МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Мраморова Ирина Михайловна

МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ МИГРАЦИИ ПРО (ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РАЗВЕРТКИ ОТРАЖЕНИЙ) В СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в отделе обработки данных сейсморазведки Департамента полевой геофизики Акционерного общества «ПАНГЕЯ».

Научный руководитель	***Кондрашков Вадим Васильевич***, *кандидат технических наук.*
Официальные оппоненты	***Ампилов Юрий Петрович***, *доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, профессор.*
	Птецов Сергей Николаевич, *доктор технических наук, ООО «ГеоПрайм», отдел региональной геологии, главный геофизик.*
	Каплан Самуил Абрамович, *кандидат технических наук, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт», отдел Комплексной обработки и интерпретации данных сейсморазведки и геофизических исследований скважин, заведующий отделом.*

Защита диссертации состоится «6» ноября 2020 г. в 17.30 часов на заседании диссертационного совета МГУ.04.03 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией, а также со сведениями о регистрации участия в удаленном интерактивном режиме в защите можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: https://istina.msu.ru/dissertations/315479149/

Автореферат разослан «___» сентября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук В.А. Куликов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

На сегодняшний день обработка сейсмических материалов, полученных методом отраженных волн, не обходится без миграции данных и решения обратной кинематической задачи.

Миграция, или миграционные преобразования – это общепринятая формулировка, на самом деле означающая дифракционные преобразования. Идея дифракционного преобразования записей волновых полей разрабатывалась уже в 60-х годах прошлого столетия и впервые была сформулирована отечественным ученым Ю.В. Тимошиным в 1972 году [Тимошин, 1972]. К 70-м годам учеными-геофизиками была создана глубокая теоретическая база дифракционных и фокусирующих преобразований и обоснована роль интеграла Кирхгофа как теоретической основы продолжения волновых полей. Примерно в то же время были сделаны серьезные теоретические и алгоритмические разработки в области конечно-разностных алгоритмов миграции зарубежным геофизиком Дж. Клаербоутом; вслед за ним его коллегами были обоснованы и сформулированы различные подходы к миграции. Таким образом, к началу 80-х годов прошлого столетия миграция уже вошла в граф стандартной обработки данных в сложных геологических районах [Козлов, 1986].

Настоящая работа посвящена исследованию возможностей миграции методом параметрической развертки отражений в условиях сложнопостроенной среды. В основе параметрической развертки отражений (ПРО) лежит метод эллиптической развертки отображений (ЭРО), который был сформулирован в 70-е годы его идеологом и разработчиком Вадимом Васильевичем Кондрашковым [Кондрашков, 1977]. Затем теоретические принципы и многочисленные результаты применения метода были опубликованы В.В. Кондрашковым и его соавторами в разные годы во множестве печатных работ, и дальнейшее свое развитие метод ПРО получил в области миграционных преобразований [Кондрашков, Анискович, Богданов, 2018].

Актуальность темы исследования

Геологическое строение многих нефтегазоносных провинций не имеет однозначного представления. В частности, на сегодняшний день значительное количество сейсмических материалов, полученных при разведке месторождений нефти и газа, имеют спорную интерпретацию, вызванную некорректной обработкой. В связи с этим, изучение перспективных нефтегазоносных регионов со сложной геологической обстановкой с помощью сейсморазведки остается весьма актуальной, развивающейся, востребованной с точки зрения обработки данных сейсморазведки, задачей.

Актуальность настоящей работы обусловлена потребностями нефтегазовой отрасли в разработке новых способов и инструментов решения обратной задачи сейсморазведки. Растущие потребности отрасли требуют применения альтернативных наряду с общепринятыми методами получения новой сейсмической и геологической информации для более широкого осмысления геологической среды, повышения точности структурных построений и сужения неопределенности при интерпретации сейсмических данных.

На данный момент разработан целый ряд способов и методов получения мигрированного изображения среды с помощью сейсморазведки. При этом каждый из методов имеет свои ограничения для определенных моделей сред. В связи с этим актуальность настоящей работы связана с необходимостью определения класса моделей геологических сред, для которых применение метода миграции ПРО наиболее эффективно и целесообразно.

Алгоритмы и программное обеспечение для получения глубинного изображения среды при помощи глубинной миграции сложны, многоэтапны, итерационны и требуют значительных трудозатрат специалиста для получения приемлемого результата. Сами процедуры получения глубинного изображения среды, в частности миграционные преобразования, отличаются существенно большими затратами расчетного времени по сравнению с другими стадиями

обработки, а это влияет и на стоимость этого этапа работы. Возможность использования эффективной и подходящей для изучаемого класса моделей методики сокращает время для получения результата, это также делает данную работу актуальной.

Степень разработанности проблемы

Метод миграции ПРО является логическим продолжением метода ПРО, описанным подробно в диссертации В.В. Кондрашкова [Кондрашков, 1986]. Теоретические основы метода ПРО и результаты его применения широко отражены в целом ряде публикаций, опубликованных начиная с 70-х годов В.В. Кондрашковым, А.Н. Богдановым, Е.М. Анискович и их коллегами. В некоторых работах рассматриваются геологические среды, где успешно применяется этот метод [Кондрашков, 1980; Кондрашков и др., 2002; Невинный, Кондрашков и др., 1986].

В то же время область применения метода миграции ПРО на настоящий момент четко не обозначена. Несколько примеров ее успешного использования рассматриваются в пионерской работе [Кондрашков, Анискович, Богданов, 2018], посвященной миграции ПРО, а также отражены в тезисах конференций 2017–2020 годов. Следствием упомянутых публикаций и явились вопросы, которые поднимаются в данной диссертационной работе, в том числе конкретные методические рекомендации для применения миграции ПРО, которые ранее сформулированы не были.

Целью работы является рассмотрение возможностей и эффективности применения метода ПРО для получения сейсмического изображения в условиях сложной, неоднородной, дислоцированной среды, характеризующейся резкими изменениями скоростей сейсмических волн.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи**:

1. Рассмотреть наиболее распространенные методики решения обратной кинематической задачи и методы миграции. Определить место

миграции ПРО среди наиболее применяемых методов получения сейсмического изображения.

2. Провести апробацию миграции ПРО на реальных данных при исследовании геологического строения некоторых районов с наличием сложной тектоники.

3. Провести тестирование рекомендуемой методики миграции ПРО на модельных данных.

4. Рассмотреть эффективность применения метода миграции ПРО для решения задач на этапе интерпретации.

5. Сформулировать выводы и методические рекомендации к применению метода миграции ПРО. Определить классы сред, для которых применение миграции ПРО наиболее эффективно в сравнении с другими методами решения обратной кинематической задачи.

Научная новизна

1. Среди наиболее известных методов получения сейсмического изображения среды впервые показано место метода миграции ПРО (параметрической развертки отражений) в отношении различных классов моделей геологической среды.

2. Впервые показана эффективность применения метода миграции ПРО для получения сейсмического изображения среды в районах со сложным геологическим строением.

3. Впервые на реальных данных в результате применения миграции по методу ПРО получены сейсмические изображения с геологическими элементами, не выявленными прежде при использовании других алгоритмов миграции, что подтверждается имеющейся геолого-геофизической информацией.

4. Обоснован и впервые успешно применен новый сейсмический атрибут для интерпретации – интервальные скорости, полученные при миграции ПРО.

5. Впервые сформулированы методические рекомендации к получению разрезов с помощью миграции ПРО.

Защищаемые положения

1. Метод миграции ПРО эффективен для следующих классов геологических сред: в условиях складчатых зон, круто падающих углов наклона границ, надвиговой тектоники, в условиях резких изменений пластовых скоростей.

