МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Гоманюк Юлия Александровна**

# Технологии вариационного лучевого трассирования в двумерных и трехмерных средах

Специальность 1.6.9. Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

**Научный руководитель** ***Степанов Павел Юрьевич***
*кандидат физико-математических наук*

**Официальные оппоненты:** ***Тихоцкий Сергей Андреевич***
*доктор физико-математических наук, академик РАН, Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта Российской академии наук, директор*

***Гогоненков Георгий Николаевич***
*доктор технических наук, Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт, отдел комплексной интерпретации геолого-геофизических данных, главный научный сотрудник*

***Шумилов Александр Владимирович***
*доктор технических наук, Пермнефтегеофизика, директор по обеспечению производства*

Защита диссертации состоится 23 декабря 2026г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, аудитория 308.
E-mail: kuznetsovkm@my.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: https://dissovet.msu.ru/dissertation/4170

Автореферат разослан «___» ноября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.016.6
кандидат технических наук К.М. Кузнецов

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы исследования

Благодаря своей относительной простоте, понятности процессов расчета и математической базы, наглядности получаемых результатов, а также высокой точности лучевое трассирование в настоящее время является одним из основных подходов к решению прямых и обратных кинематических задач сейсморазведки. Несомненно, волновые методы позволяют получать существенно больше информации из сейсмических данных по сравнению с методами, основанными на расчете лучевых полей, волновых фронтов и времен пробега сейсмических волн. Тем не менее волновые методы имеют ряд серьезных ограничений, вследствие чего они не в состоянии полностью заменить лучевые технологии, совершенствование которых остается востребованной и актуальной задачей современной сейсморазведки (Тихоцкий и др., 2011). Помимо высокой вычислительной стоимости, инверсия волновых форм сопряжена с принципиальными трудностями, поскольку ее результат существенно определяется выбором начальной модели среды, для построения которой широко используют различные лучевые технологии (Pratt, 1999). Поэтому развитие методов и алгоритмов лучевого трассирования по сей день является актуальной задачей, над которой активно работают научные коллективы всего мира (Cerveny, Psencik, 2010; Xu et al, 2010; Протасов, Осипов, 2014; Yang et al, 2017; Шилов и др., 2021).

## Степень разработанности

Тематика лучевого трассирования достаточно широко освещена в отечественной и зарубежной научной литературе, что свидетельствует о высокой степени разработанности вопроса. Ежегодно публикуются результаты многочисленных исследований, посвященных различным аспектам применения лучевых методов при изучении геологических объектов (Tikhotsky, Achauer, 2008; Vermeesch et al., 2009; Evain et al., 2010; Тихоцкий и др., 2011; Yarman et at,

2013; Sripanich, Fomel, 2014; Xu et al, 2014; Чеботарева, 2017; Yang et al, 2017; Аниконов и др., 2018; Taygur, Eibert, 2020; Шилов и др., 2021).

Огромный вклад в развитие методов решения кинематических задач сейсморазведки в области лучевого трассирования внес профессор Пражского университета В.Червеней (Cerveny, 1985; Cerveny, 1990; Cerveny, Soares, 1992; Cerveny, 2001; Cerveny, Psencik, 2010). В трудах В.Червенея, а также во множестве других классических работ (Гольдин, 2003; Gjoystdal и др., 2002; Rawlinson и др., 2007; Taygur, Eibert, 2020) рассматриваются достоинства, недостатки и особенности методов лучевого трассирования в различных средах, математические основы лучевых алгоритмов, вопросы расчета времен пробега лучей и построения волновых фронтов на основании методов лучевого трассирования.

**Цель** диссертационной работы заключается в разработке технологий решения прямой и обратной кинематических задач двумерной и трехмерной сейсморазведки для разных типов волн способом лучевого трассирования с использованием вариационной теории сейсморазведки неоднородных сред и частотно-зависимых алгоритмов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи** диссертационного исследования**:**

- Рассмотреть и классифицировать современные методы решения кинематических задач сейсморазведки способами лучевого трассирования.
- Изучить и определить наиболее эффективные технологии частотно-зависимого лучевого трассирования.
- Разработать вариационные технологии частотно-зависимого лучевого трассирования в средах с сильной скоростной неоднородностью для исследования особенностей кинематики сейсмических волн разных типов в двумерных и трехмерных средах.
- Исследовать разработанные технологии лучевого трассирования и опробовать их на теоретических моделях двумерных и трехмерных сред разных типов.

- Применить разработанные вариационные технологии лучевого трассирования для исследования ограничений и области применимости метода решения обратной задачи МПВ, известного как метод однородных функций.
- Разработать 2D и 3D алгоритмы глубинной кинематической миграции с применением частотно-зависимой технологии лучевого трассирования для сред с контрастными нерегулярными границами и сильной скоростной неоднородностью в слоях.
- Исследовать эффективность восстановления отражающих границ сложной формы различными алгоритмами кинематической миграции на двумерных и трехмерных теоретических моделях и реальном полевом материале.

**Объектом исследования** настоящей работы являются вариационные асимптотические и частотно-зависимые алгоритмы трассирования лучей в двумерных и трехмерных средах, а также геологическое строение выбранных для изучения участков в Центрально-Европейской части России и Северном Прикаспии.

**Фактический материал и методы исследования**

В рамках написания диссертации были использованы материалы, предоставленные кафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ, в составе которых полевые годографы первых вступлений и восстановленные методом однородных функций скоростные разрезы по сейсмическим профилям МПВ; карты изохрон и структурные карты по основным отражающим горизонтам по одному из месторождений в Северо-Каспийском регионе, глубинно-скоростная модель, стратиграфические отбивки.

**Научная новизна работы**

- Разработана и реализована технология решения прямой кинематической задачи в сеточных моделях, основанная на вариационном частотно-зависимом лучевом трассировании в средах с сильной скоростной неоднородностью.

- Впервые выполнено исследование пределов применимости и корректности расчета кинематики сейсмических волн с использованием разработанной частотно-зависимой технологии лучевого трассирования в сложнопостроенных средах с высокоскоростными включениями и с контрастными нерегулярными границами.
- Впервые выполнено исследование возможностей и ограничений метода однородных функций решения обратной кинематической задачи с помощью разработанной вариационной технологии лучевого трассирования.
- Установлено, что метод однородных функций при работе с реальными полевыми данными, полученными в сложных сейсмогеологических условиях, способен корректно восстанавливать скоростное строение разреза до уровня, не превышающего половину от максимальной глубины проникновения лучей.
- Впервые определены и обоснованы пределы применимости и ограничения технологии частотно-зависимого лучевого трассирования, основанной на локальном осреднении нерегулярных границ.
- Впервые обоснована возможность применения квадратичной аппроксимации в технологии частотно-зависимого лучевого трассирования через нерегулярные границы.
- Разработаны и реализованы 2D и 3D технологии глубинной кинематической миграции с применением частотно-зависимого лучевого трассирования для сред с контрастными нерегулярными границами.
- Впервые проведено исследование эффективности восстановления отражающих границ сложной формы при наличии разрывов, петель и ветвей возврата на временных изображениях различными алгоритмами кинематической миграции на теоретических моделях и реальном полевом материале.

