое решение и полученные томографические модели отражают наличие выраженной латеральной неоднородности скорости. Обе модели имеют выделяющиеся юго-западную и северо-восточную части профиля с выраженным контрастом скоростей, что соответствует разлому, образовавшемуся вследствие разрушительного землетрясения 2003 г. Юго-западная часть профиля для обеих моделей характеризуется высокоскоростными породами, скорость продольной волны в этой части профиля уже на глубине 15 м достигает значения 4.5 км/с. В северо-

восточной части наблюдаются низкоскоростные породы, происходит постепенное увеличение скорости с глубиной, скорость продольной волны не превышает 2.5 км/с, что свидетельствует о наличии низкоскоростных пород. Рассматриваются глубины до 80 м, что говорит об осадочной природе геологической толщи.

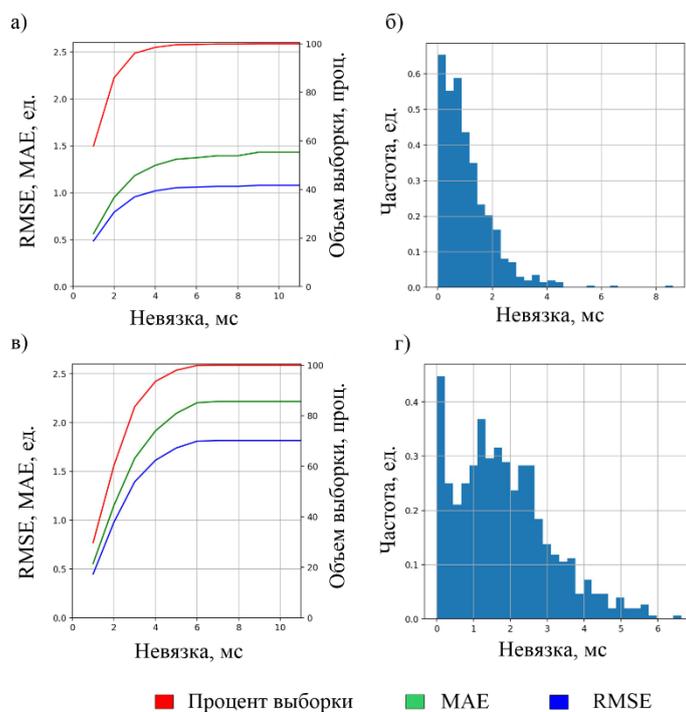


Рис. 7. Статистика распределения ошибок: а – статистика распределения ошибок ST3D, б – плотность распределения ошибок ST3D, в – статистика распределения ошибок PROFIT, г – плотность распределения ошибок PROFIT.

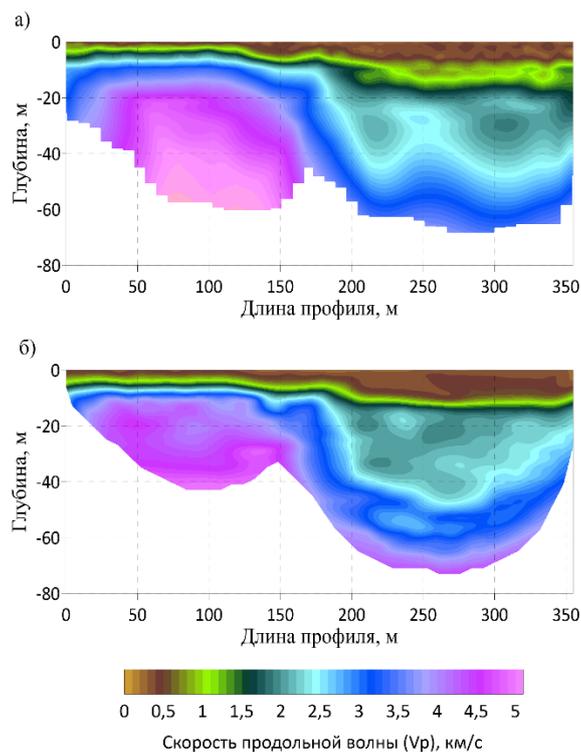


Рис. 8. Результаты инверсии: а – распределение абсолютных скоростей в PROFIT, б – распределение абсолютных скоростей в ST3D.