2. Разработанные методические рекомендации к получению разрезов с помощью миграции ПРО позволяют успешно решать обратную кинематическую задачу в районах со сложной геологической обстановкой.

3. Разрезы интервальных скоростей миграции ПРО позволяют осуществлять качественную интерпретацию сейсмических данных, например: уточнять структурно-тектоническое строение территории, выявлять участки разреза с аномалиями низких скоростей, указывающие на повышенные коллекторские свойства в целевом пласте, выделять фациально-седиментационные зоны и др.

Теоретическая значимость работы состоит в расширении инструментальной базы для решения геологоразведочных задач. Кроме того, представленная работа является основанием для пересмотра привычных и общепринятых методик, включенных в стандартный граф обработки для достижения этих задач, с целью повышения эффективности сейсморазведки.

Практическая значимость работы

Предложенный способ получения изображения среды (миграция ПРО) используется при изучении с помощью сейсморазведки районов со сложными тектоническими условиями.

Метод миграции ПРО реализован в программном комплексе PROspect, который используется геофизиками в ряде организаций (АО «ПАНГЕЯ», АУ «НАЦ РН им. В.И. Шпильмана», ООО «Газпром геологоразведка»,

научно-производственная компания ОАО «Гемма», LandOcean (КНР) и др.). В связи с этим работа имеет практическую значимость с точки зрения повышения эффективности метода и качества результатов его применения. Практическая ценность работы обусловлена предложенными соискателем конкретными рекомендациями к получению изображений среды в сложных геологических условиях, которые позволяют решать производственные задачи с меньшими затратами времени на поиск наилучшего решения.

Результаты, полученные при использовании метода миграции ПРО, являются дополнительными атрибутами при качественной интерпретации данных.

Методология и методы исследования

В основе исследования лежит метод Параметрической развертки отражений (ПРО) и метод миграции ПРО, идеологом и создателем которых является Кондрашков Вадим Васильевич и соавторы Е.М. Анискович и А.Н. Богданов. Для получения всех результатов по методу ПРО и миграции ПРО использовалась программа PROspect, разработанная А.Н. Богдановым и Е.В. Брызгиным (Томск).

Для стандартной обработки данных применялась обрабатывающая система Geovation (CGG), интерпретация данных проводилась в программном комплексе Review. Все программы и материалы предоставлены АО «ПАНГЕЯ».

Апробация работы

Результаты исследований неоднократно докладывались автором на научных конференциях, среди которых: молодежная конференция «Ломоносов-2010» (г. Москва), международная конференция «Геомодель-2011» (г. Геленджик), научно-практические конференции «Сейсмические технологии-2016» и «Сейсмические технологии-2017» (г. Москва), технологический форум Газпром-Нефть НТЦ «Инновационный взгляд на выполнение площадных геолого-геофизических исследований и их

комплексирование для сложных геологических и поверхностных условий» (г. Санкт-Петербург, 2017), молодежная научная конференция ИПНГ РАН (г. Москва, 2017), международная конференция «SPG India Jaipur-2017» (г. Джайпур, Индия), международные конференции «Геомодель-2018» и «Геомодель-2020» (г. Геленджик), научно-практическая конференция «Перспективные технологии ГРР при изучении нефтяных и газовых месторождений» (г. Казань, 2019). Материалы опубликованы в сборниках конференций, некоторые расширенные тезисы цитируются в системах Scopus и Web of Science (WoS).

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы представлены в ряде научных публикаций, три из которых – в реферируемых научных журналах, включенных в международные базы цитирования Web of Science, Scopus, RSCI и в перечень изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности.

Личный вклад автора

Материалы для диссертационной работы были получены в ходе научно-производственных проектов при непосредственном участии автора. Автором лично проводилось тестирование процедур как стандартной обработки, так и процедур миграции ПРО на данных, полученных в различных геологических обстановках, а также на модельных данных. На основании апробации метода миграции ПРО на значительном количестве материала автором были указаны классы моделей сред, для которых применение миграции ПРО эффективно и целесообразно, и выработаны авторские методические рекомендации для применения метода миграции ПРО с целью получения временных разрезов, пригодных для интерпретации.

Все разрезы по методу миграции ПРО были получены автором лично. Все выводы настоящей работы принадлежат автору.

Структура работы

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 156 наименований. Общий объем работы составляет 123 страницы, включая 67 рисунков и 3 таблицы.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю Вадиму Васильевичу Кондрашкову за несколько лет совместной работы, открытость и искреннее отношение, а также Александру Николаевичу Богданову, без которого получение практических результатов было бы невозможным. Особую признательность автор выражает Константину Юрьевичу Татаренко за веру в результат и всестороннюю поддержку. Автор искренне признательна своим коллегам в АО «ПАНГЕЯ», поддерживающих автора на всех этапах написания работы.

Автор глубоко признательна заведующему кафедрой сейсмометрии и геоакустики МГУ имени М.В. Ломоносова, профессору Михаилу Львовичу Владову за консультации, конструктивные замечания и неоценимую помощь в работе над диссертацией. Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам отделения геофизики: доценту Людмиле Алексеевне Золотой, чья отзывчивость и поддержка были спутниками на всем протяжении написания работы, а также доценту Павлу Юрьевичу Степанову за внимательное прочтение диссертации, ценные советы и поддержку. За справедливые замечания к работе и доброжелательность автор благодарит весь состав кафедры сейсмометрии и геоакустики.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, формулируются цели и задачи исследования; приведены объем и структура диссертации.

Глава 1. Обзор основных методов миграций и способов получения изображений среды

В главе представлен обзор основных и наиболее известных на сегодняшний день методов миграций, применяемых в отечественных и иностранных компаниях: приводятся их основные принципы, допущения и ограничения, а также практические реализации методов. Кроме различных миграций, приведены также альтернативные методы получения изображения среды. Отмечено, что, несмотря на различие возможностей всех методов, тем не менее, есть один общий недостаток всех способов получения изображения среды – это отсутствие универсальности.

Существуют разные классификации миграций в зависимости от разных признаков, например, классификация по Козлову [Козлов, 2006]. При этом, несмотря на многообразие типов миграций и различных признаков их классификации, есть наиболее значимый признак их разделения – по применяемой в вычислениях модели скоростей: миграции, использующие глубинно-скоростную модель, и миграции, использующие среднескоростную модель среды.

В настоящей работе предлагается обратить внимание на временные миграции, алгоритмы которых основаны на среднескоростной модели среды. Такая сравнительно простая модель среды дает возможность достаточно быстро в сравнении с полным циклом PSDM (глубинной миграции до суммирования) получать изображение среды. Известно [Robein, 2010], что при сложном геологическом строении среды, больших углах наклона, миграция Кирхгофа имеет ограничения. То есть в таких условиях корректно использовать глубинную миграцию, однако она очень чувствительна к малейшим колебаниям глубинно-скоростной модели, что подтверждает необходимость длительного и многоэтапного уточнения глубинно-скоростной модели для глубинной миграции. В свою очередь, временная миграция имеет определенное преимущество перед глубинной в том, что имеет устойчивость к ошибкам

определения скорости [Кондрашков, Анискович, Богданов, 2018]. Таким образом, учитывая эти факторы, рассмотрение класса миграций, использующих среднескоростную модель, является по-прежнему актуальным. Являющийся объектом исследования настоящей диссертационной работы метод миграции ПРО, которая осуществляет глубинное преобразование на основе среднескоростной модели среды, можно отнести к группе временных миграций и сравнивать результаты ее применения с временной миграцией Кирхгофа.

