
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ОСНОВАН В 2004 г.
ВЫХОДИТ 4 РАЗА В ГОД

АПРЕЛЬ № 2 2024 ИЮНЬ

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. Баяк*, 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. Поспеева*, 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	№ 2	Апрель–Июнь 2024
----------------	-------------------------------	-----	---------------------

СОДЕРЖАНИЕ

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.....	4
Фомин А.М., Новоселя П.А. Уточнение строения парфеновского горизонта на основе обобщения результатов региональных сейсморазведочных работ в пределах Ангаро-Ленской НГО.....	17
Дучков А.Д., Сивцев А.И., Аюнов Д.Е. Оценка теплового потока в северной части Индигиро-Зырянского прогиба (Якутия).....	29
Неклюдов Д.А., Протасов М.И. Частотно-зависимые лучи Ломакса для квазипродольных волн в трехмерных трансверсально-изотропных средах с наклонной осью симметрии	40
Тимофеев В.Д., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В. Деформации и смещения земной поверхности в эпоху землетрясений в Турции в феврале 2023 года по геодезическим данным.....	55

RUSSIAN JOURNAL OF GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES

Founded in 2004	Quarterly	No 2	April–June 2024
-----------------	-----------	------	--------------------

CONTENTS

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.....	4
Fomin A.M., Novoselya P.A. Clarification of the structure of the Parfenov horizon based on generalization of the results of regional seismic surveys within the Angara–Lena oil and gas region	17
Duchkov A.D., Sivtsev A.I., Ayunov D.E. Assessment of heat flow in the northern part of the Indigiro-Zyryansky trough (Yakutia).....	29
Neklyudov D.A., Protasov M.I. Frequency dependent qP -Lomax rays in three-dimensional weak TTI media.....	40
Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V. Deformation and displacements of Earth's surface in Turkish earthquakes era in February 2023 by geodesy data	55



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, Koptuyug 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 [Беяшов и др., 2013], метод полей времен [Епинатьева и др., 1990], метод T_0' 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.

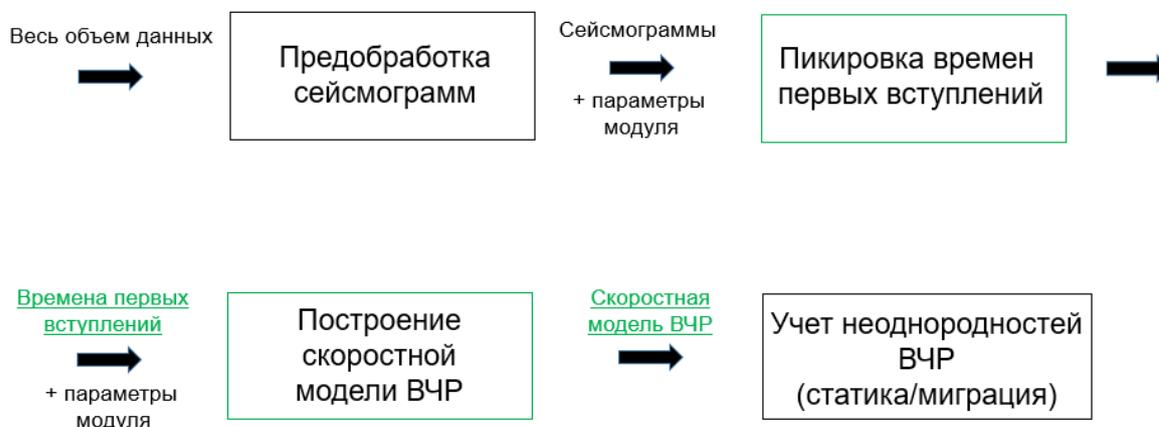


Рис. 1. Блок-схема применения автоматического пикировщика и лучевой томографии.

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 ПИКИРОВКИ

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.

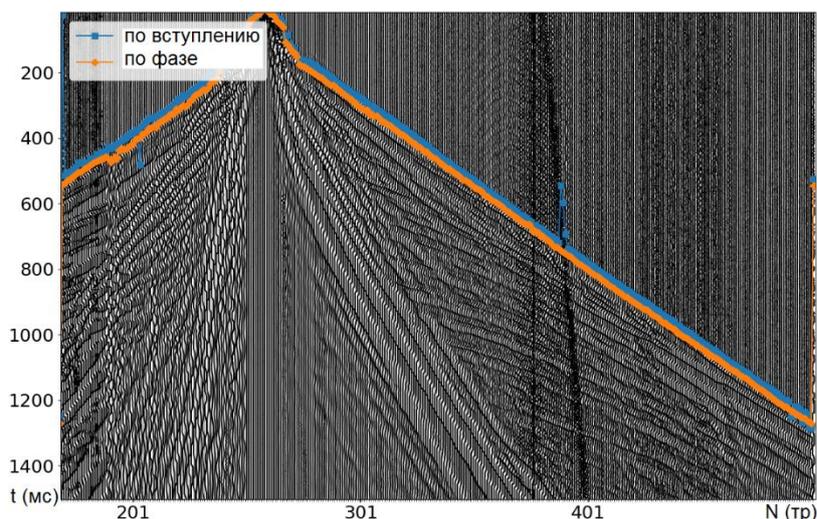


Рис. 2. Пример сейсмограммы с нанесенными временами первых вступлений, синим – времена ИНГГ СО РАН, оранжевым – времена АО «СНИИГГиМС».

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).

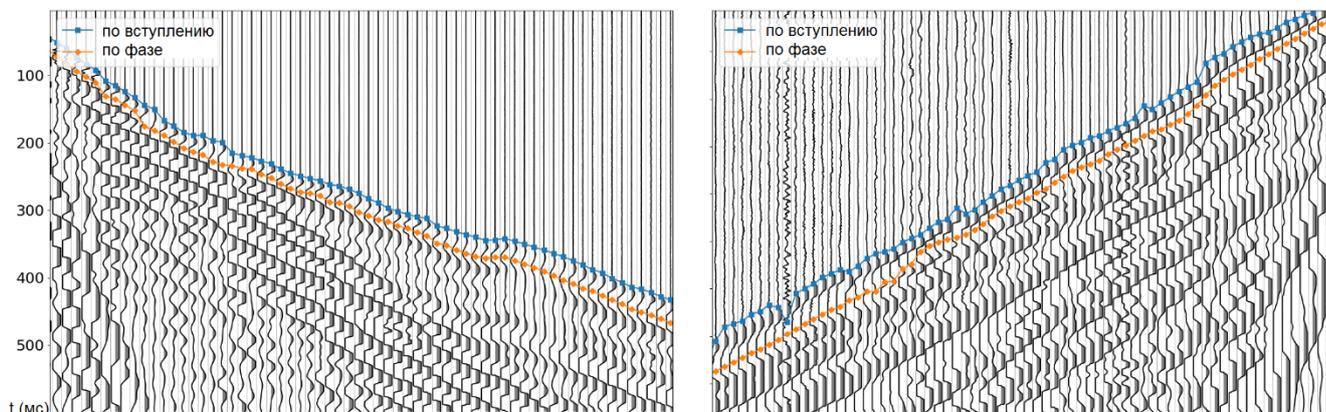


Рис. 3. Два участка сейсмограммы с нанесенными временами первых вступлений: синим – времена ИНГГ СО РАН, оранжевым – времена АО «СНИИГГИМС».

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 %).

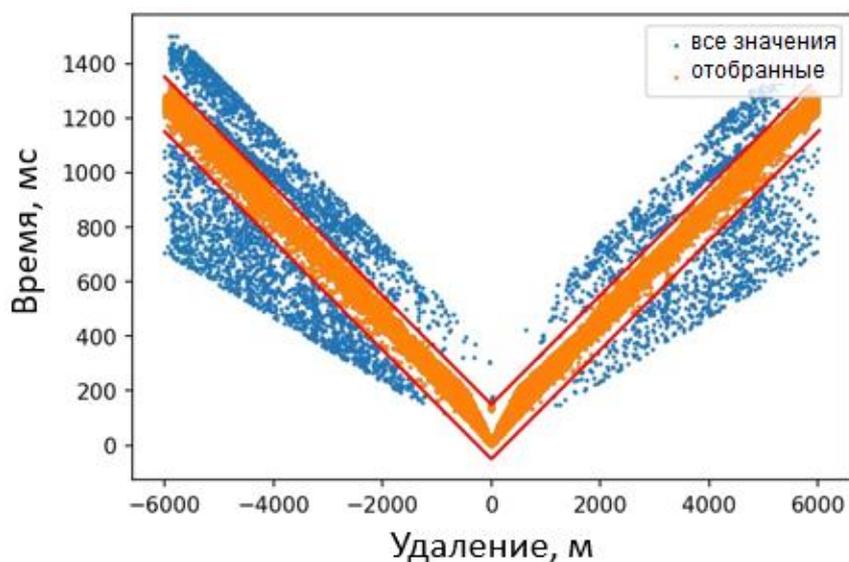


Рис. 4. Кросс-плот времен первых вступлений ИНГГ СО РАН, красным – доверительный интервал, синим – выбросы, оранжевым – времена первых вступлений после отбраковки.

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.

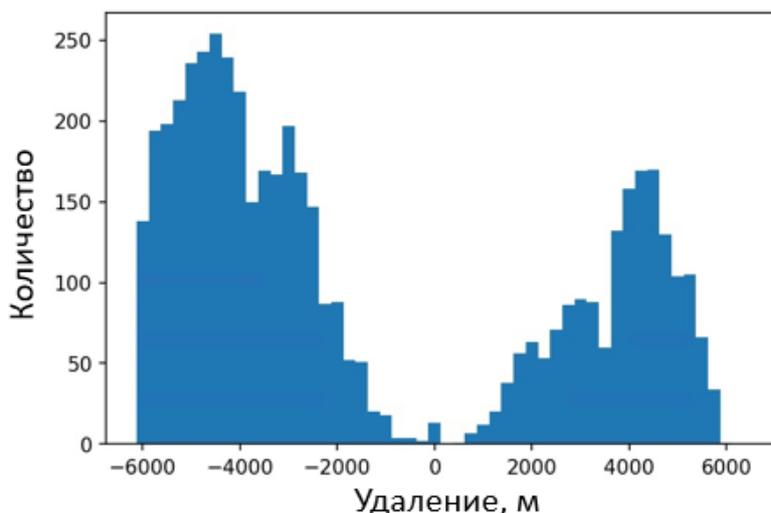


Рис. 5. Гистограмма распределения количества выбросов от удаления (пикировка ИНГГ СО РАН).

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.

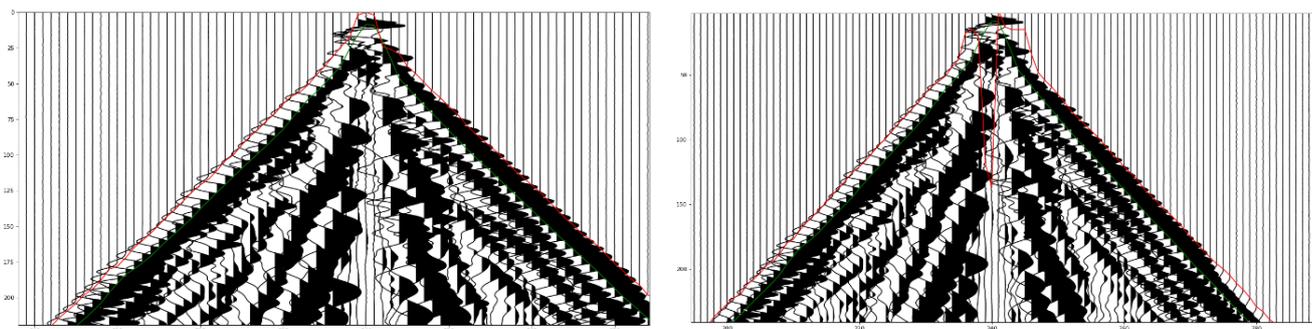


Рис. 6. Сейсмограммы с временами первых вступлений, слева без дообучения, справа с дообучением, красным – пикировка первых вступлений.

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.

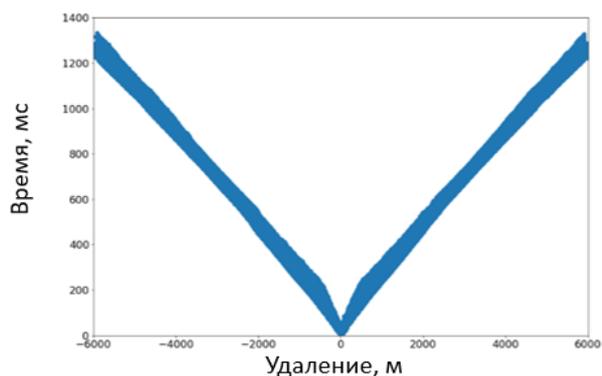


Рис. 7. Кросс-плот времен первых вступлений АО «СНИИГГиМС».

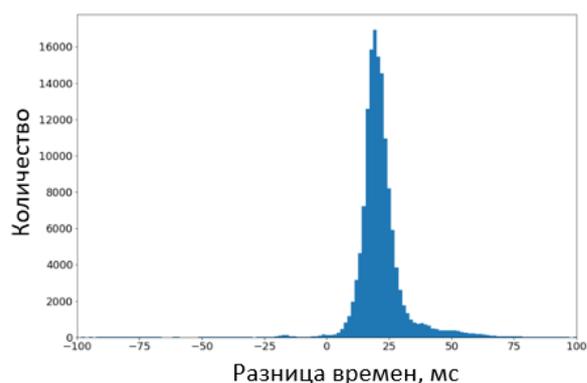


Рис. 8. Гистограмма разницы времен первых вступлений АО «СНИИГГиМС»–ИНГГ СО РАН.

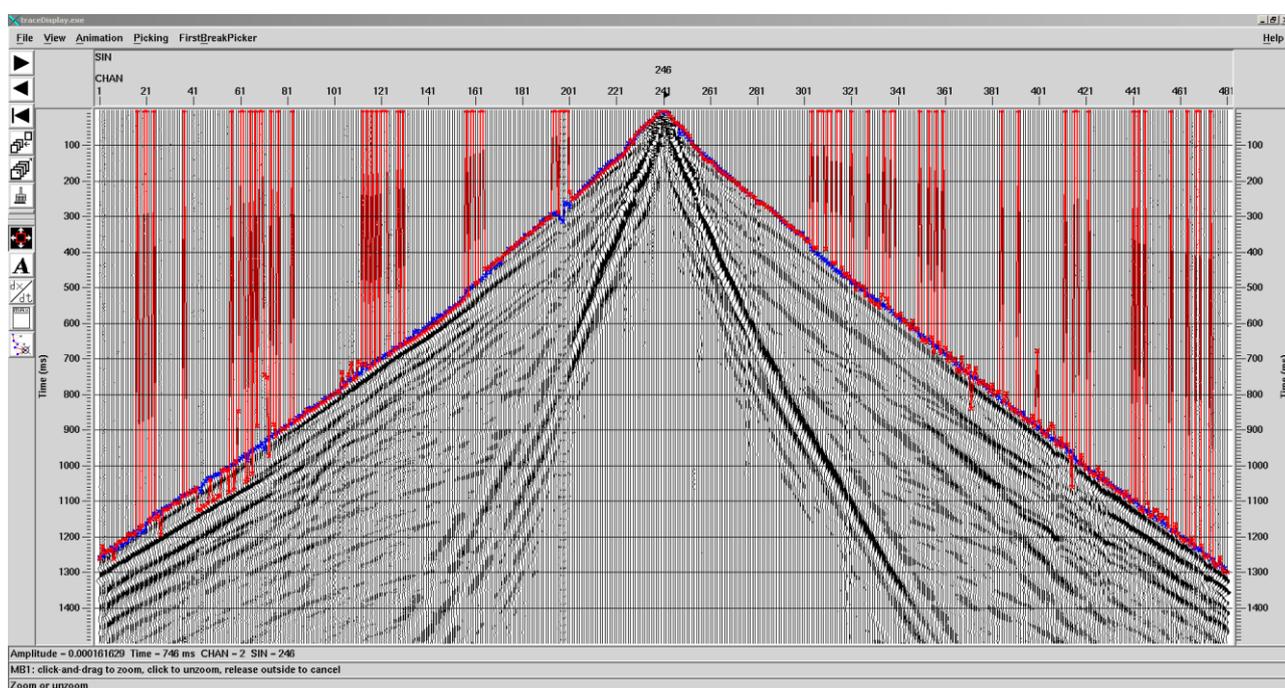


Рис. 9. Сейсмограмма с временами первых вступлений, красным – пикировка ИНГГ СО РАН (с нулевыми значениями в области автоматической отбраковки некорректных пиков), синим – пикировка АО «СНИИГГиМС» «по срыву».

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.

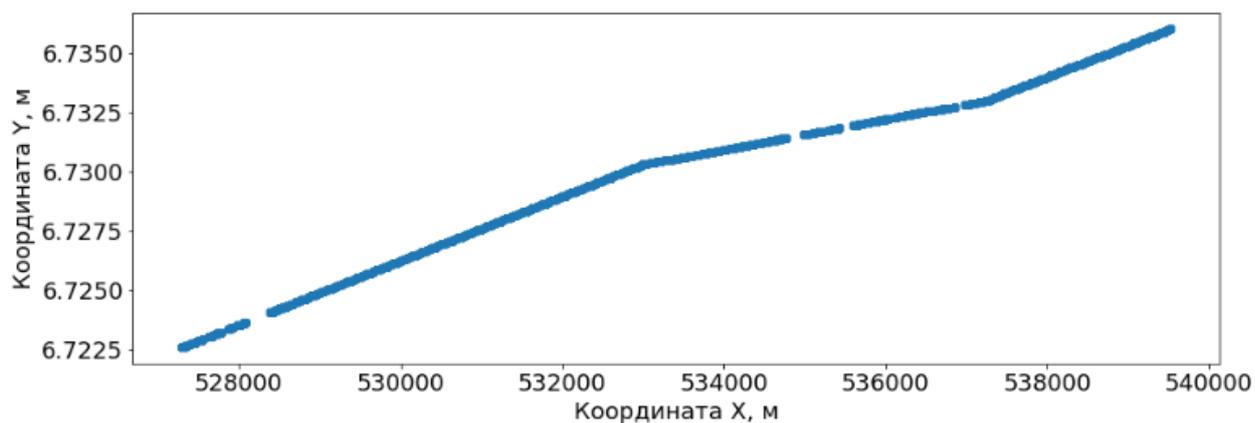


Рис. 10. Положение приемников на профиле.

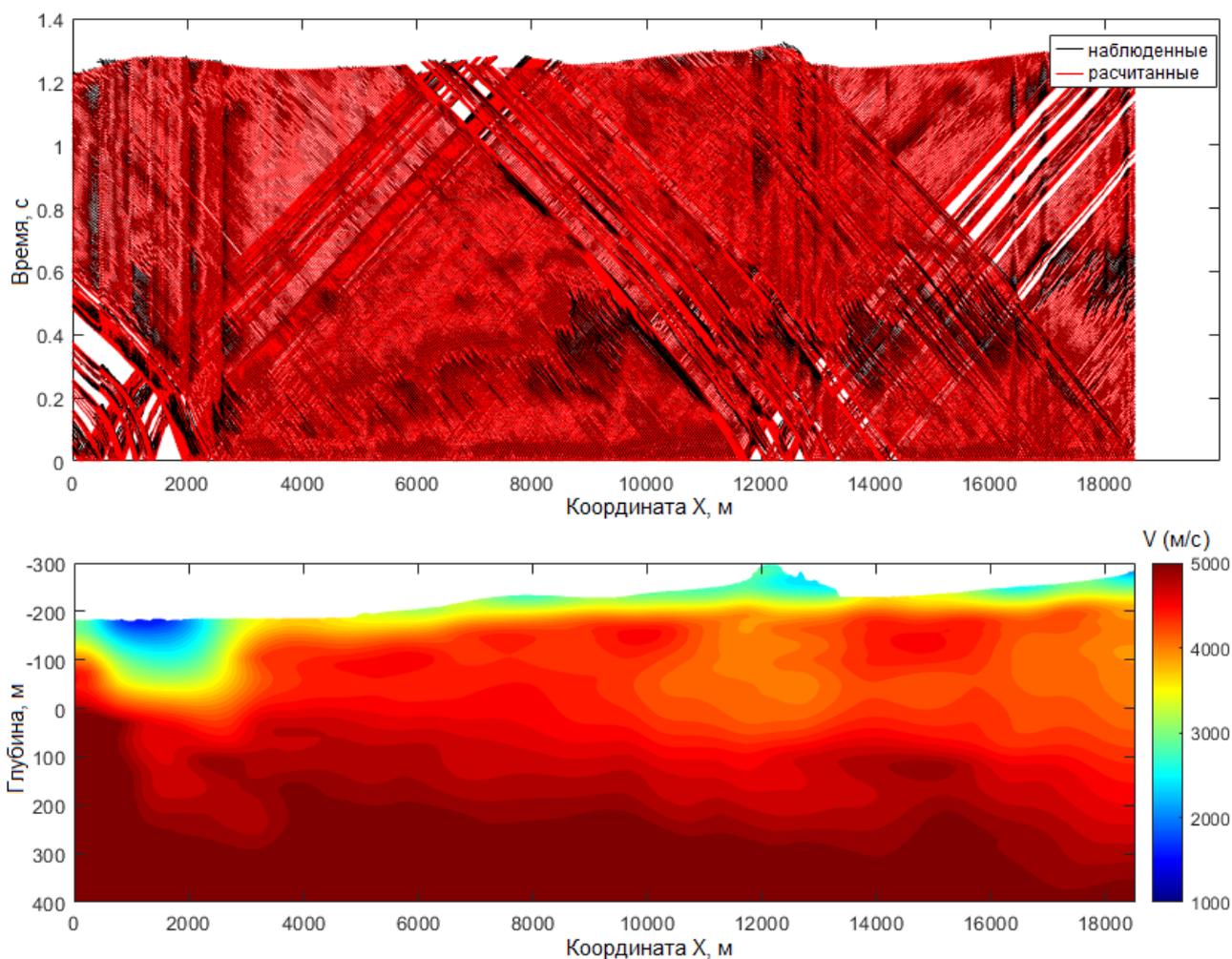


Рис. 11. Результат применения метода лучевой томографии, пикировка АО «СНИИГГиМС», совокупность годографов сверху, скоростная модель снизу.

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).

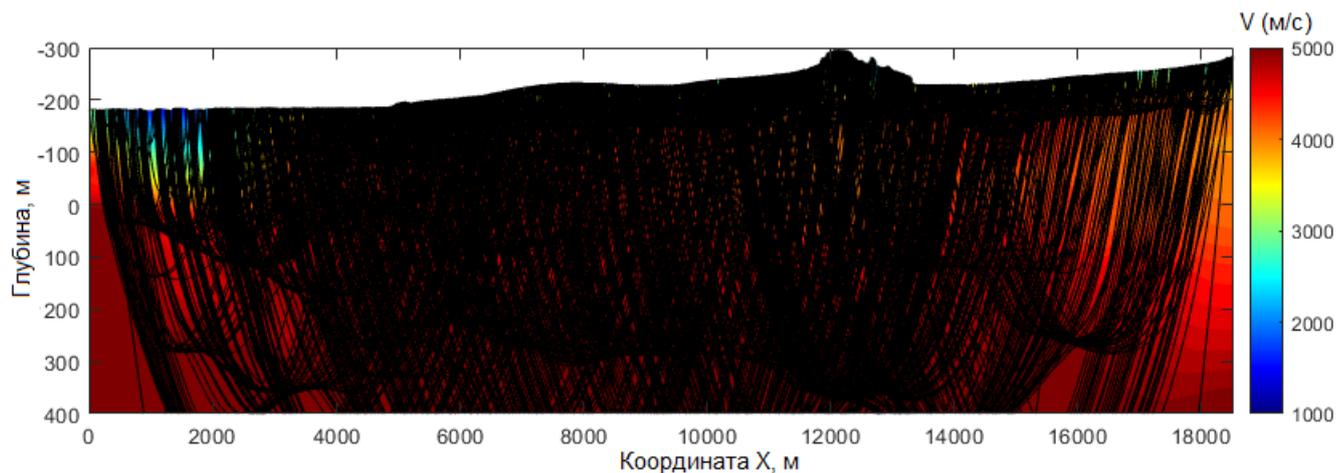


Рис. 12. Траектории лучей рефрагированных волн в полученной модели.

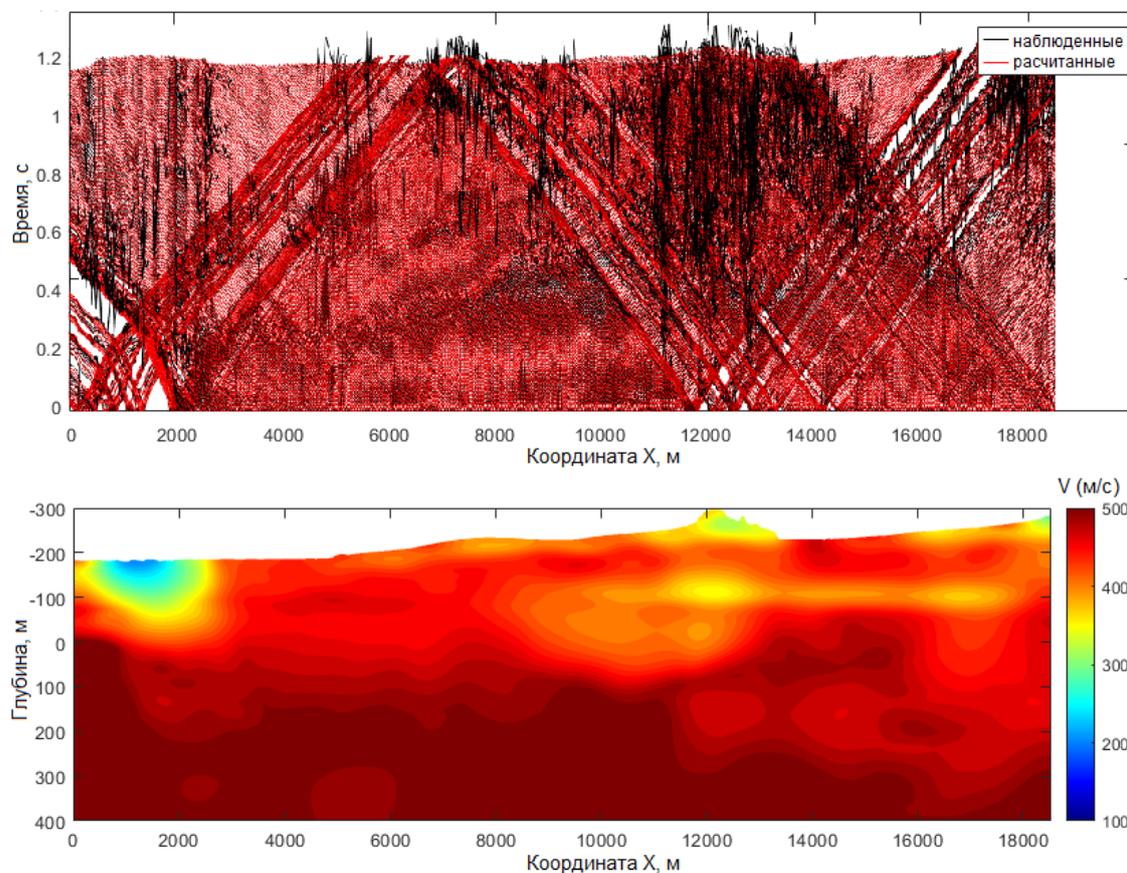


Рис. 13. Результат применения метода лучевой томографии, пикировка ИНГГ СО РАН, совокупность годографов сверху, скоростная модель снизу.

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 обрабатывает 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., Горяевчев 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.

- Epinatieva 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 сейсмологии 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.*



УТОЧНЕНИЕ СТРОЕНИЯ ПАРФЕНОВСКОГО ГОРИЗОНТА НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ В ПРЕДЕЛАХ АНГАРО-ЛЕНСКОЙ НГО

Андрей Михайлович Фомин^{1,✉}, Полина Александровна Новоселя²

^{1,2}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹FominAM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5789-1762>

²NovoselyaPA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5468-4694>

Аннотация. Проанализированы результаты региональных геологоразведочных работ за счет федерального бюджета на территории Ангаро-Ленской НГО с 2006 по 2017 гг. На базе комплексной интерпретации данных геофизических исследований скважин и сейсморазведочных работ уточнены карты рельефа кровли чорской свиты, толщин и песчаности парфеновского газоносного горизонта. На основе интерпретации комплекса данных ГИС, сейсморазведки и глубокого бурения сделан вывод о характере изменения песчаности парфеновского газоносного горизонта.

Ключевые слова: венд, региональная сейсморазведка, парфеновский горизонт, песчаность, корреляционный профиль, Ангаро-Ленская НГО

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ-2022-0008.

Для цитирования: Фомин А.М., Новоселя П.А. Уточнение строения парфеновского горизонта на основе обобщения результатов региональных сейсморазведочных работ в пределах Ангаро-Ленской НГО // Геофизические технологии. 2024. № 2. С. 17–28. doi:10.18303/2619-1563-2024-2-17.

CLARIFICATION OF THE STRUCTURE OF THE PARFENOV HORIZON BASED ON GENERALIZATION OF THE RESULTS OF REGIONAL SEISMIC SURVEYS WITHIN THE ANGARA–LENA OIL AND GAS REGION

Andrey M. Fomin^{1,✉}, Polina A. Novoselya²

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

¹FominAM@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5789-1762>

²NovoselyaPA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5468-4694>

Abstract. The results of regional geological exploration at the expense of the federal budget in the territory of the Angara–Lena oil and gas region from 2006 to 2017 are analyzed. Based on a comprehensive interpretation of data from geophysical surveys of wells and seismic surveys, relief maps of the roof of the Chora Formation, thicknesses and sandiness of the Parfenov gas-bearing horizon were updated. Based on the interpretation of a complex of GIS data, seismic exploration and deep drilling, a conclusion was made about the nature of the change in the sand content of the Parfenov gas-bearing horizon.

Keywords: Vendian, regional seismic exploration, Parfenov horizon, sand content, correlation profile, Angara–Lena oil and gas region

Funding: The study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0008.