**Теоретическая и практическая значимость**

Проведенный комплексный сравнительный анализ стандартных и частотно-зависимых алгоритмов лучевого трассирования позволяет более оптимально подходить к выбору метода решения прямых кинематических задач

сейсморазведки в 2D и 3D средах разных типов, а также определяет условия применимости каждого метода.

Разработанные технологии лучевого трассирования в сеточных моделях могут быть применены для контроля точности решения обратных кинематических задач в сложнопостроенных средах, а также для коррекции методики и геометрии полевого эксперимента (Гоманюк и др., 2024).

Разработанные технологии глубинной кинематической миграции могут быть применены для решения структурных задач МОГТ в 2D или 3D слоистых средах с контрастными границами сложной формы, с переменными пластовыми скоростями при любой схеме полевых наблюдений (Гоманюк, Степанов, 2024).

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре Сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ.

**Защищаемые положения:**

- Разработанная технология частотно-зависимого лучевого трассирования, основанная на локальном осреднении скоростного поля на базе 1-ой зоны Френеля, позволяет исследовать особенности кинематики сейсмических волн разных типов, контролировать точность решения обратных кинематических задач и обеспечивает преимущество при решении прямых кинематических задач в средах с сильной скоростной неоднородностью по сравнению со стандартным асимптотическим вариационным алгоритмом и частотно-зависимым алгоритмом Ломакса.
- Разработанная технология частотно-зависимого лучевого трассирования, основанная на локальном сглаживании границ, позволяет прослеживать сейсмические лучи через контрастные нерегулярные границы при горизонтальных размерах неоднородностей на границе, сравнимых с диаметром 1-ой зоны Френеля.
- Разработанные технологии глубинной кинематической миграции на основе частотно-зависимого лучевого трассирования позволяют восстанавливать контрастные отражающие границы сложной формы при наличии разрывов, петель и ветвей возврата на временных изображениях.

**Апробация работы и степень достоверности**

Основные тезисы и результаты диссертационной работы были представлены на 4-й всероссийской научно-практической конференции «Инженерная сейсморазведка и сейсмология 2022», Москва, 2022; на 6-й всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы нефти и газа», Москва, 2023; на международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2024», Москва, 2024; на 66-й всероссийской научной конференция МФТИ, 2024; на международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2025», Москва, 2025.

**Публикации**

Основные идеи и положения диссертации опубликованы в 6 статьях автора, все в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

**Личный вклад автора**

Все описанные в диссертации алгоритмы лучевого трассирования были самостоятельно разработаны автором. Автор лично осуществлял все этапы численного моделирования и интерпретации сейсмических данных.

Автор внес определяющий вклад в работу по подготовке к публикации (совместно с соавторами) результатов, полученных в рамках выполнения диссертационного исследования. Автор принимал самое активное участие в постановке научных задач и планировании численных экспериментов, создании математической основы применяемых алгоритмов, анализе и описании результатов выполненных исследований. Основной объем работы над текстом статей, включая их предоставление в редакции журналов, был проделан автором самостоятельно.

**Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Содержание работы изложено на 252 страницах, включая 2 таблицы, 106 рисунков. Список используемой литературы включает 220 наименований.

**Благодарности**

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю доценту Степанову Павлу Юрьевичу за постоянную помощь, ценные наставления и поддержку на всех этапах выполнения работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено содержание работы, обоснована актуальность темы и сформулированы задачи, стоявшие перед автором в ходе исследования. Основная идея диссертации заключается в разработке технологий лучевого трассирования с использованием вариационной теории сейсморазведки неоднородных сред и частотно-зависимых алгоритмов.

### Глава 1. Обзор методов лучевого трассирования при решении кинематических задач сейсморазведки

В данной главе рассматриваются преимущества, ограничения, классификация и области применения лучевых методов (Dehghan et al, 2007; Pham et al., 2008; Cerveny, Psencik, 2010; Galaktionova, Belenosov, 2015). Отдельно рассмотрены вопросы, связанные с частотно-зависимыми технологиями лучевого трассирования (Bube, Washbourne, 2008; Протасов, Осипов, 2014; Гадыльшин, Протасов, 2015; Неклюдов, Протасов, 2022), а также с применением лучевых алгоритмов при решении обратных кинематических задач сейсморазведки (Wang et al., 2008; Ben-Brahim et al., 2009; Sherwood et.al., 2009; Evain et al, 2010).

### Глава 2. Вариационная теория лучевого трассирования

В данной главе с помощью методов вариационного исчисления с единых позиций рассмотрены кинематические задачи лучевого трассирования в двумерных и трехмерных средах. На основе вариационного подхода введены системы дифференциальных уравнений лучей для этих сред, а задача расчёта пространственных лучей и времён пробега вдоль них сформулирована и решена

как задача Коши для полученных систем дифференциальных уравнений первого порядка для двумерных и трехмерных сред (Ермаков, Степанов, 2018).

## Глава 3. Технологии вариационного лучевого трассирования при решении прямых кинематических задач сейсморазведки

В главе рассматриваются две вариационные технологии лучевого трассирования, основанные на решении систем дифференциальных уравнений первого порядка, описывающих траекторию сейсмического луча: стандартная вариационная технология, использующая высокочастотную аппроксимацию процессов распространения сигнала, и частотно-зависимая технология, основанная на локальном сглаживании скоростного поля в пределах первой зоны Френеля, учитывающая эффекты, вызванные тем обстоятельством, что реальные сейсмические сигналы являются широкополосными и имеют ограниченный спектр частот.

**Стандартная вариационная технология лучевого трассирования**, которую еще часто называют «классической лучевой трассировкой», поставлена и решена как задача Коши для системы дифференциальных уравнений первого порядка (Степанов, Гоманюк, 2022). Для прослеживания лучей в неоднородной среде необходимо определить начальные условия для всех неизвестных функций в соответствующей системе, затем найти решение задачи Коши с использованием различных методов вычислительной математики таких, как, например, методы Рунге-Кутта или Эйлера и определить из этого лучевые траектории в каждой точке среды (Гоманюк, Степанов, 2024).