Глава 2. Основные положения метода ПРО и миграции ПРО

В первых двух разделах главы представлены теоретические основы метода ПРО и миграции ПРО, которая продолжает теорию метода ПРО, а также описан алгоритм миграции, который реализован в программе ProMig системы PROspect. Миграция ПРО осуществляет глубинное преобразование с использованием среднескоростной модели среды. Кинематически миграция ПРО состоит в представлении большой изохроны Д-преобразования как огибающей к преобразованным в глубину и подвергнутым аффинному преобразованию перекоса изохронам ПРО временного разреза. В этом случае границы формируются как огибающие к миграционным изохронам ПРО, а дифрагирующие объекты формируются в результате их пересечения [Кондрашков и др., 2018].

В последующих трех разделах показаны примеры применения миграции на различных моделях: простая модель однородной среды с криволинейной границей, модель с многочисленными разломами и модель с надвигами.

Пример определения скоростей миграции по модели с криволинейной границей демонстрирует тесную взаимосвязь кривизны изохроны миграции с точностью определяемой скорости [Кондрашков, Глаголев, Мраморова, 2017]. Так, кривизна изохроны миграции ПРО на порядок меньше, чем кривизна изохроны Д-преобразования, таким образом, скорости, определяемые в процессе анализа скоростей миграции ПРО, существенно ближе к заданным в модели скоростям (для наклонной до 30 градусов границы отклонение

составило 0.3% в отличие от 3% отклонения скорости, полученной в процессе скоростного анализа миграции Кирхгофа).

Результаты миграции ПРО для приведенной в диссертационной работе модели со сложной сбросо-сдвиговой разломной системой показывают возможность на качественном уровне восстановления скоростной модели. При этом границы на полученном сейсмическом разрезе практически полностью соответствуют границам, заложенным в теоретической модели среды [Кондрашков и др., 2018].

Третья модель – с надвигами, включающая также круто падающую границу, – была построена на основании ранее полученных результатов производственных проектов и материалов исследований геологии и тектонических процессов района Ассам, Индия. Моделирование было выполнено в программе Tesseral для построения числовых моделей сложных сейсмогеологических разрезов с использованием метода конечных разностей для вычисления волновых полей. Скорости в слоях глубинно-скоростной модели, представленной на Рисунке 1, были взяты из данных исследования скважины, пробуренной на изучаемой площади.

Полученные в результате моделирования сейсмограммы были поданы на вход скоростного анализа временной миграции Кирхгофа до суммирования и скоростного анализа миграции ПРО. На основе подобранных скоростей были проведены соответствующие миграции. Рисунок 2, на котором представлены результаты миграций, демонстрирует преимущество миграции ПРО в восстановлении круто падающей границы; при этом в зоне надвигов оба разреза дают достаточно информативную картину, отличаясь деталями, но не давая оснований явно выделить преимущества одного результата на фоне другого. Распределение интервальных скоростей (Рисунок 3) отражает геологическую ситуацию, заданную в модели. При этом после пересчета сейсмического разреза в глубинный масштаб при помощи средних скоростей, полученных на основе скоростей миграции ПРО, границы занимают правильные положения в глубине.

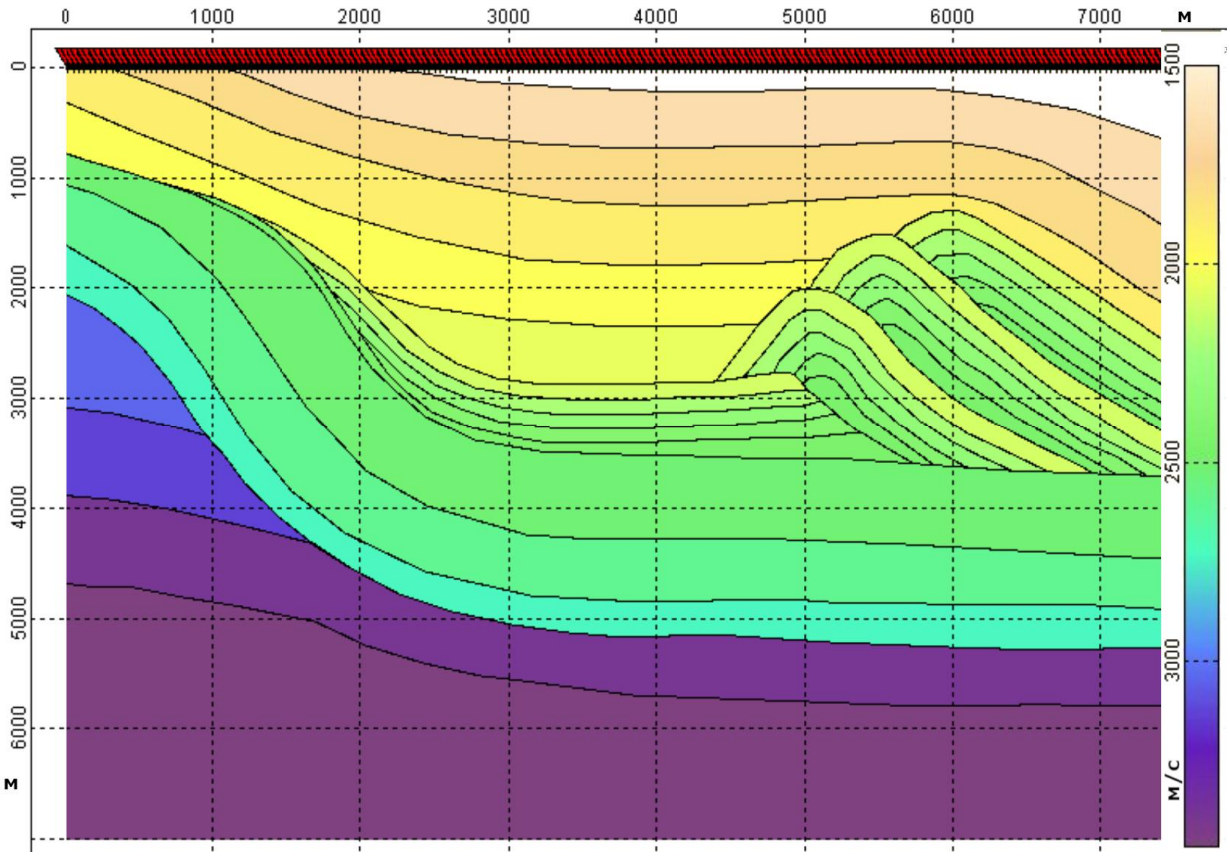

Рисунок 1 – Модель среды с надвигами, включающая круто падающую границу, для которой было выполнено моделирование сейсмограмм.

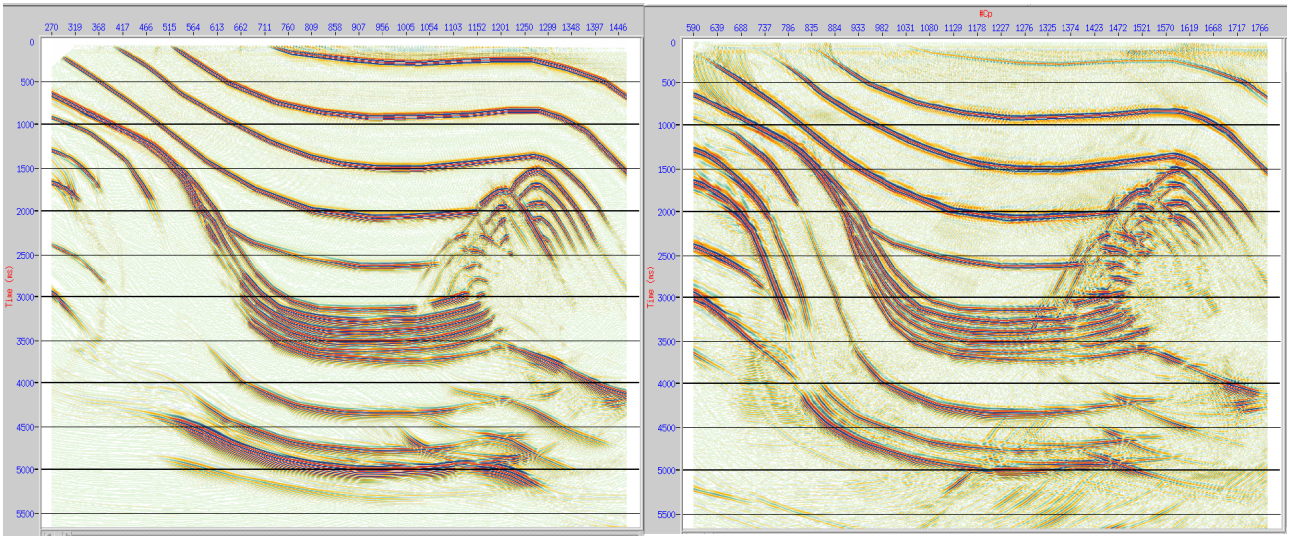

Рисунок 2 – Результаты временной миграции Кирхгофа (слева) и миграции ПРО (справа) по модели с надвигами (см. Рисунок 1).

