

На правах рукописи

Давлетханов

Давлетханов Ришат Талгатович

**КОРРЕКЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ
ЗА ВЛИЯНИЕ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА
С СОХРАНЕНИЕМ КИНЕМАТИКИ
ОТРАЖЁННЫХ ВОЛН, СООТВЕТСТВУЮЩИХ
ПЛАСТОВОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ**

Специальность 25.00.10 —

«Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»

Научные руководители:

д-р физ.-мат. наук, профессор

Калинин Виктор Васильевич

д-р техн. наук

Жуков Александр Петрович

Официальные оппоненты:

Каштан Борис Маркович,

д-р физ.-мат. наук, профессор,

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», заведующий лабораторией динамики упругих сред кафедры физики Земли физического факультета

Белоусов Александр Валерьевич,

канд. техн. наук, доцент,

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», доцент кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем факультета геологии и геофизики нефти и газа

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт»

Защита состоится 24 мая 2017 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 501.001.64 при Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, РФ, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, МГУ имени М. В. Ломоносова, геологический ф-т, ауд. 308.

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале Отдела диссертаций Научной библиотеки МГУ (Ломоносовский проспект, д. 27, Фундаментальная библиотека, сектор «А», 8-й этаж, к. 812) и на сайте в системе «Наука-МГУ» («ИСТИНА») по адресу: <https://istina.msu.ru/media/dissertations/dissertation/256/1f9/47646081/dissertation1.pdf>.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Никулин Борис Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Несмотря на то, что Западная Сибирь уже давно находится в стадии глубокого освоения, она продолжает лидировать в списке регионов России по объёмам добываемой нефти и газа. Однако все крупные месторождения, характеризующиеся высокоамплитудными структурными аномалиями, давно изучены, и оставшиеся неосвоенные ресурсы сосредоточены в объектах, имеющих малые площадные размеры и амплитуды. В настоящее время наблюдается общая тенденция к снижению коэффициента успешности поисковых работ, который в целом по России находится на уровне 0,25–0,30. Одним из существенных факторов, определяющих снижение коэффициента успешности поисковых работ, является неподтверждаемость объектов, выявленных сейсморазведкой. Основной причиной неподтверждаемости является низкая точность сейсморазведки [Долгих, 2014].

Например, сегодня, когда все крупные месторождения нефти и газа уже изучены и разбурены, сейсморазведочные работы нацелены на поиск низкоамплитудных малоразмерных структурных аномалий (с поперечными размерами 2–5 км и амплитудой 10–15 м). Для обнаружения таких аномалий с вероятностью 90 % необходимо, чтобы погрешность определения глубины была в 2 раза меньше амплитуды, т. е. критической можно считать точность ± 5 м [Долгих, 2014].

Верхняя часть разреза (ВЧР) представляет собой крайне неоднородную среду. На большей части Западной Сибири она включает в себя зону малых скоростей (ЗМС), подстилаемую зоной многолетнемёрзлых пород (ЗММП). Перед восстановлением параметров нижней (целевой) части разреза, требуется учесть ВЧР. Для этих целей традиционные методы обработки предполагают использование аппарата статических поправок. Однако условие его применимости зачастую не выполняется, что приводит к некорректному учёту ВЧР, и, как следствие, к ошибкам в сейсмоструктурных построениях глубинных горизонтов. Величина этих ошибок значительно превосходит критический уровень точности в 5 м. Поэтому правильный учёт неоднородностей ВЧР является актуальной задачей.

С ещё большими сложностями мы сталкиваемся в условиях Восточной Сибири, где развит трапповый магматизм. Таким образом, задача учёта неоднородностей ВЧР не привязана к какому-либо конкретному региону. Более того, она является актуальной и в случае морских сейсморазведочных работ [Baixas et al., 1997].

Целью данной работы является повышение точности сейсмоструктурных построений.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать, как разные способы учёта неоднородностей ВЧР влияют на результат кинематической инверсии.
2. Проанализировать зависимость этого влияния от размеров неоднородностей ВЧР.
3. Предложить корректные способы учёта неоднородностей ВЧР.

Научная новизна:

1. Впервые показано искажающее влияние средне- и длиннопериодных статических поправок на результат кинематической инверсии, выполняемой R -способом и методом взаимных точек.
2. Впервые опробовано кинематико-динамическое преобразование для коррекции статических поправок.
3. Предложен способ параметризации годографа ОГТ отражённой волны (гиперболоид + трендовая составляющая статических поправок), который позволяет получить практически неискажённую глубоко-скоростную модель (ГСМ).

Практическая значимость определяется высокой стоимостью бурения поисковой скважины (миллионы долларов). Как уже отмечалось, сегодня коэффициент успешности в среднем составляет 0,25–0,30. Таким образом, экономически более целесообразно использовать может быть более сложную (более дорогую) методику обработки данных, чем сэкономить на обработке и не попасть скважиной в структурную аномалию.

Методология и методы исследования. Были опробованы различные методики коррекции неоднородностей ВЧР на синтетических данных 2D и 3D и реальном материале 3D.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Если для компенсации влияния средне- и длиннопериодных неоднородностей ВЧР использовать аппарат статических поправок, то получаемая ГСМ оказывается недостоверной.
2. Короткопериодные неоднородности ВЧР, наоборот, должны учитываться статическими поправками. Если их также включать в ГСМ, то модель получается негладкой, и, как следствие, результат миграции в такой модели оказывается хуже.
3. Если для параметризации годографа ОГТ отражённой волны использовать не обычный гиперболоид, а гиперболоид + трендовая составляющая статических поправок, то точность восстановления ГСМ по такой кинематике возрастает. Аналогичный положительный эффект имеет место, если для описания кинематики использовать кинематико-динамическое преобразование.

Достоверность полученных результатов демонстрируется на синтетических данных 2D и 3D. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на пяти научно-практических конференциях:

1. Давлетханов Р., Лангман С., Силаенков О. Коррекция статических поправок с сохранением кинематики отражённых волн, соответствующих пластовой модели среды // 14-я международная научно-практическая конференция по проблемам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных при геологическом моделировании месторождений углеводородов «Геомодель 2012». — EAGE. Геленджик, Россия, сент. 2012.
2. Давлетханов Р., Лангман С., Силаенков О. Кинематико-динамическое преобразование в задаче коррекции статических поправок // Международная научно-практическая конференция «Тюмень 2013: Новые геотехнологии для старых провинций». — EAGE. Тюмень, Россия, март 2013.
3. Давлетханов Р. Учёт остаточных высокочастотных статических поправок в данных, соответствующих наблюдениям на неплоской линии приведения // Научно-практическая конференция «Сейсмические технологии-2014». — Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М. В. Ломоносова, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, АО «ЦГЭ», ЕАГО. Москва, Россия, апр. 2014.
4. Давлетханов Р. Учёт влияния ВЧР при построении глубинно-скоростной модели среды // Научно-практическая конференция «Сейсмические технологии-2015». — Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М. В. Ломоносова, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, АО «ЦГЭ», ЕАГО. Москва, Россия, апр. 2015.
5. Давлетханов Р., Силаенков О. Параметризация годографа для описания ВЧР // Научно-практическая конференция «Сейсмические технологии-2016». — Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М. В. Ломоносова, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, АО «ЦГЭ», ЕАГО. Москва, Россия, апр. 2016.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в разработке методики, подходов к задаче коррекции статических поправок на основе кинематико-динамического преобразования и комплексной параметризации годографа. Также автор участвовал в разработке программного обеспечения Prime (адаптация к новым методикам обработки), опробовал программы и алгоритмы на модельных и реальных материалах, формировал системы тестов для выявления сильных и слабых сторон новых и традиционных подходов к поставленным задачам.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 5 — в тезисах докладов.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 177 страниц,