**Технология частотно-зависимого лучевого трассирования в средах с сильной скоростной неоднородностью.** В основе предлагаемой в работе технологии частотно-зависимого лучевого трассирования в средах с сильной скоростной неоднородностью лежит подход, при котором скоростная модель усредняется в плоскости, перпендикулярной к лучу, с использованием гауссовой весовой функции. Предлагается модифицировать лучевые уравнения таким образом, чтобы луч «определял» скорость не в точке, а в её окрестности как

взвешенное среднее по апертуре поперёк своего направления. Наиболее принципиальным моментом предлагаемой технологии, определяющим кривизну и направление сейсмического луча, а в конечном итоге и всю структуру лучевого поля, является применение в качестве апертуры для локального сглаживания скоростного поля параметра, равного размеру первой зоны Френеля. Показано, что выбор апертуры, равной размеру первой зоны Френеля, имеет значительные преимущества, по сравнению с используемой в (Lomax, 1994; Неклюдов, Протасов, 2021) апертурой, равной длине сейсмической волны.

**Исследование частотно-зависимой технологии лучевого трассирования на теоретических моделях сред с сильной скоростной неоднородностью**. Акцент сделан на работе со средами, содержащими сильные скоростные неоднородности в виде контрастных включений (например, интрузии или соляные тела) или контрастных нерегулярных границ, характеризующихся существенным скачком скоростей сейсмических волн.

Проведено сравнение результатов, полученных для сложных моделей сред с использованием стандартного и частотно-зависимого алгоритмов лучевого трассирования, и сделаны выводы о применимости данных алгоритмов для решения прямой кинематической задачи в средах различной сложности.

Для контроля правильности решения прямой кинематической задачи различными лучевыми методами был реализован подход, основанный на сравнении результатов лучевого и конечно-разностного моделирования волнового поля для рассматриваемых моделей сред. Совпадение результатов лучевого и конечно-разностного моделирования позволило сделать выводы о корректности лучевых расчетов, поскольку в отличие от лучевой трассировки, конечно-разностное моделирование решает волновое уравнение напрямую — без приближений геометрической сейсмики.

На рисунке 1 представлены результаты решения прямой кинематической задачи классическим и частотно-зависимым лучевыми алгоритмами для модели с соляным телом. Как можно видеть, поле классических лучей нерегулярно (рис. 1а). Обращают на себя внимание зоны пересечения лучевых траекторий, а также

области с малой плотностью лучевого поля, вследствие чего появляются интервалы, куда лучи вообще не приходят. Последнее обстоятельство входит в явное противоречие с реальным физическим процессом распространения волн.

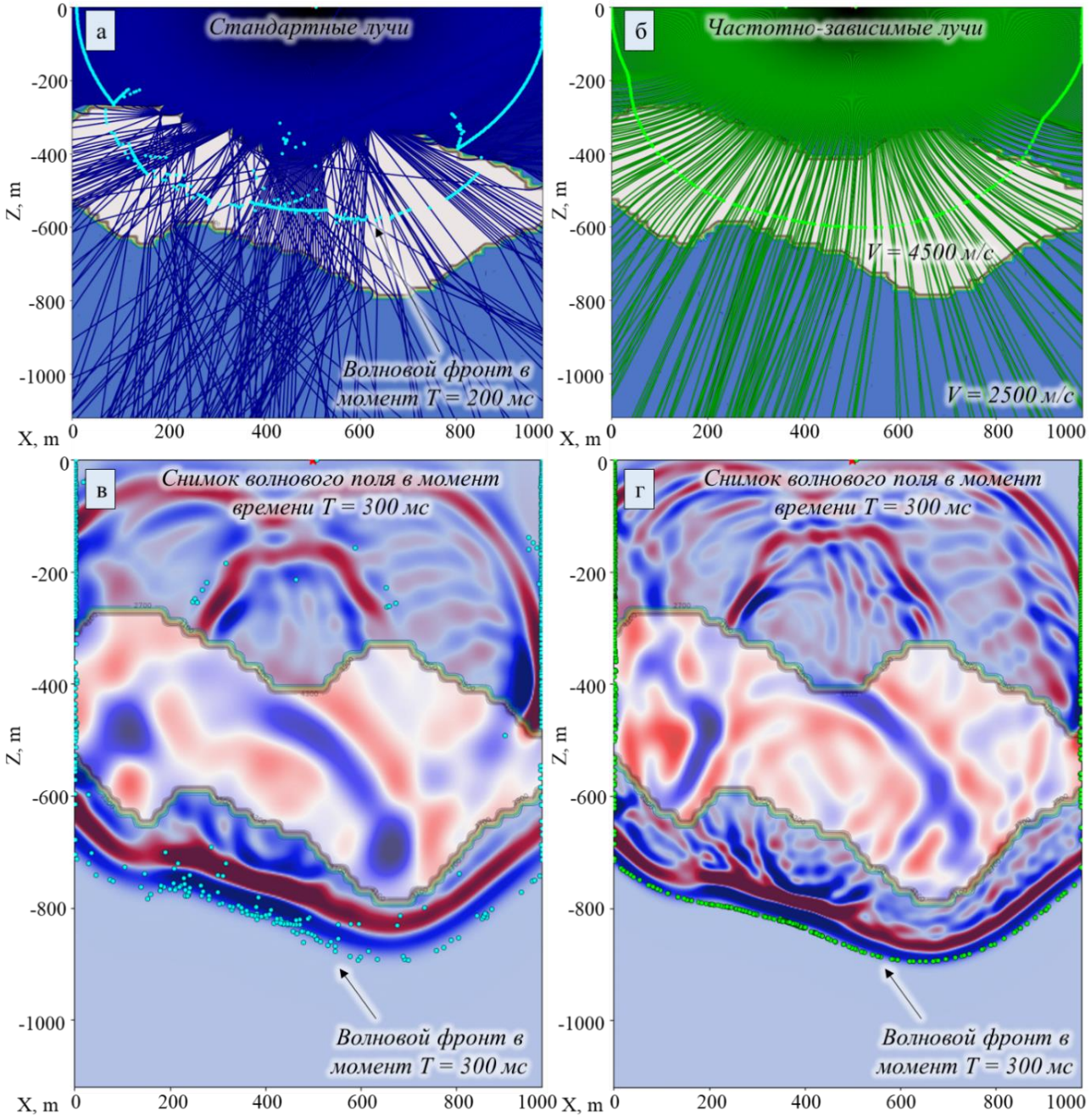



*Рисунок 1 – Результаты расчетов для модели с соляным телом: а) стандартные сейсмические лучи; б) частотно-зависимые сейсмические лучи (частота 30 Гц); в) снимок волнового поля и времена пробега, рассчитанные лучевым методом по стандартному алгоритму; г) снимок волнового поля и времена пробега, рассчитанные лучевым методом по частотно-зависимому алгоритму (осреднение по зоне Френеля)*

Для подтверждения «нефизичного» характера поведения лучевых полей и волновых фронтов, рассчитанных по стандартной технологии, было проведено конечно-разностное моделирование волнового поля для рассматриваемой модели среды. Как видим, результаты расчетов кинематики сейсмических волн лучевым методом по стандартной технологии не согласуются с данными волнового моделирования (рис. 1в).