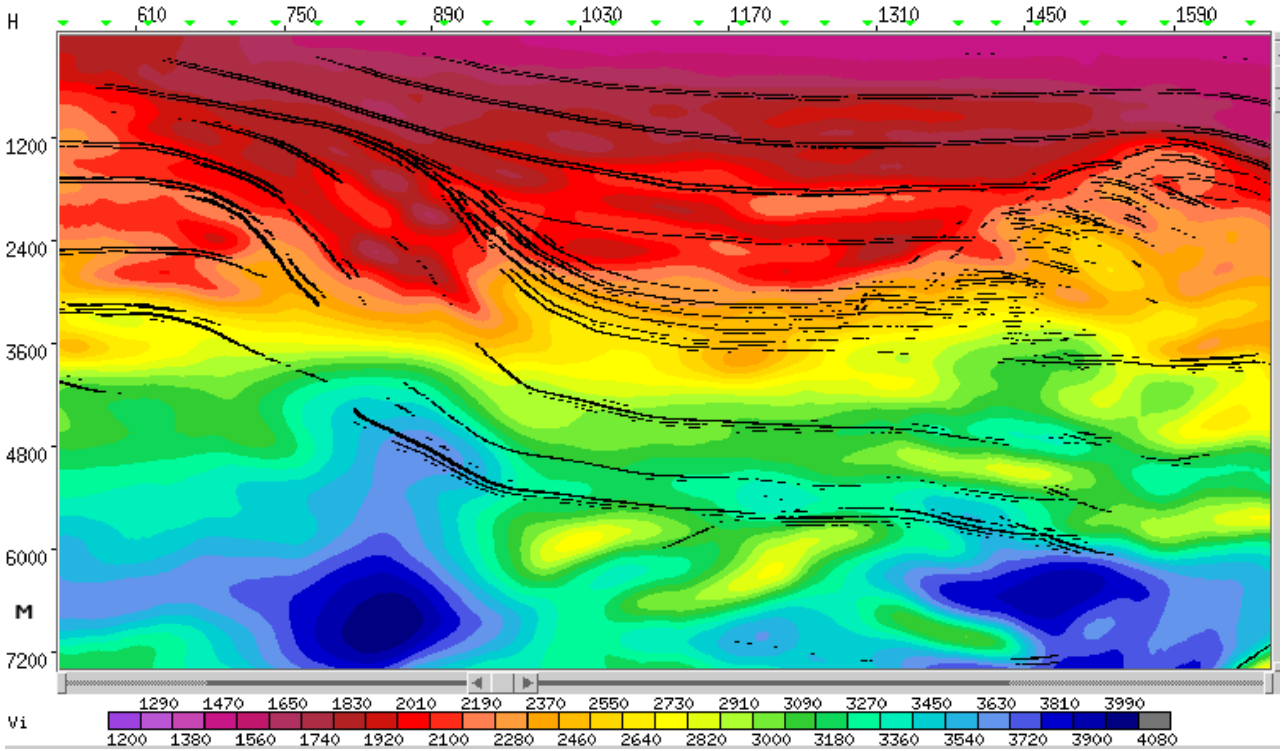

Рисунок 3 – Разрез интервальных скоростей миграции ПРО, совмещенный с мигрированным разрезом. Глубинный масштаб.

Модельные примеры позволяют сделать вывод о целесообразности применения миграции ПРО на реальных данных.

Глава 3. Применение миграции методом ПРО на реальных данных

Нет ни одного метода миграционных преобразований, который идеально бы подходил для всех классов моделей. Еще до широкого развития миграционных подходов, сам метод ПРО зарекомендовал себя как надежный для работы в различных геологических условиях. В свою очередь результаты, полученные с помощью миграции ПРО, дают основания выделить некоторые классы моделей среды, для которых этот инструмент работает хорошо. В главе рассмотрены несколько примеров успешного применения миграции ПРО для данных 2Д сейсморазведки, которые демонстрируют возможность и преимущества его привлечения в граф обработки. При этом анализ результатов миграции ПРО и основные сравнения проводятся с временной миграцией Кирхгофа до суммирования.

В первом примере обработка методом миграции ПРО проводилась с целью получения дополнительной информации на временном разрезе, а именно уточнения формы и местоположения круто падающих границ, улучшения прослеживаемости сейсмической записи на «сложных» участках разреза. Район работ, где проводилась сейсмическая съемка МОГТ-2Д, охватывает Предуральский краевой прогиб и зону передовых складок Урала.

По сейсмограммам, прошедшим через основные этапы сигнальной обработки, был рассчитан спектр сейсмической энергии для анализа скоростей, а затем проведена миграция ПРО. Как видно на Рисунке 4, миграция ПРО позволила подчеркнуть наклонно залегающие границы (максимальный угол падения 30°). Данная пачка тонких слоев, не очень регулярных и круто падающих, приурочена к кровле и подошве флишевых отложений карбонатного состава нижнепермского возраста. Этот пример в качественном плане демонстрирует преимущество метода ПРО в данных условиях среды: отвечающая известному геологическому представлению информация отражается на конечном результате миграции ПРО и ближе к геологической модели, полученной по результатам бурения [Пучков, 2010].

Значимыми результатами миграции ПРО для данного примера явились скоростные разрезы. Скорости миграции ПРО были пересчитаны в интервальные скорости ПРО. Как можно видеть, на разрезе интервальных скоростей (Рисунок 5) отмечается латеральная изменчивость и резкая смена значений скоростей на отдельных участках профиля, в чем находит свое отражение сложное сейсмогеологическое строение района работ. В восточной части профиля наблюдается общее увеличение скоростей (на Рисунке 5 слева), что может быть связано с уплотнением пород в результате более активной тектоники, характерной для этой части территории. Кроме того, данный разрез характеризуется наличием локальных зон относительного понижения скоростей, которые можно интерпретировать как зоны разуплотнения пород, что обусловлено как сложной тектонической обстановкой, так и высокой степенью литологической неоднородности отложений.