включая 76 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 94 наименования.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена обзору научной литературы по изучаемой проблеме. Приводятся различные типы неоднородностей ВЧР, и даётся описание аппарата статических поправок как наиболее общеупотребительного метода компенсации влияния этих неоднородностей. Рассматриваются два широко распространённых способа расчёта предварительных статических поправок: по параметрам взрывных скважин и по головным волнам. Также даётся модель остаточных (корректирующих) поправок — многофакторная модель статического сдвига. Приводятся недостатки такой модели — она обладает дефектом (плавные составляющие статик определяются с точностью до полинома даже при точно известных сдвигах [Глебов, 2006]) и, что более важно, она является плохо обусловленной (из-за неизбежно присутствующих погрешностей в исходных сдвигах плавные составляющие статик не могут быть найдены в принципе [Wiggins et al., 1976]).

Наиболее полно современное состояние проблемы коррекции статических поправок отражено в монографиях [Сох, 1999; Козырев и др., 2003; Сысоев, 2011; Долгих, 2014]. Данной проблемой занималось множество авторов: [Taner et al., 1974; Wiggins et al., 1976; SÁghy, Zelei, 1975; 1980; Booker, 1976; Larnier et al., 1979; Taner, Koehler, 1981; Глоговский и др., 1982; Глоговский, Хачатрян, 1986; Сысоев, 2004; 2008; 2012; Черняк, 2006; 2007; Черняк, Гриценко, 2009; Долгих, 2007; 2008; 2010; Завьялов, 2010; 2012; Коротков, Козырев; 2011]. Здесь перечислены далеко не все исследователи этой задачи, которая по-прежнему остаётся одной из ключевых в обработке сейсмических данных.

В завершении первой главы устанавливается связь между статическими поправками и глубинно-скоростной моделью (ГСМ) среды. Поскольку неоднородности ВЧР искажают не только время нормального отражения t_0 , но и эффективную скорость $V_{\text{ОГТ}}$, то в тех случаях, когда расчёт глубины отражающей границы ведётся с использованием этих двух кинематических параметров, требуется предварительная их корректировка за ВЧР. Наиболее часто это выполняется с помощью статических поправок. Однако в тех условиях, когда они применяются при несоблюдении модельных предположений о вертикальности луча в ВЧР (рельеф, мерзлота), не обеспечивается полная корректировка $V_{\text{ОГТ}}$. Существуют способы устранения остаточных аномалий $V_{\text{ОГТ}}$ [Долгих, 2007; 2008; 2010; Черняк, 2006; 2007; Черняк, Гри-

ценко, 2009], но для существенно негиперболических годографов ОГТ эти приёмы могут не подходить.

Поэтому в конце главы выдвигается предположение, что в тех случаях, когда заложенные в модель статики условия не выполняются (например, рельеф или мерзлота), альтернативным подходом к учёту аномалий ВЧР может быть использование ГСМ, а не аппарата статических поправок. Это касается только длиннопериодных (низкочастотных) неоднородностей, так как включение короткопериодных (высокочастотных) аномалий в ГСМ может быть затруднено. Поэтому последние кажется разумным учитывать традиционным образом, т. е. с помощью статики.

Во **второй главе** исследуется влияние коротко- и длиннопериодных статических поправок на результат решения обратной кинематической задачи.

На синтетических 2D данных иллюстрируется, что в некоторых случаях компенсация влияния неоднородностей ВЧР статическими поправками может оказаться губительной для последующих структурных построений. В частности, ошибка определения глубины границы может достигать 100 м при истинной глубине 500 м, а ошибка в пластовой скорости — 800 м/с при истинном значении 1800 м/с. Такие погрешности возникают при вводе достаточно больших поправок (~ 100 мс). Более корректный способ — пересчёт поля на основе волнового уравнения — на начальном этапе непригоден из-за наличия в данных высокочастотных подвижек («дребезг» в данных).

В качестве альтернативы предлагается использовать *«кинематико-динамическое преобразование»* — это метод нахождения поля времён отражённых волн из их глубинных образов (возможно, даже далёких от истинных). В 80-х гг. данный способ был предложен В. М. Глоговским для прослеживания сложных синфазностей на временных разрезах [Глоговский и др., 1982]. Позже метод был обобщён С. Л. Лангманом для оценивания поля времён на сейсмограммах [Лангман, Силаенков, 2011]. Ими было доказано, что если удаётся проследить остаточные годографы в глубинной области после миграции (даже в случае неверно заданной модели среды), то по этим годографам восстанавливается верное поле времён, что позволяет правильно решать обратную кинематическую задачу. Эти остаточные годографы имеют существенно более простую форму, чем годографы во временной области, что облегчает их параметризацию. Если миграция осуществляется в сортировке равных удалений, то во многих ситуациях остаточный годограф неплохо аппроксимируется гиперболой, даже если годограф во временной области существенно негиперболический. Важно также то, что по мере уточнения модели остаточный годограф приближается к горизонтальной синфазности, так что даже неточная его аппроксимация в первоначальной модели может служить неплохим приближением для сходящегося итеративного процесса оценивания кинематических параметров среды.

Кинематико-динамическое преобразование осуществляется в три шага:

1. Глубинная миграция до суммирования в априорной модели с выводом сейсмограмм общей точки изображения (common image gather) или ОТИ (CIG).
2. Корреляция горизонта в глубинной области и гиперболическая параметризация остаточной кинематики (RNMO) по формуле:

$$h(l) = \sqrt{h_0^2 + al^2},$$

где $h(l)$ — глубина отражающей границы на удалении l ; h_0 — глубина, полученная при миграции разреза нулевых удалений; a — параметр гиперболичности.

3. Решение прямой кинематической задачи от границы $h(l)$ для каждого удаления l .

Здесь важно то, что ГСМ может быть задана весьма приблизительно, прослеживание в глубинной области существенно облегчается по сравнению с временной, даже если пластовые скорости весьма далеки от истинных.

Эффективность данной технологии демонстрируется как при отсутствии высокочастотных статических подвижек, так и при их наличии. В обоих случаях использование этого метода позволяет получить практически неискажённую ГСМ. Построив её, приступают к коррекции остаточных неоднородностей, которые не попали в модель, с помощью статических поправок. Автор даёт следующую рекомендацию — высокочастотные неоднородности надо учитывать с помощью статических поправок, а средние и низкочастотные необходимо, по возможности, включать в пластовую модель.