На основании вышесказанного можно заключить, что стандартные технологии лучевого моделирования, использующие асимптотическое приближение, принципиально не подходят для решения кинематических задач в средах, содержащих высокоскоростные тела сложной формы.

На рисунке 1б представлено поле частотно-зависимых лучей, рассчитанных по разработанному алгоритму, в котором осреднение скоростного поля производится в пределах 1-ой зоны Френеля. Лучи равномерно покрывают всю область модели, отсутствуют зоны тени, и лучи, преломляясь на кровле и подошве соляного тела, не меняют направление своего распространения сразу на несколько десятков градусов. Рисунок 1г демонстрирует совпадение результатов частотно-зависимого лучевого и конечно-разностного моделирования для времени, когда волна уже прошла соляное тело и находится в подсолевой зоне (невязка времен первых вступлений не превосходит 5-7 мс). Таким образом независимая проверка подтверждает корректность расчета кинематики сейсмических волн с использованием разработанной частотно-зависимой технологии в средах с контрастными высокоскоростными включениями сложной формы.

Далее было рассмотрено трассирование сейсмических лучей через контрастные нерегулярные границы, часто встречающиеся при изучении геологических разрезов, осложненных интрузиями или соляными телами. Опыт реальных полевых исследований позволяет утверждать, что волновое поле при прохождении подобных границ становится более сложным, но при этом волновая картина не «рассыпается» полностью, чего можно было бы ожидать, основываясь на лучевом моделировании в асимптотическом приближении.

Отсюда возникает задача создания технологий лучевого трассирования, которые позволили бы с высокой точностью решать кинематические задачи в средах, содержащих подобные, непреодолимые для обычных лучей, границы.

Разработанный метод частотно-зависимого лучевого трассирования был применен для моделирования кинематики сейсмических волн в средах с контрастными границами различной формы, и результаты расчетов были проверены с помощью конечно-разностного моделирования волнового поля.

На рисунке 2 представлена модель с нерегулярной границей, представляющей собой синусоиду с амплитудой ±100 м.

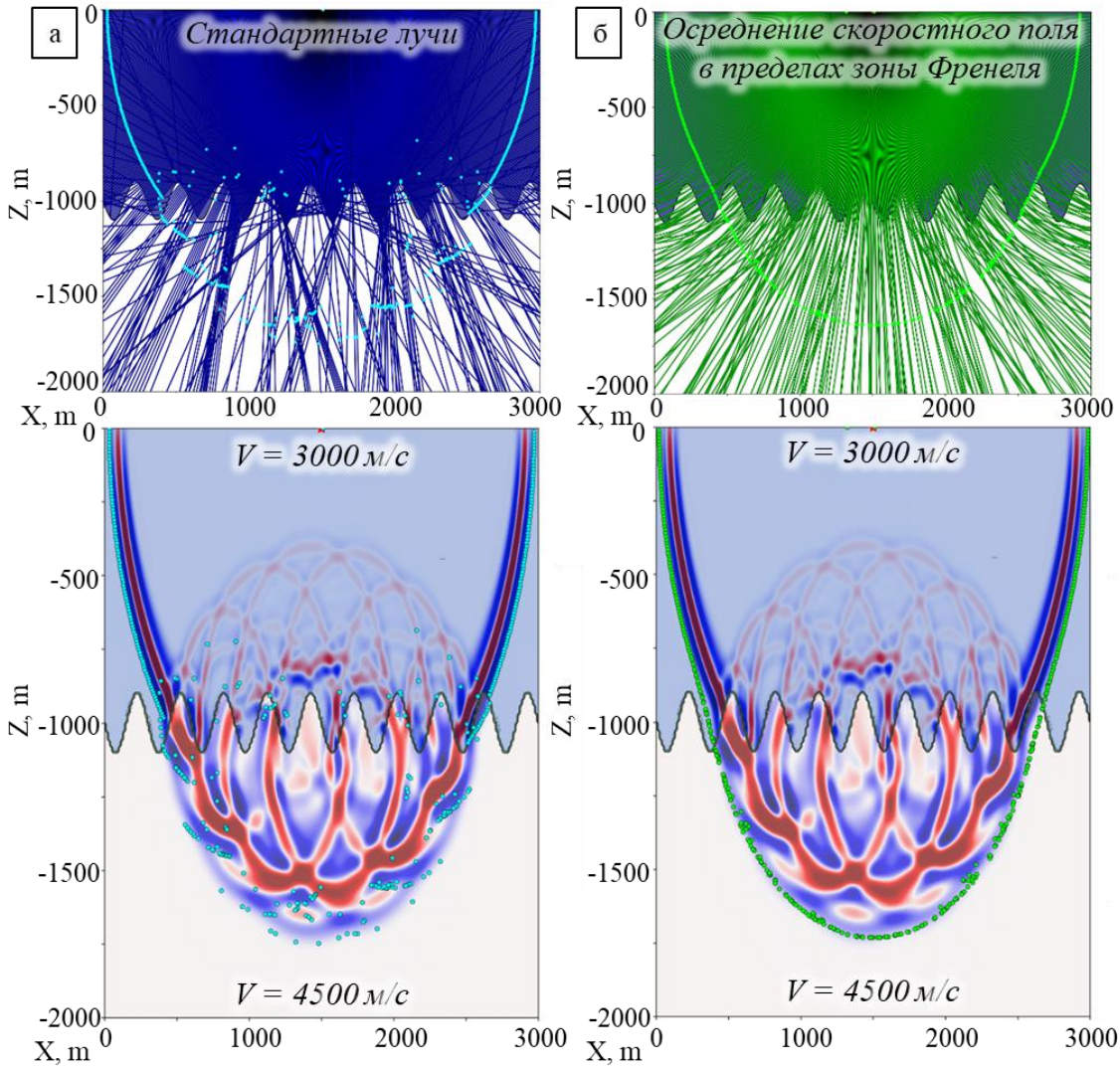



*Рисунок 2 – Сейсмические лучи и волновые фронты для модели с нерегулярной границей: а) стандартная технология; б) частотно-зависимая технология с осреднением скоростного поля на базе зоны Френеля. Внизу приведены снимки волнового поля с наложенными волновыми фронтами, рассчитанными различными лучевыми методами*

Ширина каждой структуры (один период синусоиды) составляет 300 м. Как видно, поле классических лучей в высокоскоростном слое ниже границы представляет собой хаотическую картину (рис. 2а), то есть геометрические параметры рассматриваемой модели делают стандартные лучевые технологии неприменимыми в этих условиях.