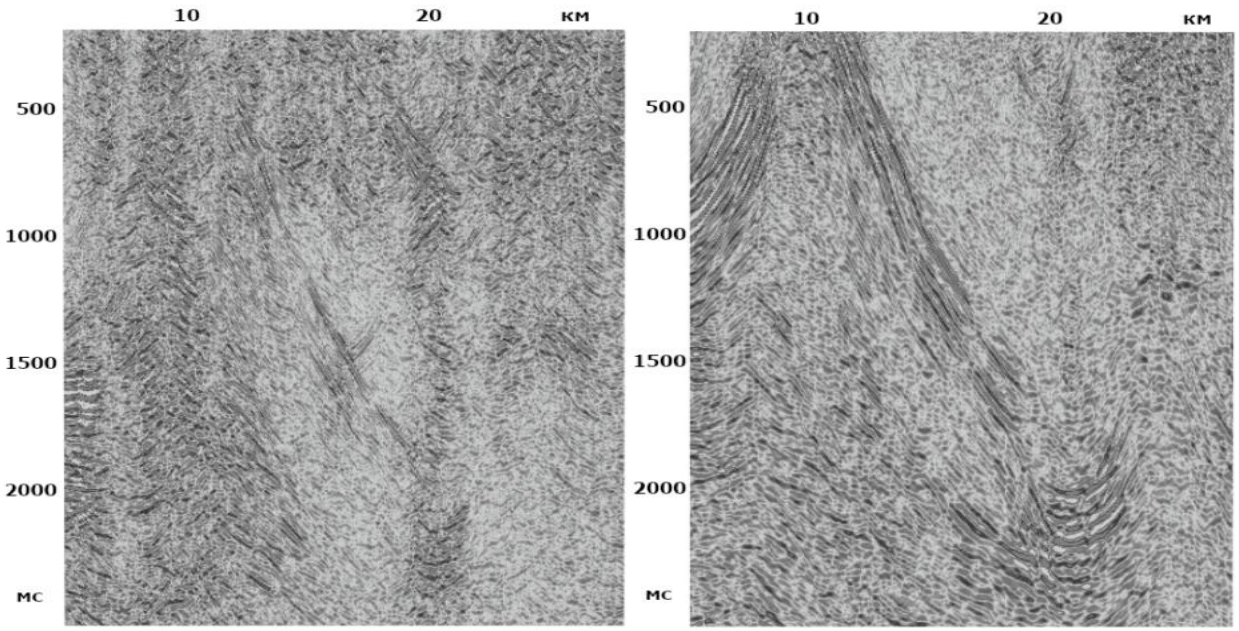

Рисунок 4 – Фрагменты временных разрезов, полученных с помощью миграции Кирхгофа (слева) и миграции ПРО (справа); миграция ПРО позволила подчеркнуть наклонно залегающие границы, приуроченные к кровле и подошве флишевых отложений карбонатного состава нижнепермского возраста.

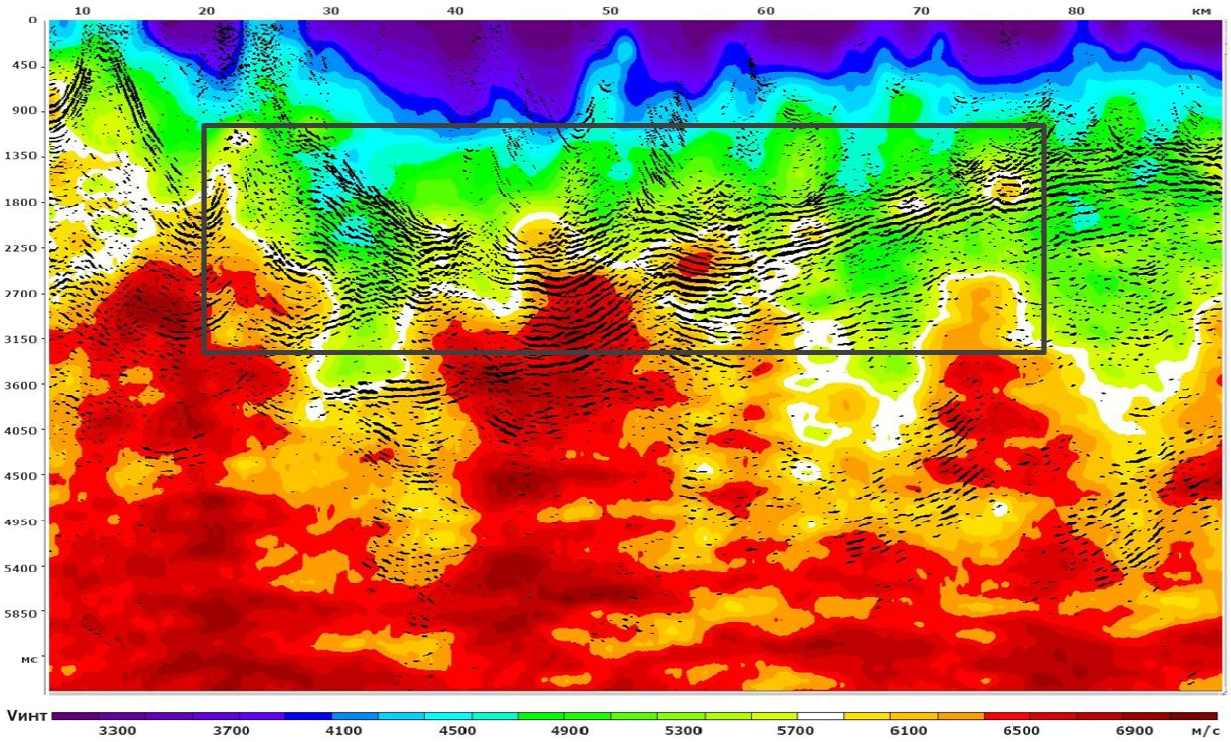

Рисунок 5 – Разрез интервальных скоростей ПРО. На разрезе по значениям интервальных скоростей отмечается литологическая изменчивость толщи, хорошо выделяются структурные этажи (показаны в прямоугольнике), что подтверждается характером поведения отражений в поле сейсмических волн.

Достоверность полученных результатов подтверждается, во-первых, известными геологическими представлениями о районе работ [Пучков, 2010; Синицкий, 2008; Балдин, 1998] и сводной геологической колонкой для исследуемой территории, во-вторых, сравнением с результатами независимого метода для определения скорости – метода ВСП (вертикального сейсмического профилирования, Рисунок 6). В точке скважины кривая средних скоростей ПРО, пересчитанных из интервальных скоростей ПРО, сравнивалась со средней скоростью ВСП.