В третьей главе предлагается ещё один вариант описания годографа ОГТ отражённой волны (комплексная параметризация), который призван дополнить кинематико-динамическое преобразование.

Как следует из выводов ко второй главе, иногда использование статических поправок с целью приведения годографа к гиперболической форме может оказать фатальное воздействие на последующие глубинные построения. Кинематико-динамическое преобразование решает данную проблему, но не во всех ситуациях в результате миграции, которая является неотъемлемой частью этого преобразования, можно гарантировать существенное улучшение прослеживаемости синфазности на глубинном разрезе и упрощение годографа на мигрированных сейсмограммах. Такие сложности могут возникать в случае сильно неоднородной ВЧР и редких данных. Использование не гиперболической функции, а, например, кривой более высокого порядка, также не всегда возможно из-за низкой плотности данных.

Поэтому предлагается *комплексное описание годографа*:

1. Параметризация годографа ОГТ отражённой волны от опорного горизонта аналитической функцией (например, гиперболой) — подбираются время нормального отражения t_0 и скорость суммиро-

вания V_{st} , которые наилучшим образом описывают наблюдаемые времена.

2. Расчёт статических поправок в двухфакторной модели статики относительно поля времён из п. 1.
3. Выделение трендовой (гладкой) составляющей из рассчитываемых статических поправок. Тренд T считается поверхностно-согласованным, т. е. зависящим только от положения ПВ и ПП.
4. Корректирование поля времён из п. 1 — прибавление к нему трендовой составляющей статических поправок. Здесь используется следующее соглашение о знаке статических поправок — положительная поправка уменьшает время, т. е. поправки вычитаются.

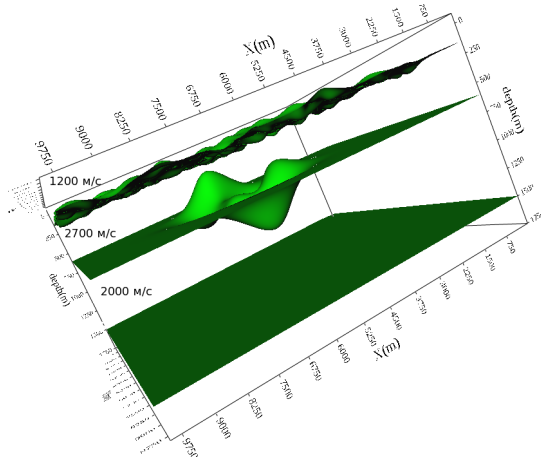
Таким образом, время t отражённой волны считается по формуле:

$$t(x_s, y_s, x_r, y_r) = \sqrt{t_0^2(x_m, y_m) + \left[\frac{l(x_s, y_s, x_r, y_r)}{V_{st}(x_m, y_m)} \right]^2} + T(x_s, y_s) + T(x_r, y_r), \quad (1)$$

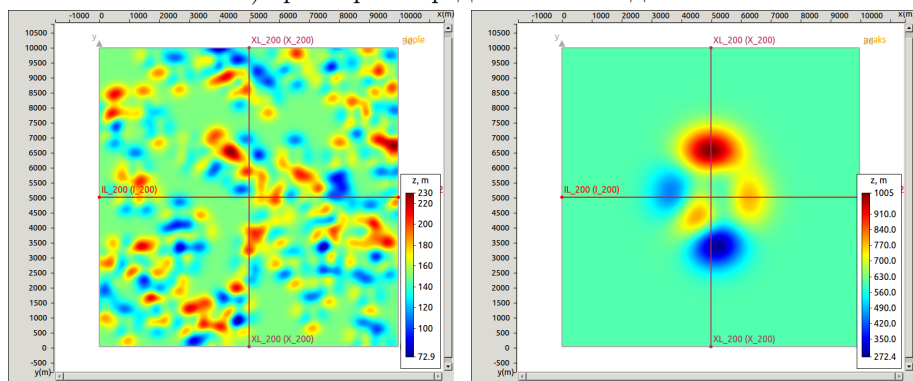
где (x_s, y_s) , (x_r, y_r) , (x_m, y_m) — координаты ПВ, ПП, ОСТ соответственно; $t_0(x_m, y_m)$ и $V_{st}(x_m, y_m)$ — время нормального отражения и скорость суммирования в точке с координатами ОСТ; l — 2D удаление ПВ-ПП; $T(x_s, y_s)$ и $T(x_r, y_r)$ — значение тренда статических поправок в точках с координатами ПВ и ПП соответственно.

Первое слагаемое в правой части выражения (1) — это обычный гиперболоид, относительно которого рассчитывается вся статика. Второе и третье слагаемые являются гладкими поправочными членами, которые превращают обычный гиперболоид в «мятый». Необходимость использования этих дополнительных членов связана с тем, что, во-первых, иногда природа поправок, которые ищутся как статические, таковой не является (например, часть из них может быть связана с неучётом азимута ПВ-ПП), поэтому их надо исключать перед решением обратной кинематической задачи. Вообще говоря, для 3D данных необходимо проводить скоростной анализ по азимутам, т. е. гиперболоид вращения для них не годится. Однако в силу редкой системы наблюдений это не всегда возможно. Поэтому автор во всех своих работах и на модельных, и на реальных данных 3D использовал формулу (1) без изменений, и, несмотря на то, что фактор, связанный с неучётом азимута, не является статическим, его, тем не менее, неплохо удаётся учесть с помощью аппарата статических поправок (показано в четвёртой главе на стр. 17). Во-вторых, по мере итеративного уточнения кинематических и статических поправок вносится гладкая компонента статики в t_0 , которая также должна быть исключена перед решением обратной задачи. В-третьих, сложная форма годографа, которую удаётся описать статическими сдвигами, объясняется сложностью ВЧР, а не условиями взрыва-приёма, имеющими статический характер.

Таким образом, в данной методике не все поверхностно-согласованные сдвиги используются для коррекции статики, а только короткопериодные. Длиннопериодные статические поправки (тренд), наоборот, применяются для описания кинематики (отсюда и название «комплексная параметризация»). Выделение трендовой составляющей из рассчитываемых статических поправок позволяет разделить неоднородности, которые должны быть учтены с помощью модели, и которые разумно скорректировать с помощью статических поправок. В отличие от кинематико-динамического преобразования данная технология работает даже в случае сильно неоднородной ВЧР и неплотной системы наблюдений. В третьей главе эта методика демонстрируется на синтетических 3D данных.



а) трёхмерное представление модели



б) карта глубин горизонта **ripple**

в) карта глубин горизонта **peaks**

Рис. 1 — Пластовая ГСМ 3D, использовавшаяся для эксперимента

На **рис. 1** представлена использовавшаяся для эксперимента пластовая GCM 3D, состоящая из трёх слоёв¹:

1. **ripple** (пластовая скорость 1200 м/с);
2. **peaks** (пластовая скорость 2700 м/с);
3. **horiz** (пластовая скорость 2000 м/с).