На рисунке 2б представлено лучевое поле частотно-зависимых лучей, рассчитанных для частоты 30 Гц. Лучевое поле здесь имеет регулярный характер: лучи равномерно покрывают всю область построения, волновой фронт гладкий и практически без особенностей. Результаты волнового моделирования для частоты 30 Гц (первые вступления) с высокой точностью совпадают с временами, полученными частотно-зависимым лучевым методом.

**Опробование вариационных технологий лучевого трассирования на реальных данных.** В дополнение к исследованиям на теоретических моделях возможности разработанных технологий лучевого трассирования были изучены на реальных полевых данных МПВ (рис. 3). Для решения вопроса, какая из технологий лучевого трассирования дает результаты, наиболее близкие к реальным полевым данным, а также к результатам конечно-разностного моделирования, были рассмотрены несколько профилей МПВ и скоростных разрезов, полученных для них с применением метода однородных функций (Ермаков и др., 2022; Гоманюк и др., 2023).

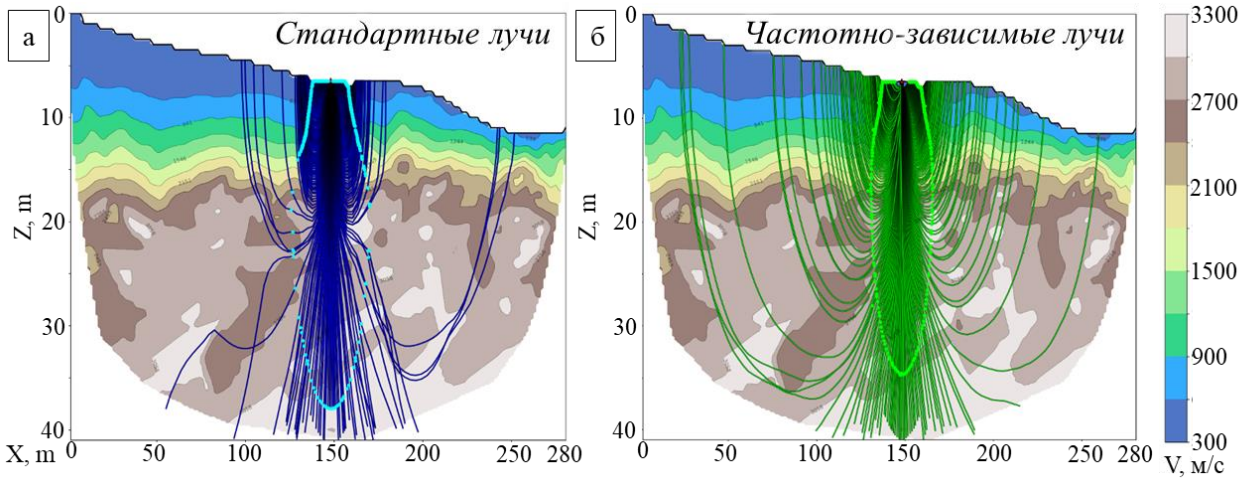



*Рисунок 3 – Опробование технологий лучевого трассирования на реальных данных: а) стандартные лучи и волновые фронты; б) частотно-зависимые лучи и волновые фронты*

Проведенное на реальных полевых данных сравнение наблюденных годографов первых вступлений с синтетическими, рассчитанными лучевыми алгоритмами, а также сопоставление результатов конечно-разностного и лучевого моделирования достаточно убедительно демонстрируют преимущество частотно-зависимых технологий лучевого трассирования по сравнению со стандартной асимптотической технологией.

Рассчитанные в асимптотическом приближении классические лучи «острее» реагируют на изменения скоростного поля, что не всегда соответствует реальному характеру распространения сейсмической волны (рис. 3а). Осреднение скоростного поля по апертуре, равной 1-ой зоне Френеля, обеспечивает гладкость лучевых траекторий и равномерное покрытие лучами всей области скоростной модели (рис. 3б). При этом результаты расчетов кинематики сейсмических волн по частотно-зависимой технологии в большей степени совпадают с результатами волнового моделирования по сравнению со стандартной асимптотической технологией, что в очередной раз подтверждает предположение о более «физичном» характере поведения частотно-зависимых лучей в неоднородных средах.

## Глава 4. Технологии вариационного лучевого трассирования при решении обратных кинематических задач сейсморазведки МОВ

В самых общих терминах под кинематической миграцией понимают задачу определения конфигурации отражающих границ по полю времен прихода отраженных волн. Часто понятие «кинематическая миграция» заменяют на «лучевая миграция», которая предполагает преобразование временных разрезов в глубинные посредством лучевого трассирования (Гоманюк, Степанов, 2024).

В работе предложены технологии преобразования времен в глубины, основанные на вариационной теории лучевого трассирования, использующие стандартный лучевой и частотно-зависимый подходы к процедуре прослеживания лучей в слоистых моделях сред. Данные технологии учитывают искривление сейсмических лучей в слоях, вызванное неоднородностью среды,

преломление лучей на промежуточных границах, а также наклон сейсмических границ (Степанов, Гоманюк, 2023; Степанов, Гоманюк, 2024).

**Глубинная кинематическая миграция с применением частотно-зависимой технологии лучевого трассирования в средах с контрастными нерегулярными границами и сильной скоростной неоднородностью в слоях.** В работе представлен метод кинематической миграции, реализованный для двумерных и трехмерных слоистых сред с использованием алгоритма частотно-зависимого лучевого трассирования через контрастные границы сложной формы. Алгоритм частотно-зависимого лучевого трассирования разработан на основе идеи сглаживания нерегулярной границы в пределах первой зоны Френеля с применением весового суммирования (рис. 4).

Предлагаемый метод состоит из двух основных частей или шагов. Первый шаг – это вариационное трассирование лучей вне границ по частотно-зависимой технологии, подробно рассмотренной в главе 3. Вторым (ключевым) шагом является вычисление лучей на границе.