For citation: Fomin A.M., Novoselya P.A. Clarification of the structure of the Parfenov horizon based on generalization of the results of regional seismic surveys within the Angara–Lena oil and gas region // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 2. P. 17–28. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-2-17.

ВВЕДЕНИЕ

Ангаро-Ленская нефтегазоносная область (НГО) была выделена в объеме Ангаро-Ленской ступени (АЛС) [Конторович и др., 1975]. Вопросами изучения нефтегазоносности вендского терригенного комплекса АЛС в разные годы занимались А.А. Трофимук (ИГГ АН СССР), А.Э. Конторович, С.А. Моисеев (ИНГГ СО РАН), В.Г. Васильев (ВНИИГАЗ), Ю.А. Притула, Э.А. Базанов, В.В. Забалуев (ВНИГРИ), В.Н. Воробьев, Н.В. Мельников, В.С. Старосельцев (СНИИГГиМС), С.Л. Арутюнов, Д.И. Дробот, А.Н. Золотов (ВостСибНИИГГиМС), Т.К. Баженова, М.В. Дахнова, Н.К. Фортунатова, П.Н. Мельников (ВНИГНИ) и многие другие [Геология..., 1981; Нефтегазоносные бассейны..., 1995; Топешко, Еремин, 2004; Конторович и др., 2009].

За последнее десятилетие проведены работы по уточнению обстановок осадконакопления терригенных отложений венда Ангаро-Ленской ступени по лито- и биофациям. Они рассмотрены в ряде работ Кочнева Б.Б., Хабарова Е.М. и др. [Советов, Благовидов, 2004; Хабаров и др., 2013, 2014; Наговицин, Кочнев, 2015].

Изучаемая часть терригенных отложений венда на рассматриваемой территории входит в состав непского и тирского региональных стратиграфических горизонтов (РСГ). В непском РСГ выделяются сверху вниз шамановский, боханский и базальный газоносные горизонты, в тирском РСГ – парфеновский горизонт [Геология..., 1981; Нефтегазоносные бассейны..., 1995; Скузоватов, 2017].

Парфеновский горизонт распространен на всей территории Ангаро-Ленской НГО, в нем выделяют два пласта P_1 и P_2 , которые отличаются по условиям осадконакопления и промысловым параметрам [Геология..., 1981; Нефтегазоносные бассейны..., 1995]. Верхняя часть разреза (пласт P_1) сложена толщей неравномерного переслаивания мелко-среднезернистых до алевритистых и редко до крупнозернистых кварцевых, полевошпат-кварцевых и полимиктовых песчаников с пачками и прослоями алевролитов и аргиллитов. В нижней части (P_2) он сложен неравномерным переслаиванием зеленовато-серых и серых алевролитов и аргиллитов с тонкими прослоями песчаников тех же цветов. Парфеновский горизонт сильно варьируется по толщине. Так, в скважинах Левобережного месторождения она составляет 7–10 м, на Братском – 6–51 м, на Шамановской площади – 23–38 м, на Чорской – 65–81 м, на Ковыктинской – 39–83 м. Максимальные толщины горизонта наблюдаются на северо-западе НГО – Кутурминская (141 м) и Ковинская (140 м) площади. Такая изменчивость толщин горизонта обусловлена его генезисом.

Большинство исследователей считает, что пласт P_1 сложен осадками аллювиальных русел, устьевых баров и прибрежной равнины, плавно переходящей в северном направлении в морской залив с терригенно-сульфатно-карбонатной седиментацией. Верхняя часть пласта P_1 распространена по площади НГО практически повсеместно и сложена осадками от аллювиальных до преимущественно мелководно-морских обстановок. Литофациальный набор пласта P_1 характеризует осадочную систему трансгрессирующего моря и сверху ограничен подошвой карбонатной катангской свиты, фиксирующей максимально высокий уровень морского бассейна. Ближе к Присяжью отложения P_1 сложены аллювиальными грубозернистыми косослоистыми песчаниками.

Пласт P_2 формировался в обстановке приливно-отливных течений, т. е. режим осадконакопления был, преимущественно, морским. В это время происходила переработка песчаного материала фронта дельты и его обогащение глинистыми компонентами. Пласт P_2 отвечает фазе образования дельтовой системы, когда осадконакопление имело преимущественно континентальный источник [Советов, Благовидов, 2004; Ахияров и др., 2007; Фомин и др., 2007; Самсонов, Ларичев, 2008; Хабаров и др., 2013, 2014; Скузоватов, 2014].

Установлено, что большая часть запасов и ресурсов газа Ангаро-Ленской НГО сосредоточена в парфеновском горизонте вендского терригенного комплекса [Геология..., 1981; Нефтегазоносные бассейны..., 1995]. Залежи углеводородов в нем характеризуются как неантиклинальные литологически и тектонически ограниченные. Осложняющим фактором для них является мозаичный характер распространения высокочемких коллекторов, как по латерали, так и по разрезу. Проведенные ранее литологические исследования позволили сделать вывод о существенных различиях в характере распространения улучшенных коллекторов на Ковыктинском, Ангаро-Ленском и Левобережном месторождениях, которые связаны главным образом с условиями формирования отложений и их постседиментационными изменениями [Хабаров и др., 2013, 2014; Скузоватов, 2017].

В связи с этим работа по изучению изменчивости песчаности парфеновского горизонта на территории Ангаро-Ленской НГО представляется актуальной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБОБЩЕНИЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

На территории Ангаро-Ленской НГО за счет Федерального бюджета РФ были проведены комплексные геофизические и геохимические исследования на девяти сейсморазведочных площадях практически неизученных глубоким бурением, которые позволили уточнить их геологическое строение и перспективы обнаружения новых залежей углеводородов (рис. 1).

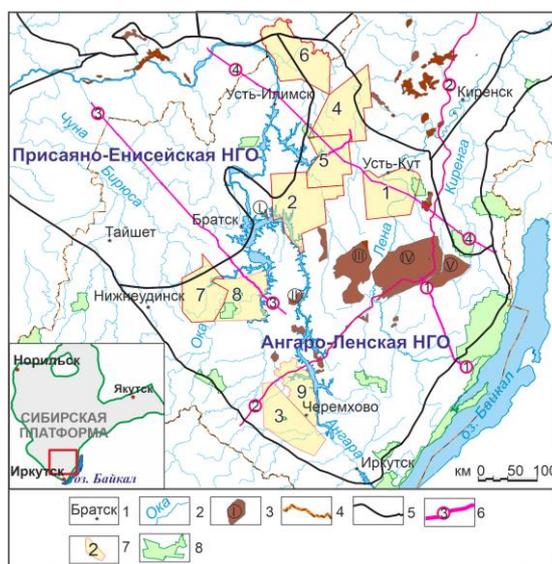


Рис. 1. Карта размещения региональных профилей и проектов сейсморазведочных работ на территории Ангаро-Ленской НГО. 1 – населенные пункты; 2 – реки; 3 – месторождения нефти и газа; границы (4–6): 4 – административные, 5 – нефтегазоносных областей, 6 – опорных сейсмопрофилей МОГТ 2D; 7 – территории проектов региональных работ; 8 – особо охраняемые территории. Цифры в кружках: 1 – Ковыкта-Предпатомский прогиб, 2 – Присяяно-Ленский, 3 – Богучано-Манзинский выступ-р. Ангара, 4 – Кежда-Предпатомский прогиб. Проекты региональных работ: 1 – Усть-Кутский, 2 – Заярский, 3 – Бельский, 4 – Верхнекатангский, 5 – Рудногорский, 6 – Катский, 7 – Западно-Ийский, 8 – Илиро-Ийский, 9 – Нукутский. Газоконденсатные месторождения, отмеченные на карте: I – Братское, II – Левобережное, III – Ангаро-Ленское, IV – Ковыктинское, V – Хандинское.

В рамках проектов было выполнено 101 53 км профилей сейсморазведки МОГТ 2D с плотностью сети сейсмических профилей 0.17 км/км². Всего же в пределах Ангаро-Ленской НГО отработано более 57 тыс. км сейсмических профилей со средней плотностью изученности 0.25 км/км². К 2024 г. территория НГО на 25 % изучена современными региональными сейсморазведочными работами, при этом следует отметить неравномерность степени изученности геолого-геофизическими методами.

Для картопостроений по результатам этих исследований нами были уточнены стратиграфические разбивки вендского терригенного комплекса по 70 глубоким скважинам, вскрывшим чорскую свиту на полную мощность. При этом использовались данные ГИС (ГК, НГК, АК и КС) и описание керна скважин. Был построен ряд профилей корреляции, меридионального и субширотного простирания, а также геологический профиль через скважины Хор-Тагнинская-3 и Ковыктинская-3 (рис. 2–4).

Профиль «Иркутская-1–Ковыктинская-3» протягивается в субмеридиональном направлении от юга Сибирской платформы к Верхоленскому сводовому поднятию. Песчаная часть парфеновского горизонта варьирует в небольших пределах от 10 до 30 м вплоть до скважин Чиканская-2 и Ковыктинская-3, где происходит резкий рост песчаной части до 54 и 83 м. В скважинах Парфеновская-2 и Осинская-10 выделяются дополнительные песчаные пласты парфеновского горизонта, которые хорошо выражены по кривым ГК и НГК. Боханский горизонт в рассмотренных скважинах варьирует по мощности от 33 до 90 м. Базальный горизонт мощностью 3 м вскрыт скв. Ковыктинская-3.

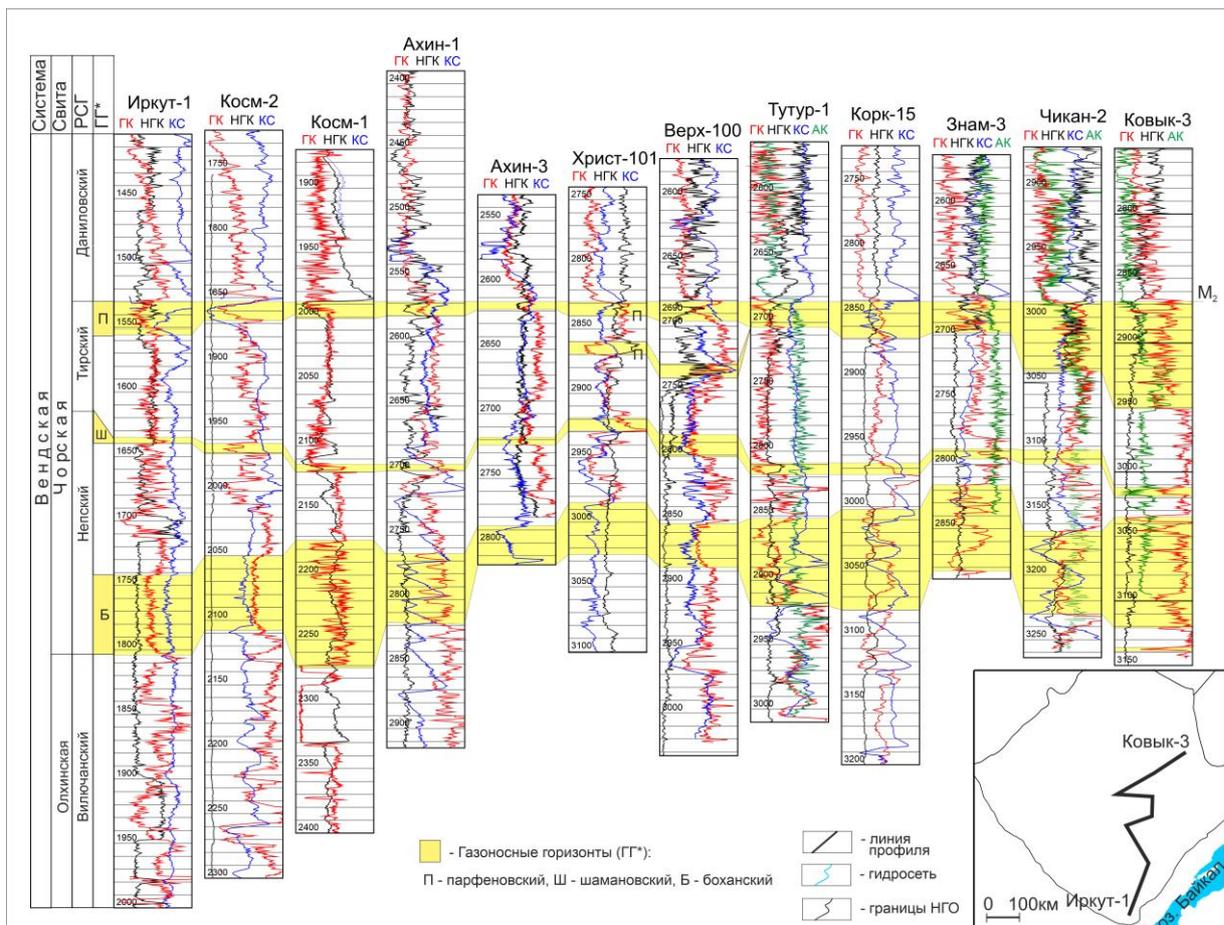


Рис. 2. Профиль корреляции по линии скважин Иркутская-1–Ковыктинская-3. РСГ – региональный стратиграфический горизонт, M₂ – электрокаротажный репер. Сокращенные названия скважин: Иркут – Иркутская, Косм – Космическая, Ахин – Ахинская, Христ – Христофоровская, Верх – Верхоленская, Тутур – Тутурская, Корк – Коркинская, Знам – Знаменская, Чикан – Чиканская, Ковык – Ковыктинская.

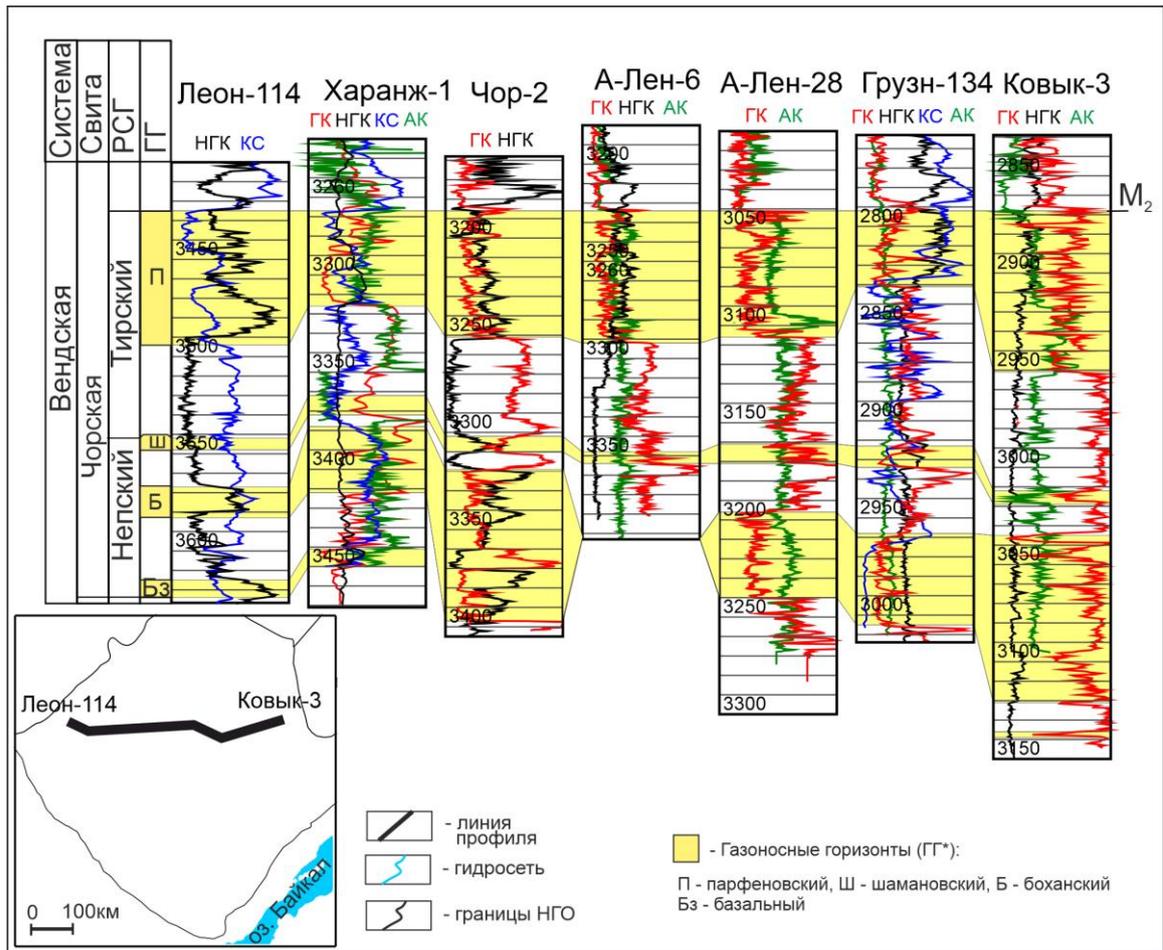


Рис. 3. Профиль корреляции по линии скважин Леоновская-114–Ковыктинская-3. Сокращенные названия скважин: Леон – Леоновская, Харанж – Харанжинская, Чор – Чорская, А-Лен – Ангаро-Ленская, Грузн – Грузновская.

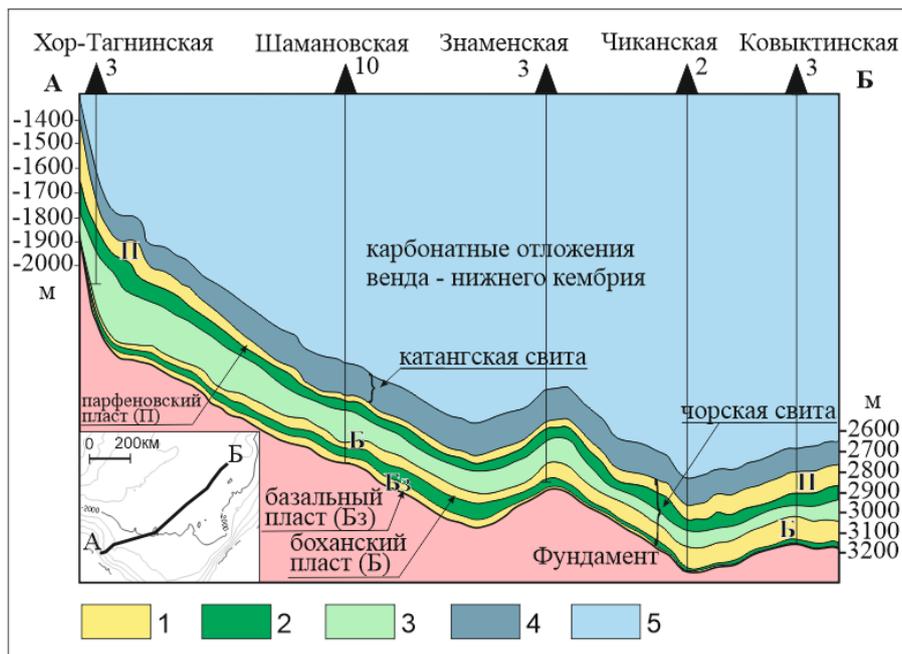


Рис. 4. Геологический профиль Хор-Тагнинская-3–Ковыктинская-3. Породы: 1 – преимущественно песчаные, 2 – алевроито-глинистые породы, 3 – песчано-алеврито-глинистые, 4 – глинисто-карбонатные, 5 – преимущественно сульфатно-карбонатные.

Профиль Тагнинская-2–Верхоленская-100 протягивается в субширотном направлении. Парфеновский горизонт имеет выдержанный характер по линии профиля, средняя мощность – 50 м. Боханский горизонт вскрыт пятью скважинами, средняя мощность – 30 м.

На разрезе наблюдается уменьшение глубин залегания терригенных отложений чорской свиты и заключенных в ней продуктивных горизонтов в юго-западном направлении, к границе Сибирской платформы. В катангской свите на юго-западе платформы увеличивается глинистость разреза и появляются маломощные алеврито-песчаные прослои.

По девяти проектам сейсморазведочных работ были оцифрованы структурные построения по отражающим горизонтам Ф (кровля фундамента), М₂ (кровля чорской свиты), которые были использованы для уточнения региональных структурных карт (рис. 5).

По кровле терригенного венда (кровле чорской свиты) по направлению к Присяжно-Енисейской синеклизе происходит погружение до глубины –4500 м. Братский выступ оконтуривается по изолинии –3000 м, достигая абсолютных отметок до –2750 м в своей центральной части.

Граница Ангаро-Ленской ступени с Непско-Ботубинской антеклизой (на севере карты) оконтуривается по изолинии –2300 м, относительно размыта.

На востоке ступень граничит с Предпатомским региональным прогибом, здесь абсолютные отметки глубин меняются от –2300 до –2750 м.

На юге Ангаро-Ленской ступени градиент рельефа резко возрастает, примерно с абсолютной отметки –2000 м (см. рис. 4, 5).

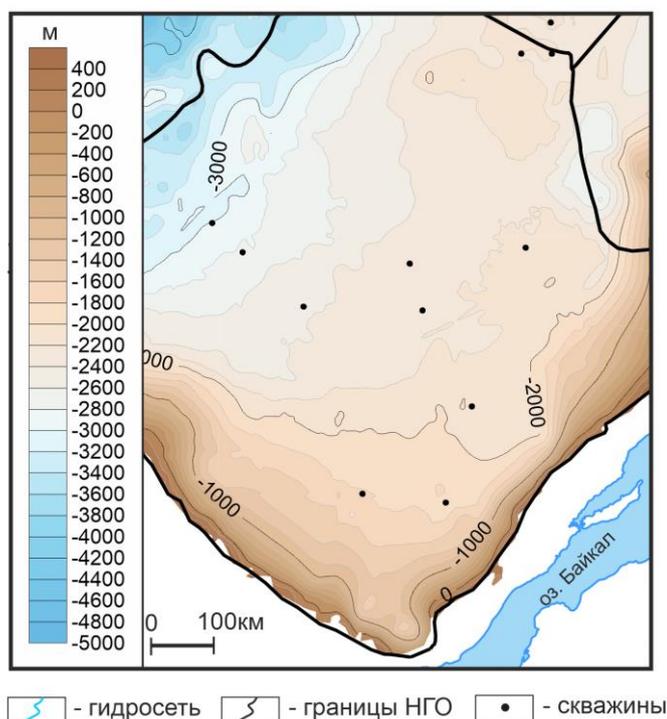


Рис. 5. Карта структурной поверхности чорской свиты.

Далее по регрессионным зависимостям были построены структурные карты по кровлям и подошвам для трех горизонтов изучаемого разреза – парфеновского, боханского и базального, а затем и карты общих толщин [Фомин, Новоселя, 2023].

Наиболее интересный результат был получен для парфеновского горизонта. Для него была построена карта толщин песчаников и затем из соотношения карты толщин песчаников к карте толщин парфеновского горизонта построена карта песчанности. В большинстве глубоких скважин, вскрывших парфеновские песчаники, керн отобран не в полном объеме горизонта, поэтому для построения карты песчанности использовалась зависимость значений гамма-каротажа от литологического состава пород, с привязкой к керну. Значения гамма-активности нормировались от 0 (отсутствие песчаников) до 1 (чистые песчаники) (рис. 6). Значения отнормированного параметра радиоактивности (коэффициент песчанности) менее 0.7 были отнесены к песчаникам по данным сопоставления керна и значений гамма-каротажа.

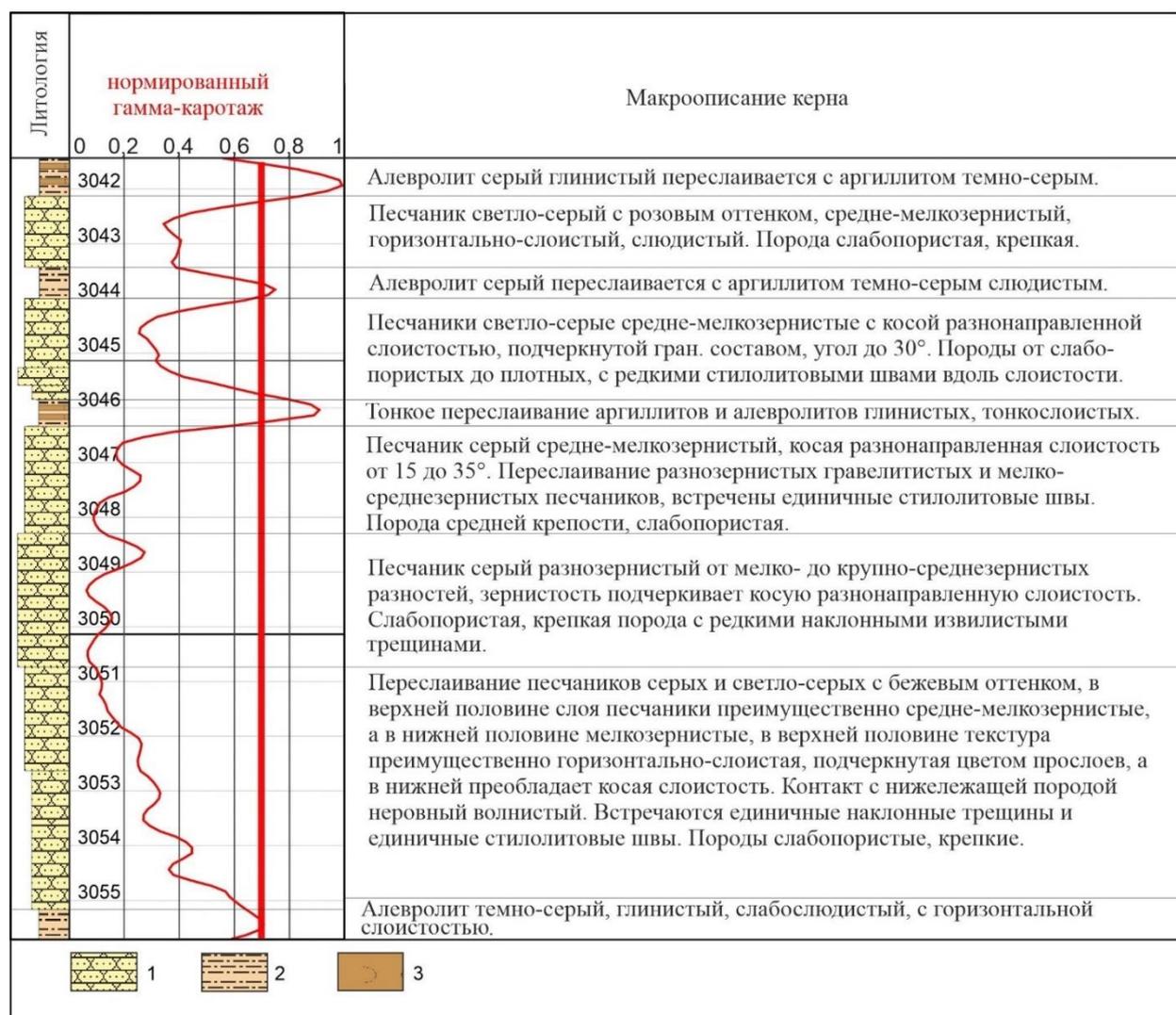


Рис. 6. Нормирование параметра радиоактивности парфеновского продуктивного горизонта на примере скважины Ангаро-Ленского месторождения. 1 – песчаники, 2 – алевролиты, 3 – аргиллиты.

На карте песчанности парфеновского горизонта значения отнормированного параметра радиоактивности, составляющие менее 0.7, распространены на периферии Ангаро-Ленской НГО, а также на Ковыктинском и Левобережном ГКМ и прилегающих к ним территориях (скв. Харанжинская-1, Леоновская-114 и др.). В центральных частях на Правобережной, Шамановской, Знаменской и других близлежащих площадях коэффициент песчанности снижается до значений ниже 0.35 (рис. 7).

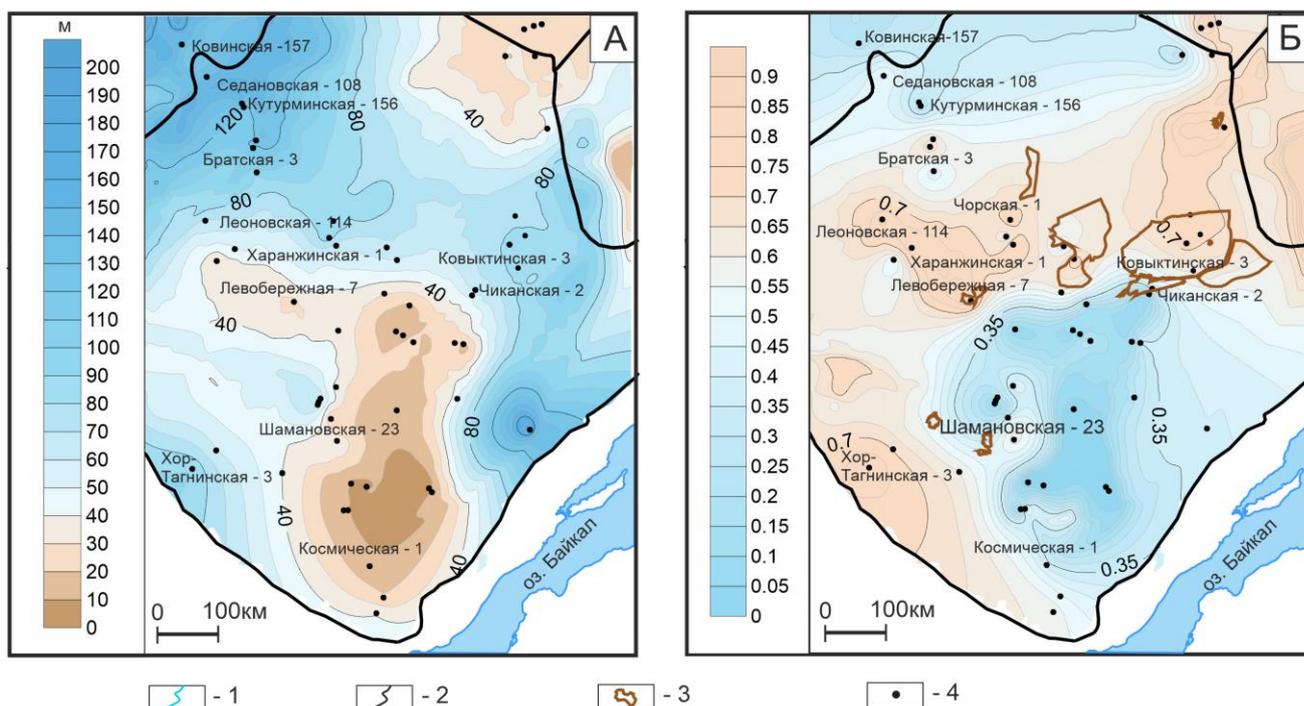


Рис. 7. Карты общих толщин (А) и песчаности (Б) парфеновского горизонта. 1 – гидросеть, 2 – границы нефтегазоносных областей, 3 – контуры месторождений, 4 – глубокие скважины.