Вся сложность модели заключается в поведении глубинных границ, особенно в ВЧР, где они существенно трёхмерны. Для простоты пластовые скорости в пределах каждого пласта не меняются, но имеется инверсия скоростей — высокоскоростной второй слой **peaks**, окружённый сверху и снизу более низкоскоростными слоями. Такая ситуация может наблюдаться в зонах развития вечной мерзлоты в сезоны оттаивания. Кровля мёрзлого слоя **peaks** (т. е. горизонт **ripple**) имеет короткопериодные низкоамплитудные вариации, его подошва (т. е. сам горизонт **peaks**), наоборот, характеризуется длиннопериодными высокоамплитудными изменениями.

В этой модели было выполнено 3D волновое моделирование с параметрами, перечисленными в **табл. 1**. Однако моделирование отражённых волн производилось лишь от второй и третьей границ (**peaks** и **horiz** соответственно), а отражение от первого горизонта **ripple** специально не моделировалось, так как считалось, что отражённая волна от этой границы недоступна для наблюдения. При такой неплотной системе наблюдений 3D, как в **табл. 1**, подобная ситуация не является редкостью — зафикси-

¹Здесь и далее слои именуются по названию горизонта, являющегося их подошвой, а пластовая скорость, приписываемая к горизонту, относится к слою, расположенному непосредственно над этим горизонтом.

Таблица 1 — Параметры моделирования

Параметр	Ед. изм.	Значение
Площадь грида	км ²	100 км ² (10 км × 10 км)
Тип сейсмической расстановки		крест
Активная расстановка	канал	2541 (21 ЛПП по 121 ПП)
Шаг между линиями ПВ	м	300
Шаг между линиями ПП	м	300
Шаг между ПВ вдоль линии	м	50
Шаг между ПП вдоль линии	м	50
Удаление ПВ-ПП по X	м	от −3000 до 3000, шаг 50
Удаление ПВ-ПП по Y	м	от −3000 до 3000, шаг 50
2D удаление ПВ-ПП	м	от 0 до 4250, шаг 50
Размер ОГТ-бина	м	25 × 25
Кратность наблюдений	трасс	100 (max 121)
Общее количество ПВ	шт.	6834 (34 ЛПВ по 201 ПВ)
Общее количество ПП	шт.	6834 (34 ЛПП по 201 ПП)
Общее количество трасс	трасс	12 632 107
Диапазон частот	Гц	5–60

ровать отражение от горизонта, располагающегося на глубине 150 м, на достаточном количестве каналов невозможно. Например, в тех ОГТ, которые располагаются между линиями пунктов возбуждения (ЛПВ) и линиями пунктов приёма (ЛПП), есть только трассы начиная с удаления $\sqrt{300^2 + 300^2} \approx 424$ м, что почти в три раза превосходит глубину первого горизонта.

При обработке сейсмических данных пластовая ГСМ строится сверху вниз, слой за слоем. При этом всегда строят эффективную модель среды, состоящую из не очень большого количества слоёв (существенно меньше, чем количество синфазностей, наблюдаемых на волновой картине). Подобного рода модель является упрощённым представлением реальной среды, поэтому параметры подбираемой модели имеют интегральный характер. В одних случаях невключение того или иного реального горизонта в эффективную модель вполне допустимо. Например, переслаиваемую пачку, состоящую из тонких слоёв близких по литологическому составу, заменяют одним толстым пластом. Поскольку плотности таких слоёв и скорости в них примерно одинаковы, то их можно объединять (хотя их и разделить-то было бы трудно из-за слабой отражённой волны и интерференции). Однако бывают ситуации, когда отражение от горизонта недоступно для наблюдения. В модели из [рис. 1](#) таким горизонтом является *ripple*, причём он разделяет абсолютно разные слои (со скоростями 1200 м/с и 2700 м/с). На этой границе происходит сильное преломление луча, поэтому не включать её в эффективную модель нельзя.

Для восстановления данной границы применялась *реконструкция* — метод построения эффективной пластовой модели ВЧР, когда один слой разбивается на два [Анисимов и др., 2015]. Для этого должны быть известны два параметра так называемого опорного горизонта:

1. глубина;
2. образ во временной области (не только t_0 , но и времена для разных пар ПВ-ПП с различными удалениями и азимутами).

При реконструкции производится вставка горизонта над опорным таким образом (т. е. слой разбивается на два), чтобы минимизировать невязку между наблюдаемыми временами отражённых волн от опорного горизонта и временами, которые соответствуют подбираемой модели. При этом варьируются три параметра: конфигурация вставляемого горизонта и две пластовые скорости (над и под ним). В 3D случае все три параметра являются функциями от (x, y) .

Оказывается, если реальную среду в интервале глубин от свободной поверхности до опорного горизонта удаётся описать некой кинематически эквивалентной средой (т. е. времена отражённой волны от опорного горизонта, получаемые при решении прямой кинематической задачи в подобранной модели, с приемлемой точностью совпадают с наблюдаемыми времена от него), то это обеспечивает правильное восстановление параметров нижеле-

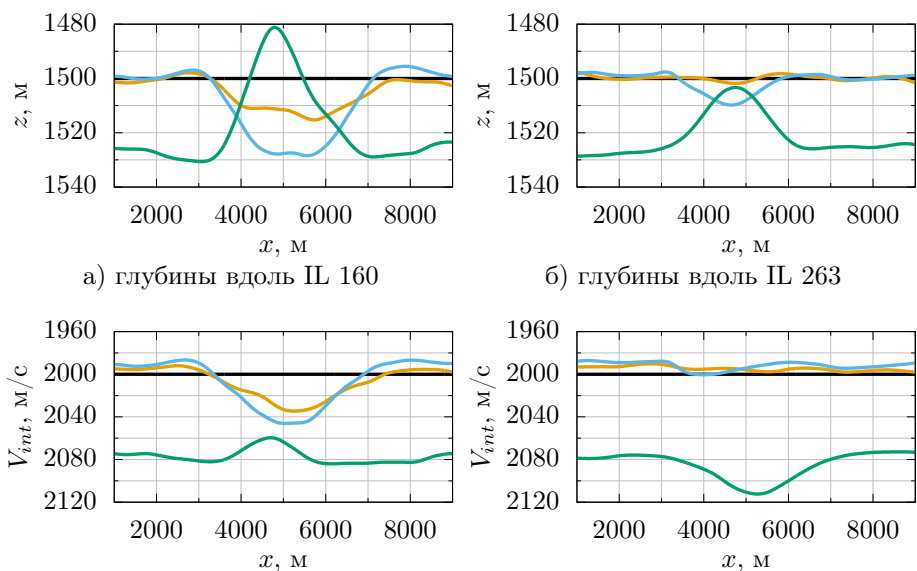
жащих пластов. Это утверждение было высказано В. М. Глоговским, оно не доказано, но его справедливость многократно подтверждена практикой, по крайней мере, для изотропных сред [Глоговский, Лангман, 2009]. Стоит отметить, что опорный горизонт не может быть очень глубоким, так как должна быть известна его глубина, но он и не может залегать слишком мелко, так как в этом случае параметризация времён отражённых волн от него может быть не обеспечена плотностью сейсмических съёмки. Таким способом можно построить эффективную модель даже для многослойной пачки, используя, при необходимости, каскад реконструкций. Вставляемые при этом горизонты являются фиктивными, они могут не иметь ничего общего с реальностью, но, тем не менее, позволяют описать реальную среду кинематическим эквивалентом, что достаточно для корректных структурных построений более глубоких границ. Ведь именно это является главной задачей глубинной сейсморазведки, а не детальная модель ВЧР.