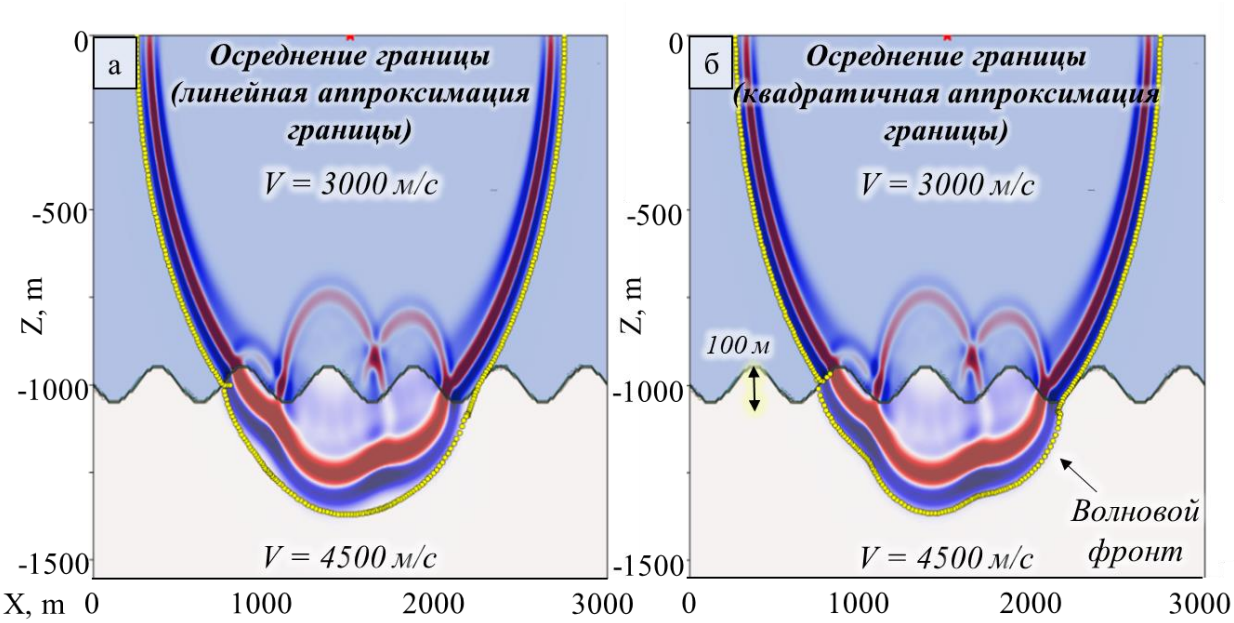



*Рисунок 4 – Тестирование частотно-зависимых лучевых алгоритмов на модели с нерегулярной границей: а) алгоритм с линейной аппроксимацией границы; б) алгоритм с квадратичной аппроксимацией границы; в) алгоритм с осреднением скоростного поля в пределах 1-ой зоны Френеля*

Принципиальным моментом предлагаемого метода является вопрос выбора степени сглаживающего полинома, который используется для осреднения отражающих и преломляющих границ в пределах первой зоны Френеля.

В работе подробно исследованы все аспекты аппроксимации сейсмических границ в пределах 1-ой зоны Френеля кривыми первого или второго порядков с позиции их влияния на результаты лучевого трассирования через контрастные нерегулярные границы, а также проведено сравнение результатов лучевого и конечно-разностного моделирования с целью определения пределов применимости линейной и квадратичной аппроксимаций при частотно-зависимом трассировании лучей через нерегулярные границы.

Эмпирическим путем было установлено, что:

- Технологии частотно-зависимого лучевого трассирования, основанные на локальном осреднении скоростного поля и на локальном сглаживании границы полиномом 1-ой степени, при прослеживании лучей через контрастные нерегулярные границы дают практически идентичные результаты.
- Алгоритм, использующий линейную аппроксимацию нерегулярной границы, обеспечивает результаты лучевого трассирования, подтверждающиеся конечно-разностным моделированием, при горизонтальных размерах неоднородностей на границе, превышающих два диаметра 1-ой зоны Френеля (рис 4а).
- Алгоритм, основанный на квадратичной аппроксимации нерегулярной границы, обеспечивает результаты лучевого трассирования, подтверждающиеся конечно-разностным моделированием, при горизонтальных размерах неоднородностей на границе, превышающих или сравнимых с диаметром 1-ой зоны Френеля (рис. 4б).

**Исследование возможностей и ограничений алгоритмов кинематической миграции на теоретических моделях.** Для исследования возможностей предложенного 2D алгоритма решения обратной кинематической

задачи были проведены расчеты на ряде теоретических моделей слоистых сред, приближенно описывающих реальные геологические ситуации. На основании полученных результатов были сделаны выводы об эффективности применения алгоритма кинематической миграции для восстановления геологических границ в моделях сред различной сложности (Степанов, Гоманюк, 2023; Степанов, Гоманюк, 2024; Гоманюк, Степанов, 2024).

На рисунке 5 представлена модель с высокоскоростным слоем и нерегулярными границами, соответствующими кровле и подошве этого пласта. Восстановление сразу двух контрастных нерегулярных границ представляет собой весьма сложную задачу, непосильную для большинства известных лучевых алгоритмов. На рисунке 5а представлены результаты решения прямой кинематической задачи, а на рисунке 5б – результаты работы частотно-зависимого алгоритма кинематической миграции, который позволил корректно восстановить не только кровлю и подошву соляного пласта, но и конфигурацию подсолевой границы.

Рассмотренная вариационная технология кинематической миграции была обобщена на трехмерные среды с гладкими границами и произвольно меняющимися пластовыми скоростями и также была успешно опробована на объемных теоретических моделях слоистых сред.

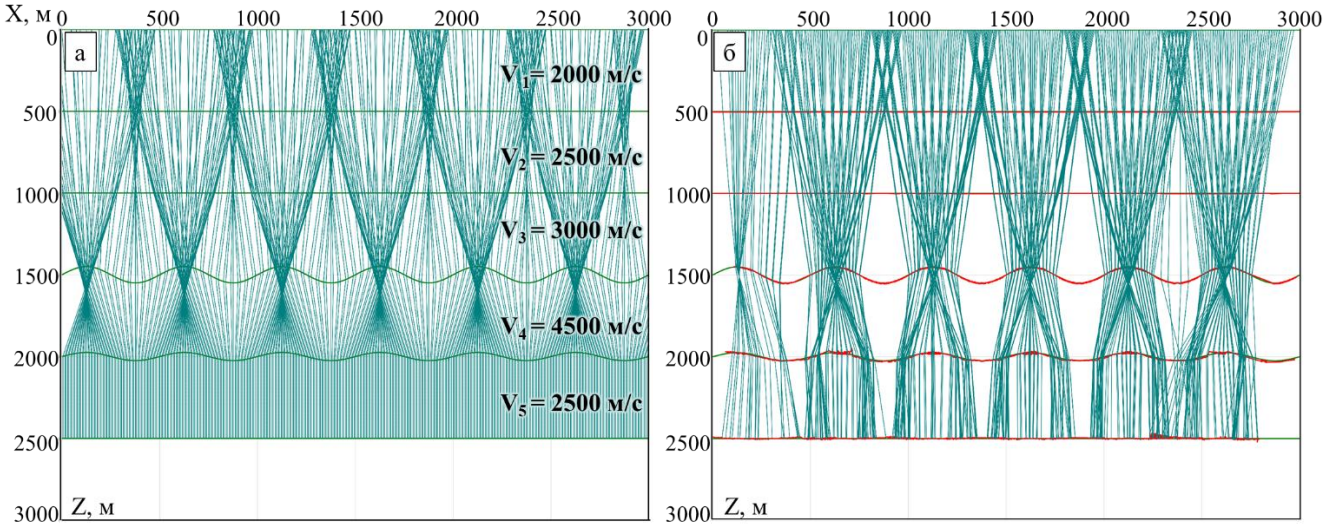



*Рисунок 5 – Тестирование алгоритма кинематической миграции на модели с высокоскоростным слоем и нерегулярными границами: а) поле нормальных лучей для нижней границы; б) восстановленные лучевым алгоритмом отражающие границы*

**Применение технологии кинематической миграции на полевых данных.** В дополнение к исследованиям на теоретических моделях слоистых сред технологии кинематической миграции были опробованы на реальных сейсмических данных ОГТ, полученных в Северо-Каспийском регионе. Результаты работы 2D алгоритма глубинной кинематической миграции представлены на рисунке 6.