В области увеличенных толщин горизонта на севере Ангаро-Ленской НГО снижается их песчаность, существенно увеличивается алеврито-глинистая составляющая. В юго-восточной части территории исследования также происходит уменьшение доли кластического материала и замещение отложений чорской свиты на космическую свиту, имеющей преимущественно карбонатный состав, с маломощными прослоями песчаников в кровельной (аналог парфеновского горизонта) и базальной частях разреза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные построения позволили детализировать структурный план терригенного комплекса венда на территориях проектов региональных работ, приведенных на рис. 1.

В целом на картах сохранился тренд на погружение кровли терригенного комплекса в сторону Присяяно-Енисейской синеклизы со средним градиентом 7 м/км. Результаты построения карт показывают, что все структурные поверхности на территории площади залегают моноклинально, погружаясь в северо-восточном направлении с различными градиентами на отдельных участках. Моноклираль не имеет выраженных антиклинальных форм. Выделяются только осложнения в виде широких пологих структурных носов. Это дает основание считать, что ловушками для углеводородов здесь могут быть неструктурные формы, а либо литологические, либо тектонически экранированные, либо комбинированные. Экранами для залежей УВ могут служить тектонические нарушения, простирающиеся, в частности, вдоль моноклиального склона в северо-западном направлении.

Построенная карта песчаности удовлетворительно согласуется с палеогеографическими построениями, опубликованными в работах В.Ю. Гоя, а также Е.М. Хабарова с соавторами [Гой, 2017; Хабаров и др., 2013]. Е.М. Хабаров показал, что для территории Ковыктинского газоконденсатного

месторождения существовало два источника сноса: со стороны Присяянья и со стороны Байкало-Патомского нагорья. На построенной нами карте выделяется центральная область с высоким содержанием алеврито-глинистых отложений (по керну и интерпретации радиоактивного каротажа), которая на схеме Е.М. Хабарова относится к зоне среднешельфовых обстановок (мелководный залив). В этой части осадки формировались в баровых системах, переработанных приливно-отливными протоками. Периодически происходило отмирание питающих каналов, в это время накапливались преимущественно глинистые осадки в мелководных заливах и/или на приливно-отливных равнинах. Здесь мощность песчаников не превышает 30 м, а средняя мощность составляет 10–20 м. Периферийная зона является наиболее песчанистой, по интерпретации указанных авторов она относится к обстановкам аллювиально-дельтового комплекса. Здесь толщины песчаников достигают 60 м. Таким образом карта песчанистости позволила уточнить границы области распространения зоны среднешельфовых обстановок.

Байкало-Патомский и Присяянский источники сноса в непское и тирское время, по-видимому, были разделены узким проливом, между ними формировались песчано-алеврито-доломитовые породы космической свиты (аналог чорской свиты в Иркутской фациальной зоне), а севернее, в области песчанистости менее 0.35 (Ийско-Жигаловская фациальная зона), шло накопление песчано-алеврито-глинистых пород в мелководном заливе (см. рис. 7Б).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Ахияров А.В., Орлов В.И., Бондарев А.Н. Зависимость продуктивности терригенных коллекторов от их фациальной принадлежности на примере парфёновского горизонта Ковыктинского газоконденсатного месторождения // *Геофизика*. 2007. № 6. С. 60–67.

Геология нефти и газа Сибирской платформы / Под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. М.: Недра, 1981. 552 с.

Гой В.Ю. Палеогеографическая модель формирования парфеновского горизонта с целью прогноза зон нефтегазоносности Ангаро-Ленской ступени // *Материалы конференции Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. Новосибирск: СГУГиТ, 2010. Т. 2, № 1. С. 102–106.

Конторович А.Э., Мельников Н.В., Старосельцев В.С. Нефтегазоносные провинции и области Сибирской платформы // *Геология и нефтегазоносность Сибирской платформы*. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1975. С. 4–21.

Конторович А.Э., Беляев С.Ю., Конторович А.А., Старосельцев В.С., Мандельбаум М.М., Мигурский А.В., Моисеев С.А., Сафронов А.Ф., Ситников В.С., Филипцов Ю.А., Хоменко А.В., Еремин Ю.Г., Быкова О.В. Тектоническая карта венд-нижнепалеозойского структурного яруса Лено-Тунгусской провинции Сибирской платформы // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50, № 8. С. 851–862.

Моисеев С.А., Пимичев Г.В., Скузоватов М.Ю., Теплов Л.К., Фонин П.Н. Строение парфеновского горизонта центральных и южных районов Ангаро-Ленской ступени // *Материалы научно-практической конференции: Нефтегазогеологический прогноз и перспективы развития нефтегазового комплекса Востока Сибири*. СПб.: ФГУП ВНИГРИ, 2013. С. 177–181.

Наговицин К.Е., Кочнев Б.Б. Микрофоссилии и биофации вендской ископаемой биоты юга Сибирской платформы // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56, № 4. С. 748–760. doi:10.15372/GiG20150409.

Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Вып. 8. Иркутский бассейн // Под ред. А.Э. Конторовича. Новосибирск, 1995. 61 с.

Самсонов В.В., Ларичев А.И. Перспективные нефтегазоносные комплексы и зоны южной части Сибирской платформы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. Т. 3, № 4. С. 12. https://www.ngtp.ru/rub/4/43_2008.pdf.

Скузоватов М.Ю. Критерии оценки перспектив газоносности парфеновского горизонта центральных районов Ангаро-Ленской ступени // Геология нефти и газа. 2014. № 1. С. 101–109.

Скузоватов М.Ю. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности вендского терригенного комплекса Ангаро-Ленской нефтегазоносной области. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2017. 187 с.

Советов Ю.К., Благовидов В.В. Реконструкция бассейна осадконакопления (на примере вендского передового прогиба – "форландового бассейна" юго-запада Сибирской платформы) // Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция / Под ред. Ю.Г. Леонова, Ю.А. Воложа. М.: Научный мир, 2004. 526 с.

Топешко В.А., Еремин Ю.Г. Перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия Ангаро-Ленской ступени // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2004. № 10. С. 20–28.

Фомин А.М., Новоселя П.А. Обобщение результатов региональных сейсморазведочных работ на территории Ангаро-Ленской НГО // Материалы конференции Интерэкспо ГЕО-Сибирь (г. Новосибирск, 17–19 мая 2023 г.). Новосибирск: СГУГиТ, 2023. Т. 2, № 2. С. 259–265.

Фонин П.Н., Конторович А.Э., Моисеев С.А., Пимичев Г.В. Левобережное и Ангаро-Ленское месторождения – новые открытия на Ангаро-Ленской ступени [Электронный ресурс] // Международная конференция геофизиков и геологов «Тюмень-2007» (г. Тюмень, 4–7 декабря 2007 г.). Тюмень, 2007. 4 с.

Хабаров Е.М., Вараксина И.В., Пушкарева М.М., Кугаколов С.А., Родякин С.В., Черныш П.С. Обстановки осадконакопления и фильтрационно-емкостные свойства парфеновского горизонта венда Ангаро-Ленской ступени // Материалы Всероссийского литологического совещания, посвященного 100-летию со дня рождения Л.Б. Рухина. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2013. Т. 1. С. 164–166.

Хабаров Е.М., Вараксина И.В., Пушкарева М.М., Кугаколов С.А., Родякин С.В., Черныш П.С. Обстановки осадконакопления и фильтрационно-емкостные свойства парфеновского горизонта венда Ангаро-Ленской ступени // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 2С. С. 66–75.

REFERENCES

Akhiyarov A.V., Orlov V.I., Bondarev A.N. Terrigenous reservoirs productivity vs rock mass facial characteristics: Parfyonov beds of the Kovykta gas/condensate field case history // Geophysics. 2007. No. 6. P. 60–67.

Fomin A.M., Novoselya P.A. Generalization of the results of regional seismic surveys on the territory of the Angara-Lena oil and gas region // Proceedings of the Interexpo GEO-Siberia Conference (Novosibirsk, May 17–19, 2023) [in Russian]. SGUGiT, Novosibirsk, 2023. Vol. 2 (2). P. 259–265.

Fonin P.N., Kontorovich A.E., Moiseev S.A., Pimichev G.V. Levoberezhnoye and Angarolenskoye fields – new discoveries in Angara-Lena step [Electronic resource] // International Conference of Geophysicists and Geologists "Tyumen-2007" (Tyumen, December 4–7, 2007) [in Russian]. Tyumen, 2007. 4 p.

Goy V.Yu. Paleogeographical model of the formation of the Parfenovsky horizon for the purpose of forecasting oil and gas bearing zones of the Angara-Lena stage // Proceedings of the Interexpo GEO-Siberia Conference [in Russian]. SGUGiT, Novosibirsk, 2010. Vol. 2 (1). P. 102–106.

Khabarov E.M., Varaksina I.V., Pushkareva M.M., Kugakolov S.A., Rodyakin S.V., Chernysh P.S. Sedimentation environments and filtration-capacitive properties of the Vendian Parfenovsky horizon of the Angara-Lena stage // Proceedings of the All-Russian Lithological Meeting Dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of L.B. Rukhin [in Russian]. St. Petersburg State University, St. Petersburg, 2013. Vol. 1. P. 164–166.

Khabarov E.M., Varaksina I.V., Pushkareva M.M., Kugakolov S.A., Rodyakin S.V., Chernysh P.S. Depositional environments and reservoir properties of the Vendian Parfyonovo producing horizon at the Angara-Lena step // Geology and Mineral Resources of Siberia. 2014. No. 2S. P. 66–75.

Kontorovich A.E., Melnikov N.V., Staroseltsev V.S. Oil and gas bearing provinces and areas of the Siberian Platform // Geology and Oil and Gas Content of the Siberian Platform [in Russian]. SNIIGiMS, Novosibirsk, 1975. P. 4–21.

Kontorovich A.E., Surkov V.S., Trofimuk A.A. (Eds.) Geology of oil and gas of the Siberian Platform [in Russian]. Nedra, Moscow, 1981. 552 p.

Kontorovich A.E. (Ed.) Oil and gas basins and regions of Siberia. Vol. 8. Irkutsk Basin [in Russian]. Novosibirsk, 1995. 61 p.

Kontorovich A.E., Belyaev S.Yu., Kontorovich A.A., Starosel'tsev V.S., Mandel'baum M.M., Migurskii A.V., Moiseev S.A., Safronov A.F., Sitnikov V.S., Filiptsov Yu.A., Khomenko A.V., Eremin Yu.G., Bykova O.V. Tectonic map of the Vendian–Lower Paleozoic structural stage of the Lena–Tunguska petroleum province, Siberian Platform // Russian Geology and Geophysics. 2009. Vol. 50 (8). P. 649–659. doi:10.1016/j.rgg.2008.10.005.

Moiseev S.A., Pimichev G.V., Skuzovatov M.Yu., Teplov L.K., Fonin P.N. The structure of the Parfenovsky horizon of the central and southern regions of the Angara-Lena stage // Proceedings of the Scientific-Practical Conference: Oil and Gas Geological Forecast and Prospects for the Development of the Oil and Gas Complex of East Siberia [in Russian]. FSUE VNIGRI, St. Petersburg, 2013. P. 177–181.

Nagovitsin K.E., Kochnev B.B. Microfossils and biofacies of the Vendian fossil biota in the southern Siberian Platform // Russian Geology and Geophysics. 2015. Vol. 56 (4). P. 584–593. doi:10.1016/j.rgg.2015.03.009.

Samsonov V.V., Larichev A.I. Prospective oil-gas complexes of southern Siberian platform // Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies. 2008. Vol. 3 (4). Article 12. https://www.ngtp.ru/rub/4/43_2008.pdf.

Skuzovatov M.Yu. Criteria of evaluating gas-bearing prospects for gas content of Parfenov horizon of central areas of Angaro-Lena step // Oil and Gas Geology. 2014. No. 1. P. 101–109.

Skuzovatov M.Yu. Geological structure and prospects for oil and gas potential of the Vendian terrigenous complex of the Angara-Lena oil and gas region [in Russian]. INGG SO RAN, Novosibirsk, 2017. 187 p.

Sovetov Yu.K., Blagovidov V.V. Reconstruction of a sedimentation basin (using the example of the Vendian foredeep – the “foreland basin” of the southwest of the Siberian Platform) // Leonov Yu.G., Volozh Yu.A. (Eds.). Sedimentary Basins: Methods of Study, Structure and Evolution [in Russian]. Nauchnyi Mir, Moscow, 2004. 526 p.

Topeshko V.A., Eremin Yu.G. Prospects for the oil and gas potential of the Vendian and Lower Cambrian of the Angara-Lena stage // Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields. 2004. No. 10. P. 20–28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ФОМИН Андрей Михайлович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии нефти и газа Сибирской платформы Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Специалист в области геологии, поиска и разведки месторождений нефти и газа Восточной Сибири. Основные научные интересы: геологическое строение и оценка перспектив нефтегазоносности венд-кембрийских отложений Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции.

НОВОСЕЛЯ Полина Александровна – инженер лаборатории геологии нефти и газа Сибирской платформы Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, магистрант 2 года обучения Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: интерпретация данных сейсморазведки, сейсмогеологическое моделирование, региональная геология юга Сибирской платформы.

*Статья поступила 20 февраля 2024 г.,
одобрена после рецензирования 14 марта 2024 г.,
принята к публикации 15 марта 2024 г.*



ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО ПОТОКА В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ИНДИГИРО-ЗЫРЯНСКОГО ПРОГИБА (ЯКУТИЯ)

Альберт Дмитриевич Дучков^{1,✉}, Алексей Иванович Сивцев², Дмитрий Евгеньевич Аюнов³

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

²Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Белинского, 58, Россия

¹DuchkovAD@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4252-4382>

²SivtsevAI@tyngd.rosneft.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8386-2383>

³AyunovDE@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0373-8789>

Аннотация. Выполнена приблизительная оценка величины теплового потока по трем глубоким параметрическим скважинам, пробуренным в северной части Индигиро-Зырянского прогиба. Скважины вскрыли породы палеогена и верхней юры. Геотермические градиенты рассчитывались по значениям температуры на нижней границе криолитозоны (0 °С) и на забое скважины. Теплопроводность пород оценивалась по опубликованным данным. Вычисленный тепловой поток на Индигирской площади составляет в среднем 70 мВт/м². Высокие значения теплового потока зафиксированы и на ранее изученных соседних участках. Таким образом, оценка теплового потока, полученная авторами в Индигиро-Зырянском прогибе, вполне соответствует уже имеющимся сведениям об уровне теплового потока в этом регионе Восточной Якутии.

Ключевые слова: термограммы скважин, теплопроводность, тепловой поток, Индигиро-Зырянский прогиб, Восточная Якутия

Финансирование: исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН (проект Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0019).

Благодарности: авторы благодарят к.т.н. Л.С. Соколову за активную помощь при подготовке статьи.

Для цитирования: Дучков А.Д., Сивцев А.И., Аюнов Д.Е. Оценка теплового потока в северной части Индигиро-Зырянского прогиба // Геофизические технологии. 2024. № 2. С. 29–39. doi:10.18303/2619-1563-2024-2-29.

ASSESSMENT OF HEAT FLOW IN THE NORTHERN PART OF THE INDIGIRO-ZYRYANSKY TROUGH (YAKUTIA)

Albert D. Duchkov^{1,✉}, Aleksey I. Sivtsev², Dmitry E. Ayunov³

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

²Ammosov North-Eastern Federal University, Belinsky Str., 58, Yakutsk, 677000, Russia.

¹DuchkovAD@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0002-4252-4382>

²SivtsevAI@tyngd.rosneft.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8386-2383>

³AyunovDE@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0373-8789>

Abstract. An approximate estimation of the heat flow value was performed for three deep parametric wells drilled in the northern part of the Indigiro-Zyryansky trough. Boreholes have uncovered Paleogene and Upper Jurassic rocks. Geothermal gradients were calculated from the temperature values at the lower boundary of the cryolithozone (0 °C) and at the downhole. The thermal conductivity of rocks was roughly estimated from published data. The calculated heat flow on the

Indigirskaya area is on average 70 mW/m². The values of heat flow values were recorded in the previously studied neighboring areas. Thus, the heat flow estimate obtained by the authors in the Indigiro-Zyryansky trough correspond fully to the available data on the heat flow level in this region of East Yakutia.

Keywords: thermograms of wells, thermal conductivity, heat flow, Indigiro-Zyryansky trough, East Yakutia

Funding: The study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0019.

Acknowledgments: Authors are grateful to PhD L.S. Sokolova.

For citation: Duchkov A.D., Sivtsev A.I., Ayunov D.E. Assessment of heat flow in the northern part of the Indigiro–Zyryansky trough (Yakutia) // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 2. P. 29–39. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-2-29.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловой поток (q) является основным источником информации об энергетическом состоянии земной коры и верхней мантии, индикатором геодинамической активности. Обширные северные территории Сибири по разным причинам слабо изучены в геотермическом отношении. Местами расстояния между пунктами оценки теплового потока составляют сотни километров. В этой связи представляет интерес любая возможность для улучшения этой ситуации. В настоящей статье авторы представляют свой подход к приблизительной оценке теплового потока на одном из участков Индигиро-Зырянского прогиба при отсутствии полного набора необходимых данных. Тепловой поток определяется как произведение стационарного геотермического градиента (g), вычисляемого по измерениям температуры в достаточно глубоких скважинах, и коэффициента теплопроводности (λ) пород, вскрытых этими же скважинами. Основным параметром из двух (g и λ), необходимых для оценки q , является несомненно геотермический градиент, на который влияет целый ряд природных факторов, затрудняющих его прогнозирование. Теплопроводность горных пород измеряется в лабораторных условиях на специально отобранных образцах из керна скважин. Данных о тепловых свойствах горных пород к настоящему времени накоплено достаточно много (только в ИНГГ СО РАН выполнено порядка 4000 измерений λ [Дучков и др., 2017]). Опубликованы многочисленные каталоги и базы данных, содержащие сведения о тепловых свойствах различных типов пород из многих регионов страны и мира. Установлены корреляционные связи между λ и некоторыми другими физическими свойствами пород. Все это позволяет с оптимизмом надеяться на благоприятный прогноз теплопроводности пород по перечисленной опубликованной информации.

Имея все указанное в виду, авторы поставили задачу оценить величины теплового потока на Индигирской площади в северной части Индигиро-Зырянского прогиба, где выполнено бурение параметрических глубоких скважин [Аржаков и др., 2017]. Измерения температуры проведены в скважинах сразу после завершения бурения. Недавно авторы показали успешный пример использования термограмм, измеренных сразу после остановки бурения, для оценки q по скважинам Лено-Анабарского прогиба [Дучков и др., 2023]. Новая задача представляется сложнее, так как отсутствуют и сведения о теплопроводности пород, заполняющих Индигиро-Зырянский прогиб.

ГЕОЛОГИЯ И СВЕДЕНИЯ О СКВАЖИНАХ

В 1989–1992 гг. подразделениями ПГО «Ленанефтегазгеология» пробурены четыре структурно-параметрические скважины (рис. 1) глубиной более 1 км на Индигирской площади в северной части

Индиги́ро-Зыря́нского прогиба, расположенного в западной части Верхояно-Чукотской складчатой области [Аржаков и др., 2017]. Скважины пробурены с целью изучения геологического строения, выявления перспективных проницаемых горизонтов, оценки их нефтегазоносности. Бурение происходило в субарктической зоне с повсеместным распространением многолетнемерзлых пород (ММП), мощность которых местами превышает 400 м. Измерения температуры выполнены в скважинах № 272-01, 272-02 и 272-03. Поэтому в статье рассматриваются материалы из отчетных документов только по этим скважинам («Дела скважин № 272-01, 272-02 и 272-03»).

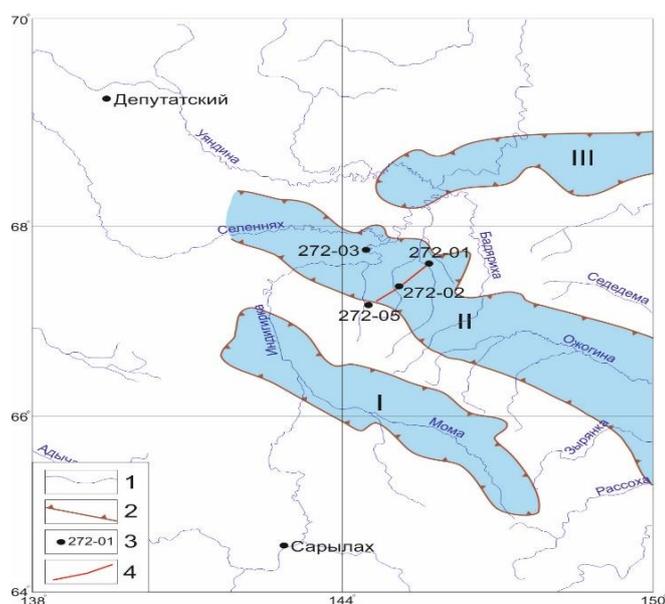


Рис. 1. Расположение впадин в западной части Верхояно-Чукотской складчатой области и параметрических скважин в Индиги́ро-Зыря́нском прогибе. Условные обозначения: 1 – гидросеть, 2 – границы впадин (I – Момская впадина, II – Индиги́ро-Зыря́нский прогиб, III – Алазейско-Инди́гирская система впадин), 3 – скважины и их номера: 272-01 (67.61° с.ш., 145.66° в.д.), 272-02 (67.45° с.ш., 145.15° в.д.), 272-03 (67.73° с.ш., 144.49° в.д.), 4 – линия разреза.

Бурение скв. 272-01 началось 26.03.1989 г. При забое 1034 м бурение было остановлено на месяц (с 10.07.1989 по 10.08.1989) по техническим причинам. После расконсервации бурение продолжалось более месяца (до 17.09.1989 г.), и за это время скважина была углублена всего на 115 м (забой 1149 м). Бурение прекращено из-за геологических осложнений. Термокаротаж выполнен 18.09.1989 г. в интервале 0–1117 м. По материалам бурения мощность ММП в этом пункте составляет 380 м.

Бурение первого ствола скв. 272-02 началось 23.05.1989 г. На глубине 1242 м произошел прихват инструмента, аварию ликвидировать не удалось, бурение прекращено 24.09.1989 г. Термокаротаж первого ствола выполнен 25.09.1989 г. в интервале 0–1110 м. С помощью клина забурен второй ствол, пройденный до 1611 м. Термокаротаж во втором стволе не производился. С глубины 1110 м забурен третий ствол. Бурение прекращено по техническим причинам 27.03.1990 г. на глубине 1350 м. Термокаротаж третьего ствола выполнен 28.03.1990 г. в интервале 0–1340 м. Мощность ММП – 417 м. В дальнейшем при необходимости первый ствол будем обозначать – скв. 272-02/1, а третий ствол – скв. 272-02/3.

Бурение скв. 272-03 началось 30.05.1990 г. Скважина бурилась 6.5 месяцев с короткими остановками на ремонтные работы и ГИС. Она закончена бурением 16.12.1990 г. при забое 1300 м. Термокаротаж выполнен 18.12.1990 г. в интервале 0–1280 м. Мощность ММП – 356 м.

Рассмотрим стратиграфию разрезов по скважинам. Сква. 272-01 (рис. 2) прошла четвертичные (0–55 м) и неоген-палеогеновые (55–1045 м) отложения и вскрыла породы бастахской свиты верхней юры (1045–1149 м). Стволы 1 и 3 скв. 272-02 (см. рис. 2) вскрыли только четвертичные (0–57 м) и неоген-палеогеновые (57–1350 м) отложения. Разрез по скв. 272-03 не коррелирует с разрезами первых двух. Эта скважина пробурила четвертичные (0–48 м), неоген-палеогеновые (48–756 м) отложения и породы илиньтасской свиты верхней юры (756–1280 м). Таким образом, скважины 272-01 и 272-02 вскрыли в основном неоген-палеогеновые отложения, а скважина 272-03 прошла в равной пропорции неоген-палеогеновую толщу и породы илиньтасской свиты верхней юры.

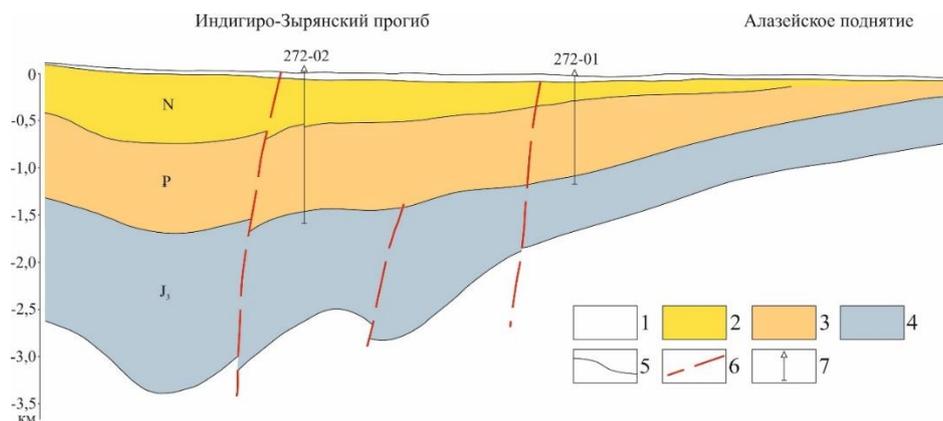


Рис. 2. Геолого-геофизический разрез по линии скважин 272-05–272-02–272-01 (по материалам АО «Якутскгеология», АО «Якутскгеофизика», ВНИГРИ). Условные обозначения: Отложения: 1 – четвертичные, 2 – неогеновые, 3 – палеогеновые, 4 – верхнеюрские; 5 – геологические границы, 6 – разрывные нарушения по сейсморазведке, 7 – скважины.

Неоген-палеогеновые свиты сложены слабосцементированными песчаниками, глинами, алевролитами со значительным содержанием растительных остатков, прослоями углей. Бастахская и илиньтасская свиты (J_3) представлена разными по составу и плотности аргиллитами, алевролитами, песчаниками, перемешанными по разрезу в разных пропорциях. В процессе бурения из керна скважин 272-01 и 272-02 было отобрано несколько образцов песчаников: 10 образцов из палеогеновых и три образца из верхнеюрских (бастахская свита) отложений. Изучены пористость (ϕ) и плотность этих образцов. При этом установлено, что палеогеновые и верхнеюрские породы существенно различаются по пористости: среднее значение ϕ палеогеновых пород составляет 28 %, а верхнеюрских – 20 % при практически одинаковой плотности 2.0–2.2 г/см³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В СКВАЖИНАХ

Термокаротажи в рассматриваемых скважинах проводились в рамках ГИС через 1–2 суток после прекращения бурения. Температура измерялась непрерывно электротермометрами ТЭГ-36 при спуске приборов со скоростью 600–700 м/час. Такие скорости каротажа обеспечивают измерения температуры пород с погрешностью порядка 0.3–0.4 °С [Череменин, 1972]. Термограммы, построенные по термокаротажным записям, приведены на рис. 3–5. Они свидетельствуют, что стволы скважин, особенно в верхней части, существенно прогреты (на 3–6 °С выше 0 °С), несмотря на сравнительно медленное с частыми остановками бурение. При проходке скважин температура горных пород нарушается в основном активной циркуляцией бурового раствора во время бурения.

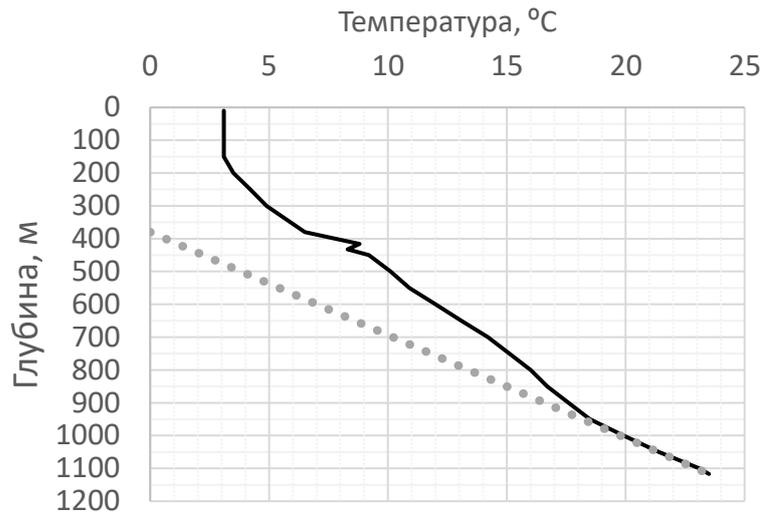


Рис. 3. Производственная термограмма по скв. 272-01 (запись 18.09.1989 г. через сутки после окончания бурения). Точками на рис. 3–5 изображены расчетные термограммы.

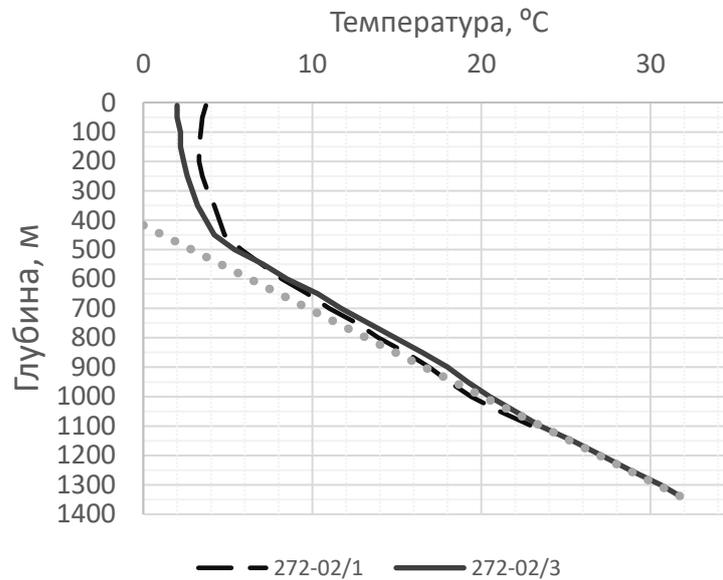


Рис. 4. Производственные термограммы по скв. 272-02/1 (первый ствол, запись 25.09.1989 г.) и 272-02/3 (третий ствол, запись 28.03.1990 г.). Записи производились через сутки после окончания бурения.