Полученное в ходе инверсии распределение скоростей (см. рис. 8) хорошо согласуется между собой, значения абсолютных скоростей соотносятся и наблюдается выраженный контраст скоростей под зоной разлома. Оба алгоритма позволили получить высокоскоростную юго-западную часть профиля со значениями до 4.5 км/с и низкоскоростную северо-восточную со значениями, не превышающими 2.5 км/с. Такие сильные контрасты скорости могут быть связаны с наличием многолетнемерзлых пород, в которых скорость выше более чем в два раза, чем в породах без проявлений мерзлоты. Результаты настоящей работы хорошо согласуются с результатами работы [Дергач и др., 2022], где было сделано предположение о том, что в юго-западной части профиля разрез представлен тонким приповерхностным слоем гравия с суглинистым заполнителем, залегающим над толщей водонасыщенных галечников в мерзлом состоянии. В северо-восточной части профиля авторы выделили талик мощностью около 30 м, залегающий на слое мерзлых галечников, либо песчаников.

Несмотря на согласованный результат скоростных моделей, полученных алгоритмами, годографы (см. рис. 5), рассчитанные в ST3D, совпадают с наблюдаемыми в обеих частях профиля, а годографы, смоделированные в PROFIT, совпадают с наблюдаемыми только в той части профиля, где наблюдаются низкоскоростные породы и плавное возрастание скорости с глубиной (см. рис. 8). Такой результат может быть объяснен тем, что решение уравнения эйконала гарантирует глобальный минимум решения, а трассирование изгибом луча не всегда его гарантирует.

ВЫВОДЫ

В результате работы с помощью PROFIT и ST3D были построены две сейсмотомографические модели для одного и того же набора данных. Использование методики решения прямой задачи через изгиб луча дает результат сравнимый с результатом, полученным через методику решения уравнения эйконала. Для используемого набора данных уместнее рассматривать оба подхода, поскольку ошибки (рис. 6, а, б, 7) в разных точках профиля практически не коррелируют (коэффициент корреляции по профилю равен 0.3). В то время как после инверсии корреляция скоростей составляет 75 %, ошибка MAPE (Mean Absolute Percentage Error – средняя абсолютная ошибка в процентах) составляет 25 %, что незначительно влияет на интерпретацию результата обоими алгоритмами [Дергач и др., 2022].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Боровских А.В.** Уравнение эйконала в неоднородной среде // Доклады Академии наук. 2003. Т. 391, № 5. С. 587–590.
- Буслов М.М., Зыкин В.С., Новиков И.С., Дельво Д.** Структурные и геодинамические особенности формирования Чуйской межгорной впадины Горного Алтая в кайнозойе // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 12. С. 1720–1736.
- Волчкова В.А., Шишкина М.А.** Лучевая сейсмическая томография синтетических данных, характерных для Западной Сибири: отработка алгоритма сейсмической инверсии с адаптивной параметризацией среды вейвлет-функциями, подбор параметров инверсии // Проблемы геокосмоса: Материалы 13-ой международной школы-конференции. СПб.: ООО «Издательство ВВМ», 2021. С. 17–28.
- Деев Е.В., Неведрова Н.Н., Зольников И.Д., Русанов Г.Г., Пономарев П.В.** Геоэлектрические исследования отложений Чуйской котловины (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 1. С. 120–139.