Для каждого отражающего горизонта были восстановлены значения глубин, показанные на рисунке красным цветом. Темно-зелеными линиями выведены значения глубин, рассчитанные по стандартной методике послойного пересчёта без учета горизонтальной скоростной неоднородности и преломления на промежуточных границах. Невязки между полученными в рамках производственного проекта и восстановленными по технологии кинематической миграции значениями глубин отражающих горизонтов не превышают 5-10 метров для большинства отражающих горизонтов.

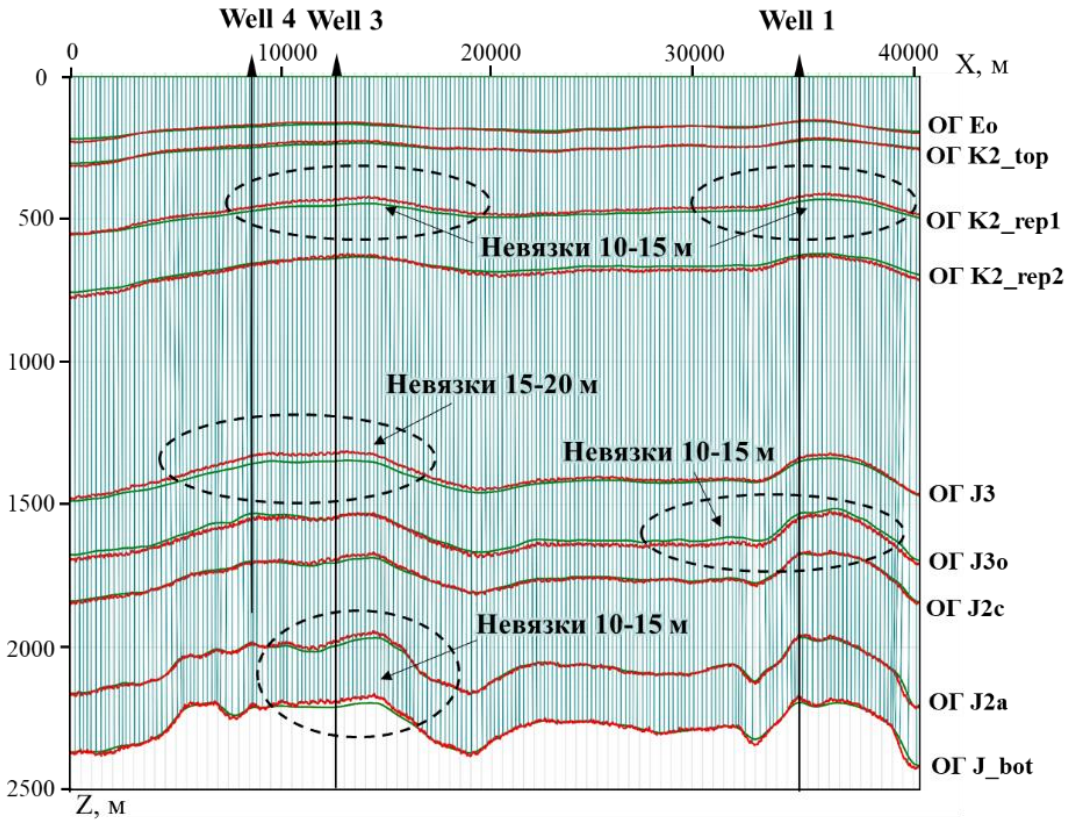



*Рисунок 6 – Опробование 2D технологии кинематической миграции на полевых данных*

Для более точного контроля качества полученных по 2D технологии кинематической миграции результатов были рассчитаны невязки между стратиграфическими отбивками в трех скважинах и значениями глубин, снятыми в точках скважин с построенных в результате решения обратной кинематической задачи отражающих горизонтов в глубинном масштабе. Невязки не превышают 5-7 метров для верхних отражающих горизонтов и 10-15 метров для нескольких нижних, наиболее сложных отражающих горизонтов.

3D технология кинематической миграции также была опробована на реальных данных, в результате чего были получены структурные карты по всем целевым горизонтам изучаемого месторождения. Результаты расчетов по одному из девяти отражающих горизонтов представлены на рисунке 7.

Можно видеть, что карты, полученные по технологии глубинной кинематической миграции, в структурном плане не противоречат картам, полученным в рамках производственного проекта. Невязки структурных карт по большей части не превышают 5-10 метров, в наиболее сложных в структурном плане местах достигая значений 15-20 метров.