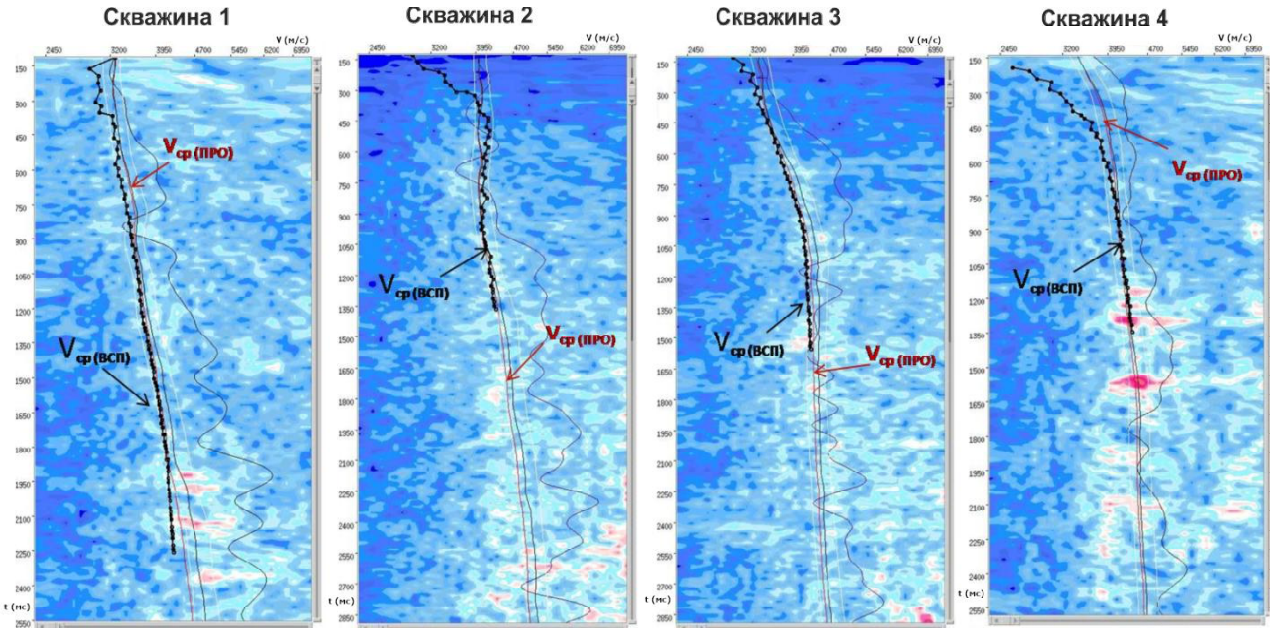

Рисунок 6 – Планшеты скоростного анализа в точках скважин, находящихся на демонстрируемом профиле или в непосредственной близости от него. Черной линией с точками обозначена кривая средних скоростей, полученная по данным ВСП в скважине. Тонкая красная линия – средняя скорость, вычисленная из интервальной скорости ПРО.

Второй пример демонстрирует эффективную работу миграции ПРО в условиях складчатых зон (район Хатангского залива). На разрезе миграции ПРО (Рисунок 7) отчетливо выделяются выраженные по амплитуде сейсмические рефлекторы, которые приурочены к границе между карбонатными девон-нижнекаменноугольными и вышезалегающими терригенными каменноугольно-пермскими породами. Кроме того, на разрезе в сейсмическом поле отмечается область, характерная для рифогенных построек верхнедевон-нижнекаменноугольного возраста.

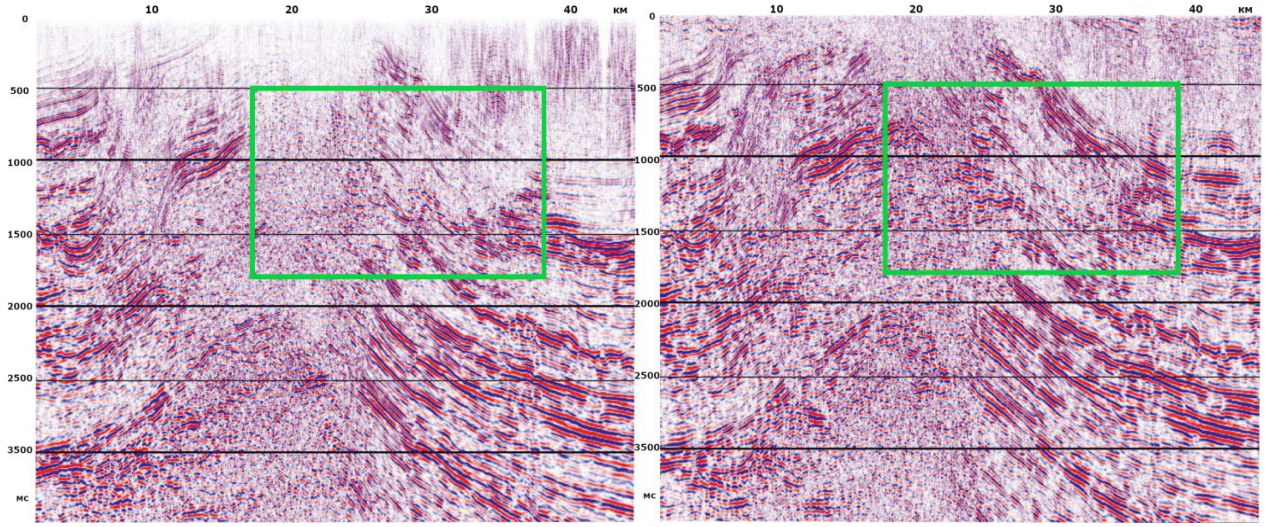

Рисунок 7 – Временные разрезы, полученные с помощью миграции Кирхгофа (слева) и миграции ПРО (справа).

По этим сейсмическим данным были получены информативные детальные разрезы интервальных скоростей ПРО путем пересчета из скоростей миграции, примеры таких разрезов на пересечении двух профилей 2Д приведены на Рисунке 8.

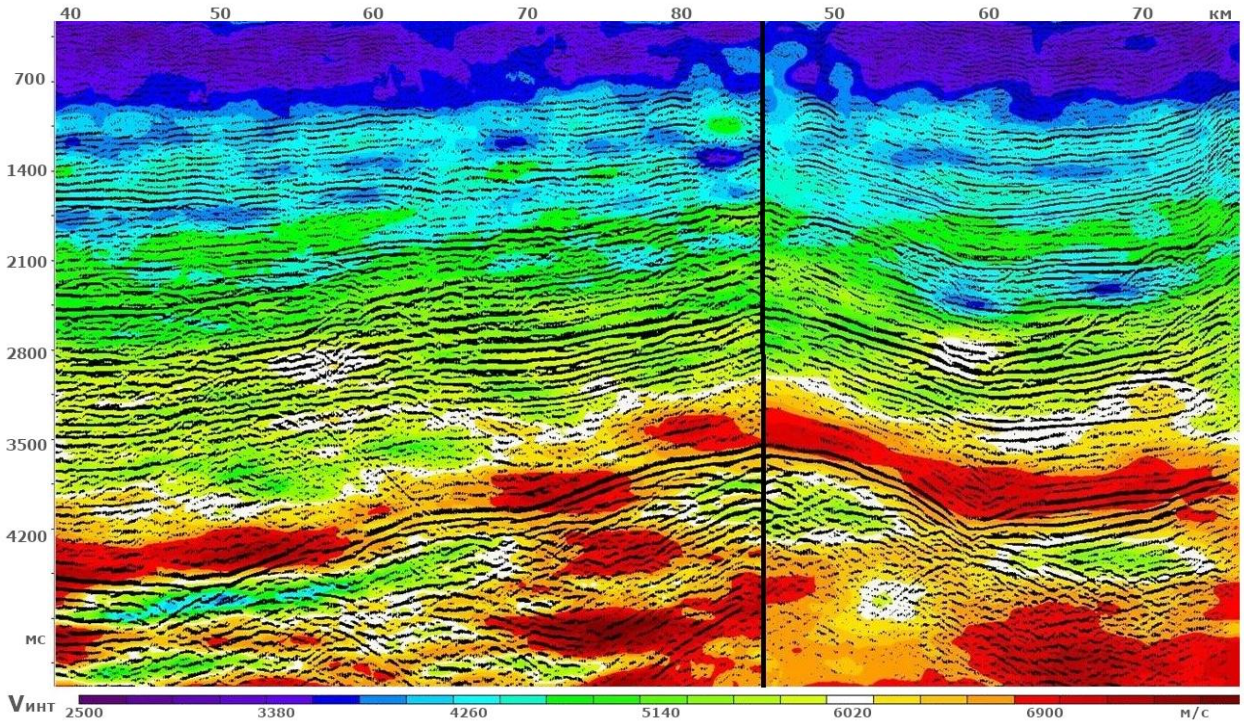

Рисунок 8 – Разрезы интервальных скоростей ПРО, совмещенных с мигрированными разрезами ПРО, на пересечении двух профилей 2Д (черная вертикальная линия).

На приведенных разрезах интервальных скоростей особый интерес представляют аномалии пониженных скоростей в поднятии, указывающие на зоны разуплотнения пород, которые в свою очередь могут указывать на потенциальное положение коллекторов. Характер изменения формы отражающих границ на представленных разрезах отображается в поле интервальных скоростей. При этом протяженные аномальные зоны повышенных интервальных скоростей (5-6 км/с на временном интервале 1-2.5 сек) могут свидетельствовать о внедрении траппов. Достоверность полученных результатов подтверждается известным геологическим строением изучаемой территории [Могучева, 1989; Пронкин и др., 2012].