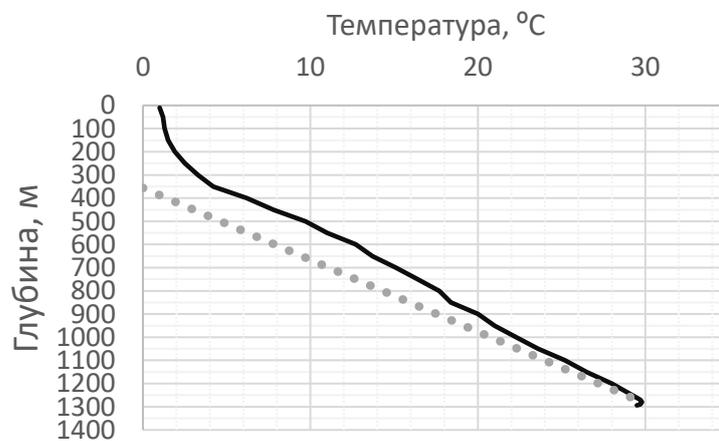


Рис. 5. Производственная термограмма по скв. 272-03. Запись 18.12.1990 г. через двое суток после окончания бурения.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО ГРАДИЕНТА ПО ТЕРМОГРАММАМ, ЗАПИСАННЫМ СРАЗУ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ БУРЕНИЯ

В процессе бурения температурное поле пород, окружающих скважину, существенно нарушается. Поэтому термограммы, записанные непосредственно после окончания бурения, обычно не используются для оценки стационарных значений геотермического градиента. Однако по таким термограммам можно определить близкое к стационарному значение геотермического градиента по всему интервалу термокаротажа (без учета возможных локальных отклонений градиента), если использовать наиболее достоверные значения температуры в верхней и нижней частях скважины [Гордиенко и др., 2002; Дучков и др., 2023]. В арктических районах в качестве верхнего значения температуры следует использовать «нулевую изотерму» ($T_0=0$ °С) на нижней границе ММП (на глубине h_p). При выстойке скважины после завершения бурения постепенно восстанавливается и слой многолетнемерзлых пород, на нижней границе которого неизбежно установится нулевая температура. В качестве значения температуры в нижней части скважины берется ближайшее к забою скважины измерение T_z (на глубине h_z). Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что после завершения бурения и циркуляции бурового раствора температура на забое скважины может восстанавливаться до стационарных значений за 1–2 суток под воздействием радиального и вертикального (снизу) тепловых потоков [Череменинский, 1972]. Естественно, что наиболее быстро T восстанавливается непосредственно на забое скважины. В нашем случае измерения T по всем скважинам заканчивались на 10–30 м выше забоя. Геотермический градиент (g) в интервале между h_p и h_z можно оценить по формуле:

$$g = T_z:(h_z-h_p). \quad (1)$$

Описанная методика применима для интерпретации термограмм по скважинам глубиной более 1000 м. Полученные таким образом расчетные термограммы (графики температуры между значения T_0 и T_z) также показаны на рис. 3–5. Интересно отметить, что для скв. 272-01 и 272-02 расчетные термограммы идеально совпадают с призабойными частями производственных термограмм. Иная картина наблюдается по скв. 272-03, где во всем интервале сравнения (350–1280 м) производственная термограмма превышает расчетную на 5–1 °С. Вероятно, эти различия связаны с особенностями завершения буровых работ на скважинах. Оценки геотермического градиента по формуле (1) приведены в табл. 1. По всем трем скважинам зафиксированы близкие значения g , изменяющиеся от 31.9 до 34.1 мК/м. Средний геотермический градиент по скважинам составляет 32.8 мК/м.

Таблица 1

Оценки геотермического градиента по скв. 272-01, 272-02 и 272-03

Скважина	h_p , м	h_z , м	T_z , °С	g , мК/м
272-01	380	1117	23.5	31.9
272-01/1	417	1110	23.4	33.8
272-02/3	417	1340	31.8	34.4
272-03	356	1280	29.8	32.3
Среднее значение g по всем скважинам				32.8

Установлено, что термограммы, записанные сразу после бурения, могут сохранять порядка 50–70 % стационарного градиента [Кутас, Гордиенко, 1971]. Сохранившуюся в термограмме часть геотермического градиента принято называть остаточным градиентом (G). Оценим значения G по термограммам рассматриваемых параметрических скважин. Расчеты приведены в табл. 2. Очевидно, что во всех производственных термограммах сохранился очень высокий уровень остаточного градиента G (порядка 70–90 % от g). Подобное нами наблюдалось и в скважинах Лено-Анабарского междуречья [Дучков и др., 2023]. Сохранение столь высоких значений остаточного градиента в сибирских производственных термограммах, записанных в конце прошлого века, возможно является следствием сложных условий бурения в арктических районах (удаленность буровых бригад от ремонтных баз, плохие дороги, перерывы в снабжении).

Таблица 2

Результаты определения остаточного геотермического градиента G

Скважины/возраст пород	H, м	ΔH, м	ΔT, °C	G, мК/м	g, мК/м	(G/g)·100, %
272-01/Pg	400–1100	700	16.3	23	31.9	72
272-02/Pg	450–1300	850	25.4	31	34.4	90
272-03/Pg	400–750	350	10.2	29.1	32.3	90
272-03/Jз	750–1280	530	13.4	25.3	32.3	78

Примечание. H и ΔH – интервал глубин (и его мощность), в котором по производственным термограммам определяется остаточный градиент G; ΔT – перепад температур на границах интервала H; $G = \Delta T / \Delta H$ – остаточный геотермический градиент; g – «стационарный» геотермический градиент.

Полученные сведения о значениях g (табл. 1) можно использовать для определения теплового потока, но для этого необходимо хотя бы примерно оценить значения теплопроводности пород, пройденных скважинами. Этот вопрос рассматривается в следующем разделе.

ОЦЕНКА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРОД И ТЕПЛОвого ПОТОКА ИНДИГИРСКОГО УЧАСТКА

Так как теплопроводность осадочных пород, заполняющих Индигиро-Зырянский прогиб, не известна, попытаемся, имея сведения о породах, вскрытых параметрическими скважинами (отложения палеогена и верхней юры), оценить их λ по опубликованным данным о тепловых свойствах аналогичных пород.

При проведении геотермических работ в южных районах Западно-Сибирской плиты была измерена теплопроводность примерно 200 образцов осадочных песчано-глинистых пород палеогена и верхней юры, отобранных с глубин 0.5–2 км [Тепловое поле..., 1987]. Во многих случаях значения λ измерялись прямо на скважине методом цилиндрического зонда. Диапазон изменения теплопроводности этих, в основном слабо сцементированных отложений, достаточно велик, однако средние значения λ отдельных групп пород определяются уверенно. Так, средняя теплопроводность кайнозойских пород (N–Pg) оценивается в 2.0 Вт/(м·К), а верхнеюрских – 2.3 Вт/(м·К).

Представляют интерес сведения о теплопроводности слабоплотненных песчано-углистых неоген-палеогеновых отложений Анадырской впадины. В работе [Девяткин, 1993] сообщается об

измерении порядка 20 образцов из керна глубоких скважин. Их теплопроводность изменяется от 1.4 до 2.8 Вт/(м·К). Однако среднее значение λ кайнозойских пород в этих работах не определено. В 1984 г. сотрудник ИГиГ СО АН СССР (сейчас ИНГГ СО РАН) Г.Н. Новиков отобрал 24 образца алевролита и песчаника из керна скважин Верхне-Телекайской, Вахрушенской, Гриневецкой, Западно-Озерной и Акольской площадей Анадырской впадины. Теплопроводность этих образцов палеогенового возраста измерялась на Компараторе теплопроводности [Тепловое поле..., 1987]. Среднее значение $\lambda = 2.1$ Вт/(м·К) определено достаточно уверенно. Результаты измерений теплопроводности образцов хранятся в архиве лаб. 563 ИНГГ СО РАН.

В лаборатории геотермии ИМЗ СО РАН измерена теплопроводность более 100 образцов алевролитов и песчаников, отобранных из верхнемезозойских (K_1 – J_3) отложений на участках Апсат, Эльге, Худуркан, Молоковка, Лунгхинский и Беринговский прогибы [Гаврильев, 2013]. Среднее значение λ изученных образцов оценивается в 2.3–2.4 Вт/(м·К).

Другую возможность оценить λ палеогеновых и верхнеюрских пород Индигирского участка предоставляют известные корреляционные зависимости между значениями теплопроводности и пористости (ϕ). Выше упоминалось, что кайнозойские и верхнеюрские породы Индигирского участка заметно различаются по пористости: породы Рg характеризуются средними значениями $\phi = 28$ % (10 образцов из скв. 272-01), а породы бастахской свиты J_3 – $\phi = 20$ % (три образца из скв. 272-02). По этим данным можно оценить теплопроводность пород, например, по корреляционной связи между λ и ϕ , установленной при изучении водонасыщенных осадочных пород северо-восточных районов Западно-Сибирской плиты [Дучков и др., 2014]:

$$\lambda_w = 2.95 - 0.032 \phi,$$

где ϕ – пористость в процентах.

Расчеты по формуле свидетельствуют, что теплопроводность палеогеновых пород в среднем оценивается в 2.1 Вт/(м·К), а пород бастахской свиты (J_3) – в 2.3 Вт/(м·К). Полученные оценки λ практически идентичны указанным выше литературным данным.

К сожалению, из пород илиньтасской свиты (J_3), слагающих нижнюю половину разреза скв. 272-03, образцы не отбирались. Судя по термограмме этой скважины, илиньтасская свита характеризуется более низким (на 15 %) градиентом G (табл. 2) по сравнению с породами палеогена. Это может свидетельствовать о более высокой (на те же 15 %) λ пород этой свиты. Если принять среднюю теплопроводность пород Рg равной 2.1 Вт/(м·К), то λ пород илиньтасской свиты (J_3) можно оценить в 2.4 Вт/(м·К).

Авторы полагают, что приведенные материалы позволяют с высокой степенью достоверности оценить среднюю теплопроводность пород в районе бурения параметрических скважин следующим образом: породы палеогена $\lambda = 2.0$ – 2.1 Вт/(м·К), верхнеюрские породы $\lambda = 2.3$ – 2.4 Вт/(м·К).

Полученные значения g и λ позволяют выполнить приблизительные определения теплового потока на Индигирской площади. При расчете q авторы использовали максимальные из указанных выше оценок λ . Результаты приведены в табл. 3. Они свидетельствуют, что для всех трех скважин Индигирской площади характерен практически одинаковый и высокий тепловой поток (67–73 мВт/м²).

Оценка теплового потока

Скважина	Возраст пород	g , мК/м	λ , Вт/(м·К)	q , мВт/м ²
272-01	Pg	31.9	2.1	67
272-02	Pg	34.1	2.1	72
272-03	Pg, J ₃	32.3	2.25	73
Среднее значение q по трем скважинам				70

Примечание. По скв. 272-03, разрез которой включает породы Pg и J₃, использовано значение $\lambda = (2.1+2.4):2 = 2.25$ Вт/(м·К).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований авторами получены оценки теплового потока по трем глубоким параметрическим скважинам, пробуренным на Индигирской площади в Индигиро-Зырянском прогибе. Определения геотермического градиента выполнены по производственным термограммам, записанным через 1–2 суток после окончания бурения. Для расчета величины g по всему стволу использованы значения температуры в верхней и нижней частях скважин: «нулевая изотерма» ($T = 0$ °С) на нижней границе криолитозоны и температура на ближайшей к забою глубине. В итоге по всем скважинам получены близкие значения $g = 32$ – 34 мК/м. Имея сведения о породах, вскрытых параметрическими скважинами, авторы оценили их теплопроводность, по данным о λ аналогичных пород из других регионов Сибири. В результате установлено, что теплопроводность отложений палеогена скорее всего составляет 2.0–2.1 Вт/(м·К), а верхнеюрских пород – 2.3–2.4 Вт/(м·К). При расчете теплового потока авторы использовали максимальные оценки λ – 2.1 и 2.4 Вт/(м·К). Расчеты показали, что по всем трем скважинам фиксируются высокие значения q , изменяющиеся незначительно – от 67 до 73 мВт/м². Средний q составляет 70 мВт/м². Ранее в Индигиро-Зырянском прогибе определения теплового потока не выполнялись.

Оценить достоверность выполненных определений теплового потока возможно, сравнив их с известной геотермической информацией по другим соседним районам. Как уже отмечалось, северные территории Сибири в геотермическом отношении изучены недостаточно. Так, в пределах более 200 км от Индигирской площади ранее были изучены геотермические условия только на двух участках (см. рис. 1): Депутатский на севере и Сарылах на юге [Девяткин, 1993].

Участок Депутатский (оловорудное месторождение) находится в Момско-Чарской горной области. Участок Сарылах расположен в бассейне р. Индигирки в юго-восточной части Уольчанского хребта. Температурные наблюдения везде проводились в выстоявшихся скважинах глубиной до 400–600 м, пройденных в песчаниках и сланцах триаса. Мощность мерзлоты на участках изменяется от 300 до 500 м. На Депутатском участке все оценки g выполнены в многолетнемерзлых породах. На участке Сарылах измерения температуры выполнялись и в мерзлоте, и в талых породах (десятки метров). При этом было установлено равенство геотермических градиентов в этих разных условиях, что свидетельствует о стационарном состоянии ММП в данном регионе. Геотермический градиент, измеренный в скважинах участков, изменяется от 20 до 32 мК/м, а теплопроводность пород – от 2.8 до 4.3 Вт/(м·К). При расчете q

с помощью электро моделирования (на установке УСМ-1) учитывалось влияние природных факторов (рельефа, климата, особенностей геологической структуры и других) на распределение температуры в горных породах. На обоих участках по данным измерений и моделирования был зафиксирован практически одинаковый высокий средний тепловой поток: на участке Депутатский $q = 80$ мВт/м², а на участке Сарылах $q = 84$ мВт/м².

Результаты сопоставлений с одной стороны свидетельствуют о реальности оценки высокого теплового потока на Индигирском участке, а с другой – полученные новые данные подтверждают высокий уровень q в данном регионе Восточной Якутии, т. к. несмотря на существенные различия объектов исследований (мелкие и глубокие скважины, измерение g в мерзлых и талых породах, измерение и прогноз λ пород) на всех трех участках получены близкие значения высокого теплового потока. Предложенный подход может быть использован и в других северных регионах Сибири (где развита мерзлота) для улучшения их геотермической изученности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Аржаков Н.А., Оболкин А.П., Ситников В.С. Анализ геолого-геофизической изученности потенциально нефтегазоносных районов северо-восточной Якутии и прилегающего шельфа Восточно-Арктических морей // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2017. Т. 12, № 4. С. 1–18. doi:10.17353/2070-5379/39_2017.

Гаврильев Р.И. Каталог теплофизических свойств горных пород северо-востока России. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2013. 174 с.

Гордиенко В.В., Гордиенко И.В., Завгородняя О.В., Усенко О.В. Тепловое поле территории Украины. Киев: Знание Украины, 2002. 170 с.

Девяткин В.Н. Тепловой поток криолитозоны Сибири. Новосибирск: Наука, 1993. 165 с.

Дучков А.Д., Соколова Л.С., Родякин С.В., Черныш П.С. Зависимость теплопроводности пород осадочного чехла Западно-Сибирской плиты от влажности и пористости // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 5–6. С. 991–1000. doi:10.15372/GiG20140520.

Дучков А.Д., Соколова Л.С., Аюнов Д.Е. Свидетельство о государственной регистрации базы данных: «База данных тепловых свойств горных пород Сибирского региона РФ». Свидетельство № 2017621489, RU, заявлено 25.10.2017, опубликовано 15.12.2017.

Дучков А.Д., Аюнов Д.Е., Ян П.А., Сивцев А.И., Соколова Л.С. Теплопроводность пород и оценки теплового потока в Лено-Анабарском междуречье (Сибирская платформа) // Геология и геофизика. 2023. Т. 64, № 6. С. 858–869. doi:10.15372/GiG2022143.

Кутас Р.И., Гордиенко В.В. Тепловое поле Украины. Киев: Наукова Думка, 1971. 140 с.

Тепловое поле недр Сибири / Ред. Э.Э. Фотиади. Новосибирск: Наука, 1987. 196 с.

Череменский Г.А. Геотермия. Л.: Недра, 1972. 272 с.

REFERENCES

Arzhakov N.A., Obolkin A.P., Sitnikov V.S. Geological and geophysical study of potentially petroleum bearing areas of north-eastern Yakutia and the approaching eastern Arctic offshore // Oil and Gas Geology. Theory and Practice. 2017. Vol. 12 (4). P. 1–18 (In Russ.). doi:10.17353/2070-5379/39_2017.

Cheremensky G.A. Geothermy [in Russian]. Nedra, Leningrad, 1972. 272 p.

- Devyatkin V.N.** Thermal flow of cryolithozones of Siberia [in Russian]. Nauka, Novosibirsk, 1993. 165 p.
- Duchkov A.D., Ayunov D.E., Yan P.A., Sivtsev A.I., Sokolova L.S.** Thermal conductivity of rocks and estimates of heat flow in the Lena–Anabar interfluvium (Siberian Platform) // Russian Geology and Geophysics. 2023. Vol. 64 (6). P. 713–723. doi:10.2113/RGG20224518.
- Duchkov A.D., Sokolova L.S., Ayunov D.E.** Certificate of state registration of the database: "Database of thermal properties of rocks of the Siberian region of the Russian Federation". Certificate No. 2017621489, RU, announced 10/25/2017, published 12/15/2017.
- Duchkov A.D., Sokolova L.S., Rodyakin S.V., Chernysh P.S.** Thermal conductivity of the sedimentary-cover rocks of the west Siberian plate in relation to their humidity and porosity // Russian Geology and Geophysics. 2014. Vol. 55 (5–6). P. 784–792. doi:10.1016/j.rgg.2014.05.021.
- Gavrilyev R.I.** Catalogue of thermophysical properties of rocks of the North-east of Russia [in Russian]. Publishing House of IMZ SB RAS, Yakutsk, 2013. 174 p.
- Gordienko V.V., Gordienko I.V., Zavgorodnaya O.V., Usenko O.V.** Thermal field of the territory of Ukraine [in Russian]. Naukova Dumka, Kiev, 2002. 170 p.
- Kutas R.I., Gordienko V.V.** Thermal field of Ukraine [in Russian]. Naukova dumka, Kiev, 1971. 140 p.
- Thermal field of the bowels of Siberia / Editor E.E. Fotiadi [in Russian]. Nauka, Novosibirsk, 1987. 196 p.**

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ДУЧКОВ Альберт Дмитриевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: внутриземной тепловой поток, геотермия земной коры, газогидраты.

СИВЦЕВ Алексей Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры «Недропользование» Геологоразведочного факультета Северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Основные научные интересы: геология месторождений нефти и газа Саха Якутии.

АЮНОВ Дмитрий Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, с.н.с. лаборатории естественных геофизических полей Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: геотермия, тепловые свойства горных пород.

*Статья поступила в редакцию 20 ноября 2023 г.,
одобрена после рецензирования 25 декабря 2023 г.,
принята к публикации 27 декабря 2023 г.*



ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫЕ ЛУЧИ ЛОМАКСА ДЛЯ КВАЗИПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН В ТРЕХМЕРНЫХ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ С НАКЛОННОЙ ОСЬЮ СИММЕТРИИ

Дмитрий Александрович Неклюдов^{1,✉}, Максим Игоревич Протасов²

^{1,2}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹NeklyudovDA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0495-0156>

²ProtasovMI@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0449-1639>

Аннотация. Описывается простой и эффективный метод расчета частотно-зависимых лучей квазипродольных волн в трехмерных трансверсально-изотропных средах с наклонной осью симметрии. Предлагаемый подход аппроксимирует распространение локально плоского фрагмента волнового фронта, который оказывается чувствителен к распределению параметров модели в некотором объеме среды в окрестности луча. Зона чувствительности зависит от длины волны к каждой точке на луче. Для повышения эффективности численной реализации используются приближенные выражения для фазовых и групповых скоростей в предположении, что среда является слабоанизотропной. Представленные численные эксперименты подтверждают работоспособность предложенного метода.

Ключевые слова: лучевой метод, частотно-зависимые лучи, анизотропия, ТТИ

Благодарности: М.И. Протасов разработал алгоритм построения квазипродольных частотно-зависимых лучей в рамках проекта ФНИ FWZZ-2022-0022. Д.А. Неклюдов реализовал алгоритм построения квазипродольных частотно-зависимых лучей и численно его исследовал на ряде реалистичных моделей на предмет его применимости для задач сейсмологии при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-71- 20002). Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (scc.spbstu.ru).

Для цитирования: Неклюдов Д.А., Протасов М.И. Частотно-зависимые лучи Ломакса для квазипродольных волн в трехмерных трансверсально-изотропных средах с наклонной осью симметрии // Геофизические технологии. 2024. № 2. С. 40–54. doi:10.18303/2619-1563-2024-2-40.

FREQUENCY DEPENDENT QP-LOMAX RAYS IN THREE-DIMENSIONAL WEAK TTI MEDIA

Dmitry A. Neklyudov^{1,✉}, Maxim I. Protasov²

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

¹NeklyudovDA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0495-0156>

²ProtasovMI@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0449-1639>

Abstract. A simple and numerically effective approach for calculating frequency dependent qP -rays in three-dimensional TTI media is presented in this paper. Our method involves propagating a locally plane fragment of wavefront which is sensitive to the distribution of the model parameters in some subvolume of the medium near a ray. The width of the sensitivity area depends on the wavelength in each point on the ray. For numerical realization we apply approximate

expressions for phase and group velocities which are valid for weak TTI media. Numerical experiment proves the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: ray method, frequency dependent rays, anisotropy, TTI

Acknowledgments: M.I. Protasov developed a frequency-dependent qP -ray tracing algorithm within the framework of the FWZZ-2022-0022 research project. D.A. Neklyudov implemented the algorithm for constructing qP frequency-dependent rays and numerically studied it on the realistic models for its applicability to seismic problems with the support of the Russian Science Foundation (grant No. 21-71-20002). The results of the work were obtained using the computing resources of the Supercomputer Center of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (scc.spbstu.ru).

For citation: Neklyudov D.A., Protasov M.I. Frequency dependent qP -Lomax rays in three-dimensional weak TTI media // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 2. P. 40–54. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-2-40.

ВВЕДЕНИЕ

Лучевой метод [Бабич, Булдырев, 1972; Červený et al., 1977] по-прежнему играет важную роль в сейсмике. На его основе реализованы ключевые процедуры обработки сейсмических данных, такие как лучевая сейсмическая томография и миграция Кирхгофа. Прежде всего лучевой метод служит для расчета лучевых траекторий и времен первых вступлений сейсмических волн. В классической постановке он основан на использовании высокочастотной аппроксимации для получения решений системы уравнений динамической теории упругости. При этом практически не учитываются эффекты, связанные с ограниченностью спектров реальных сейсмических сигналов. Вследствие высокочастотной аппроксимации при численной реализации классического лучевого метода проявляется «нефизичное» поведение лучей в моделях с наличием существенных неоднородностей и резких границ раздела [Кравцов, Орлов, 1980; Ben-Menahem, Beydoun, 1985]. В таких случаях лучи ведут себя очень неустойчиво, существенно отклоняются в стороны от ожидаемого пути распространения. Как следствие, в расчетной области возникают так называемые «зоны тени», т. е. такие участки, через которые лучи не проходят. Во-первых, такое поведение явно противоречит физике реальных процессов распространения сейсмических волн. Во-вторых, процедуры обработки сейсмических данных, основанные на использовании лучей (например, кинематическая томография), могут приводить к недостоверным результатам, что нежелательно на практике. Таким образом, возникает практическая необходимость обойти ограничения стандартного лучевого метода.

Известно, что на распространение сигналов с ограниченным спектром влияет распределение параметров среды внутри некоторого объема, окружающего луч («френелевский объем»). Ширина этого объема определяется доминирующей частотой сигнала. Необходимость учитывать этот факт и ослабить ограничения лучевого метода, связанные с высокочастотной аппроксимацией, была осознана достаточно давно. Как следствие, был предложен целый ряд подходов, с помощью которых можно с разной степенью эффективности решить данную проблему [Červený, Soares, 1992; Lomax, 1994; Vasco et al., 1995; Bube, Washbourne, 2008; Yarman et al., 2013; Протасов, Осипов, 2014; Protasov, Gadylshin, 2017; Vasco, Nihei, 2019]. Все эти подходы имеют свои преимущества и недостатки, ключевым из которых является вычислительная сложность, которая особенно проявляется при переходе к трехмерному случаю.

В работе [Lomax, 1994] был предложен простой, но весьма эффективный подход для аппроксимации процесса распространения широкополосных сейсмических сигналов на основе стандартного лучевого метода. Его суть заключается в том, что при трассировке луча локальная скорость в точке на луче определяется при сглаживании интервальных скоростей вдоль локально плоского участка

фронта, причем апертура такого сглаживания выбирается пропорционально длине волны. Система дифференциальных уравнений луча остается практически неизменной, за исключением замены интервальных скоростей на сглаженные вдоль фронта скорости. В дальнейшем мы будем называть лучи, построенные этим методом, лучами Ломакса. В работе [Неклюдов, Протасов, 2021] были рассмотрены лучи Ломакса в 2D случае и предложена достаточно простая процедура их построения без решения системы дифференциальных уравнений луча. При этом процесс их построения сводится к трассировке локально плоского фрагмента волнового фронта, ориентация которого оказывается чувствительна к распределению скоростей внутри частотно-зависимой апертуры. Показано, что несколько адаптированный подход Ломакса может эффективно использоваться при решении практических задач сейсмологии, таких как построение лучевых траекторий и моделирование акустических волновых полей в достаточно сложных моделях. В работе [Неклюдов, Протасов, 2023] разработан алгоритм построения частотно-зависимых лучей Ломакса в трехмерном изотропном случае, а также показана перспективность их применения в сложных средах.

В настоящей работе предложен, реализован и протестирован алгоритм построения квазипродольных частотно-зависимых лучей Ломакса в трехмерных трансверсально-изотропных средах с наклонной осью симметрии. Необходимость учета анизотропии хорошо известна на практике. Причем в большинстве практических случаев выполняется предположение о «слабой» анизотропии. Это предположение позволяет существенно упростить выражения для фазовых и групповых скоростей [Fowler, 2003], что существенно повышает вычислительную эффективность трассировки лучей в анизотропных средах.

ПРИБЛИЖЕННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ФАЗОВЫХ И ГРУППОВЫХ СКОРОСТЕЙ qP -ВОЛН В ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ С НАКЛОННОЙ ОСЬЮ СИММЕТРИИ (ТТИ)

В данном разделе представлены приближенные выражения для фазовой и групповой скорости qP -волн, которые будут необходимы для построения лучей Ломакса в трансверсально-изотропных средах с наклонной осью симметрии.

Рассмотрим матрицу Кристоффеля $\Gamma(\vec{p})$, элементы которой зависят от направления \vec{p} , $\Gamma_{jk} = p_i p_l a_{ijkl}$, где $a_{ijkl} = c_{ijkl}/\rho$ есть элементы тензора Грина, нормированные на плотность, p_j – компоненты вектора \vec{p} . В произвольной анизотропной среде могут распространяться волны трех типов: qP , qSV , qSH , каждая из которых соответствует одному из собственных чисел матрицы Кристоффеля. В дальнейшем нас будет интересовать только случай распространения qP -волн, соответствующий наибольшему собственному числу. Вектор \vec{p} (вектор медленности) связан с фазовой скоростью V в направлении нормали к фронту, $\vec{p} = \vec{n}/V(\vec{n})$, где \vec{n} есть единичная нормаль к фронту. Фазовая скорость определяется через собственное число матрицы Кристоффеля $G(\vec{n})$ как

$$V(\vec{n}) = \sqrt{G(\vec{n})}. \quad (1)$$

Вектор поляризации qP -волны совпадает с первым собственным вектором. Компоненты вектора групповой (лучевой) скорости определяются как

$$v_j = \frac{1}{2} \frac{\partial G(\vec{p})}{\partial p_j}. \quad (2)$$

При изучении распространения qP -волн для параметризации трансверсально-изотропной среды с наклонной осью симметрии используется следующий набор параметров, ставший уже стандартным для большинства практических приложений в сейсмике: V_p – фазовая скорость qP -волны вдоль оси симметрии, два угла, характеризующие положение оси симметрии, θ_{AZ} (азимут), θ_{DIP} (угол наклона относительно вертикали) и два параметра Томсена [Thomsen, 1986] – ε , δ .

Приближенное упрощенное выражение собственного числа qP -волны для VTI случая (вертикальная ось симметрии) получено в работе [Farra, 2001] в предположении «слабой» анизотропии. Обобщение этого выражения на более общий случай трансверсально-изотропной среды с произвольным положением оси симметрии приводится в работе [Dehghan et al., 2007] (формула 24). В этом случае параметры Томсена выражаются через нормированные на плотность коэффициенты тензора Грина следующим образом: $\varepsilon = \frac{a_{11}-a_{33}}{2a_{33}}$, $\delta = \frac{a_{13}-a_{33}+2a_{44}}{a_{33}}$ [Dehghan et al., 2007].