В модели из [рис. 1](#) в качестве опорного горизонта был выбран **peaks**. В итоге верхняя часть разреза была учтена тремя различными способами:

1. С помощью реконструкции с учётом тренда статических поправок — параметризация годографа производилась по формуле (1) с использованием поправочных членов $T(x_s, y_s)$ и $T(x_r, y_r)$. В исходные модельные данные вводилась только высокочастотная компонента корректирующих статических поправок.
2. С помощью реконструкции без учёта тренда статических поправок — параметризация годографа выполнялась по формуле (1) без применения поправочных членов $T(x_s, y_s)$ и $T(x_r, y_r)$. В исходные модельные данные вводилась вся корректирующая статика.
3. С помощью модели замещения со скоростью 2220 м/с (вариант классической обработки). В исходные модельные данные вводилась вся корректирующая статика и статика за замещение слоя.

В дальнейшем, учитывая построенную разными способами ГСМ для верхней части разреза, была предпринята попытка к построению ГСМ для низа (горизонт **horiz**). Независимо от того, какой подход был использован для учёта верха, для построения ГСМ для нижней части разреза использовалось кинематико-динамическое преобразование как наиболее универсальное средство.

Обобщение финальных результатов по нижнему горизонту **horiz** в виде сечений поверхностей глубин и пластовых скоростей вдоль линий П 160 и П 263 приводится на [рис. 2](#). Из-за возможных краевых эффектов сечения поверхностей соответствуют не всему гриду (слева и справа отрезано по 1 км). Чёрная кривая показывает истинные глубину и скорость. Из всех графиков можно сделать вывод, что классическая обработка с помощью замещения слоя даёт наибольшие погрешности в глубинах и пластовых скоростях (зелёная кривая). Даже не обращая внимания на систематическую погрешность, которая связана, скорее всего, с неправильно



а) глубины вдоль IL 160 б) глубины вдоль IL 263
 в) пластовые скорости вдоль IL 160 г) пластовые скорости вдоль IL 263

Рис. 2 — Сопоставление результатов, полученных разными методами по горизонту *horiz*, вдоль линий IL 160 (левая колонка) и IL 263 (правая колонка). Обозначения: — истинная глубина/скорость; — использовалась вставка с учётом тренда; — использовалась вставка без учёта тренда; — использовалась модель замещения

выбранной скоростью замещения, дисперсия оказывается больше. Методы, основанные на реконструкции ВЧР, менее подвержены ошибкам. Даже при неучёте трендовой составляющей статических поправок результат ближе к истинному (голубая кривая). В случае, если этот тренд прибавлять к гиперболическим годографам, ответ почти идеален (оранжевая кривая).

Итак, на модельном примере 3D были опробованы три метода: два со вставкой горизонта (с учётом тренда статических поправок и без) и один без вставки (с помощью модели замещения). Было установлено, что наименьшие погрешности в глубинах и скоростях получаются при применении вставки с учётом тренда, а наибольшие — при использовании модели замещения.

Во второй и в третьей главах ставились эксперименты на модельных сейсмических данных. Хотя автор и старался использовать ГСМ, которые могут описывать реальные среды, возможно, это удалось не в полной мере, так как мощности ЗМС были несколько завышены. Это было обусловлено тем, что огромная мощность ЗМС является одним из главных факторов, нарушающих предположение вертикальности луча в верхнем слое, поэтому в таких неблагоприятных условиях результаты эксперимента казались наиболее яркими.

Однако значительные погрешности в структурном плане при использовании аппарата статических поправок возможны и в «нормальных» условиях (даже при малой мощности ЗМС и отсутствии мерзлоты). Это иллюстрируется в **четвёртой главе**. В рамках одного производственного проекта, в котором автор принимал непосредственное участие, стояла задача моделирования и анализа сейсмических волновых полей с целью повышения эффективности методик проектирования полевых сейсмических наблюдений и обработки сейсмических данных. Стояла задача подбора оптимальных параметров системы полевых наблюдений, позволяющих построить адекватную ГСМ. Всего анализировалось пять различных систем наблюдений, которые отличались между собой плотностью расположения ПВ и ПП. Поскольку сама задача планирования сейсмических съёмок не имеет прямого отношения к теме диссертации, то в работе проиллюстрирован только один набор данных, соответствующий наиболее типичной системе полевых наблюдений, используемой в настоящее время в России (**табл. 2**). Обработка данных производилась по технологии, описанной в третьей главе.

Таким образом, в четвёртой главе снова показаны модельные данные. Однако на этот раз геолого-геофизическая модель, содержащая 42 горизонта, была предоставлена высококвалифицированными геологами. Она была создана ими на основе всей имеющейся информации об одной из областей Восточно-Европейской платформы. Для создания модели использовались данные 248 скважин и многочисленные геологические карты. Такая модель с достаточно высокой точностью описывает реальную среду. Поэтому можно сказать, что этот эксперимент был поставлен на псевдо-реальных данных.

Таблица 2 — Параметры моделирования

Параметр	Ед. изм.	Значение
Площадь грида	км ²	185,7 км ² (12175 м × 15250 м)
Тип расстановки		крест
Активная расстановка	канал	3718 (22 ЛПП по 169 ПП)
Шаг между линиями ПВ	м	300
Шаг между линиями ПП	м	200
Шаг между ПВ вдоль линии	м	50
Шаг между ПП вдоль линии	м	25
Удаление ПВ-ПП по X	м	от –2100 до 2100, шаг 25
Удаление ПВ-ПП по Y	м	от –2100 до 2150, шаг 50
2D удаление ПВ-ПП	м	от 0 до 3000, шаг 25
Размер ОГТ-бина	м	12,5 × 25,0
Кратность наблюдений	трасс	77 (max 88)
Общее количество ПВ	шт.	5994 (27 ЛПВ по 222 ПВ)
Общее количество ПП	шт.	37037 (77 ЛПП по 481 ПП)
Общее количество трасс	трасс	21 779 199