- Дергач П.А., Яскевич С.В., Яблоков А.В.** Изучение структуры скоростного разреза с разрывным нарушением, образовавшимся в результате Чуйского землетрясения 2003 года // Интерэкспо Гео-Сибирь. Новосибирск, 2022. Т. 2, № 2. С. 108–114.
- Захаров В.Н., Аверин А.П., Вартанов С.А.** Анализ алгоритмов лучевой томографии для прогноза нарушенности выемочного столба // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 3. С. 183–190.
- Зольников И.Д., Деев Е.В., Лямина В.А.** Новые данные о четвертичном морфолитогенезе в Чуйской котловине (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 4. С. 437–449.
- Кулаков И.Ю.** BASIC TOMO: обучающая программа для изучения роли свободных параметров и систем наблюдения в задачах томографии // Геофизические технологии. 2020. № 1. С. 40–54. doi:10.18303/2619-1563-2020-1-40.
- Куликов В.А., Хогоев Е.А., Сальников А.С., Сагайдачная О.М., Дунаева К.А., Шемякин М.Л., Яскевич С.В.** Результаты исследования трещиноватой зоны Чуйского землетрясения и их приложение к решению задач нефтегазовой геологии Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2011. № 3. С. 23–30.
- Неведрова Н.Н., Шалагинов, А.Е.** Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. 2015. № 1. С. 31–40.
- Никитин А.А., Сердюков А.С., Дучков А.А.** Параллельный алгоритм решения уравнения эйконала для трехмерных задач сейсморазведки // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2015. Т. 13, № 3. С. 19–28.
- Никитин А.А., Сердюков А.С., Дучков А.А.** Оптимизация алгоритма лучевой сейсмической томографии для современных высокопроизводительных вычислительных систем // Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике. Улан-Удэ: Издательство Бурятского государственного университета, 2017. С. 178–180.
- Никитин А.А., Дучков А.А., Кулаков И.Ю., Василевский А.Н.** Развитие программных средств для сейсмической томографии // Геодинамика. Геомеханика и геофизика: Материалы XVIII Всероссийского семинара. Новосибирск, 2018. С. 19–20.
- Никитин А.А., Дучков А.А., Кулаков И.Ю., Чернышов Г.С.** ST3D: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2020.
- Никитин А.А., Епонешникова Л.Ю., Дучков А.А.** Разработка и тестирование библиотеки алгоритмов сейсмической томографии // Сейсморазведка в Сибири и за ее пределами: Материалы научно-практической конференции. Красноярск: Сиб. Федер. Ун-т, 2023. С. 122–128.
- Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Ахматов А.Е., Бабкин А.И., Голдобин А.А., Миньков С.И.** Импульсный пороховой источник упругих колебаний. Патент 2439620 РФ. 2012.
- Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягода А.Г.** Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. 232 с.
- Чеботарева И.Я.** Методы трассировки лучей в эмиссионной сейсмической томографии // Физика Земли. 2018. № 2. С. 12–24. doi:10.7868/S0002333718020023.
- 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.

- Cervený V.** Seismic ray theory. Cambridge University Press, Cambridge, 2001. Vol. 110. doi:10.1017/CBO9780511529399.
- Guedes V.J.C.B., Maciel S.T.R., Rocha M.P.** Refrapy: A Python program for seismic refraction data analysis // Computers & Geosciences. 2022. Vol. 159. Article 105020. doi:10.1016/j.cageo.2021.105020.
- Higuera-Díaz I.C., Carpenter P.J., Thompson M.D.** Identification of buried sinkholes using refraction tomography at Ft. Campbell Army Airfield, Kentucky // Environmental Geology. 2007. Vol. 53. P. 805–812. doi:10.1007/s00254-007-0693-y.
- Julian B.R., Gubbins D.** Three-dimensional seismic ray tracing // Journal of Geophysics. 1977. Vol. 43 (1). P. 95–113.
- Kissling E., Husen S., Haslinger F.** Model parametrization in seismic tomography: a choice of consequence for the solution quality // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2001. Vol. 123 (2–4). P. 89–101. doi:10.1016/S0031-9201(00)00203-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.
- Koulakov I., Stupina T., Kopp H.** Creating realistic models based on combined forward modeling and tomographic inversion of seismic profiling data // Geophysics. 2010. Vol. 75 (3). P. B115–B136. doi:10.1190/1.3427637.
- Koulakov I., Kopp H., Stupina T.** Finding a realistic velocity distribution based on iterating forward modelling and tomographic inversion // Geophysical Journal International. 2011. Vol. 186 (1). P. 349–358. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05034.x.
- Liu J.-S., Liu F.-T., Liu J., Hao T.-Y.** Parallel LSQR algorithms used in seismic tomography // Chinese Journal of Geophysics. 2006. Vol. 49 (2). P. 483–488. doi:10.1002/cjg2.858.
- Meléndez A., Korenaga J., Sallarès V., Miniussi A., Ranero C.R.** TOMO3D: 3-D joint refraction and reflection traveltimes tomography parallel code for active-source seismic data—synthetic test // Geophysical Journal International. 2015. Vol. 203 (1). P. 158–174. doi:10.1093/gji/ggv292.
- Nikitin A.A., Serdyukov A.S., Duchkov A.A.** Cache-efficient parallel eikonal solver for multicore CPUs // Computational Geosciences. 2018. Vol. 22 (5). P. 775–787. doi:10.1007/s10596-018-9725-9.
- Paige C.C., Saunders M.A.** LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). 1982. Vol. 8 (1). P. 43–71. doi:10.1145/355984.35598.
- Powers M., Burton B.** Seismic refraction tomography inversion of blind test model traveltimes using two commercial programs // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2011. Society of Exploration Geophysicists, 2011. P. 29.
- Riad S., El-Haddad A.E., Abbas M.A., Said A.H.** Structural modeling of seismic refraction investigations at Wadi Beda El Atshan area in the Eastern Desert, Egypt // International Journal of Geophysics and Geochemistry. 2017. Vol. 4 (1). P. 1–17.
- Sheehan J.R., Doll W.E., Mandell W.A.** An evaluation of methods and available software for seismic refraction tomography analysis // Journal of Environmental & Engineering Geophysics. 2005a. Vol. 10 (1). P. 21–34. doi:10.2113/JEEG10.1.21.
- Sheehan J.R., Doll W.E., Watson D.B., Mandell W.A.** Application of seismic refraction tomography to karst cavities // US geological survey karst interest group proceedings, Rapid City, South Dakota. 2005b. P. 29–38.