Пусть \vec{e} – единичный вектор, направленный вдоль оси симметрии. Его компоненты выражаются через углы θ_{AZ} , θ_{DIP} как $(\sin\theta_{DIP} \cdot \cos\theta_{AZ}, \sin\theta_{DIP} \cdot \sin\theta_{AZ}, \cos\theta_{DIP})$. Сделаем следующие обозначения: пусть $P = |\vec{p}|^2$ – квадрат нормы вектора медленности, а $D = \vec{e} \cdot \vec{p}$ есть скалярное произведение векторов \vec{e} и \vec{p} . Используя введенные обозначения можно записать приближенное выражение для первого собственного числа матрицы Кристоффеля [Dehghan et al., 2007]:

$$G(\vec{x}, \vec{p}) = V_p^2 \left\{ P(1 + 2\varepsilon) + 2(\delta - 2\varepsilon)D^2 - 2(\delta - \varepsilon)\frac{D^4}{P} \right\}. \quad (3)$$

Фазовая скорость в направлении нормали к фронту определяется из выражений (1) и (3):

$$V^2(\vec{x}, \vec{n}) = V_p^2 \left\{ 1 + 2\varepsilon + 2(\delta - 2\varepsilon)D_N^2 - 2(\delta - \varepsilon)D_N^4 \right\}, \quad (4)$$

где $D_N = \vec{e} \cdot \vec{n}$ обозначает скалярное произведение единичной нормали к фронту \vec{n} и вектора, определяющего направление оси симметрии \vec{e} . Теперь согласно формуле (2), вычислив производные $G(\vec{x}, \vec{p})$ по компонентам вектора медленности \vec{p} , получается приближенное выражение для компонент групповой (лучевой) скорости:

$$v_j = \frac{1}{2} V_p^2 \left\{ \left[2(1 + 2\varepsilon) + 4(\delta - \varepsilon)\frac{D^4}{P^2} \right] p_j + \left[2(\delta - 2\varepsilon)D - 8(\delta - \varepsilon)\frac{D^3}{P} \right] e_j \right\}, \quad (5)$$

где p_j и e_j есть компоненты векторов \vec{p} и \vec{e} соответственно. Значение групповой скорости определяется как $v = |\vec{v}|$. Напомним, что фазовая скорость определяет вектор медленности $\vec{p} = \frac{\vec{n}}{V(\vec{n})}$ и, таким образом, входит в выражение групповой скорости.

ПОСТРОЕНИЕ ЛУЧЕЙ ЛОМАКСА В ТРЕХМЕРНЫХ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

В работе [Неклюдов, Протасов, 2023] описана процедура построения лучей Ломакса в трехмерном изотропном случае. Ниже показано, как модифицировать предложенный ранее алгоритм для трансверсально изотропных сред с наклонной осью симметрии.

Напомним, что основная идея, заложенная в лучах Ломакса, это возможность учитывать в процессе трассировки луча распределение физических параметров среды в некоторой его окрестности, причем ширина этой окрестности определяется через некоторый заданный наперед параметр, имеющий размерность частоты. Увеличивая «частоту» луча, можно добиться увеличения зоны чувствительности к параметрам модели, или же наоборот – получать лучи близкие к стандартным лучам, описываемым

классической лучевой теорией. Исходя из самого способа построения можно отметить, что при трассировке луча Ломакса происходит распространение фрагмента локально плоского фронта волны. Трассировка луча Ломакса в 3D состоит из двух этапов. На первом этапе происходит движение луча из текущей точки в известном направлении, который определяется текущей ориентацией нормали к волновому фронту (а в изотропном случае совпадает с ней). Для этого используются параметры модели, сглаженные вдоль локально плоского фрагмента фронта (в изотропном случае – интервальные скорости). Таким образом находится положение луча в следующий момент времени. На втором этапе находится ориентация элемента фронта в найденной точке на луче. Для этого используется движение множества «контрольных» точек, выбранных в некоторой окрестности луча в плоскости волнового фронта. То, насколько далеко от луча располагаются контрольные точки, т. е. область чувствительности луча к вариациям параметров модели, также определяется «длиной волны» в точке на луче.

Далее рассмотрим, как модифицируются упомянутые этапы трассировки применительно к случаю трансверсально-изотропных сред. В качестве входных параметров задаются два угла, характеризующие ориентацию единичной нормали волнового фронта φ_{AZ} , φ_{Dip} , где φ_{AZ} – азимутальный угол, т. е. угол между направлением нормали и положительным направлением оси X в горизонтальной плоскости XY , φ_{Dip} – угол наклона, т. е. угол между нормалью и вертикальной осью Z (глубина). Наряду с этим задается параметр ν , имеющий физическую размерность частоты (Гц) («частота луча»). Он будет определять чувствительность луча к вариациям параметров модели.

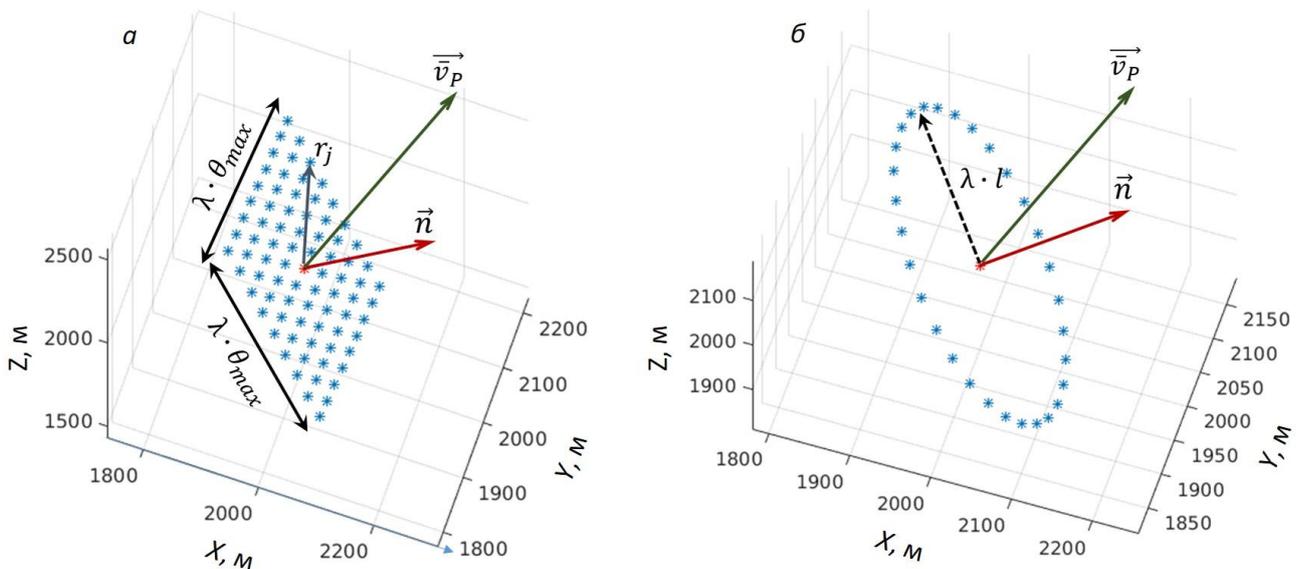


Рис. 1. а – Плоский фрагмент волнового фронта. Синими звездочками обозначены точки регулярной сетки, где вычисляются значения фазовых скоростей для сглаживания вдоль волнового фронта. Вектор \vec{n} обозначает текущую нормаль к фронту. Зеленой стрелкой обозначен вектор групповой скорости \vec{v}_p в центральной точке; б – контрольные точки, взятые вокруг текущей точки на луче в плоскости волнового фронта. Они используются для вычисления нормали к фронту на следующем шаге вдоль луча.

1. Пусть луч уже построен до некоторой точки $\vec{x}_p = (x_p, y_p, z_p)$ (далее она называется центральной точкой). В этой точке задано текущее направление единичной нормали к волновому фронту, $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$. Прежде всего объясним, как происходит сглаживание параметров модели в окрестности луча вдоль элемента волнового фронта. В точке \vec{x}_p строится плоскость, ортогональная вектору \vec{n} . На этой плоскости вырезается прямоугольник с центром в точке \vec{x}_p , размеры которого зависят от длины волны

$\lambda = \frac{V(\vec{x}_p, \vec{n})}{v}$ в центральной точке, как это показано на рис. 1а. Здесь $V(\vec{x}_p, \vec{n})$ – значение фазовой скорости в точке \vec{x}_p , вычисляемой по формуле (4), v – «частота луча». На выбранном фрагменте волнового фронта задается регулярная сетка, в каждой точке которой по формуле (4) определяются значения фазовых скоростей $V(\vec{x}_j, \vec{n})$ при заданном направлении нормали к фронту \vec{n} (одинакова для всех точек). Точки этой сетки показаны на рис. 1а как синие «звездочки». Значение сглаженной фазовой скорости вдоль плоского фрагмента фронта вычисляется в центральной точке как взвешенная сумма всех значений фазовых скоростей:

$$V_{sm}(\vec{x}_p, \vec{n}, v) = \frac{\sum_{j=-N}^N w_j \cdot V(\vec{x}_j, \vec{n})}{\sum_{j=-N}^N w_j}, \quad (6)$$

где w_j весовые коэффициенты сглаживания. В качестве сглаживающей функции используется двумерная функция Гаусса. В этом случае весовые коэффициенты определяются следующим образом:

$$w_j = \exp\left\{-\left(\frac{r_j}{\lambda \cdot \theta_{max} \cdot \alpha}\right)^2\right\}, \quad (7)$$

где r_j обозначает расстояние между центральной точкой \vec{x}_p и точкой \vec{x}_j на прямоугольном фрагменте волнового фронта. Заданный параметр θ_{max} определяет, какую часть длины волны мы принимаем в рассмотрение при выборе апертуры сглаживания, параметр α позволяет контролировать форму двумерного гауссиана. При его уменьшении сглаживающая функция становится уже, сосредотачиваясь ближе к центральной точке, т. е. влияние удаленных точек уменьшается. При увеличении α процедура сглаживания постепенно сводится к простому усреднению скоростей по фрагменту волнового фронта [Неклюдов, Протасов, 2023].

Итак, пусть dt есть шаг по времени при движении вдоль луча. Для того чтобы продвинуться вдоль луча, применяется следующая схема (рис. 2). В центральной точке \vec{x}_p вычисляется значение сглаженной вдоль фронта фазовой скорости $\bar{V}_p = V_{sm}(\vec{x}_p, \vec{n}, v)$ способом, описанным выше. Используя полученное усредненное значение фазовой скорости \bar{V}_p и направление нормали к фронту \vec{n} , по формуле (5) вычисляются соответствующие значения компонент вектора групповой скорости $\vec{v}_p(\vec{n}) = (v_x, v_y, v_z)$. За промежуток времени dt центральная точка \vec{x}_p переместится в точку $\vec{x}_p + d\vec{x}_p$, $d\vec{x}_p = (dx_p, dy_p, dz_p)$ вдоль направления вектора групповой скорости:

$$dx_p = dt \cdot v_x, \quad dy_p = dt \cdot v_y, \quad dz_p = dt \cdot v_z. \quad (8)$$

Таким образом находится положение следующей точки на луче. Далее нам необходимо вычислить ориентацию волнового фронта в этой точке.

2. Контрольные точки, которые используются для определения нормали к фронту в следующий момент времени, выбираются следующим образом. Рассмотрим окружность, лежащую в плоскости волнового фронта. Пусть радиус окружности тоже зависит от локальной длины волны, $R = \lambda \cdot l$, где параметр l по смыслу аналогичен параметру θ_{max} , который используется для определения апертуры сглаживания, но не обязательно совпадает с ним по значению. На этой окружности мы выбираем некоторое количество точек с равномерным шагом по углу (см. рис. 1б). Для каждой контрольной точки, расположенной на окружности с центром на луче, вычисляется вектор групповой скорости $\vec{v}_j(\vec{x}_j, \vec{n}) = (v_x^j, v_y^j, v_z^j)$ с использованием соответствующей нормали к волновому фронту \vec{n} (одинакова для всех контрольных точек). За промежуток времени dt каждая из контрольных точек пройдет разное расстояние

в силу того, что групповые скорости вычислялись в некотором объеме неоднородной модели, т. е. точкам могут соответствовать разные групповые скорости: $dx_j = dt \cdot v_x^j$, $dy_j = dt \cdot v_y^j$, $dz_j = dt \cdot v_z^j$. В новом положении контрольные точки $\vec{x}_j + d\vec{x}_j$ в общем случае уже необязательно будут лежать в одной плоскости. Чтобы определить текущее положение локально плоского волнового фронта, мы численно определяем такую плоскость, которая наиболее близка в среднеквадратичном смысле одновременно ко всему множеству точек $\vec{x}_j + d\vec{x}_j$. Таким образом, возникает классическая задача линейной регрессии. В результате ее численного решения определяется новый вектор нормали к фронту \vec{n}_{new} . Мы приписываем этот вектор к новому положению центральной точки $\vec{x}_p + d\vec{x}_p$, и процедура повторяется снова. Так шаг за шагом происходит движение вдоль луча. Таким образом, при реализации описанной схемы происходит движение локально плоского фрагмента волнового фронта. В каждый момент времени на его ориентацию влияет распределение физических параметров модели в некоторой окрестности луча.

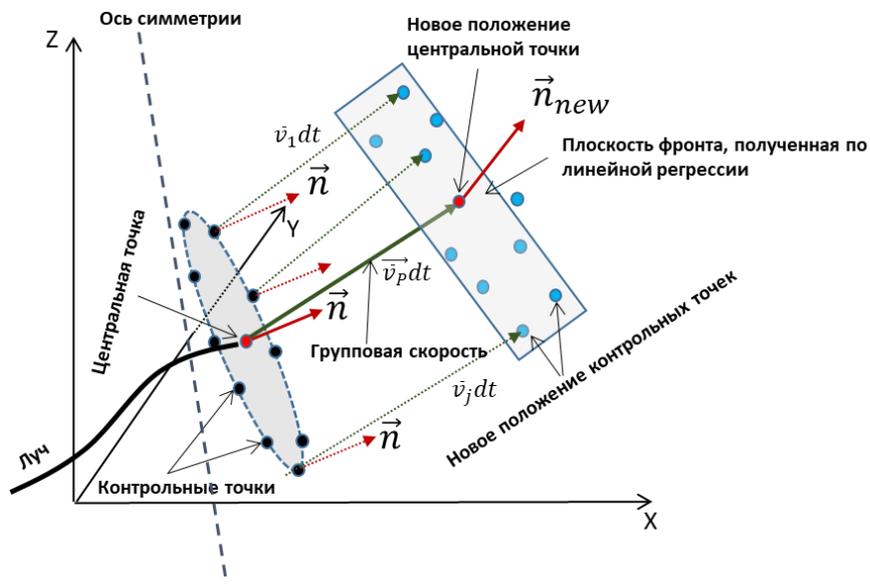


Рис. 2. Схема построения 3D луча Ломакса в трансверсально-изотропной среде.

ВЕРИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА: СРАВНЕНИЕ ЛУЧЕЙ ЛОМАКСА СО СТАНДАРТНЫМИ ЛУЧАМИ В ГЛАДКОЙ VTI МОДЕЛИ

Для того чтобы численно подтвердить работоспособность описанного выше подхода, проведем сравнение лучей Ломакса, построенных по предложенной схеме, со стандартными лучами в достаточно простой (гладкой) анизотропной модели. Выбор гладкой модели обусловлен необходимостью избежать проблем при расчете стандартных лучей, ведь, как известно, они ведут себя весьма неустойчиво при наличии резких неоднородностей. Воспользуемся тем фактом, что в теории, при увеличении параметра ν , лучи Ломакса должны становиться все ближе к стандартным лучам, а начиная с некоторого момента, должны стать практически неотличимы от них (как показывают численные эксперименты в изотропном случае при $\nu > 30$ Гц).

В численных экспериментах, представленных ниже, будет использоваться реалистичная модель среды, полученная при обработке данных сейсмической съемки на одном из участков Восточной Сибири. Параметры модели были восстановлены с помощью анизотропной сейсмической томографии на отраженных волнах (миграционный скоростной анализ). Предполагается, что эти параметры достаточно

адекватно описывают реальное строение района. Модель, представленная на рис. 3, зависит только от двух координат (X , Z). Для того чтобы получить трехмерную модель, двумерные разрезы скоростей и параметров ε , δ , восстановленные вдоль одного из профилей, были «размножены» в кросслайн направлении (координата Y). Ось симметрии вертикальна в каждой точке (VTI).

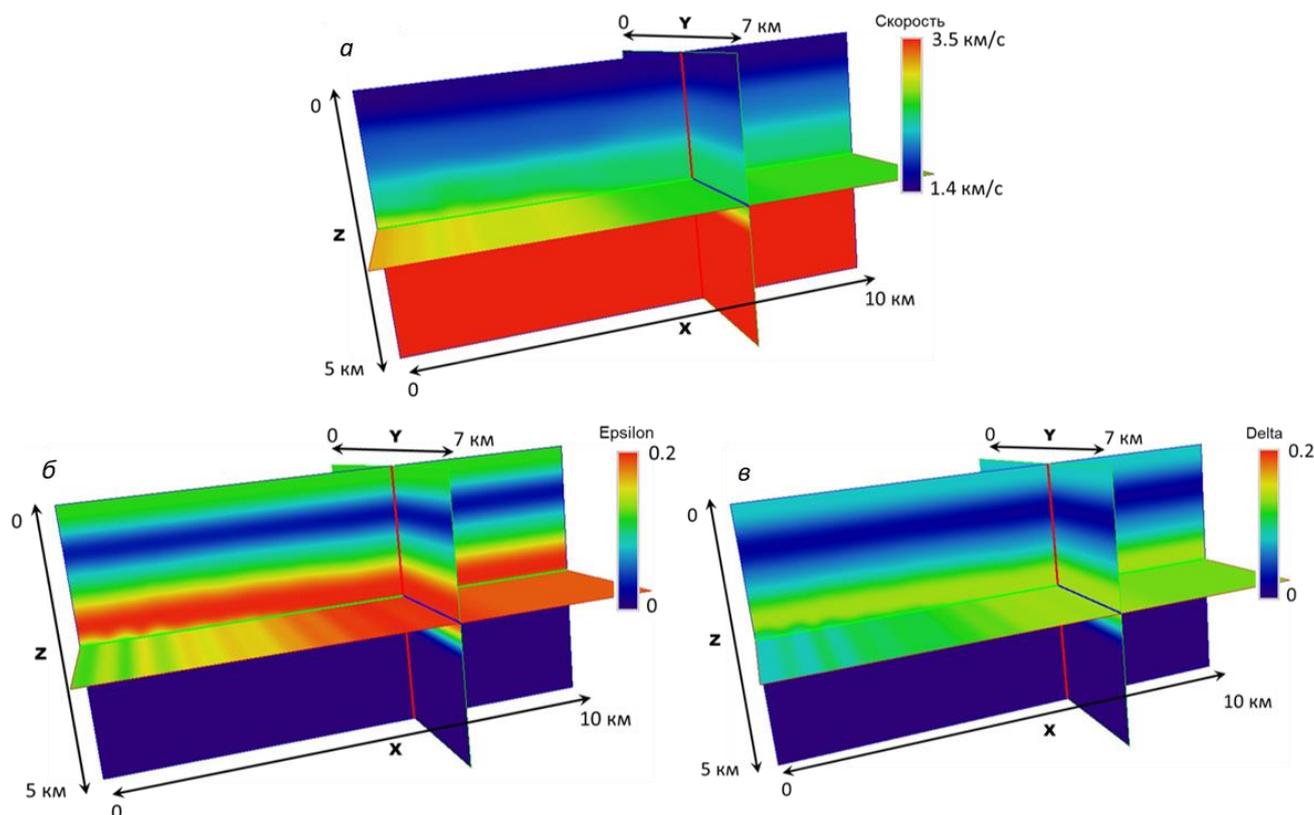


Рис. 3. 2.5D модель вертикально трансверсально-изотропной среды: а – фазовая скорость вдоль вертикальной оси симметрии; б – распределение параметра ε (вариации в интервале [0–0.2]); в – распределение параметра δ (вариации в интервале [0–0.14]).

Фазовые скорости квазипродольных волн вдоль вертикальной оси симметрии варьируются в интервале 1400–3500 м/с, безразмерные параметры ε и δ лежат в интервалах [0–0.2] и [0–0.14] соответственно. Модель задана на регулярной сетке с одинаковым пространственным шагом по всем направлениям $dx = dy = dz = 10$ м, число точек сетки $N_x = 951$, $N_y = 701$, $N_z = 501$. Таким образом, размер расчетной области составляет $9500 \times 7000 \times 5000$ м. Точечный источник расположен в точке с координатами $X_s = 4500$ м, $Y_s = 3500$ м, $Z_s = 100$ м. Для расчета лучей Ломакса использовались следующие параметры: «частота луча» $\nu = 30$ Гц, $l = 0.25$, $\theta_{max} = 0.25$, $\alpha = 1$, $dt = 0.003$ мсек, число контрольных точек равнялось 30. Здесь мы хотим воспользоваться асимптотическим свойством лучей Ломакса на высоких частотах, о котором мы упомянули выше, и добиться наилучшего совпадения лучей Ломакса со стандартными лучами. Для расчета стандартных лучей мы используем программную реализацию анизотропной трассировки лучей из известного пакета Madagascar [<https://www.reproducibility.org/RSF/>].

На рисунке 4а представлены 50 лучей, построенных для одного фиксированного азимута $\varphi_{AZ} = -30^\circ$ при равномерном изменении углов наклона нормалей к фронту. На рисунке 4б показана проекция этих лучей на дневную поверхность XY (т. е. «вид сверху»). Можно заметить, что в этом случае

лучи Ломакса очень хорошо совпадают со стандартными лучами. Максимальное отклонение при пробеге более 5 км не превышает нескольких метров.

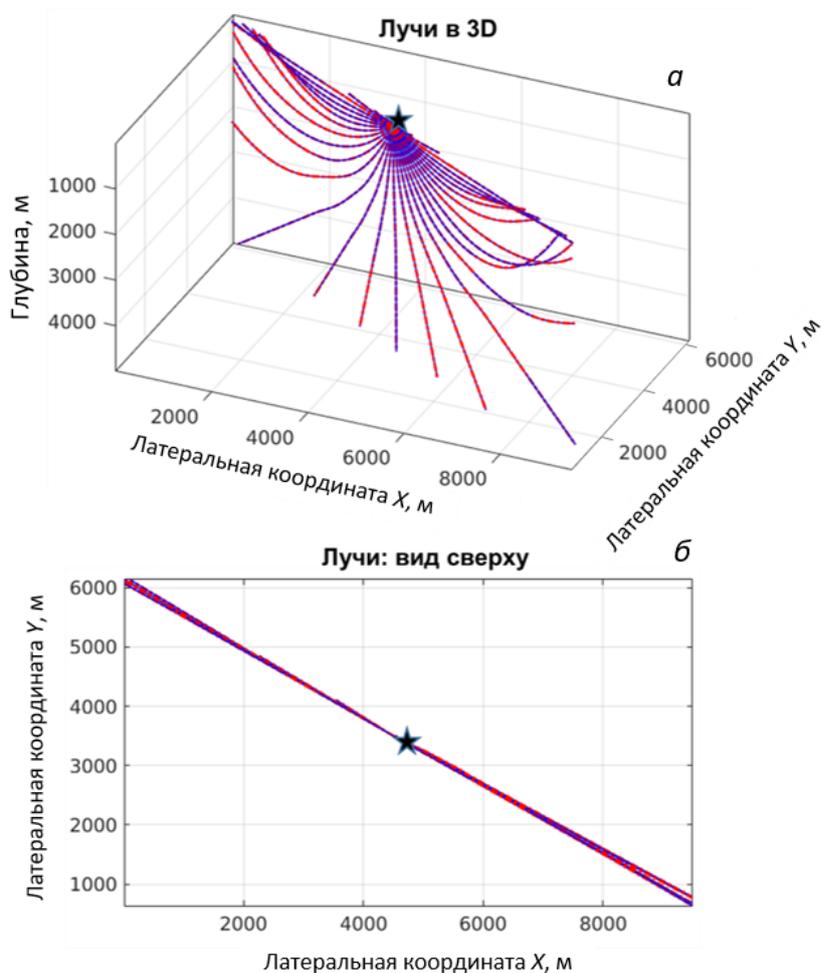


Рис. 4. Сравнение лучей для одного источника (отмечен звездочкой) и одного фиксированного азимута, $\varphi_{AZ} = -30^\circ$. Синим нарисованы лучи Ломакса при значении параметра $\nu = 30$ Гц, красным – стандартные лучи. а – лучи в 3D, б – проекция лучей на плоскость XY.

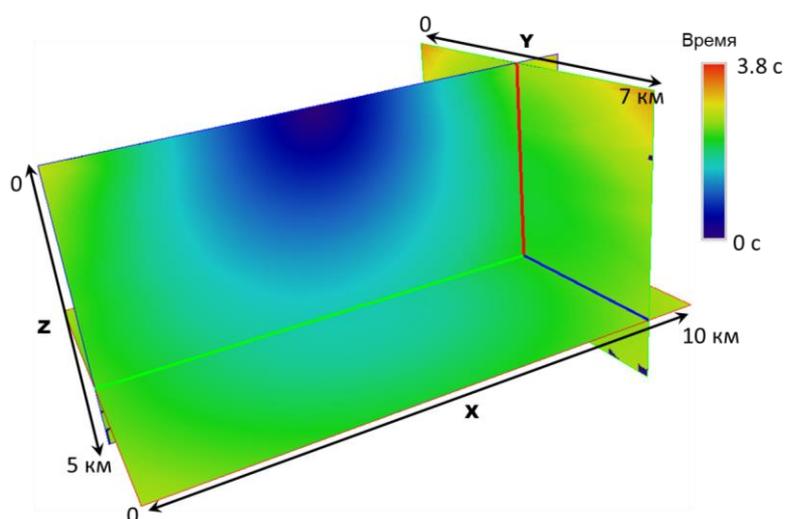


Рис. 5. Таблица времен первых вступлений qP -волны для одного источника, рассчитанная в трехмерной VTI модели, представленной на рис. 3, с помощью лучей Ломакса при значении параметра $\nu = 30$ Гц.

Рассчитаем далее таблицу времен первых вступлений qP -волн (т. е. время первых вступлений в каждой точке расчетной области). Для этого строится семейство из 400×400 лучей (количество лучей при вариации азимута и угла наклона соответственно) с углами выхода, лежащими в интервалах: $\varphi_{AZ} = [0, 360^\circ]$, $\varphi_{Dip} = [0, 360^\circ]$. Далее производится интерполяция времен первых вступлений, вычисленных вдоль каждого из полученных лучей, на регулярную сетку с помощью подхода, описанного в работе [Неклюдов, Протасов, 2023]. Результат представлен на рис. 5. Как можно видеть, таблица полностью заполнена, т. е. в ней практически отсутствуют неосвещенные области. Невязка времен, полученных с помощью лучей Ломакса, в сравнении с временами, полученными с помощью трассировки стандартных лучей, не превышает 3 мсек (рис. 6).

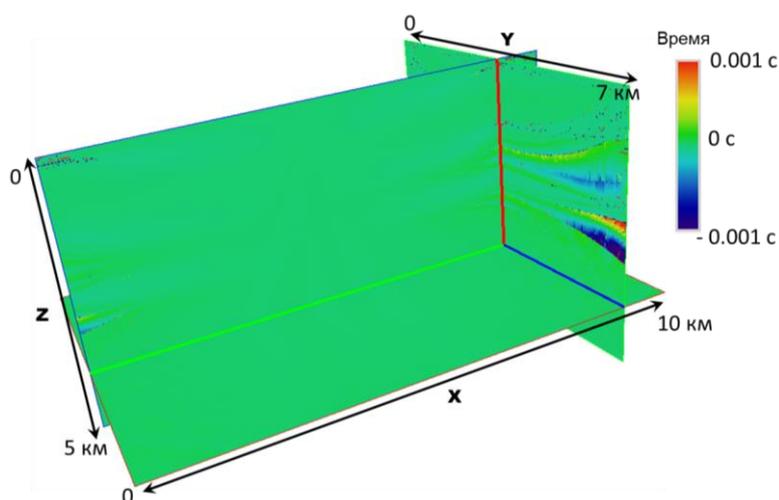


Рис. 6. Невязки времен первых вступлений qP -волны для одного источника, рассчитанных в трехмерной VTI модели, представленной на рис. 3, с помощью лучей Ломакса при значении параметра $\nu = 30$ Гц и стандартных лучей (пакет Madagaskar).

Еще раз подчеркнем, что основной целью численных экспериментов, представленных выше, было подтвердить правильность как самой концепции построения лучей Ломакса в трансверсально-изотропных средах, так и ее численной реализации. Именно поэтому выбрано соответствующее значение параметра ν и требовалось наилучшее совпадение результатов, полученных представленным в работе алгоритмом и стандартной процедурой. На практике же предполагается использовать лучи Ломакса в более сложных моделях сред, чем та, что представлена выше. В сложных моделях, имеющих резкие границы раздела классические лучи не смогут обеспечить необходимый результат, т. е. рассчитать адекватные лучевые траектории и времена первых вступлений, в то время как лучи Ломакса, как было показано ранее [Неклюдов, Протасов, 2023], при адекватно выбранных параметрах вполне справляются с этой задачей. Таким образом, возникает необходимость оптимального выбора параметра ν . При выборе «частоты луча» необходимо учитывать следующие соображения. В том случае, если требуется уверенный проход лучей через резкие неоднородности (например, соляные тела), необходимо уменьшать значение ν . В то же время необходимо, чтобы лучи Ломакса не слишком отличались от стандартных лучей, а в простых областях модели были близки к ним. Для выполнения этого требования необходимо увеличивать значение ν . Итак, можно сказать, что выбор «частоты» ν в каждом конкретном случае будет компромиссом между двумя этими требованиями и осуществляться эмпирически.

Покажем, как будет изменяться поведение лучей Ломакса при изменении частоты ν . На рисунке 7 представлены лучи, рассчитанные для модели, представленной на рис. 3 для двух случаев: $\nu = 30$ Гц и $\nu = 5$ Гц. Как можно видеть, наибольшее отличие оказывается у лучей, которые имеют близкое к горизонтальному направлению распространения, особенно в правой верхней части модели. Это связано с тем, что именно при таких условиях наиболее проявляется чувствительность лучей Ломакса к вариациям параметров модели по глубине, а используемая здесь модель имеет наиболее сильную изменчивость как раз по вертикали.