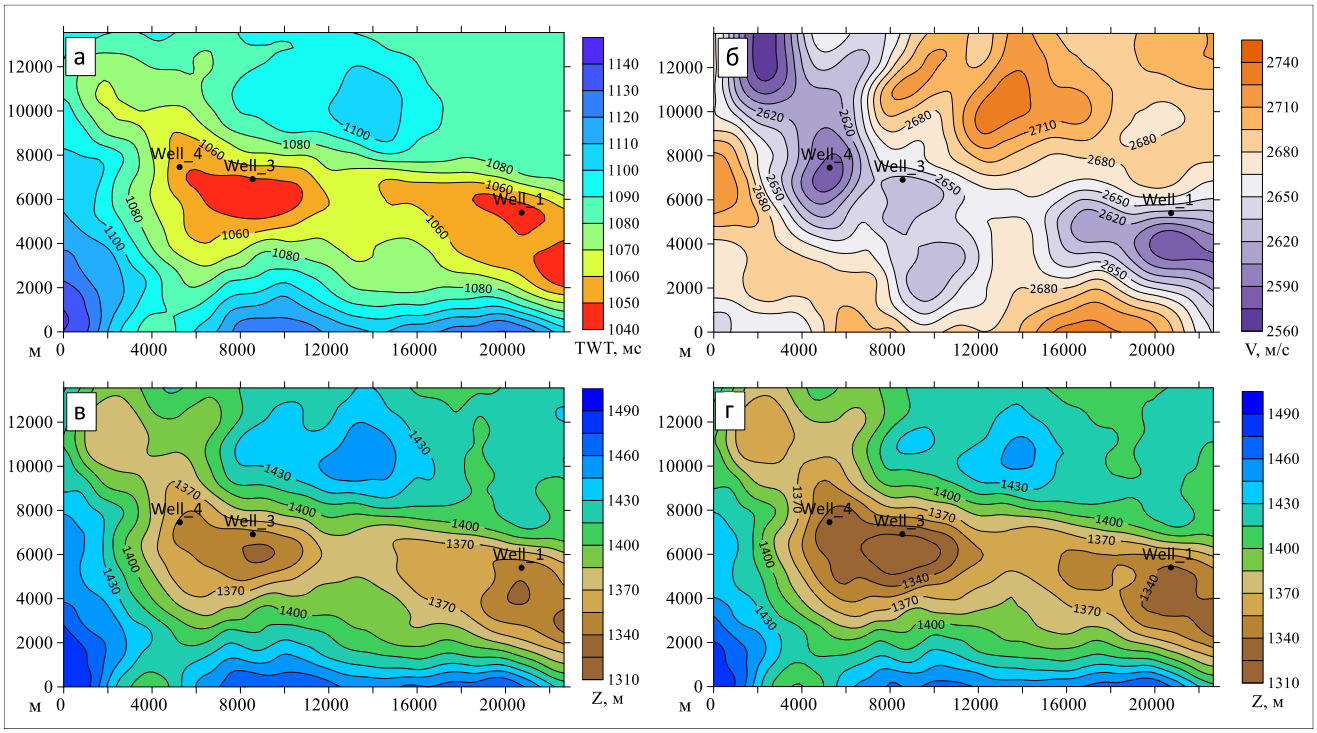



*Рисунок 7 – Структурные построения по ОГ J3: а) карта изохрон; б) карта пластовых скоростей в интервале ОГ K2_rep2 – ОГ J3; в) «производственная» структурная карта; г) структурная карта, полученная по технологии глубинной кинематической миграции*

При этом следует помнить, что производственные карты не являются эталоном для проверки качества выполненных структурных построений, поскольку лучевая миграция учитывает трехмерность среды, кривизну и кручение сейсмических лучей, изменение при преломлении не только углов падения, но и азимутов лучей в то время, как преобразование «время-глубина» при послойном пересчете использует обычные вертикальные лучи.

Важно отметить, что невязки со скважинами на площади работ находятся в тех же допустимых пределах, что и аналогичные невязки для 2D профиля. Последнее обстоятельство является объективной мерой оценки качества проделанной работы и точности восстановления структурных планов отражающих границ предлагаемыми алгоритмами кинематической миграции.

**Заключение**

Представленная диссертационная работа состоит из трех основных разделов, объединенных общей тематикой лучевого трассирования. В первой (теоретической) части работы рассматриваются преимущества, ограничения, классификация и области применения лучевых методов (глава 1), а также вопросы, связанные с вариационной теорией лучевого трассирования в двумерных и трехмерных средах (глава 2).

Вторая часть диссертации посвящена разработке и исследованию вариационных технологий лучевого трассирования в сеточных моделях при решении прямых кинематических задач сейсморазведки (глава 3). Было показано, что разработанная технология частотно-зависимого лучевого трассирования, основанная на локальном осреднении скоростного поля на базе 1-ой зоны Френеля, позволяет исследовать особенности кинематики сейсмических волн разных типов, контролировать точность решения обратных кинематических задач и обеспечивает преимущество при решении прямых кинематических задач в средах с сильной скоростной неоднородностью по

сравнению со стандартным асимптотическим вариационным алгоритмом и частотно-зависимым алгоритмом Ломакса (**защищаемое положение №1**).

Третья часть диссертационного исследования посвящена применению технологий лучевого трассирования при решении обратных кинематических задач сейсморазведки (глава 4). Была разработана и реализована технология частотно-зависимого лучевого трассирования, основанная на локальном сглаживании границ, которая позволяет прослеживать сейсмические лучи через контрастные нерегулярные границы при горизонтальных размерах неоднородностей на границе, сравнимых с диаметром 1-ой зоны Френелям (**защищаемое положение №2**).

На основе разработанных вариационных алгоритмов трассирования лучей были предложены технологии преобразования времен в глубины в слоистых средах (кинематическая миграция). На модельных и реальных данных было показано, что представленные в работе технологии глубинной кинематической миграции могут быть применены для решения структурных задач МОГТ в 2D или 3D слоистых средах с контрастными границами сложной формы, с пластовыми скоростями, изменяющимися вдоль каждого из пластов по произвольному закону, при наличии разрывов, петель и ветвей возврата на временных изображениях и при любой схеме полевых наблюдений (**защищаемое положение №3**).

**Возможным направлением дальнейших исследований** является распространение частотно-зависимых лучевых технологий на область алгоритмов сейсмической томографии для решения задач глубинно-скоростного моделирования, за счет замещения классических лучей их частотно-зависимыми аналогами.

# СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

## Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук

1. Степанов П. Ю., **Гоманюк Ю. А.** Математическое моделирование кинематики сейсмических волн в сложнопостроенных средах // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2022. — № 6. — С. 167–178. EDN: IZEHQN. 0,75 п.л., вклад автора 50%, Импакт-фактор 0,478 (РИНЦ).

2. **Гоманюк Ю. А.**, Степанов П. Ю., Ермаков А. П. Исследование ограничений в области применимости метода однородных функций решения обратной кинематической задачи сейсморазведки // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2023. — № 1. — С. 85–96. EDN: JMBYNN. 0,75 п.л., вклад автора 60%, Импакт-фактор 0,478 (РИНЦ).

3. Степанов П. Ю., **Гоманюк Ю. А.** Алгоритмы глубинной кинематической миграции в двумерных средах // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2023. — № 6. — С. 114–129. EDN: VBPNAO. 1,0 п.л., вклад автора 50%, Импакт-фактор 0,478 (РИНЦ).

4. Степанов П. Ю., **Гоманюк Ю. А**. Вариационные алгоритмы глубинной кинематической миграции в двумерных средах с горизонтальным градиентом скорости // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. — 2024. — № 1. — С. 130–144. EDN: VSGKES. 0,94 п.л., вклад автора 50%, Импакт-фактор 0,478 (РИНЦ).

5. **Гоманюк Ю. А.**, Степанов П. Ю. Вариационные алгоритмы лучевого трассирования при решении кинематических задач сейсморазведки в двумерных средах // Геофизика. — 2024. — № 1. —С. 24–32 EDN: QFTVIO. 0,75 п.л., вклад автора 70%, Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ).

6. Ермаков А. П., **Гоманюк Ю. А.**, Степанов П. Ю. Возможности и некоторые ограничения метода однородных функций в инженерной сейсморазведке // Инженерные изыскания. — 2022. — Т. 16, № 1. — С. 48–59. EDN: QEHFNU. 0,75 п.л., вклад автора 50%, Импакт-фактор 0,094(РИНЦ).