Soloviev V.M., Seleznev V.S., Kulakov I.Y., Liseikin A.V., Shenmayer A.E. Method, technology and results of engineering-seismic researches in industrial and hard to reach regions of Siberia // Near Surface Geoscience 2012: 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. European Association of Geoscientists & Engineers. Paris, 2012. P. 13.

Toto E.A., El Miloudi A., El Basri M., Hafid M., Zouhri L., El Mouraouah S., Iben Brahim A., Birouk A., Kasmi M. New geophysical and geological evidence for the present day southernmost active deformational front of the Rif thrust-and-fold belt and the oceanic accretionary prism of Cadiz: the Dhar Doum–Lalla Zahra fault, Northwestern Atlantic Coastal Morocco // Environmental Earth Sciences. 2012. Vol. 67. P. 2411–2422. doi: 10.1007/s12665-012-1692-1.

White M.C., Fang H., Nakata N., Ben-Zion Y. PyKonal: a Python package for solving the eikonal equation in spherical and Cartesian coordinates using the fast marching method // Seismological Research Letters. 2020. Vol. 91 (4). P. 2378–2389.

REFERENCES

Borovskikh A.V. The Eikonal equation in an inhomogeneous medium // Doklady Mathematics. 2003. Vol. 68 (1). P. 103–106.

Buslov M.M., Zykin V.S., Novikov I.S., Delvaux D. The Cenozoic history of the Chuya depression (Gorny Altai): structure and geodynamics // Russian Geology and Geophysics. 1999. Vol. 40 (12). P. 1720–1736.

Chebotareva I.Ya. Ray tracing methods in seismic emission tomography // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2018. Vol. 54 (2). P. 201–213. doi:10.1134/S1069351318020040.

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.

Cervený V. Seismic ray theory. Cambridge University Press, Cambridge, 2001. Vol. 110. doi:10.1017/CBO9780511529399.

Deev E.V., Nevedrova N.N., Zolnikov I.D., Rusanov G.G., Ponomarev P.V. Geoelectrical studies of the Chuya basin sedimentary fill (Gorny Altai) // Russian Geology and Geophysics. 2012. Vol. 53 (1). P. 92–107. doi: 10.1016/j.rgg.2011.12.007.

Dergach P.A., Yaskevich S.V., Yablokov A.V. Study of the structure of a velocity section with a fault formed as a result of the 2003 Chuya earthquake // Inter Expo Geo-Siberia (In Russ.). Novosibirsk, 2022. Vol. 2 (2). P. 108–114.

Guedes V.J.C.B., Maciel S.T.R., Rocha M.P. Refrapy: A Python program for seismic refraction data analysis // Computers & Geosciences. 2022. Vol. 159. Article 105020. doi:10.1016/j.cageo.2021.105020.

Higuera-Díaz I.C., Carpenter P.J., Thompson M.D. Identification of buried sinkholes using refraction tomography at Ft. Campbell Army Airfield, Kentucky // Environmental Geology. 2007. Vol. 53. P. 805–812. doi: 10.1007/s00254-007-0693-y.

Julian B.R., Gubbins D. Three-dimensional seismic ray tracing // Journal of Geophysics. 1977. Vol. 43 (1). P. 95–113.