Значимым инструментом для получения разреза с высоким разрешением явился анализ диапазонов углов наклона отражающих границ, реализуемый также с помощью теории, которая заложена в метод миграции ПРО. Разрез сейсмической энергии углов наклона границ представляет собой интерпретируемое изображение среды и имеет геологически осознанный смысл, позволяя увидеть, при каких углах формируется максимум отраженного сигнала. Рисунок 9 демонстрирует простую модель наклонной границы и поясняет механизм формирования такого спектра.

Процесс осознанного выбора диапазона углов наклона границ по энергетическому спектру является этапом интерпретационной обработки, а результат анализа углов позволяет получить временной разрез, характеризующийся улучшенной прослеживаемостью отражающих горизонтов и отсутствием противоречащих друг другу наклонов.

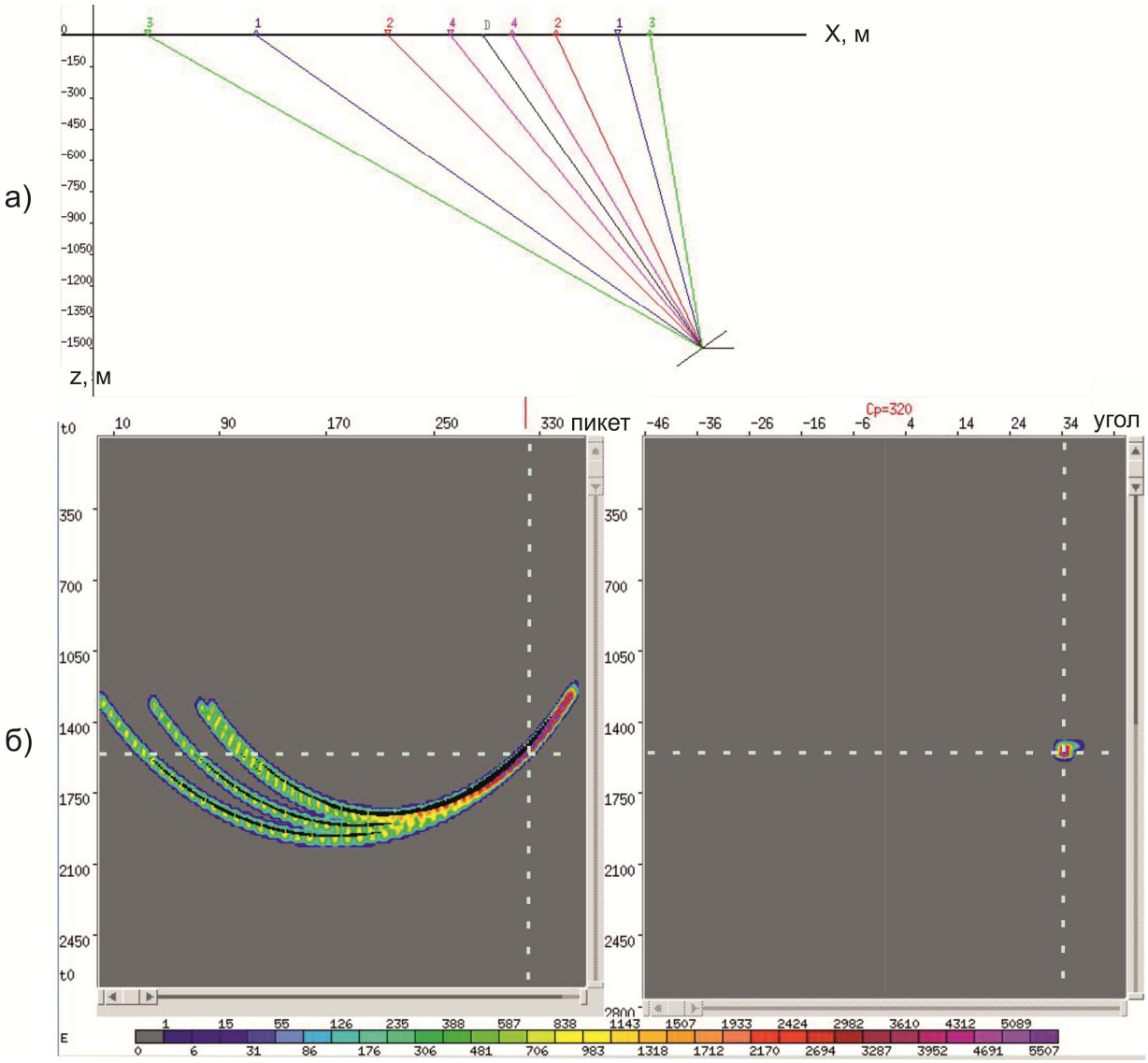

Рисунок 9 – Модель простой границы с углом наклона 35° и лучевая схема для четырех пар ПВ–ПП (а). Энергетический разрез углов наклона (б, слева) и максимум энергии на энергетическом спектре в точке накапливания, сформированный в процессе миграции ПРО (б, справа).

В третьем примере район работ относится к горной области Кавказа, находящейся в широкой зоне деформации, которая является частью пояса коллизии континентальных плит, причем плиты продолжают движение и в наше время. Вследствие этого геология района являет собой результат надвиговых процессов [Яковлев, 2017; Митюков и др., 2012].

Для сопоставления с результатом работы по методу миграции ПРО были привлечены результаты других методов миграций. Было выявлено, что в поднадвиговой зоне разрезы отличаются существенно, что является предпосылкой для разной их интерпретации. В приведенном в настоящей

работе примере, в отсутствии скважинной информации, было проведено сравнение с имеющимися геологическими моделями территории, приведен аналог разреза из близлежащего района, что показало достоверность полученных элементов разреза, а также разреза интервальных скоростей, на котором хорошо выделяются комплексы (Рисунок 10).

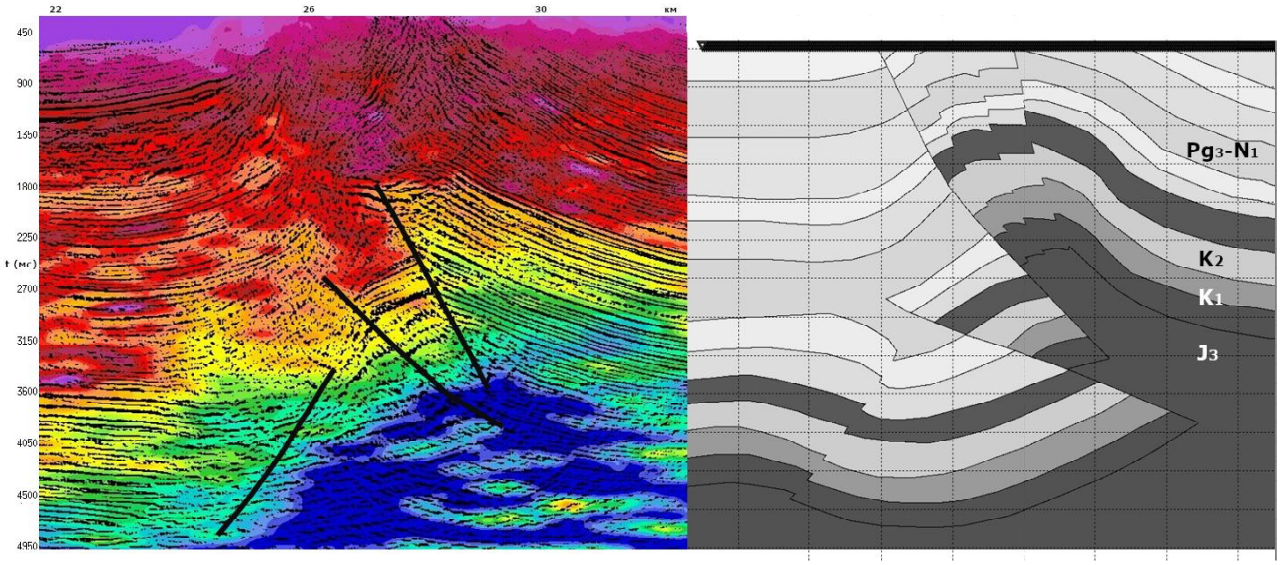

Рисунок 10 – Фрагмент разреза интервальных скоростей миграции ПРО, совмещенного с мигрированным разрезом ПРО: со схематическим вариантом интерпретации разломов (слева); геологическая модель, отвечающая полученному результату (справа).