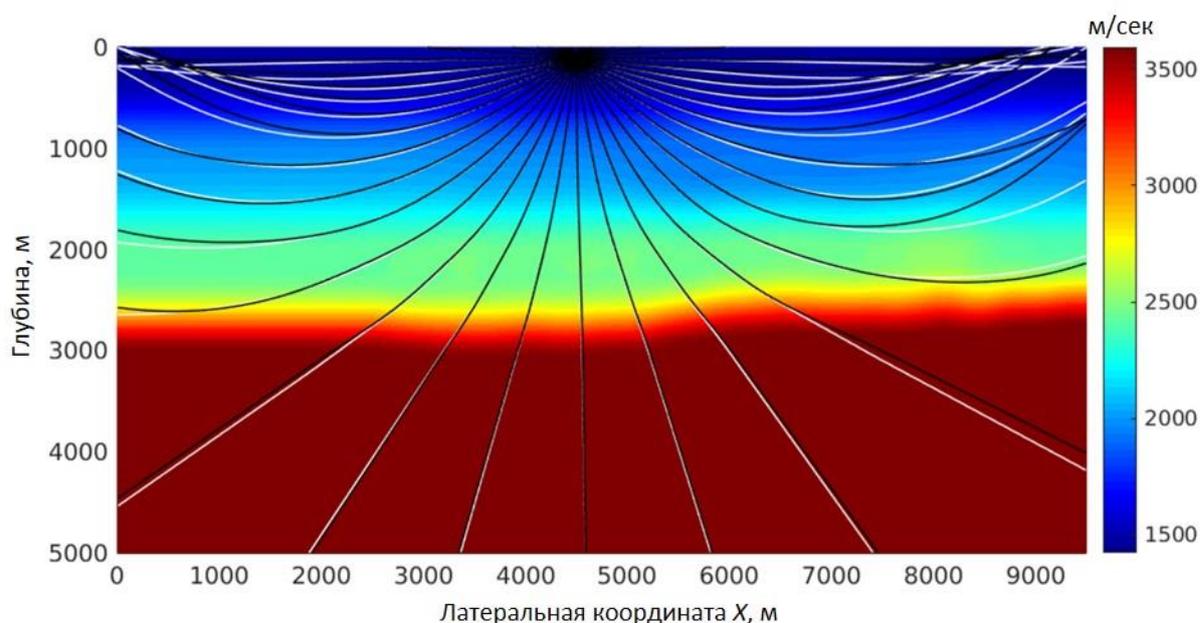


Рис. 7. Сравнение 3D лучей Ломакса в VTI модели, представленной на рис. 3, при различных значениях частоты ν . Белым изображены лучи Ломакса при $\nu = 30$ Гц (соответствуют стандартным лучам), черным – при $\nu = 5$ Гц. Лучи построены для одного фиксированного азимута $\varphi_{AZ} = 0$ и наложены на скоростную модель в XZ плоскости.

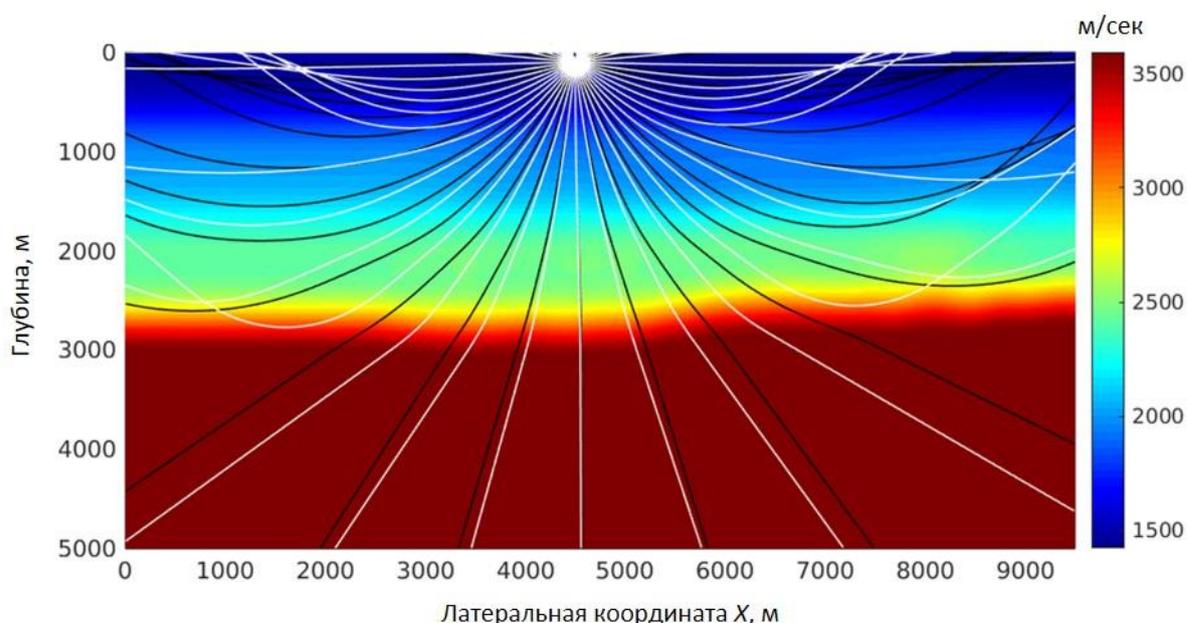


Рис. 8. Сравнение 3D лучей Ломакса для $\nu = 30$ Гц в VTI модели с рис. 3 (черные) с этими же лучами в соответствующей изотропной ($\varepsilon=0$, $\delta=0$) среде (белые). Лучи построены для одного фиксированного азимута $\varphi_{AZ} = 0$ и наложены на скоростную модель в XZ плоскости.

Также интересно оценить, насколько велико влияние слабой анизотропии на поведение лучей в предложенной модели. На рисунке 8 приведено сравнение лучей Ломакса при $\nu = 30$ Гц в изотропном (параметры ε , δ равны нулю) и анизотропном случае. Расчет лучей проводился для нулевого азимута, т. е. в плоскости (X, Z) . Как можно видеть, различие в поведении лучей весьма значительно. Это лишний раз подтверждает, что учет даже слабой анизотропии может существенно повлиять на результаты обработки.

На рисунке 9 приведено сравнение лучей Ломакса для частоты 30 Гц со стандартными лучами в изотропном случае. Как можно видеть, совпадение лучевых траекторий вполне удовлетворительно. Максимальная невязка времен пробега не превышает 3 мсек (шаг движения вдоль луча). Невязка обусловлена численной реализацией лучей Ломакса.

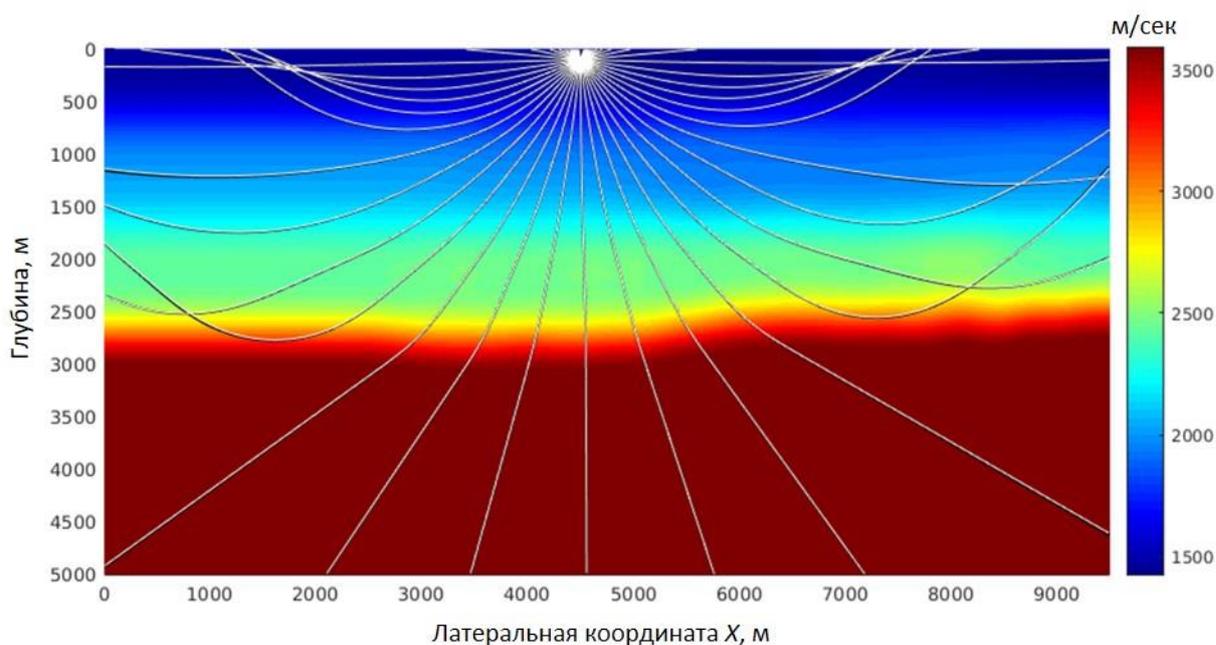


Рис. 9. Сравнение 3D лучей Ломакса для $\nu = 30$ Гц в изотропной модели с рис. 3 (черные) ($\varepsilon=0$, $\delta=0$) со стандартными лучами в этой же изотропной модели (белые). Лучи построены для одного фиксированного азимута $\varphi_{AZ} = 0$ и наложены на скоростную модель в XZ плоскости.

В заключении отметим, что в общем случае трансверсально изотропной модели с произвольной наклонной осью симметрии, в качестве входных данных необходимо будет задать еще два массива параметров (по сравнению с рассмотренным выше VTI случаем), а именно массивы со значениями углов, определяющих ориентацию оси симметрии в каждой точке: азимут и угол наклона относительно вертикали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе разработан, реализован и протестирован алгоритм построения квазипродольных частотно-зависимых лучей (лучи Ломакса) в трехмерных трансверсально-изотропных средах с наклонной осью симметрии. Лучи Ломакса позволяют до некоторой степени аппроксимировать распространение широкополосных сейсмических сигналов в реальных средах. Предложенная в данной работе схема расчета лучей Ломакса состоит из двух этапов: 1) движение луча вдоль соответствующего вектора групповой скорости, который зависит от сплаженных вдоль плоского участка фронта фазовых скоростей и текущей нормали к фронту; 2) определение локальной ориентации фронта в найденной на

первом этапе точке луча, которая находится с помощью одновременного движения множества контрольных точек, изначально расположенных на фрагменте плоского фронта в окрестности луча. Таким образом происходит аппроксимация движения локально плоского фрагмента волнового фронта. Свойства лучей Ломакса определяются распределением параметров модели в некотором объеме среды, сосредоточенным вокруг луча. Ширина зоны чувствительности зависит от длины волны в каждой точке. Длина волны определяется с помощью задаваемого наперед параметра, имеющего размерность частоты, который называется «частота луча». Для повышения численной эффективности используются приближенные выражения для фазовых и групповых скоростей для слабоанизотропной среды. Это предположение вполне оправдано в большинстве практических ситуаций, возникающих при обработке реальных сейсмических данных. Для того чтобы подтвердить правильность как самой концепции построения лучей Ломакса в трансверсально-изотропных средах, так и ее численной реализации, проведено сравнение лучей Ломакса в предельном случае (при достаточно большой частоте) со стандартными лучами с использованием гладкой реалистичной модели среды. В этом случае, в теории, результаты обоих подходов должны быть очень близки. Численные результаты подтверждают корректность разработанной реализации предложенного алгоритма. Проведенные численные эксперименты демонстрируют, что лучи Ломакса могут вполне успешно применяться при решении прямых и обратных задач сейсмологии в сложных трехмерных трансверсально-изотропных средах с наклонной осью симметрии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Бабич В.М., Булдырев В.С.** Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн. М.: Наука, 1972. 456 с.
- Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И.** Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 306 с.
- Неклюдов Д.А., Протасов М.И.** Моделирование времен пробега и акустических волновых полей лучевым методом с аппроксимацией распространения широкополосного сигнала применительно к задачам сейсмологии // Геофизические технологии. 2021. № 3. С. 4–17. doi:10.18303/10.18303/2619-1563-2021-3-4.
- Неклюдов Д.А., Протасов М.И.** Трехмерные лучи Ломакса и их использование для моделирования акустических волновых полей в сложных средах // Геофизические технологии. 2023. № 2. С. 56–71. doi:10.18303/2619-1563-2023-2-56.
- Протасов М.И., Осипов К.С.** Частотно-зависимое лучевое трассирование для неплоских границ // Технологии сейсморазведки. 2014. № 3. С. 25–31.
- Ben-Menahem A., Beydoun W.B.** Range of validity of seismic ray and beam methods in general inhomogeneous media – I. General theory // Geophysical Journal International. 1985. Vol. 82 (2). P. 207–234. doi:10.1111/j.1365-246X.1985.tb05135.x.
- Bube K.P., Washbourne J.K.** Wave tracing: Ray tracing for the propagation of band-limited signals: Part 1 – Theory // Geophysics. 2008. Vol. 73 (5). P. VE377–VE384. doi:10.1190/1.2963514.
- Červený V., Soares J.E.P.** Fresnel volume ray tracing // Geophysics. 1992. Vol. 57 (7). P. 902–915. doi:10.1190/1.1443303.
- Červený V., Molotkov I.A., Psencik I.** Ray theory in seismology. Charles University Press, 1977.
- Dehghan K., Farra V., Nicolétis L.** Approximate ray tracing for qP-waves in inhomogeneous layered media with weak structural anisotropy // Geophysics. 2007. Vol. 72 (5). P. SM47–SM60. doi:10.1190/1.2743668.

- Farra V.** High-order perturbations of the phase velocity and polarization of qP and qS waves in anisotropic media // Geophysical Journal International. 2001. Vol. 147 (1). P. 93–104. doi:10.1046/j.1365-246X.2001.00510.x.
- Fowler P.J.** Practical VTI approximations: a systematic anatomy // Journal of Applied Geophysics. 2003. Vol. 54 (3–4). P. 347–367. doi:10.1016/j.jappgeo.2002.12.002.
- Lomax A.** The wavelength-smoothing method for approximating broad-band wave propagation through complicated velocity structures // Geophysical Journal International. 1994. Vol. 117 (2). P. 313–334. doi:10.1111/j.1365-246X.1994.tb03935.x.
- Protasov M., Gadylishin K.** Computational method for exact frequency-dependent rays on the basis of the solution of the Helmholtz equation // Geophysical Journal International. 2017. Vol. 210 (1). P. 525–533. doi:10.1093/gji/ggx188.
- Vasco D.W., Nihei K.** Broad-band trajectory mechanics // Geophysical Journal International. 2019. Vol. 216 (2). P. 745–759. doi:10.1093/gji/ggy435.
- Vasco D.W., Peterson J.E., Majer E.L.** Beyond ray tomography: Wavepaths and Fresnel volumes // Geophysics. 1995. Vol. 60 (6). P. 1790–1804. doi:10.1190/1.1443912.
- Yarman C.E., Cheng X., Osypov K., Nichols D., Protasov M.** Band-limited ray tracing // Geophysical Prospecting. 2013. Vol. 61 (6). P. 1194–1205. doi:10.1111/1365-2478.12055.
- Thomsen L.** Weak elastic anisotropy // Geophysics. 1986. Vol. 51. P. 1954–1966. doi:10.1190/1.1442051.

REFERENCES

- Babich V.M., Buldyrev V.S.** Asymptotical methods in problems of short-wavelength diffraction [in Russian]. Nauka, Moscow, 1972.
- Ben-Menahem A., Beydoun W.B.** Range of validity of seismic ray and beam methods in general inhomogeneous media – I. General theory // Geophysical Journal International. 1985. Vol. 82 (2). P. 207–234. doi:10.1111/j.1365-246X.1985.tb05135.x.
- Bube K.P., Washbourne J.K.** Wave tracing: Ray tracing for the propagation of band-limited signals: Part 1 – Theory // Geophysics. 2008. Vol. 73 (5). P. VE377–VE384. doi:10.1190/1.2963514.
- Červeny V., Soares J.E.P.** Fresnel volume ray tracing // Geophysics. 1992. Vol. 57 (7). P. 902–915. doi:10.1190/1.1443303.
- Červeny V., Molotkov I.A., Psencik I.** Ray theory in seismology. Charles University Press, 1977.
- Dehghan K., Farra V., Nicoléti L.** Approximate ray tracing for qP -waves in inhomogeneous layered media with weak structural anisotropy // Geophysics. 2007. Vol. 72 (5). P. SM47–SM60. doi:10.1190/1.2743668.
- Farra V.** High-order perturbations of the phase velocity and polarization of qP and qS waves in anisotropic media // Geophysical Journal International. 2001. Vol. 147 (1). P. 93–104. doi:10.1046/j.1365-246X.2001.00510.x
- Fowler P.J.** Practical VTI approximations: a systematic anatomy // Journal of Applied Geophysics. 2003. Vol. 54 (3–4). P. 347–367. doi:10.1016/j.jappgeo.2002.12.002.
- Kravtsov Y.A., Orlov Yu.I.** Geometrical optics of inhomogeneous media [in Russian]. Nauka, Moscow, 1980.
- Lomax A.** The wavelength-smoothing method for approximating broad-band wave propagation through complicated velocity structures // Geophysical Journal International. 1994. Vol. 117 (2). P. 313–334. doi:10.1111/j.1365-246X.1994.tb03935.x.
- Neklyudov D.A., Protasov M.I.** Simulation of traveltimes and acoustic wave fields by the ray method with approximation of the propagation of a broadband signal as applied to seismic problems // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2021. Vol. 3. P. 4–17. (in Russ.). doi:10.18303/10.18303/2619-1563-2021-3-4.

Neklyudov D.A., Protasov M.I. Three-dimensional Lomax rays and its application for acoustic wave fields modelling in complex media // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2023. Vol. 2. P. 56–71. (in Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2023-2-56.

Protasov M., Osypov K. Frequency-dependent ray tracing for non-planar boundaries // Seismic Technologies. 2014. Vol. 3. P. 25–31.

Protasov M., Gadylyshin K. Computational method for exact frequency-dependent rays on the basis of the solution of the Helmholtz equation // Geophysical Journal International. 2017. Vol. 210 (1). P. 525–533. doi:10.1093/gji/ggx188.

Thomsen L. Weak elastic anisotropy // Geophysics. 1986. Vol. 51. P. 1954–1966. doi:10.1190/1.1442051.

Vasco D.W., Nihei K. Broad-band trajectory mechanics // Geophysical Journal International. 2019. Vol. 216 (2). P. 745–759. doi:10.1093/gji/ggy435.

Vasco D.W., Peterson J.E., Majer E.L. Beyond ray tomography: Wavepaths and Fresnel volumes // Geophysics. 1995. Vol. 60 (6). P. 1790–1804. doi:10.1190/1.1443912.

Yarman C.E., Cheng X., Osypov K., Nichols D., Protasov M. Band-limited ray tracing // Geophysical Prospecting. 2013. Vol. 61 (6). P. 1194–1205. doi:10.1111/1365-2478.12055.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

НЕКЛЮДОВ Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории методов интерпретационной обработки сейсмических данных Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическая томография, выделение полезного сигнала в сейсмических данных.

ПРОТАСОВ Максим Игоревич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией методов интерпретационной обработки сейсмических данных Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: исследования в области разработки алгоритмов обработки данных сейсморазведки.

*Статья поступила 21 ноября 2023 г.,
одобрена после рецензирования 15 декабря 2023 г.,
принята к публикации 18 декабря 2023 г.*



ДЕФОРМАЦИИ И СМЕЩЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЭПОХУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ТУРЦИИ В ФЕВРАЛЕ 2023 ГОДА ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Владимир Юрьевич Тимофеев^{1,✉}, Дмитрий Геннадьевич Ардюков², Антон Владимирович Тимофеев³

^{1,2,3}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹TimofeevVY@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6029-7801>

²ArdukovDG@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3089-7114>

³TimofeevAV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7664-7244>

Аннотация. Проводится анализ связи серии Турецких землетрясениях февраля 2023 г. и косейсмических смещений и деформаций земной поверхности. В области сейсмического разрыва за пять дней зарегистрированы три землетрясения 6 февраля $M = 7.8, 6.7, 7.5$ и далее в течение 5 дней 42 события $M = 4.5–6.0$. Проанализированы данные, полученные различными методами геодезии в эпицентральной области. Рассматриваются косейсмические эффекты в 300-километровой зоне, охватывающей значительную часть Восточно-Анатолийского разлома. Здесь зарегистрированы относительные смещения до 6 м, при среднем значении 4 м. При изучении эффектов в дальней зоне использованы данные по GPS сети из 27 международных станций, из них семь станций расположены на территории Турции. Для наиболее близкой к очагу главного толчка 6 февраля 2023 г. станции MERS получены косейсмические 3D смещения величиной до 20 мм. Выполнено построение полей смещений и деформаций по данным сети IGS. Скорости косейсмических деформаций в дальней зоне достигают 10^{-8} , что на порядок выше фоновых значений 10^{-9} . Постсейсмические горизонтальные и вертикальные скорости смещений земной поверхности в районах Турции, расположенных к юго-западу от эпицентров землетрясений, можно связать с наводнениями. Проведено исследование смещений и деформации территории Турции и ее окружения в эпоху 2017–2023 гг. Выделено уменьшение скорости смещений за два года до сейсмической активизации 2023 г. Полученная картина скоростей смещений и деформаций отражает современные процессы на территории, расположенной на границах Анатолийского блока и тектонических плит: Евразийской, Аравийской и Африканской.

Ключевые слова: деформации, смещения, геодезические методы, Турецкие землетрясения, Анатолийские разломы, тектонические плиты

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ-2022-0019.

Для цитирования: Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В. Деформации и смещения земной поверхности в эпоху землетрясений в Турции в феврале 2023 года по геодезическим данным // Геофизические технологии. 2024. № 2. С. 55–72. doi:10.18303/2619-1563-2024-2-55.

DEFORMATION AND DISPLACEMENTS OF EARTH'S SURFACE IN TURKISH EARTHQUAKES ERA IN FEBRUARY 2023 BY GEODESY DATA

Vladimir Yu. Timofeev^{1,✉}, Dmitry G. Ardukov², Anton V. Timofeev³

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

¹TimofeevVY@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6029-7801>

²ArdyukovDG@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3089-7114>

³TimofeevAV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7664-7244>

Abstract. The work analyzes the connection between a series of Turkish earthquakes in February 2023 and coseismic displacements and deformations on the Earth's surface. In areas of seismic rupture during the five days, there are recordings of three earthquakes on February 6 with magnitudes 7.8, 6.7, 7.5 and then for 5 days period – 42 events of magnitude 4.5–6.0. This work analyzed data obtained by various geodesy methods in the epicentral region. Coseismic effects in a 300 kilometers zone, covering a significant part of the East Anatolian Fault, are considered. Relative displacements up to 6 m have been recorded, with an average value 4 m. When for studying far-field effects, we used GPS network data from 27 international stations, of which seven stations located in Turkey. For the closest to the epicenters of the main aftershock on February 6, 2023, MERS station received coseismic 3D displacements up to 20 mm. The displacement and deformation fields have been constructed according to IGS data. Rates of coseismic deformations in the far zone reach up to 10^{-8} , which is an order of magnitude higher than the background values of 10^{-9} . Post-seismic horizontal and vertical displacements rates of the Earth's surface in areas of Turkey, located to the southwest of the earthquake epicenters can be associated with floods. A study of displacements rates and deformations of the territory was carried out Turkey and its surroundings in the era of 2017–2023. Highlighted decrease displacement rates two years before seismic activation in 2023. The resulting picture of displacement and deformation rates reflects a current processes in the territory located on the borders of Anatolian Block and tectonic plates: Eurasian, Arabian, and African.

Keywords: deformations, displacements, geodetic methods, Turkish earthquakes, Anatolian faults, tectonic plates

Funding: the study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0019.

For citation: Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V. Deformation and displacements of Earth's surface in Turkish earthquakes era in February 2023 by geodesy data // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 2. P. 55–72. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-2-55.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям, возникновение большинства землетрясений трактуется в рамках теории, называемой тектоникой плит. Ее основная идея заключается в том, что внешняя оболочка Земли состоит из нескольких крупных и жестких пластин, которые называются плитами. Их количество достигало 53, но в настоящее время по модели ITRF-2014 остановились на 11. Известно, что представления о кинематике литосферных плит основано на допущении об их внутренней стабильности и локализации межплитных деформаций вдоль границ плит [Fernandes et al., 2003; Altamimi et al., 2016, 2017]. Именно на краях плит геологические структуры Земли подвергаются наибольшему воздействию сил, возникающих в результате движения и столкновения плит, и именно там происходят самые крупные геологические преобразования, одним из которых является землетрясение. Яркий пример такого явления – последние турецкие землетрясения, случившиеся на границах Евразийской, Аравийской и Африканской тектонических плит в области Восточно-Анатолийской разлома (EAF) (рис. 1) [Holzer et al., 2000].

Касаясь истории вопроса, можно отметить, что эта область не так активна, как северная часть Анатолийского блока, Северо-Анатолийский разлом (NAF), где за период 1939–1999 гг. зарегистрировано 9 землетрясений $M > 7$ (1939, 1942, 1943, 1944, 1951, 1957, 1967, 1992, 1999), которые в итоге охватывают всю область разлома. Скорость смещений Анатолийского блока на запад по GPS данным составляет 20–28 мм/год.

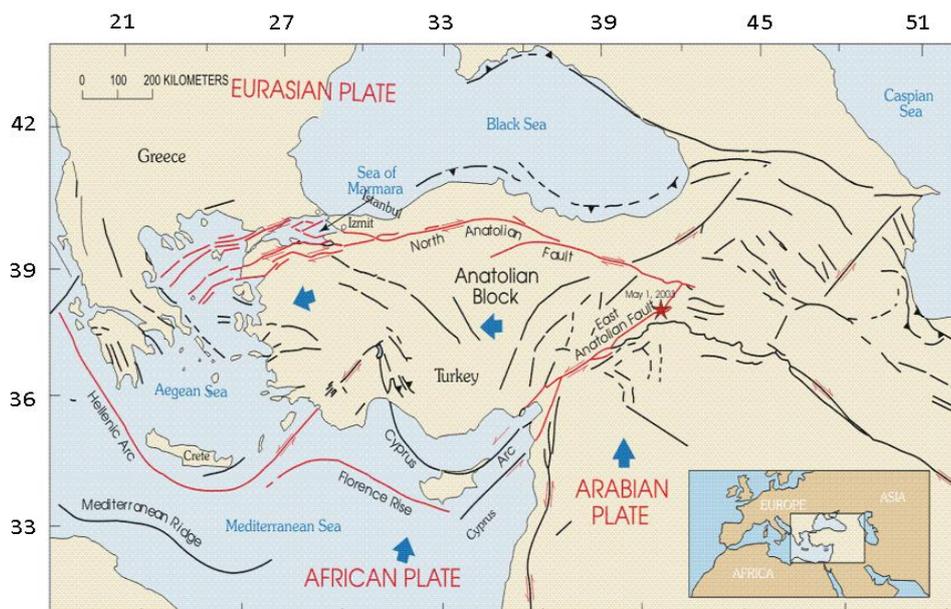


Рис. 1. Карта района исследований, включающая Анатолийский блок, ограниченный с севера Северо-Анатолийским разломом, с востока Восточно-Анатолийским разломом. Звезда – эпицентр первого землетрясения 06.02.2023 г. Стрелками показано направление смещения тектонических плит (Африканской, Аравийской и Анатолийского блока) относительно Евразийской плиты. Широта и долгота в градусах.

Другая картина наблюдается на восточной границе Анатолийского блока. Сильные исторические землетрясения в Восточно-Анатолийской разломной зоне (EAFZ), известные за последние пятьсот лет, показаны на рис. 2.

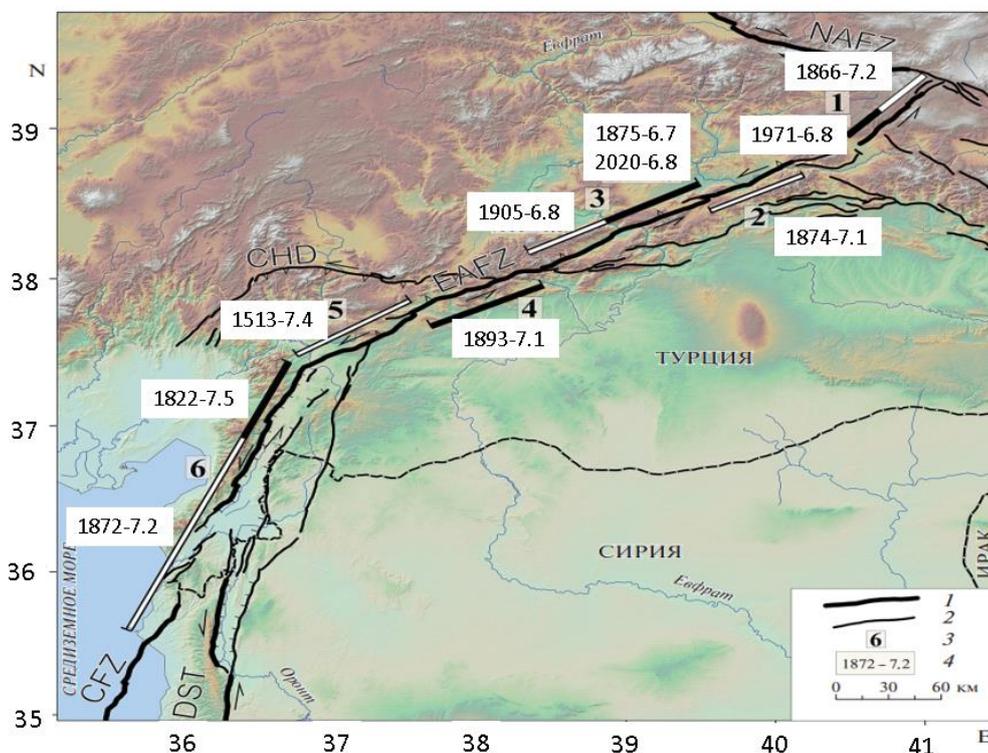


Рис. 2. Сейсмотектоническая сегментация EAFZ. В легенде (внизу справа) цифрами отмечены области воздействия землетрясения вдоль разрыва (1), разломы (2), номер сегмента (3), дата и магнитуда исторического землетрясения (4). Цифрами на карте обозначены сегменты EAF: 1 – Карлиова–Бингёль; 2 – Палу–оз. Хазар; 3 – оз. Хазар–Синджик; 4 – Челикхан–Эркенек; 5 – Гёльбаши–Тюркоглу; 6 – Тюркоглу–Антакия [Челик и др., 2023].