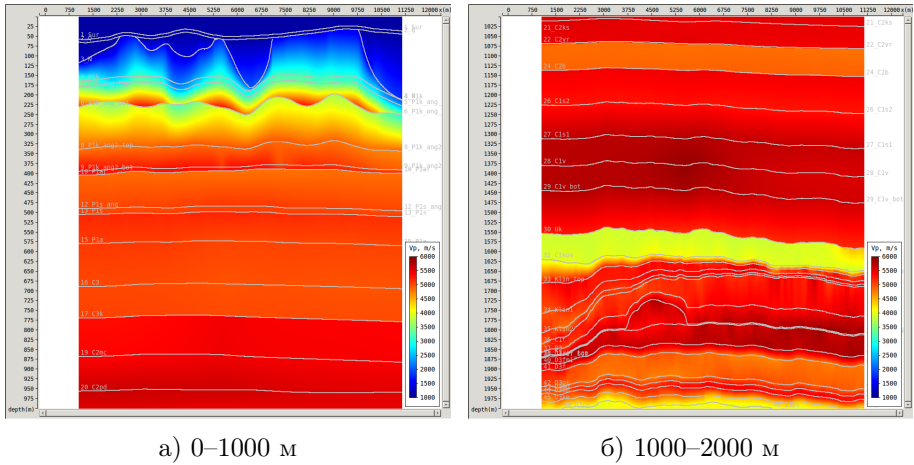
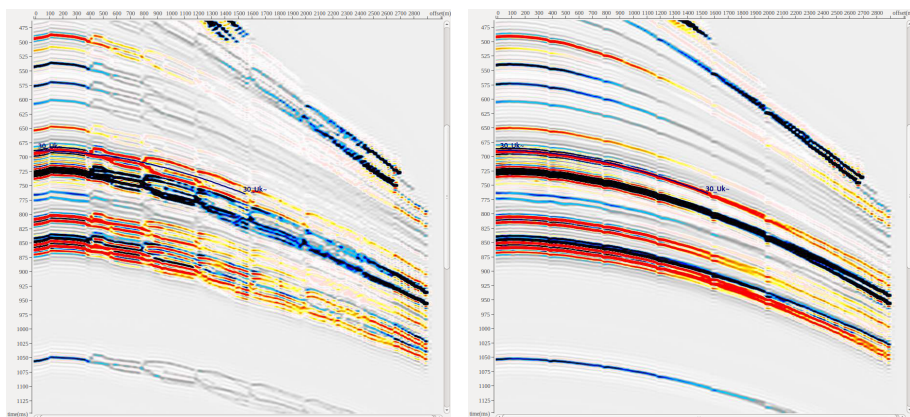


Рис. 3 — Сечение куба скоростей продольных волн (V_p) вдоль линии IL 305

Сечение куба скоростей продольных волн (V_p) вдоль центральной линии IL 305 представлено на **рис. 3**. В верхней части разреза присутствуют как низкоскоростные, так и высокоскоростные аномалии; встречаются области с выклиниванием. Также имеются инверсионные слои (с пониженной пластовой скоростью). Помимо куба куба скоростей продольных волн (V_p) для моделирования использовались в том числе куб скоростей поперечных волн (V_s) и куб плотностей (ρ). В этой модели было выполнено 3D лучевое моделирование в истинных амплитудах (с учётом геометрического расхождения, коэффициентов прохождения/отражения, характеристики направленности ПП) с параметрами, перечисленными в **табл. 2**.

В третьей главе отмечалось, что в силу редкой системы наблюдений для скоростного анализа по 3D данным не всегда возможно применять многопараметрические функции. Поэтому для этих данных использовался гиперболоид вращения. В дальнейшем эта кинематика была опорой для расчёта остаточных статических поправок. Естественно, не все сдвиги, которые искались как статические, были связаны со статикой. Например, в 3D случае на сейсмограмме ОГТ, трассы которой упорядочены по удалению ПВ-ПП без учёта азимута ПВ-ПП, имеет место дребезг трасс, который связан сразу с двумя факторами: со статикой и с неучётом азимута (**рис. 4а**). Несмотря на то, что второй из них не является статическим (т. е. постоянным для всей трассы), его, тем не менее, неплохо удаётся учесть с помощью аппарата статических поправок (**рис. 4б**).

Как и в третьей главе, ГСМ для верхней части разреза по псевдо-реальным данным строилась тремя различными способами: дважды использовалась реконструкция (с учётом тренда статических поправок и без) и один раз — модель замещения. От последнего способа пришлось сразу отказаться, так как при миграции данных, в которые была введена статика



а) до коррекции статических поправок

б) после коррекции статических поправок

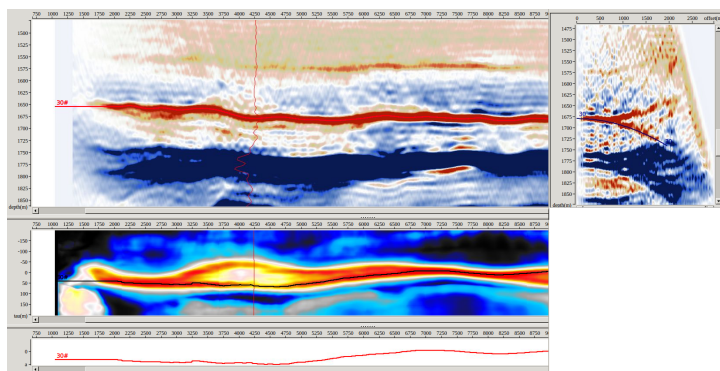
Рис. 4 — Пример суперсейсмограммы, накопленной на базе 13 ОГТ за замещения слоя, синфазности на сейсмограммах ОТИ получались «раздвоенными». Соответственно, спектр остаточной кинематики оказывался не унимодальный. Это хорошо видно из рис. 5а.

Второй результат, полученный при глубинной миграции данных, в которые статическая поправка за замещение слоя не вводилась, изображён на рис. 5б. Здесь спектр всюду унимодальный. Конкретно эти спектры соответствуют тому случаю, когда для учёта верхней части разреза использовалась реконструкция с учётом тренда статических поправок. Однако даже когда тренд не учитывался, но производилась реконструкция, спектры очень похожи друг на друга, поэтому здесь не приводятся.

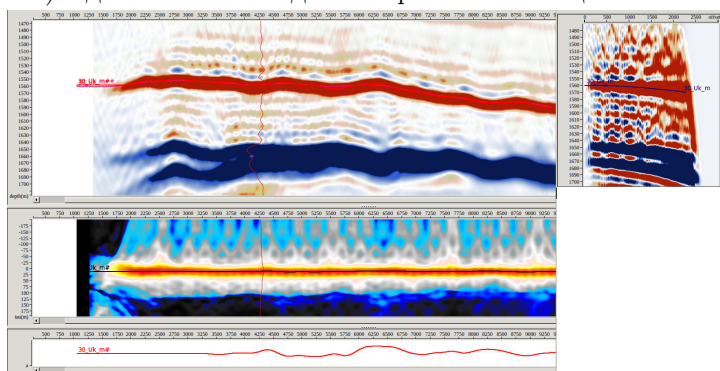
Таким образом, подход, основанный на реконструкции (неважно, с учётом тренда статических поправок или без), оказывается более приспособленным к столь сложной модели. Поэтому в дальнейшем, при восстановлении нижележащей толщи, из трёх моделей верхней части разреза (две по реконструкции и одна по модели замещения) были использованы только две (полученные по реконструкции).