Kissling E., Husen S., Haslinger F. Model parametrization in seismic tomography: a choice of consequence for the solution quality // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2001. Vol. 123 (2–4). P. 89–101. doi: 10.1016/S0031-9201(00)00203-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.

- Koulakov I., Stupina T., Kopp H.** Creating realistic models based on combined forward modeling and tomographic inversion of seismic profiling data // *Geophysics*. 2010. Vol. 75 (3). P. B115–B136. doi:10.1190/1.3427637.
- Koulakov I., Kopp H., Stupina T.** Finding a realistic velocity distribution based on iterating forward modelling and tomographic inversion // *Geophysical Journal International*. 2011. Vol. 186 (1). P. 349–358. doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05034.x.
- Kulakov I.Yu.** BASIC TOMO: an educational tool for investigating the role of controlling parameters and observation geometry in tomography problems // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. 2020. No. 1. P. 40–54. doi:10.18303/2619-1563-2020-1-40.
- Kulikov V.A., Khogoev E.A., Salnikov A.S., Sagaydachnaya O.M., Dunaeva K.A., Shemyakin M.L., Yaskevich S.V.** Studies of the Chuya earthquake fractured zone and their application to petroleum geology problem solving on the Siberian Platform // *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2011. No. 3. P. 23–30.
- Liu J.-S., Liu F.-T., Liu J., Hao T.-Y.** Parallel LSQR algorithms used in seismic tomography // *Chinese Journal of Geophysics*. 2006. Vol. 49 (2). P. 483–488. doi:10.1002/cjg2.858.
- Meléndez A., Korenaga J., Sallarès V., Miniussi A., Ranero C.R.** TOMO3D: 3-D joint refraction and reflection traveltimes tomography parallel code for active-source seismic data—synthetic test // *Geophysical Journal International*. 2015. Vol. 203 (1). P. 158–174. doi:10.1093/gji/ggv292.
- Nevedrova N.N., Shalaginov A.E.** Monitoring of electromagnetic parameters in the seismic activation zone of Gorny Altai // *Geophysics*. 2015. No. 1. P. 31–40.
- Nikitin A.A., Serdyukov A.S., Duchkov A.A.** Parallel algorithm of three-dimensional eikonal solver for seismic applications // *Bulletin of the Novosibirsk State University. Series: Information Technologies*. 2015. Vol. 13 (3). P. 19–28.
- Nikitin A.A., Serdyukov A.S., Duchkov A.A.** Optimization of the ray seismic tomography algorithm for modern high-performance computing systems // *Baikal Young Scientists Conference on Geology and Geophysics: Proceedings of the IV All-Russian youth scientific conference (In Russ.)*. Ulan-Ude, 2017. P. 178–180.
- Nikitin A.A., Serdyukov A.S., Duchkov A.A.** Cache-efficient parallel eikonal solver for multicore CPUs // *Computational Geosciences*. 2018. Vol. 22 (5). P. 775–787. doi:10.1007/s10596-018-9725-9.
- Nikitin A.A., Duchkov A.A., Koulakov I.Yu., Vasilevskiy A.N.** Development of seismic tomography software // *Geodynamics. Geomechanics and Geophysics: Proceedings of the XVIII All-Russian Workshop (In Russ.)*. Novosibirsk, 2018. P. 19–20.
- Nikitin A.A., Duchkov A.A., Kulakov I.Yu., Chernyshov G.S.** ST3D: Certificate of state registration of a computer program (In Russ.). 2020.
- Nikitin A.A., Eponeshnikova L.Yu., Duchkov A.A.** Development and testing of a library of seismic tomography algorithms // *Seismic Exploration in Siberia and Beyond: Proceedings of the Science Conference (In Russ.)*. Krasnoyarsk, 2023. P. 122–128.
- Paige C.C., Saunders M.A.** LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares // *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*. 1982. Vol. 8 (1). P. 43–71. doi:10.1145/355984.35598.
- Powers M., Burton B.** Seismic refraction tomography inversion of blind test model traveltimes using two commercial programs // *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2011*. Society of Exploration Geophysicists, 2011. P. 29.

Riad S., El-Haddad A.E., Abbas M.A., Said A.H. Structural modeling of seismic refraction investigations at Wadi Beda El Atshan area in the Eastern Desert, Egypt // International Journal of Geophysics and Geochemistry. 2017. Vol. 4 (1). P. 1–17.