По геологическим данным средняя скорость смещения при сдвиге по EAFZ оценивается в 6–8 мм/год. Современные движения в EAFZ изучены методом GPS. Согласно GPS-данным, левосторонние сдвиговые смещения вдоль EAFZ изменяются от 9–10 мм/год в центральной части до 6–7 мм/год в его южной области, где появляется компонента поперечного растяжения [Челик и др., 2023].

Последние известные события в EAFZ отмечены в 2023 г. Здесь, начиная с 6 февраля 2023 г., началась мощная активизация (рис. 3). Информация о наиболее сильных событиях, зарегистрированных 6 февраля, приведена в табл. 1.

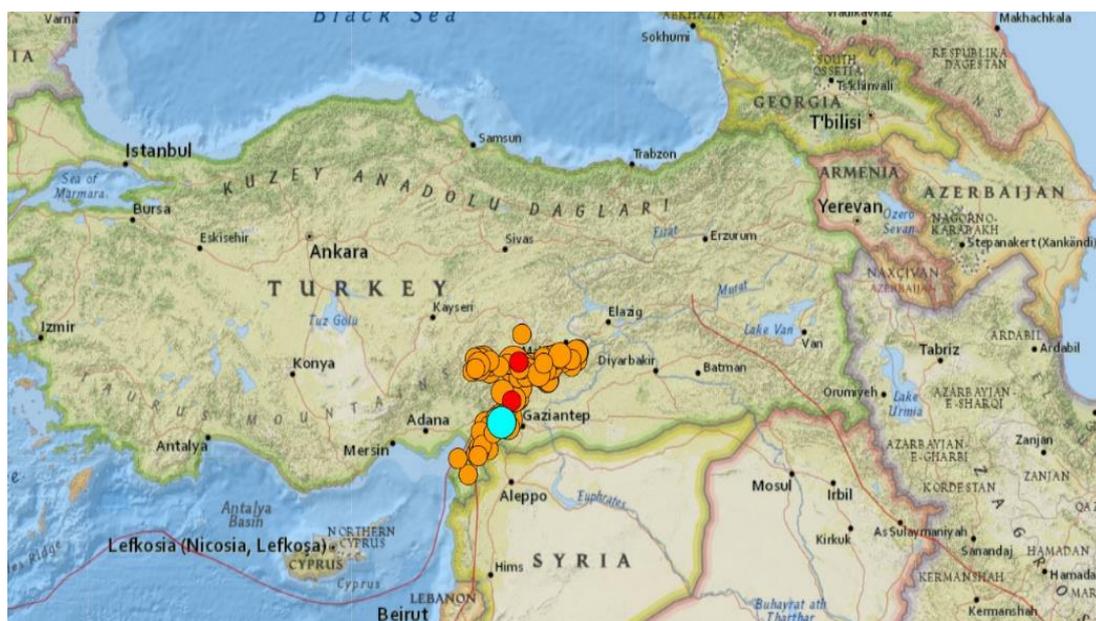


Рис. 3. Положение эпицентров землетрясений за период 06.02.23–10.02.23: круг салатного цвета $M = 7.8$, красного цвета $M = 6.7$ и $M = 7.5$ (06.02.23), коричневого цвета $M = 4.5–6.0$ за период (06.02.23–10.02.23) [https://earthquake.usgs.gov].

Таблица 1

Параметры землетрясений в Турции ($M > 6$), произошедших 06.02.2023 г. [https://earthquake.usgs.gov]

Время (UT)	Магнитуда	Широта, °N	Долгота, °E	Место
1:17:35	7.8	37.174	37.032	33 км западнее Газиантепа
1:28:15	6.7	37.127	36.943	14 км к востоку от г. Нурда
10:24:49	7.5	38.008	37.211	4 км восточнее Экинезю

Сейсмические события в Турции являются объектами активного исследования с использованием различных геофизических полей [Адушкин и др., 2023; Михайлов и др., 2023а; Atanasova et al., 2023; Barbot et al., 2023; Eppelbaum et al., 2023; Li et al., 2023; Över et al., 2023; Utkucu et al., 2023; Zhao et al., 2023]. Несколько сейсмологических центров мира вычисляли параметры мощной серии землетрясений в Турции. Результаты определения показывают разброс результатов: так для глубины первого землетрясения спектр оценок меняется от 10 до 32 км, а магнитуда от 7.7. до 8.0. Для второго землетрясения получены оценки глубины от 7 до 15 км, а для магнитуды от 7.5 до 7.8. Параметры нодальной плоскости показывают еще больший разброс, авторы многочисленных анализов косейсмических смещений [Михайлов и др., 2023б; Barbot et al., 2023] уточняли положение сейсмических разрывов, используя геологические данные о расположении системы разломов в регионе.

Задача нашей работы – анализ полей смещений и деформации земной поверхности по геодезическим данным, полученным в эпицентральной области землетрясений в Турции в феврале 2023 г. различными геодезическими методами, и зарегистрированным в дальней зоне в косейсмическую эпоху и за несколько лет до активизации 2023 г.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

В эпицентральной области вдоль линии сейсмических разрывов и разломов был выполнен большой объем геодезических измерений. На рисунках 4 и 5 показан процесс измерений и некоторые результаты смещений и деформации горных пород в эпицентральной зоне. По данным обследований в результате первого землетрясения поверхностный разрыв распространился на 290 км. На участке EAFZ северо-восточнее г. Тюркоглу максимальные сдвиговые смещения достигали 5.5 м. Разрыв второго землетрясения протянулся на 130 км. Здесь максимальные сдвиги достигли 6 м. Впоследствии в разломной области наблюдались обвалы горных пород, оползни и разжижение грунта.



Рис. 4. Левосторонний сдвиг по восточной ветви DST (Трансформа Мертвого моря) возле г. Нарли (сдвиг дорожного полотна) [Челик и др., 2023].



Рис. 5. Левосторонний сдвиг по EAFZ северо-восточнее области максимальных смещений: 1 – деформация и левосторонний сдвиг железнодорожного полотна на 5.7 м; 2 – сдвиг дорожного полотна на 5.35 м [Челик и др., 2023].

В результате геодезических измерений для области первого события 6 февраля 2023 г. получено распределение амплитуд левосторонних смещений при сдвиге вдоль активированной части EAFZ (рис. 6). Протяженность линии разрыва около 300 км, амплитуда относительных смещений по разрыву около 4 м.

Результаты локальных GPS-измерений (рис. 7) показывают в обоих случаях левостороннее смещение вдоль сейсмических разрывов, хотя из-за сложного рисунка разломов и разрывов земной поверхности картина достаточно сложна.

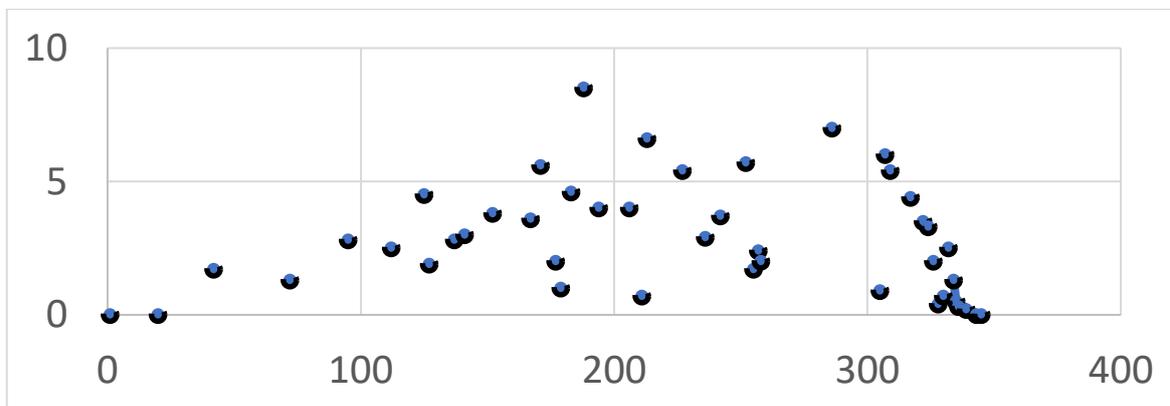


Рис. 6. Распределение амплитуд левосторонних смещений при сдвиге вдоль активированной части EAFZ.

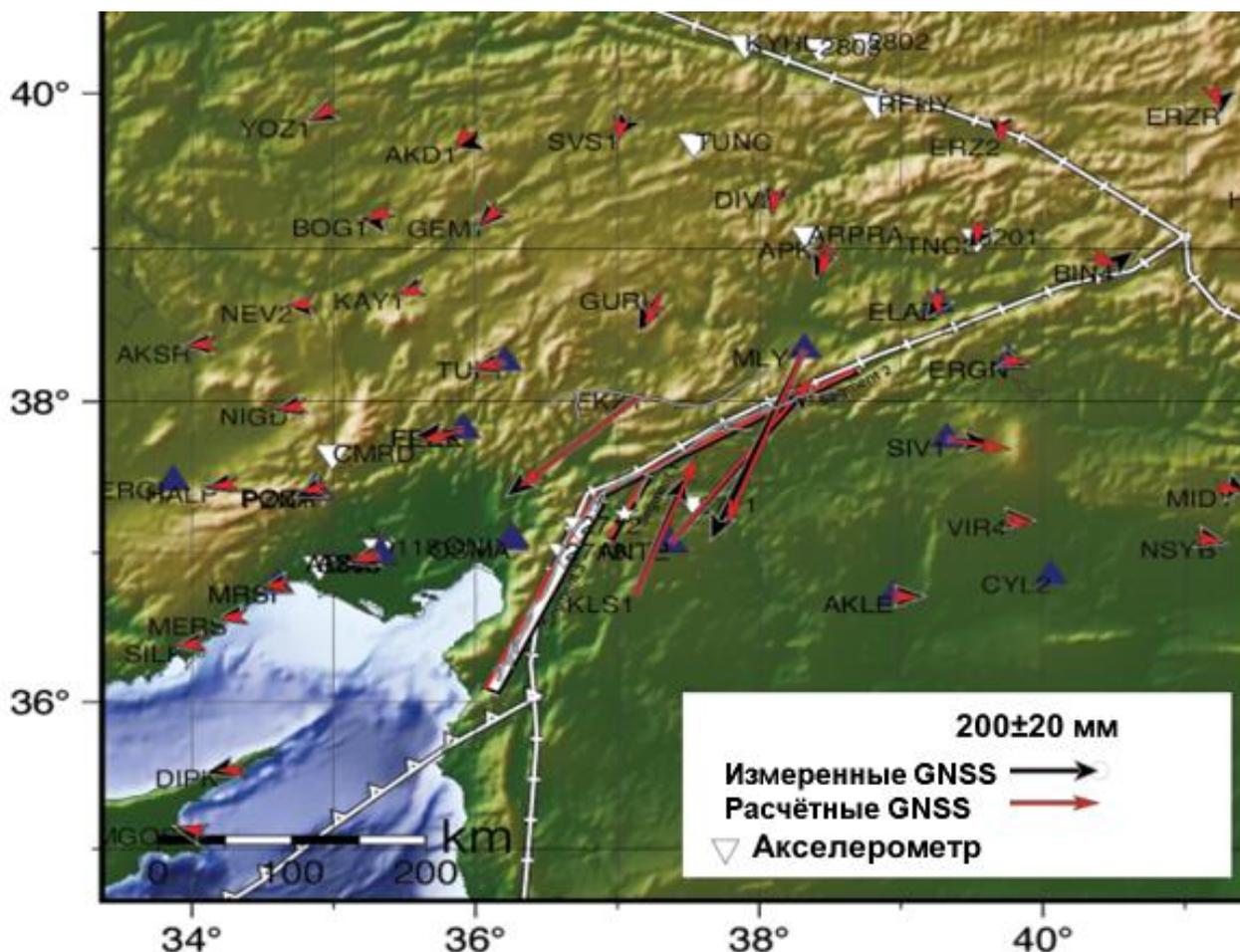


Рис. 7. Сегменты сейсмических разрывов при сильнейших землетрясениях провинции Караманмараш (обозначены синими и красными линиями), произошедших 06.02.2023 г., и косейсмические смещения на локальных GPS пунктах, результаты получены при первом землетрясении [<https://earthquake.usgs.gov>].

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

При анализе смещений в дальней зоне использованы открытые данные по постоянным GPS станциям сети IGS Турции и соседних стран (рис. 8).

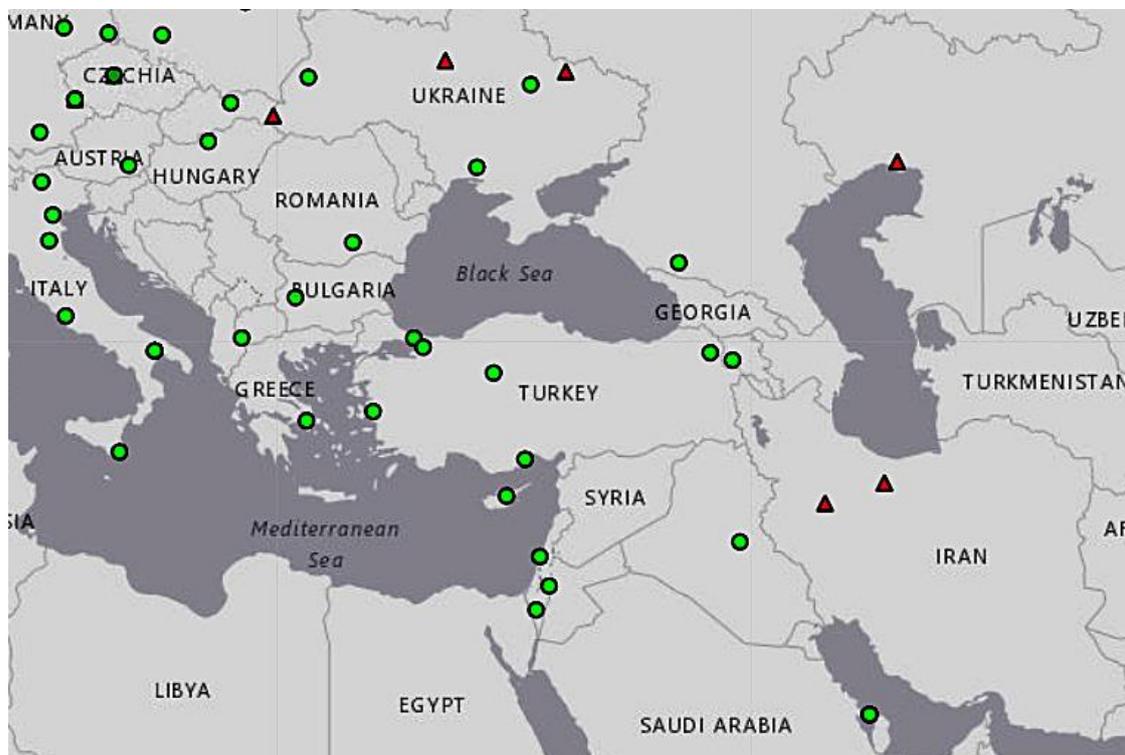


Рис. 8. Положение станций космической геодезии: зеленые кружки – станции международной сети IGS, красные треугольники региональные пункты измерений [IGS net, <https://network.igs.org/>].

Собственно, в сети IGS для территории Турции имеется только семь станций наблюдений, в основном, по границам страны. Поэтому помимо станций Турции использованы материалы, полученные в соседних странах. При анализе материалов использовались специальные программные пакеты, наиболее распространенные в работе международных научных центров: GAMIT-GLOBK версии 10.71 [Herring et al., 2010]. Данные сетевых измерений обрабатывались с учетом результатов по мировой сети постоянных станций Евразии и ее окружения. Всего в расчеты принимались данные 27 станций. Координаты станций приведены в табл. 2.

Расчет плитных скоростей проводился в рамках модели ITRF-2014 [Altamimi et al., 2016]. В результатах анализа получаем геоцентрические скорости для каждого пункта. Например, для станции Новосибирск (Ключи, NVSK), расположенной на востоке сети, скорость смещения по определениям за период 2017–2023 гг. (по эпохе – 11 дней в феврале) составляет 1.04 мм/год на юг и 26.68 мм/год на восток, при ошибке 0.3–0.4 мм, что соответствует скорости по модели Евразии ITRF-2014 (–0.63; 26.4). Из решения для станции ZECK, скорости за период 2017–2023 гг. составили 11.54 ± 0.14 мм/год на север; 25.11 ± 0.20 мм/год на восток, что также соответствует модели Евразии ITRF-2014. Данные, полученные на постоянных станциях, в дальнейшем использованы для пространственного анализа по территории Турции и ее окружения. Наиболее близкой к будущему эпицентру оказалась станция MERS (см. табл. 2). Эпоха ежегодных измерений – с 1 по 11 февраля. На рисунке 9 показаны тестовые результаты по данным 2018 и 2022 гг.

Таблица 2

Координаты станций, данные которых использованы при определениях смещений и деформаций

Код станции и местоположение	Широта, °N	Долгота, °E
ZECK Зеленчукская, Северный Кавказ, Россия	43.78839	41.56507
DYNG Афины, Греция	38.07855	23.93244
ISBA Багдад, Ирак	33.34142	44.43841
ISTA Стамбул, Турция	41.10445	29.01935
KABR Хайфа, Израиль	33.02282	35.14506
MERS Мерсин, Турция	36.56639	34.25585
MIKL Николаев, Украина	46.97279	31.97285
NICO Никосия, Кипр	35.14099	33.39645
SOFI София, Болгария	42.55610	23.39474
ARUC Ереван, Армения	40.28572	44.08559
BUCU Бухарест, Румыния	44.46395	26.12575
TUBI Измит, Турция	40.78672	29.45068
IZMI Измир, Турция	38.39480	27.08182
NVSK Новосибирск, Ключи, Россия	54.8401	83.2352

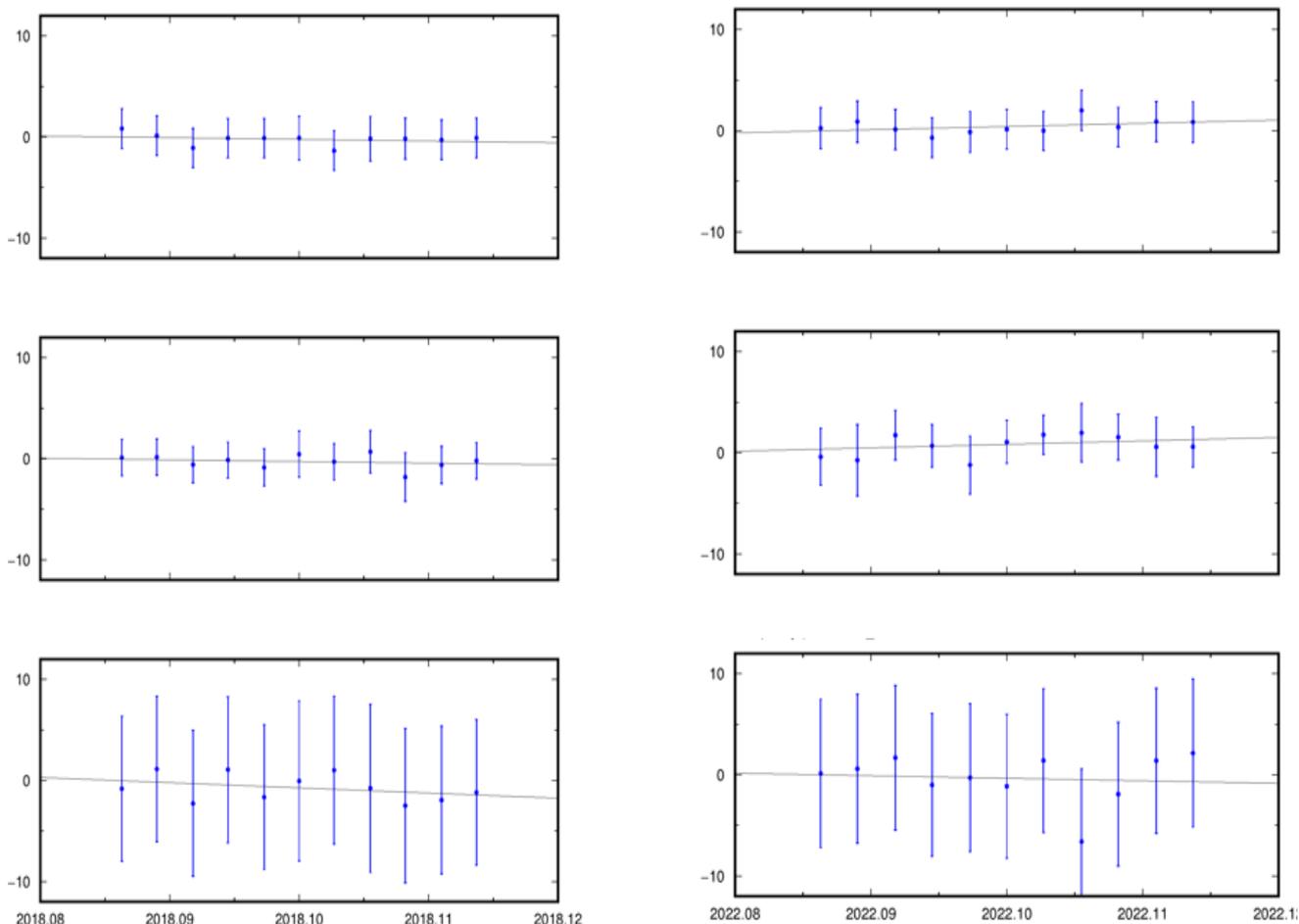


Рис. 9. Стабильность значения координат пункта MERS по ежедневным определениям для эпохи с 1 по 11 февраля 2018 и 2022 гг. Сверху вниз по широте, по долготе и по вертикали в миллиметрах. Время в сотых долях года.

Как видим по рассмотренным графикам (рис. 9), в результатах отсутствует сезонная компонента смещений на 11-ти дневной серии. Был проведен анализ многолетних смещений станции за период с 2017 по 2023 г. На рисунке 10 показаны вариации положения пункта при снятии линейного тренда.

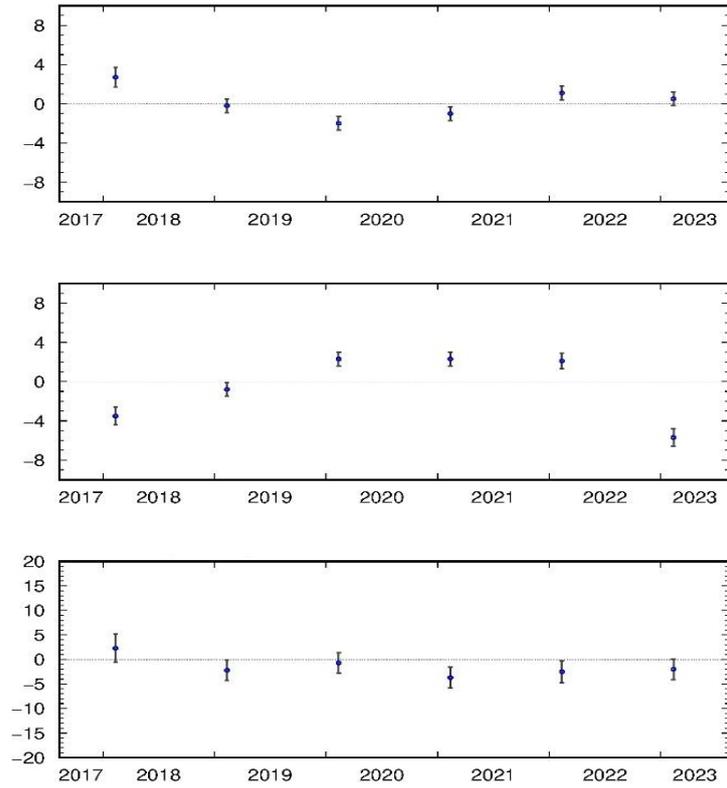


Рис. 10. Графики вариаций 3D смещений пункта MERS за период 2017–2023, сверху вниз по широте, по долготе и по высоте, линейный тренд, связанный с плитным движением, исключен (16.08 ± 0.19 мм/год; 12.39 ± 0.21 мм/год; 0.58 ± 0.56 мм/год). Вертикальная шкала в мм, горизонтальная – время.

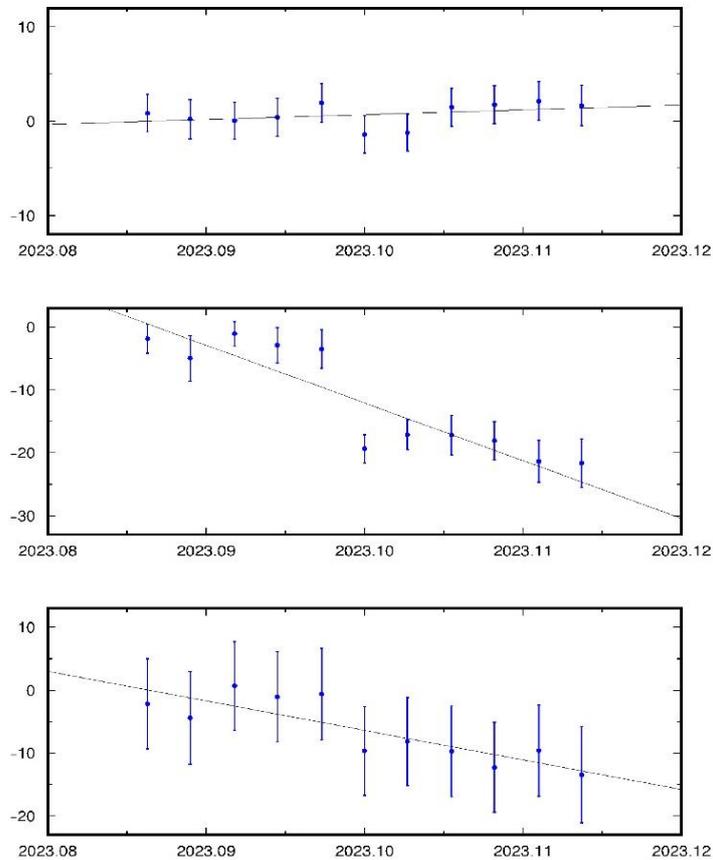


Рис. 11. Графики 3D смещений пункта MERS по ежесуточным определениям за период с 01.02.2023 по 11.02.2023. Скачок смещений выделяется с 5 на 6 февраля. Вертикальная шкала в мм, горизонтальная – время.

Также в эпоху землетрясений с 1 по 11 февраля по ежедневным определениям получены вариации смещений по трем компонентам. Вариации 2023 г. приведены на рис. 11 и 12. Выделяется косейсмический скачок горизонтальных смещений и опускание пункта MERS в период с 5 по 6 февраля 2023 г.

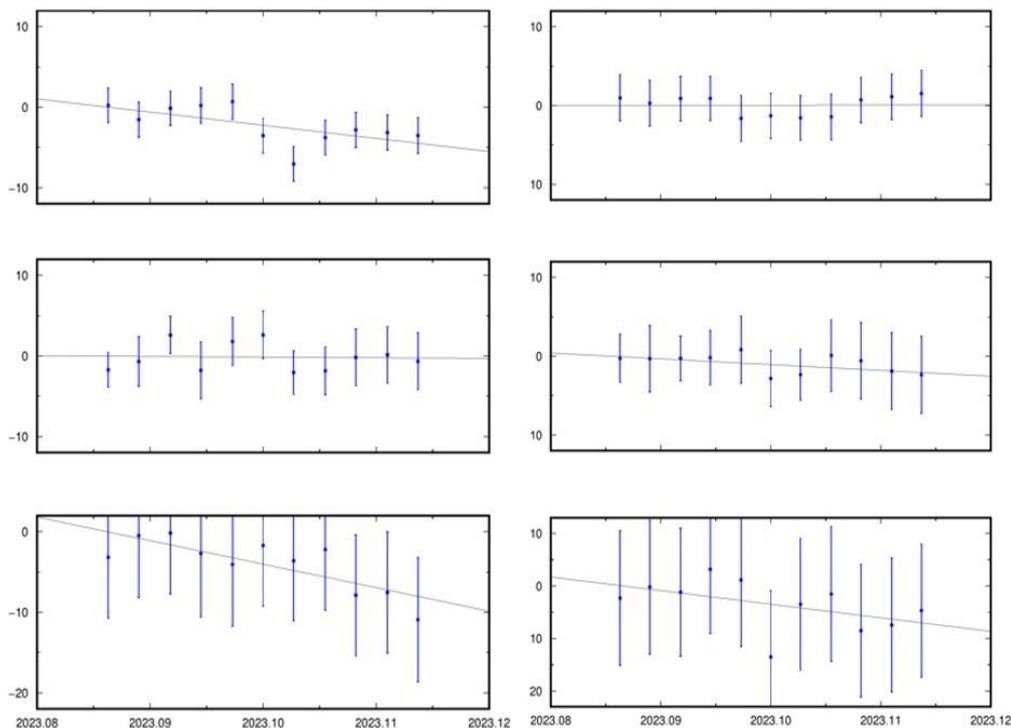


Рис. 12. Графики 3D смещений пунктов ARUC и TUBI (табл. 2) по ежедневным определениям на период с 1 по 11 февраля 2023 г. Сверху вниз: север–юг, восток–запад, вверх–вниз. Вертикальная шкала в мм, горизонтальная – время в сотых долях года.