На рис. 6а даётся сопоставление корреляции горизонта 30_Uk (1500–1600 м) по сечению глубинного мигрированного куба вдоль линии П 320, полученного при глубинной миграции в модели, восстановленной с учётом тренда статических поправок. Результат корреляции показан в виде чёрной кривой, а истинный горизонт обозначен серой кривой. Наблюдается незначительное отклонение между двумя горизонтами (до 5 м), возрастающее к краям профиля (до 10 м).

На рис. 6б показан аналогичный результат, но он соответствует корреляции по второму кубу, полученному при глубинной миграции в модели, восстановленной без учёта тренда статических поправок. Здесь отклонение



а) в данные была введена поправка за замещение слоя



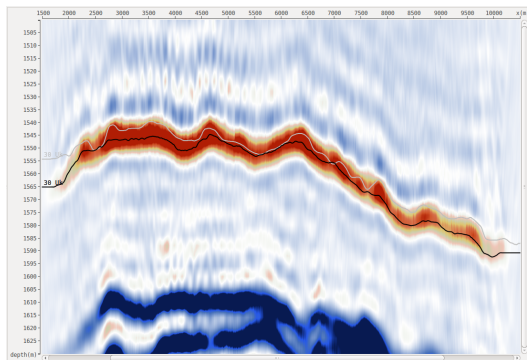
б) поправка за замещение слоя в данные не вводилась

Рис. 5 — Влияние статической поправки за замещение слоя на результат глубинной миграции на линии IL 320. Пояснения к окнам: слева сверху — фрагмент глубинного разреза в окрестности горизонта 30_Uk; слева внизу — горизонтальный спектр остаточной кинематики (RNMO) вдоль 30_Uk; справа сверху — суперсейсмограмма CIG

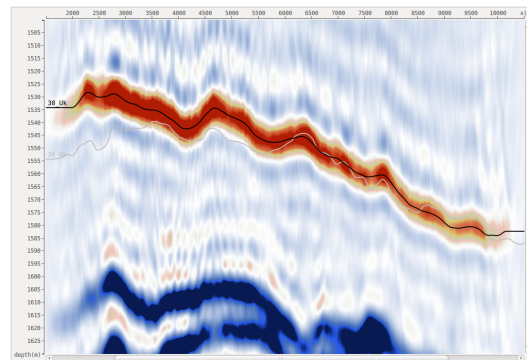
между двумя горизонтами больше — до 10 м в центре линии и до 20 м на её периферии.

Результаты по второму прокоррелированному горизонту 45_D3kn (1900–2100 м) изображены на **рис. 6в** и **рис. 6г**. Здесь невязка несколько выше, так как 45_D3kn глубже 30_Uk на ~500 м, и, следовательно, ошибки, накопленные на верхних горизонтах, усугубляют определение положения нижележащего. При корреляции первого куба ошибка не превосходит 8 м (**рис. 6в**), но при корреляции второго куба она достигает 20–30 м (**рис. 6г**).

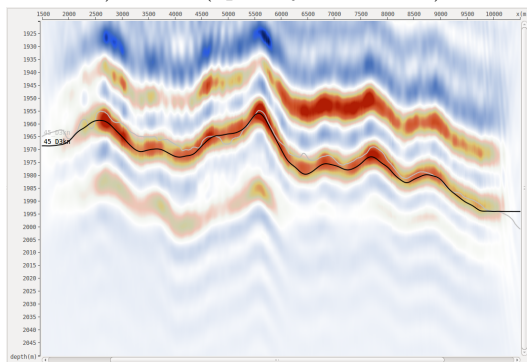
Из сравнения этих рисунков было установлено, что в обоих случаях качество глубинного изображения оказалось практически одинаковым, хотя структурный план — разным. Таким образом, качество глубинного изображения не может быть критерием правильности структурных построений.



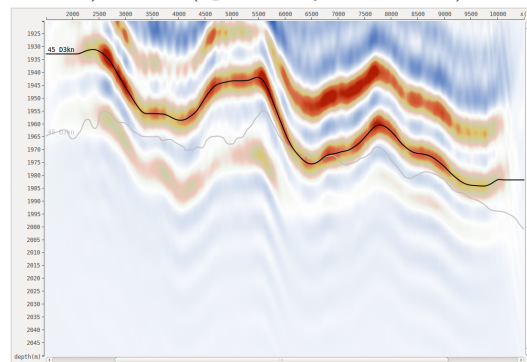
а) 30_Ук (тренд учитывался)



б) 30_Ук (тренд не учитывался)



в) 45_D3kn (тренд учитывался)



г) 45_D3kn (тренд не учитывался)

Рис. 6 — Сопоставление прокоррелированных горизонтов (чёрные кривые) и истинных (серые) на сечении глубинного мигрированного куба вдоль линии ПЛ 320, полученного при глубинной миграции в модели, восстановленной с учётом тренда статических поправок (левая колонка) и без (правая колонка)

В **пятой главе** приводится результат обработки реального 3D материала. Однако подобрать для диссертации такой материал, который:

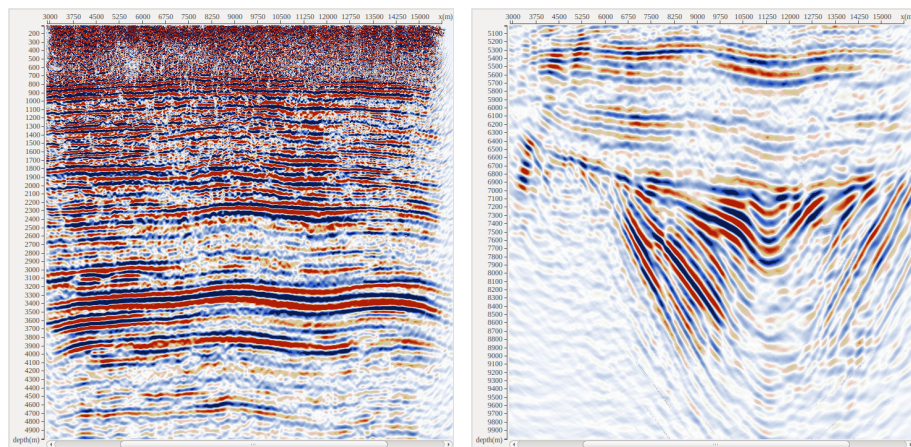
1. можно было бы демонстрировать,
2. был бы осложнён значительными неоднородностями типа «рельеф» или «мерзлота» (т. е. когда модель статики неприемлема, именно в этом случае выигрыш предлагаемой методики наиболее очевиден),
3. был бы подкреплён скважинными данными,

является само по себе непростой задачей. Поэтому в работе были использованы данные (3D), которые удовлетворяют только первым двум пунктам из этого списка. Данные были получены в одном из северных районов Западной Сибири, для которого характерно очень сложное строение ВЧР (чередование мерзлоты и растеплённых зон).

Параметры реальной системы полевых наблюдений здесь не перечислены. Из особенностей можно выделить большой шаг между ЛПВ (400 м) и между ЛПП (300 м). При такой плотности данных детальное построение модели ВЧР, которая устроена очень сложным образом, невозможно.