Основная задача процесса работ по методу ПРО состоит в получении скоростей миграции и дальнейшей миграции сейсмограмм для получения финального разреза. Тем не менее, есть ряд дополнительных важных этапов в процессе получения основных результатов. В **четвертом разделе** третьей главы подробно рассмотрен цикл работ, выполненный в процессе получения окончательного результата миграции ПРО. Некоторые этапы являются необязательными, однако их использование только углубляет понимание материала и определяет путь для получения результата.

При выборе исходного материала для миграции ПРО важно обратить внимание на следующее. Хотя в качестве исходных для миграции ПРО могут использоваться сейсмограммы, подготовленные к миграции до суммирования (например, PSTM) по стандартному графу обработки, однако к таким данным

не должны быть применены процедуры шумоподавления в сортировке ОГТ, поскольку теоретические основы, заложенные в ПРО, исключают такую сортировку.

С целью повышения разрешенности разреза и наблюдения волнового распределения проводились анализы ряда параметров, от которых зависит результат накапливания разреза: диапазона радиусов ПОН (поверхностей общих нормалей), угловой апертуры, диапазона используемых удалений. Полученные знания об этих параметрах были использованы в процедуре миграции.

В процессе выполнения тестов и подбора параметров, описанных в данном разделе, а также на основании апробации метода миграции ПРО на значительном количестве материала были выработаны ***методические рекомендации*** для выполнения миграции ПРО для 2Д сейсмических данных. Они представляют собой последовательность этапов, которая осуществляется с использованием программы ProMig программного комплекса PROspect. Сформулированные методические рекомендации приведены в тексте диссертационной работы и могут быть полезны специалистам компаний, которые используют этот программный продукт.

Возможность и целесообразность применения результатов обработки методом ПРО в интерпретации данных была показана в настоящей главе **в пятом разделе**. Добавление в качестве дополнительного атрибута интервальных скоростей ПРО в стандартную схему классификации при динамической интерпретации показало, что при таком варианте расчета на схеме временных толщин четче разделяются области с улучшенными коллекторскими свойствами, более однозначно проводится линия глинизации коллекторов.

Представленные в главе примеры позволили выявить преимущества метода миграции ПРО перед миграцией Кирхгофа. Приведенные результаты продемонстрировали такие возможности применения миграции ПРО для решения геолого-геофизических задач, как: получение хорошо разрешенных

сейсмических временных разрезов с прослеживаемыми сейсмическими отражениями в условиях круто падающих границ и складчатых зон, получение разрезов интервальных скоростей – в качественном отношении информативных данных для интерпретации.

Заключение

В настоящее время существует целый ряд методов миграционных преобразований, способов решения обратной кинематической задачи и получения изображения среды. Каждый метод имеет свои преимущества, а также свои ограничения и недостатки, позволяющие сделать выбор в пользу одного или другого метода. Однако основным недостатком абсолютно всех методов является отсутствие универсальности. Поэтому важно понимание возможностей того или иного способа при работе в конкретных геологических условиях. В работе было показано, что класс миграций, которые используют среднескоростную модель среды, является по-прежнему актуальным.

В настоящей работе были исследованы возможности метода миграции ПРО, осуществляющей глубинное преобразование через среднескоростную модель, для выявления класса сред, где метод работает эффективно.

Изучение возможностей миграции ПРО проводилось на модельных и на реальных данных в нескольких районах работ, характеризующихся достаточно сложными геологическими условиями: разломами, складчатостью, надвиговой тектоникой. Было выявлено, что для вышеуказанных условий миграция ПРО позволяет получить информативные результаты, достоверность которых подтверждается геологической информацией. Метод позволил получить разрезы, содержащие в поле сейсмических волн элементы, не выявленные в сходных условиях другими методами. Кроме того, было показано, что скорости ПРО являются дополнительным атрибутом при геологическом осмыслении района. Основные структурно-тектонические элементы и фациально-седиментационные зоны находят свое отражение в полученном поле

скоростей ПРО, и результаты на качественном уровне позволяют уточнить геологическое строение территории.

В процессе производственной и научной работы на протяжении нескольких лет были исследованы возможности метода и выработаны пошаговые методические рекомендации по применению миграции ПРО, реализованной в программе ProMig обрабатывающей системы PROspect.

Миграция ПРО является достаточно молодым методом, изучение его возможностей на модельных и реальных данных обуславливает практическую значимость настоящей работы. В работе были показаны возможности миграции для данных 2Д сейсморазведки. Направления дальнейших следований автор видит в изучении возможностей метода для данных трехмерной сейсморазведки в различных геологических условиях.

Основные публикации по теме диссертации в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. **Мраморова И.М.** О выборе инструментов для получения изображения среды в поле упругих волн на двух примерах // Вестник Московского Университета. Серия 4: Геология. 2012. №2. С. 57-61. Импакт-фактор РИНЦ 0.584.

2. **Мраморова И.М.**, Митяев В.В. Опыт обработки сейсмических данных методом параметрической развертки отражений при прогнозе коллекторских свойств перспективных интервалов // Геофизика. 2019. №1. С. 80-86. Импакт-фактор РИНЦ 0.430.

3. **Мраморова И.М.**, Кондрашков В.В. Применение миграции ПРО (параметрической развертки отражений) в обработке данных сейсморазведки 2Д для получения разреза в условиях сложной тектоники // Геофизика. 2019. №2. С. 30-36. Импакт-фактор РИНЦ 0.430.

Иные публикации (в сборниках трудов всероссийских и международных конференций):

1. Кондрашков В.В., Глаголев А.Ю., **Мраморова И.М.** Почему не удается получить адекватную глубинно-скоростную модель по сейсмическим данным? // Сборник тезисов 5-й научно-практической конференции «Тюмень-2017». EAGE, 2017. С. 1-5.

2. Кондрашков В.В., **Мраморова И.М.** Возможности миграции ПРО (Параметрической Развертки Отображений) для дислоцированных неоднородных сред // Сборник тезисов 20-й Научно-практической конференции «Геомодель-2018». EAGE, 2018. С. 1-5.

3. **Мраморова И.М.** Поиск наилучшего способа получения изображения среды с тектоническими надвигами (район Ассам) с помощью волнового моделирования. // Сборник тезисов 8-й международной научно-практической конференции «Геомодель-2011». EAGE, 2011. С. 1-4.

4. **Мраморова И.М.**, Глаголев А.Ю. Анализ сейсмических скоростей, рассчитанных по технологии параметрической развертки отображений (ПРО) // Материалы научно-практической конференции «Сейсмические технологии-2016». М.: Издательство Полипресс, 2016. С. 159-162.

5. **Мраморова И.М.**, Маканова Г.В. Первые результаты применения миграции ПРО на реальных материалах // Материалы научно-практической конференции «Сейсмические технологии-2017». М.: Издательство Полипресс, 2017. С. 89-91.