Расчет деформаций проводился методом триангуляции Делоне [Tregoning et al., 2013]. На изучаемой территории разбивается сеть треугольников. Для каждого треугольника определяется двумерный тензор деформации

$$E = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где (u, v) смещения по осям x и y соответственно. Нормальные деформации, сдвиговые деформации и параметры вращения вокруг оси z определяются в следующем виде [Turcotte, Schubert, 1982]:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{xy} = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) / 2, \quad (3)$$

$$\omega_z = \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) / 2. \quad (4)$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как отмечено выше, результаты GPS-измерений в эпицентральной зоне показывают левостороннее смещения вдоль сейсмического разрыва. Используя GPS-данные локальной сети при первом землетрясении (см. рис. 7: MLY1(0.43 м), EKZ1 (0.27 м), GUR1 (0.07), AKD1(0.30м)) в рамках дислокационной модели землетрясения, получаем достаточно простое распределение левосторонних горизонтальных смещений с расстоянием от разлома (рис. 13). Для построения теоретической кривой, приведенной на рис. 13, использовано соотношение для смещений в зоне сдвига на вертикальном разрыве [Turcotte, Schubert, 1982]:

$$\Delta w(x) \equiv w(x) - w_0(x) = (\Delta w_0/2)[(1 + x^2/a^2)^{1/2} - x/a] \operatorname{sgn} x, \quad (5)$$

где $\Delta w(x)$ – смещение в точке на расстоянии x , Δw_0 – относительное смещение по разрыву, x – расстояние от линии сейсмического разрыва, a – глубина. Использованы следующие параметры: глубина разрыва – 10 км, относительное смещение 4 м. Точки на рис. 13 – это измеренные значения смещений на разных расстояниях ортогонально линии разрыва. Для второго сильного землетрясения получены подобные распределения смещений, что типичного для землетрясений со сдвигом, выходящим на земную поверхность. Подобное распределение зарегистрировано, например, при Чуйском землетрясении 27.09.2003 г. ($M = 7.3$ – 7.5) в Горном Алтае [Тимофеев и др., 2019].

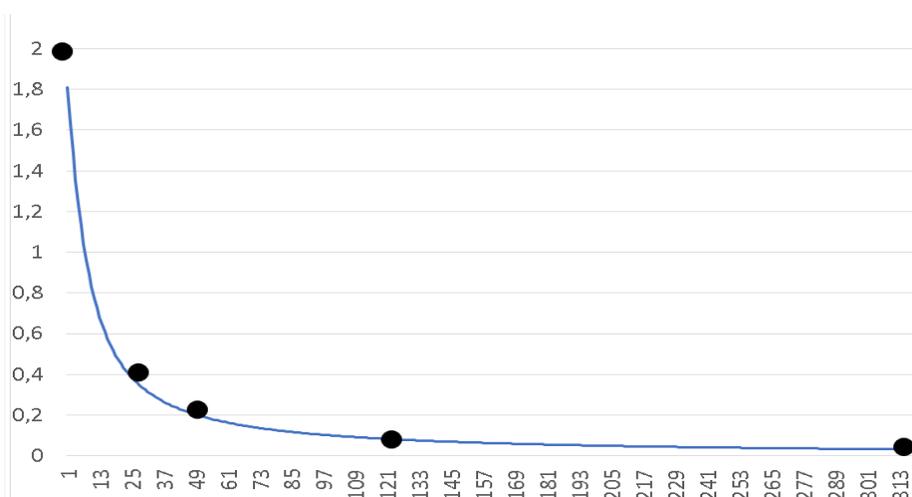


Рис. 13. Изменение смещений (в метрах, вертикальная шкала) в зависимости от расстояния до разрыва (в километрах, горизонтальная шкала) для первого сильного землетрясения 06.02.2023 г. Модельная кривая по соотношению (5), точки – экспериментальные данные.

Для определения скоростей современных смещений и координат пунктов периодических повторных измерений нами выполнялось сетевое относительное уравнивание, реализованное в программном пакете GAMIT/GLOBK разработки Массачусетского технологического института (англ. MIT) [Herring et al., 2010]. В дальней зоне, несмотря на то что наиболее близкий к эпицентрам землетрясений 6 февраля пункт MERS находится в 265 км от эпицентра, получены хорошие данные о косейсмическом смещении пункта (см. рис. 11). Выделено смещение пункта на 25 мм на ЮЗЗ. Косейсмические смещения отмечаются еще на нескольких станциях (см. рис. 12). По сейсмологическим данным при землетрясении зарегистрирован сдвиг на практически вертикальном разрыве, ориентированном на СВ, пункт MERS расположен на юго-западе вне зоны разрыва, здесь на краях разрыва кроме горизонтальной компоненты

появляется вертикальное опускание (см. рис. 8). Обращаясь к результатам анализа смещений, начиная с 2017 г., можно отметить аномальное замедление смещений с 2020 г. по горизонтальным компонентам.

Для расчета скоростей деформаций нами использовалось покрытие исследуемой территории конечным набором треугольных элементов. Для этого из набора исходных пунктов формировались треугольники, а с помощью алгоритма Делоне, реализованного в программном наборе инструментов Generic Mapping Tools [Teza et al., 2008; Wessel et al., 2019] определялись компоненты деформации. Размер стороны построенных треугольников изменяется от 100 км до нескольких сот километров.

Нижняя область сети представлена вырожденными треугольниками, которые не следует принимать в расчет. Рассматривая результаты определения различных характеристик скорости деформации территории, отметим, что наиболее интересной оказалась площадная деформация. Скорость площадной деформации треугольников ISTA-ZECK-MERS и ZECK-MERS-ARUC, охватывающих восточную часть Турции, часть акватории Черного моря и западную часть Кавказа, от практически нулевой в начале февраля 2023 г. сменилась растяжением -10^{-8} в конце декады. На рисунках 14 и 15 приведены результаты определения скорости площадной деформации в долях от $1 \cdot 10^{-6}/\text{год}$, а звездочками показаны эпицентры землетрясений. Анализ изменений скорости сдвиговой деформации до и после события показал, что величина скорости сдвига увеличилась в два раза (от $4 \cdot 10^{-8}/\text{год}$ до $10^{-7}/\text{год}$). Максимальные измерения отмечаются в западной части Турции. Ошибка определения величины деформации составляет 10 %.

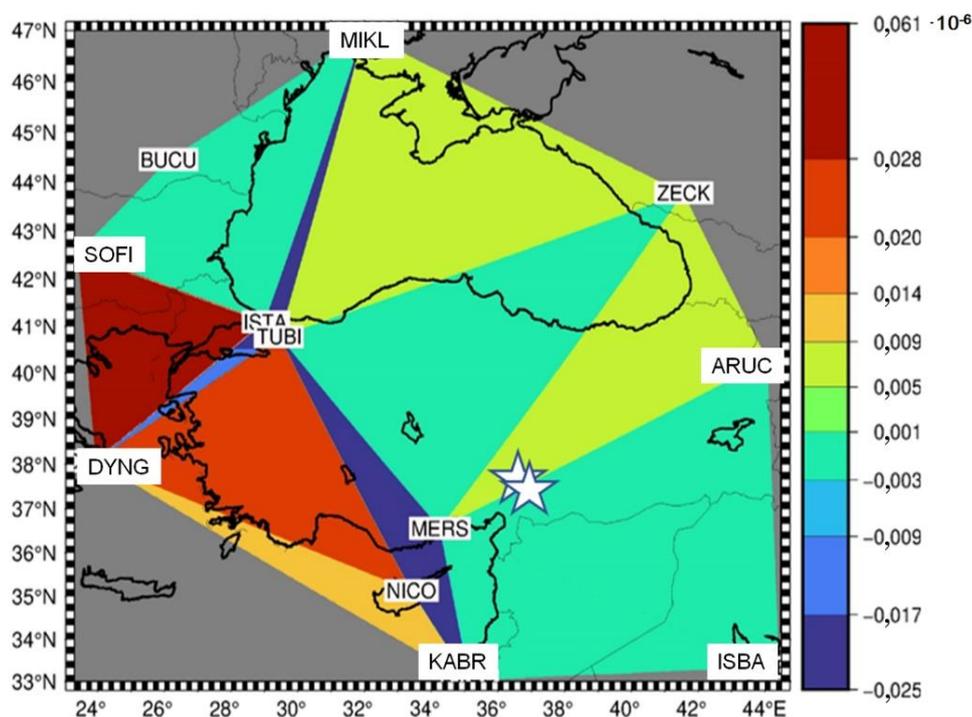


Рис. 14. Результаты определения скорости площадной деформаций 04.02.2023 г.

В эпоху после сейсмической активизации анализ результатов позволяет выделить аномалию в скорости смещения пунктов к юго-западу от эпицентров (рис. 16). Как отмечено выше, на пункте MERS после землетрясения зарегистрировано опускание (см. рис. 11), а далее, в марте, улицы турецкого г. Искендеруна в провинции Хатай оказались под водой в результате резкого подъема уровня моря. На улицах города глубина местами достигала 60–80 см (рис. 17).

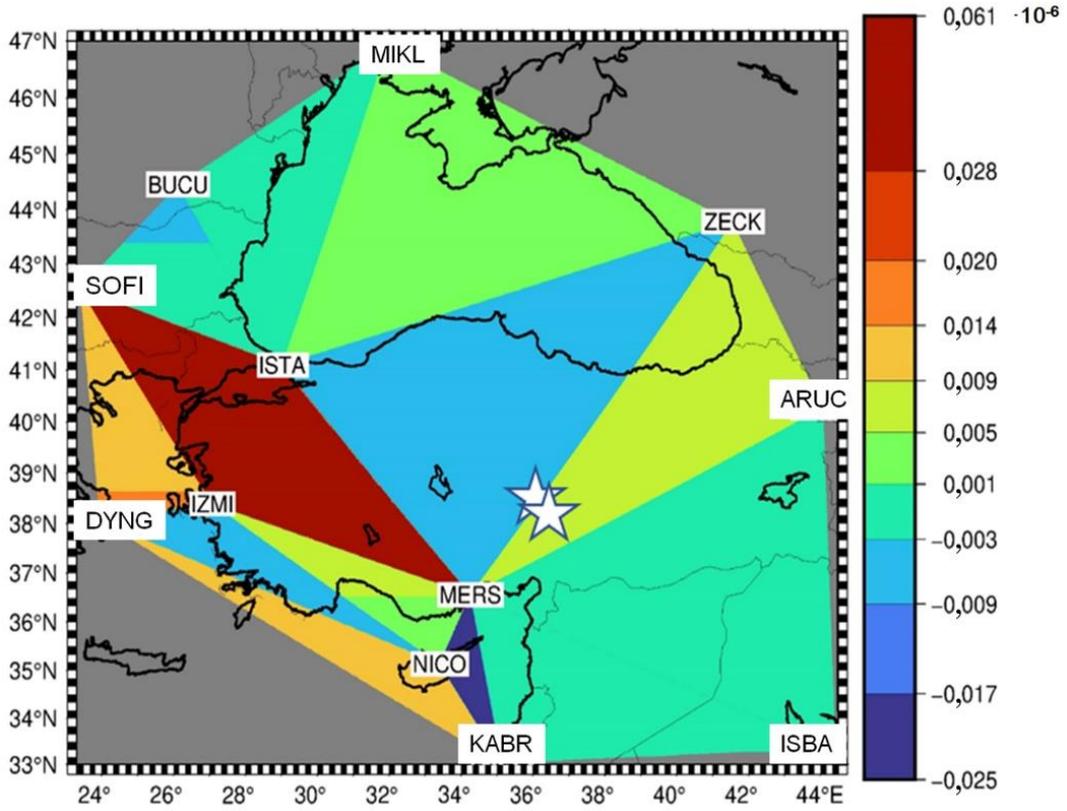


Рис. 15. Результаты определения скорости площадной деформаций 08.02.2023 г.

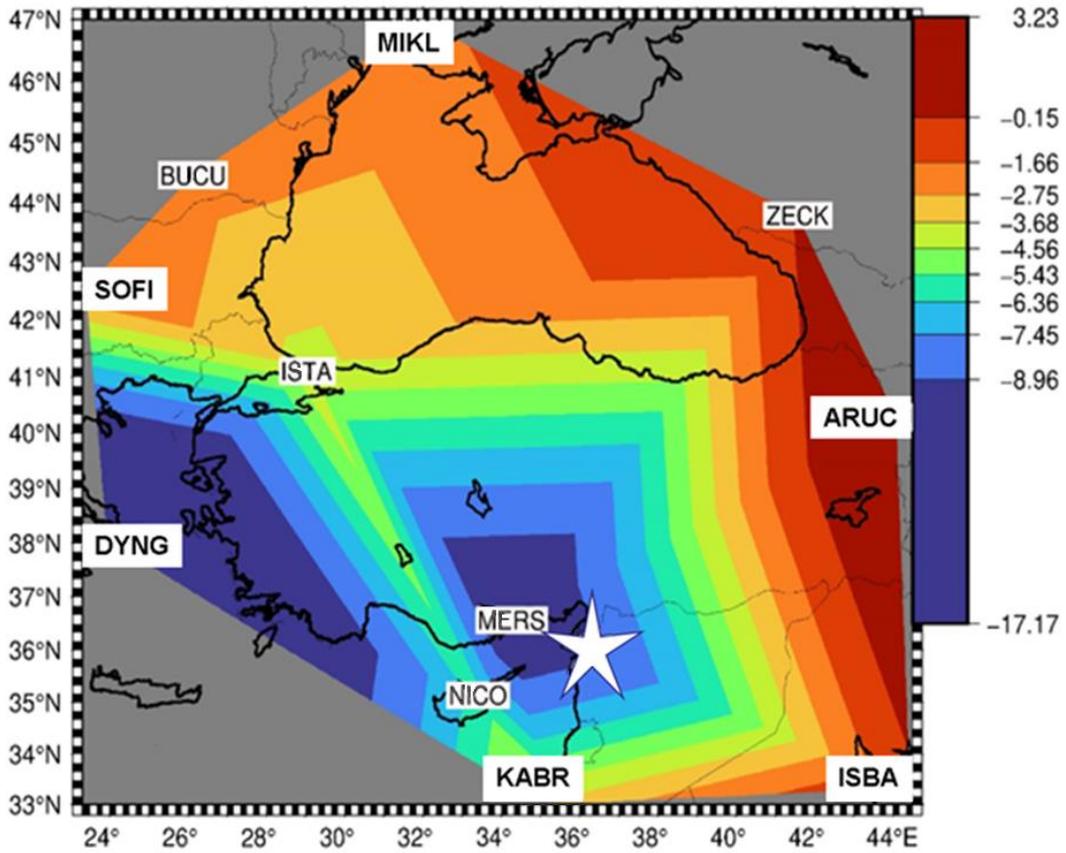


Рис. 16. Распределение скорости смещения на восток в мм по определениям 11 февраля 2023 г. Аномалия проявляется в районе городов Мерсина (MERS) и Искендеруна (положение отмечено звездочкой).



Рис. 17. Наводнение в г. Искендерун в марте 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение сильнейших землетрясений последних десятилетий – Суматра-Андаманского (26.12.2004 г., $M_w = 9.1$), Чилийского (27.02.2010 г., $M_w = 8.8$), Тохоку (11.03.2011 г., $M_w = 9.1$) показали, что инициированные такими сейсмическими событиями косейсмические смещения и деформации земной коры, могут охватывать огромные территории площадью в миллионы квадратных километров [Tregoning et al., 2013]. Одним из способов регистрации и изучения таких движений являются геодезические методы, которые позволяют определять их величины в режиме реального времени [Fratarcangeli et al., 2018] и с ошибками порядка нескольких миллиметров при ретроспективном анализе. Получаемая информация о косейсмических смещениях необходима для моделирования процессов в очагах землетрясений, а также при разработке и функционировании систем раннего предупреждения о них [Blewitt et al., 2009]. При изучении косейсмических явлений, появившихся в результате серии Турецких землетрясений в феврале 2023 г., использована вся доступная информация по смещениям земной поверхности. В работе проанализированы данные, полученные различными методами геодезии в эпицентральной области. Рассматриваются косейсмические эффекты в 300-километровой зоне, охватывающей значительную часть Восточно-Анатолийского разлома. Здесь зарегистрированы относительные смещения до 6 м, при среднем значении 4 м. Картина косейсмических смещений хорошо соответствует дислокационной теории землетрясений при сдвиге на субвертикальном разрыве, выходящем на поверхность. В дальней зоне по GPS-данным поле смещений было получено в рамках модели ITRF-2014 по сети из 27 пунктов IGS. Для наиболее близкой к очагу главного толчка 6 февраля 2023 г. станции MERS получены косейсмические смещения по трем направлениям, величиной до 20 мм, что соответствует сейсмологическим данным. Анализ данных за период 2017–2023 гг. показал затухание смещений за два года до сейсмической активизации 2023 г. В целом скорости косейсмических деформаций при величине сторон треугольников, используемых в триангуляции до нескольких сотен километров, достигают -10^{-8} , что на порядок выше фоновых значений 10^{-9} . В эпоху после сейсмической активизации анализ результатов позволяет выделить аномалию в скорости смещения пунктов к юго-западу от эпицентров за пределами сейсмического разрыва

(см. рис. 11 и 16). В этой области после землетрясения зарегистрировано опускание, а далее, в марте, наводнение (до 0.6–0.8 м). В целом, полученная картина смещений и деформаций отражает современный процесс на границах Анатолийского блока и тектонических плит: Африканской, Арабской и Евразийской.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Адушкин В.В., Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Тихонова А.В.** Серия катастрофических землетрясений в Турции 06.02.2023 г. и возмущение геофизических полей // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510, № 2. С. 227–232. doi:10.31857/S2686739723600327.
- Михайлов В.О., Бабаянц И.П., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Смирнов В.Б., Тихоцкий С.А.** Землетрясения в Турции 06.02.2023: модель поверхности разрыва по данным спутниковой радарной интерферометрии // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023а. Т. 511, № 1. С. 71–77. doi:10.31857/S2686739723600625.
- Михайлов В.О., Бабаянц И.П., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Смирнов В.Б., Тихоцкий С.А.** Реконструкция косейсмических и постсейсмических процессов для землетрясения в Турции 06.02.2023 г. по данным радарной спутниковой интерферометрии // Физика Земли. 2023б. № 6. С. 77–88. doi:10.31857/S000233372306011X.
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В.** Современные движения земной поверхности Горного Алтая по GPS-наблюдениям // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10, № 1. С. 123–146. doi:10.5800/GT-2019-10-1-0407.
- Челик Х., Трихунков Я.И., Соколов С.А., Трифонов В.Г., Зеленин Е.А., Каргиноглу Ю., Юшин К.И., Ломов В.С., Бачманов Д.М.** Тектонические аспекты Восточно-Анатолийского землетрясения 06.02.2023 г. в Турции // Физика Земли. 2023. № 6. С. 5–23. doi:10.31857/S0002333723060054.
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X.** ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2016. Vol. 121 (8). P. 6109–6131. doi:10.1002/2016JB013098.
- Altamimi Z., Métivier L., Rebischung P., Rouby H., Collilieux X.** ITRF2014 plate motion model // Geophysical Journal International. 2017. Vol. 209 (3). P. 1906–1912. doi:10.1093/gji/ggx136.
- Atanasova M., Raykova P., Nikolov H.** Determining the deformations of the Earth's Surface after the earthquakes in Turkey–Syria of 06 February 2023 – Initial Results // Proceeding of the Bulgarian Academy of Sciences. 2023. Vol. 76 (4). P. 554–562. doi:10.7546/CRABS.2023.04.07.
- Barbot S., Luo H., Wang T., Hamiel Y., Piatibratova O., Javed M.T., Braitenberg C., Gurbuz G.** Slip distribution of the February 6, 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone // Seismica. 2023. Vol. 2 (3). doi:10.26443/seismica.v2i3.502.
- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C., Plag H-P., Stein S., Okal E.** GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems // Journal of Geodesy. 2009. Vol. 83. P. 335–343. doi:10.1007/s00190-008-0262-5.
- Eppelbaum L.V., Katz Y.I., Ben-Avraham Z.** Why did such giant stress accumulate on the joining of four tectonic plates in eastern Turkey? // A Review. Preprints. 2023. doi:10.20944/preprints202308.1252.v1.
- Fernandes R.M.S., Ambrosius B.A.C., Noomen R., Bastos L., Wortel M.J.R., Spakman W., Govers R.** The relative motion between Africa and Eurasia as derived from ITRF2000 and GPS data // Geophysical Research Letters. 2003. Vol. 30 (16). 1828. doi:10.1029/2003GL017089.

- Fratarcangeli F., Savastano G., D'Achille M.C., Mazzoni A., Crespi M., Riguzzi F., Devoti R., Pietrantonio G.** VADASE reliability and accuracy of real-time displacement estimation: application to the Central Italy 2016 earthquakes // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10 (8). 1201. doi:10.3390/rs10081201.
- Herring T.A., King R.W., McClusky S.C.** Introduction to GAMIT/GLOBK. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2010.
- Holzer T.L., Barka A.A., Carver D., Çelebi M., Cranswick E., Dawson T., Dieterich J.H., Ellsworth W.L., Fumal T., Gross W.L., Langridge R., Lettis W.R., Meremonte M., Mueller C., Olsen R.S., Ozel O., Parsons T., Phan L.T., Rockwell T., Safak E., Stein R.S., Stenner H., Toda S., Toprak S.** Implications for earthquake risk reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999. U.S. Geological Survey. Circular 1193. Denver, 2000. <https://pubs.usgs.gov/circ/2000/1193/report.pdf>.
- Li S., Wang X., Tao T., Zhu Y., Qu X., Li Z., Huang J., Song S.** Source model of the 2023 Turkey earthquake sequence imaged by Sentinel-1 and GPS measurements: implications for heterogeneous fault behavior along the East Anatolian Fault Zone // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. 2618. doi:10.3390/rs15102618.
- Över S., Demirci A., Özden S.** Tectonic implications of the February 2023 earthquakes (Mw 7.7, 7.6, and 6.3) in south-eastern Türkiye // *Tectonophysics*. 2023. Vol. 866. 230058. doi:10.1016/j.tecto.2023.230058.
- Teza G., Pesci A., Galgaro A.** Grid_strain and grid_strain3: software packages for strain field computation in 2D and 3D environment // *Computers & Geosciences*. 2008. Vol. 34 (9). P. 1142–1153. doi:10.1016/j.cageo.2007.07.006.
- Tregoning P., Burgette R., McClusky S.C., Lejeune S., Watson C.S., McQueen H.** A decade of horizontal deformation from great earthquakes // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. Vol. 118. P. 2371–2381. doi:10.1002/jgrb.50154.
- Turcotte D.L., Schubert G.** Geodynamics: application of continuum physics to geological problems. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- Utkucu M., Durmuş H., Uzunca F., Nalbant S.** A preliminary report on the 2023 Gaziantep (Mw= 7.7) and Elbistan (Mw= 7.5) earthquakes in southeast Türkiye. Sakarya University, Sakarya, 2023. doi:10.13140/RG.2.2.17088.40963.
- Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H., Tian D.** The generic mapping tools, version 6 // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019. Vol. 20 (11). P. 5556–5564. doi:10.1029/2019GC008515.
- Zhao J.-J., Chen Q., Yang Y.-H., Xu Q.** Coseismic faulting model and post-seismic surface motion of the 2023 Turkey–Syria earthquake doublet revealed by InSAR and GPS measurements // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15 (13). 3327. doi:10.3390/rs15133327.

REFERENCES

- Adushkin V.V., Spivak A.A., Rybnov Yu.S., Tikhonova A.V.** The series of catastrophic earthquakes of February 6, 2023, in Turkey and variations in the geophysical fields // *Doklady Earth Sciences*. 2023. Vol. 510 (2). P. 481–486. doi:10.1134/S1028334X23600287.
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X.** ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2016. Vol. 121 (8). P. 6109–6131. doi:10.1002/2016JB013098.

- Altamimi Z., Métivier L., Rebischung P., Rouby H., Collilieux X.** ITRF2014 plate motion model // *Geophysical Journal International*. 2017. Vol. 209 (3). P. 1906–1912. doi:10.1093/gji/ggx136.
- Atanasova M., Raykova P., Nikolov H.** Determining the deformations of the Earth's Surface after the earthquakes in Turkey–Syria of 06 February 2023 – Initial Results // *Proceeding of the Bulgarian Academy of Sciences*. 2023. Vol. 76 (4). P. 554–562. doi:10.7546/CRABS.2023.04.07.
- Barbot S., Luo H., Wang T., Hamiel Y., Piatibratova O., Javed M.T., Braitenberg C., Gurbuz G.** Slip distribution of the February 6, 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone // *Seismica*. 2023. Vol. 2 (3). doi:10.26443/seismica.v2i3.502.
- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C., Plag H-P., Stein S., Okal E.** GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems // *Journal of Geodesy*. 2009. Vol. 83. P. 335–343. doi:10.1007/s00190-008-0262-5.
- Eppelbaum L.V., Katz Y.I., Ben-Avraham Z.** Why did such giant stress accumulate on the joining of four tectonic plates in eastern Turkey? // *A Review. Preprints*. 2023. doi:10.20944/preprints202308.1252.v1.
- Fernandes R.M.S., Ambrosius B.A.C., Noomen R., Bastos L., Wortel M.J.R., Spakman W., Govers R.** The relative motion between Africa and Eurasia as derived from ITRF2000 and GPS data // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30 (16). 1828. doi:10.1029/2003GL017089.
- Fratarcangeli F., Savastano G., D'Achille M.C., Mazzoni A., Crespi M., Riguzzi F., Devoti R., Pietrantonio G.** VADASE reliability and accuracy of real-time displacement estimation: application to the Central Italy 2016 earthquakes // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10 (8). 1201. doi:10.3390/rs10081201.
- Çelik H., Trikhunkov Y.I., Sokolov S.A., Trifonov V.G., Zelenin E.A., Kargınoğlu Y., Yushin K.I., Lomov V.S., Bachmanov D.M.** Tectonic aspects of the East Anatolian 06.02.2023 earthquake in Türkiye // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2023. Vol. 59 (6). P. 822–838. doi:10.1134/S1069351323060058.
- Herring T.A., King R.W., McClusky S.C.** *Introduction to GAMIT/GLOBK*. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2010.
- Holzer T.L., Barka A.A., Carver D., Çelebi M., Cranswick E., Dawson T., Dieterich J.H., Ellsworth W.L., Fumal T., Gross W.L., Langridge R., Lettis W.R., Meremonte M., Mueller C., Olsen R.S., Ozel O., Parsons T., Phan L.T., Rockwell T., Safak E., Stein R.S., Stenner H., Toda S., Toprak S.** Implications for earthquake risk reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999. U.S. Geological Survey. Circular 1193. Denver, 2000. <https://pubs.usgs.gov/circ/2000/1193/report.pdf>.
- Li S., Wang X., Tao T., Zhu Y., Qu X., Li Z., Huang J., Song S.** Source model of the 2023 Turkey earthquake sequence imaged by Sentinel-1 and GPS measurements: implications for heterogeneous fault behavior along the East Anatolian Fault Zone // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. 2618. doi:10.3390/rs15102618.
- Mikhailov V.O., Babayantz I.P., Volkova M.S., Timoshkina E.P., Smirnov V.B., Tikhotskiy S.A.** The February 6, 2023, earthquakes in Turkey: a model of the rupture surface based on satellite radar interferometry // *Doklady Earth Sciences*. 2023a. Vol. 511. P. 571–577. doi:10.1134/S1028334X23600627.
- Mikhailov V.O., Babayantz I.P., Volkova M.S., Timoshkina E.P., Smirnov V.B., Tikhotskiy S.A.** Reconstruction of co-seismic and post-seismic processes for the February 6, 2023 Earthquake in Turkey from data of satellite SAR interferometry // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2023b. Vol. 6. P. 888–898. doi:10.1134/S1069351323060113.

- Över S., Demirci A., Özden S.** Tectonic implications of the February 2023 earthquakes (Mw 7.7, 7.6, and 6.3) in south-eastern Türkiye // *Tectonophysics*. 2023. Vol. 866. 230058. doi:10.1016/j.tecto.2023.230058.
- Teza G., Pesci A., Galgaro A.** Grid_strain and grid_strain3: software packages for strain field computation in 2D and 3D environment // *Computers & Geosciences*. 2008. Vol. 34 (9). P. 1142–1153. doi:10.1016/j.cageo.2007.07.006.
- Timofeev V.Yu., Ardyukov D.T., Timofeev A.V., Boiko E.V.** Modern movements of the crust surface in Gorny Altai from GPS data of earth surface of Gorny Altai by GPS data // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2019. Vol. 10 (1). P. 123–146. (in Russ.). doi:10.5800/GT-2019-10-1-0407.
- Tregoning P., Burgette R., McClusky S.C., Lejeune S., Watson C.S., McQueen H.** A decade of horizontal deformation from great earthquakes // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. Vol. 118. P. 2371–2381. doi:10.1002/jgrb.50154.
- Turcotte D.L., Schubert G.** *Geodynamics: application of continuum physics to geological problems*. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- Utkucu M., Durmuş H., Uzunca F., Nalbant S.** A preliminary report on the 2023 Gaziantep (Mw= 7.7) and Elbistan (Mw= 7.5) earthquakes in southeast Türkiye. Sakarya University, Sakarya, 2023. doi:10.13140/RG.2.2.17088.40963.
- Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H., Tian D.** The generic mapping tools, version 6 // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019. Vol. 20 (11). P. 5556–5564. doi:10.1029/2019GC008515.
- Zhao J.-J., Chen Q., Yang Y.-H., Xu Q.** Coseismic faulting model and post-seismic surface motion of the 2023 Turkey–Syria earthquake doublet revealed by InSAR and GPS measurements // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15 (13). 3327. doi:10.3390/rs15133327.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ТИМОФЕЕВ Владимир Юрьевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: гравиметрия, вариации силы тяжести, приливные деформации Земли, современные движения земной коры, тектоника плит, космическая геодезия, моделирование современных геодинамических процессов.

АРДЮКОВ Дмитрий Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: современные движения земной коры, тектоника плит, космическая геодезия, технология обработки геодезических данных, моделирование современных геодинамических процессов.

ТИМОФЕЕВ Антон Владимирович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: современные движения земной коры, тектоника плит, космическая геодезия, моделирование современных геодинамических процессов, неприливные вариации силы тяжести.

*Статья поступила в редакцию 17 августа 2023 г.,
одобрена после рецензирования 13 июня 2024 г.,
принята к публикации 21 июня 2024 г.*