Sanfirov I.A., Yaroslavtsev A.G., Akhmatov A.E., Babkin A.I., Goldobin A.A., Minkov S.I. Pulse powder source of elastic vibrations (In Russ.). 2012.

Sheehan J.R., Doll W.E., Mandell W.A. An evaluation of methods and available software for seismic refraction tomography analysis // Journal of Environmental & Engineering Geophysics. 2005a. Vol. 10 (1). P. 21–34. doi: 10.2113/JEEG10.1.21.

Sheehan J.R., Doll W.E., Watson D.B., Mandell W.A. Application of seismic refraction tomography to karst cavities // US geological survey karst interest group proceedings, Rapid City, South Dakota. 2005b. P. 29–38.

Soloviev V.M., Seleznev V.S., Kulakov I.Y., Liseikin A.V., Shenmayer A.E. Method, technology and results of engineering-seismic researches in industrial and hard to reach regions of Siberia // Near Surface Geoscience 2012: 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. European Association of Geoscientists & Engineers. Paris, 2012. P. 13.

Tikhonov A.N., Goncharsky A.V., Stepanova V.V., Yagoda A.G. Numerical methods for solving ill-posed problems (In Russ.). Nauka, Moscow, 1990. 232 p.

Toto E.A., El Miloudi A., El Basri M., Hafid M., Zouhri L., El Mouraouah S., Iben Brahim A., Birouk A., Kasmi M. New geophysical and geological evidence for the present day southernmost active deformational front of the Rif thrust-and-fold belt and the oceanic accretionary prism of Cadiz: the Dhar Doum–Lalla Zahra fault, Northwestern Atlantic Coastal Morocco // Environmental Earth Sciences. 2012. Vol. 67. P. 2411–2422. doi: 10.1007/s12665-012-1692-1.

Volchkova V.A., Shishkina M.A. Ray seismic tomography of synthetic data typical for Western Siberia: development of a seismic inversion algorithm with adaptive parameterization of the medium by wavelet functions, selection of inversion parameters // Problems of Geokosmos: Proceedings of the XIV Conference and School (In Russ.). St. Petersburg, 2021. P. 17–28.

White M.C., Fang H., Nakata N., Ben-Zion Y. PyKonal: a Python package for solving the eikonal equation in spherical and Cartesian coordinates using the fast marching method // Seismological Research Letters. 2020. Vol. 91 (4). P. 2378–2389.

Zakharov V.N., Averin A.P., Vartanov S.A. Analysis of beam tomography algorithms for predicting the disturbance of an extraction column // Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2010. No. 3. P. 183–190.

Zol'nikov I.D., Deev E.V., Lyamina V.A. New data on Quaternary morpholithogenesis in the Chuya basin (Gorny Altai) // Russian Geology and Geophysics. 2010. Vol. 51 (4). P. 339–348. doi:10.1016/j.rgg.2010.03.002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ПОТАПОВА Кристина Юрьевна – младший научный сотрудник НОЦ НГУ. Основные научные интересы: сейсмическая лучевая томография, итерационные алгоритмы лучевой томографии.

АБРАМЕНКОВ Сергей Сергеевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории обработки и анализа сейсмических данных научно-образовательного центра “Газпромнефть-НГУ”. Основные интересы: обработка сейсмических данных, физические механизмы сейсмичности, анализ когерентности волнового поля, <https://orcid.org/0000-0003-4324-3240>.

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

ДЕРГАЧ Петр Александрович – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмический мониторинг, локальная сейсмология, сейсмометрия, инженерная сейсморазведка, <https://orcid.org/0000-0001-5672-7813>.

МЕДВЕДЬ Ирина Викторовна – заведующая лабораторией обработки и анализа сейсмических данных НОЦ ГПН НГУ. Старший научный сотрудник лаборатории сейсмической томографии ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическая томография, структура коры и мантии, коллизионные процессы, эволюция Земли, <https://orcid.org/0000-0002-4181-8365>.

СТУПИНА Татьяна Александровна – кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией сейсмической томографии Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: геостатистика, обработка и анализ сейсмических данных, методы построения оценок качества моделей, <https://orcid.org/0000-0001-7489-9731>.

*Статья поступила в редакцию 15 ноября 2024 г.,
одобрена после рецензирования 21 ноября 2024 г.,
принята к публикации 22 ноября 2024 г.*