Построение ГСМ производилось только одним способом — по методике, которая показала наилучшие результаты при обработке модельных и псевдо-реальных данных (в третьей и четвёртой главах соответственно). На **рис. 7** показано сечение глубинного мигрированного куба вдоль линии ПЛ 300.

Полученный результат демонстрирует работоспособность метода, использовавшегося для построения ГСМ. Ввиду отсутствия данных по бурению для этого реального материала нельзя привести аргументов, подтверждающих или опровергающих достоверность глубинных построений. Надо признать, что и отбивок по скважинам для контроля, вообще говоря, недостаточно. Во-первых, они сами могут содержать ошибки. Во-вторых,



а) 100–5000 м

б) 5000–10000 м

Рис. 7 — Сечение глубинного мигрированного куба вдоль линии ПЛ 300

они дают информацию в отдельных точках, не контролирующую целиком изучаемые горизонты. Обычно, когда имеются отбивки по скважинам, их привлекают при кинематической инверсии как априорную информацию, понимая, что несовпадение этих данных с решением может быть обусловлено самыми разными причинами (например, неучётом анизотропных свойств среды). Как уже было показано на псевдо-реальных данных, образ, получаемый при миграции в двух разных моделях (построенных с учётом тренда статических поправок и без), может быть очень похож, хотя структурный план — различным (рис. 6 на стр. 19), так что качество изображения тоже не может быть критерием достоверности обработки. Поэтому единственным объективным обоснованием методики может быть обработка данных «с известным ответом», т. е. синтетики. Именно поэтому модельным исследованиям и была посвящена большая часть работы.

Исходя из сказанного, вторая ветка обработка (без учёта тренда статических поправок) не производилась. Совпадение или различие в результатах не дало бы новой информации в подтверждение преимуществ предлагаемого подхода. Этот вывод вытекает из модельных исследований и общетеоретических соображений.

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. На модельных данных 2D было показано, что в некоторых случаях компенсация влияния неоднородностей ВЧР статическими поправками может оказаться губительной для последующих структурных построений. В частности, ошибка определения глубины границы может достигать 100 м при истинной глубине 500 м, а ошибка в пластовой скорости — 800 м/с при истинном значении 1800 м/с.
2. Для получения неискажённой ГСМ предлагается использовать альтернативный способ — кинематико-динамическое преобразование. Данная технология не требует ввода длиннопериодных статических поправок и непритязательна к точности задания априорной ГСМ для миграции. При использовании этой технологии результирующая ГСМ оказывается более корректной (даже в случае наличия в исходных данных короткопериодных подвижек).
3. Рекомендуются средне- и длиннопериодные неоднородности включать в ГСМ, а не корректировать статическими поправками. Короткопериодные неоднородности, наоборот, надо учитывать с помощью поправок.
4. Была предложена комплексная параметризация годографа отражённой волны (1), которая включает в себя две составляющие: гиперболическую и статическую. Статическая составляющая выделяется из полного набора статических поправок как тренд — гладкая компонента, являющаяся к тому же поверхностно-согласованной. Эта технология особенно актуальна в случае неплотных

данных, когда кинематико-динамическое преобразование использовать затруднительно.

5. Работоспособность комплексной параметризации годографа была продемонстрирована на множестве типов 3D данных (модельных, псевдо-реальных, истинно реальных). Для модельных и псевдо-реальных данных было опробовано три метода: два со вставкой горизонта (с учётом тренда статических поправок и без) и один без вставки (классическая обработка с использованием модели замещения). Было показано, что наименьшие погрешности в глубинах и скоростях получаются при применении вставки с учётом тренда, а наибольшие — в случае использования модели замещения. На истинно реальных была показана лишь работоспособность предлагаемого метода, оценить достоверность полученного результата было невозможно ввиду отсутствия скважинных данных.
6. При редкой сети наблюдений для построения ГСМ рекомендуется использовать комбинацию двух методов: комплексную параметризацию (для восстановления параметров верхней части разреза) и кинематико-динамическое преобразование (для восстановления параметров нижней части разреза).
7. В дальнейшем планируется опробовать различные способы выделения тренда статических поправок и установить связь между величиной сглаживания тренда и результатом кинематической инверсии, выяснить оптимальный вариант сглаживания. Также планируется сравнить результаты коррекции динамики отражённых волн (поверхностно-согласованной деконволюции) после традиционной и нетрадиционной коррекции кинематики.

В заключение автор выражает благодарность и большую признательность научным руководителям В. В. Калинин и А. П. Жукову, научным консультантам Д. Б. Финикову и О. А. Силаенкову за интересные идеи, помощь, обсуждение результатов и научное руководство, а также любимой маме за её поддержку. Также автор благодарит С. В. Власова, предоставившего геолого-геофизическую модель, использовавшуюся в тесте на псевдо-реальных данных, Ю. Н. Долгих, давшего разрешение на демонстрацию реального материала, коллектив разработчиков ООО «Сейсмостек» за программное обеспечение Prime. Особая благодарность авторам шаблона `Russian-Phd-LaTeX-Dissertation-Template`². Автор также благодарит много разных людей и всех, кто сделал настоящую работу автора возможной.

²<https://github.com/AndreyAkinshin/Russian-Phd-LaTeX-Dissertation-Template>

Публикации автора по теме диссертации

В журналах ВАК

1. *Давлетханов Р.* Учёт неоднородностей ВЧР статическими поправками или включение их в пластовую модель среды — что выбрать? // Технологии сейсморазведки. — 2015. — Т. 12, № 1. — С. 76—91.
2. *Давлетханов Р., Силаенков О.* Учёт влияния ВЧР на основе поверхностно-согласованной параметризации годографа отражённой волны // Технологии сейсморазведки. — 2016. — Т. 13, № 3. — С. 102—113.

В прочих изданиях

3. *Давлетханов Р.* Учёт остаточных высокочастотных статических поправок в данных, соответствующих наблюдениям на неплоской линии приведения // Научно-практическая конференция «Сейсмические технологии-2014». — Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, АО «ЦГЭ», ЕАГО. Москва, Россия, апр. 2014.
4. *Давлетханов Р.* Учёт влияния ВЧР при построении глубинно-скоростной модели среды // Научно-практическая конференция «Сейсмические технологии-2015». — Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, АО «ЦГЭ», ЕАГО. Москва, Россия, апр. 2015.
5. *Давлетханов Р., Лангман С., Силаенков О.* Коррекция статических поправок с сохранением кинематики отражённых волн, соответствующих пластовой модели среды // 14-я международная научно-практическая конференция по проблемам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных при геологическом моделировании месторождений углеводородов «Геомодель 2012». — EAGE. Геленджик, Россия, сент. 2012.
6. *Давлетханов Р., Лангман С., Силаенков О.* Кинематико-динамическое преобразование в задаче коррекции статических поправок // Международная научно-практическая конференция «Тюмень 2013: Новые геотехнологии для старых провинций». — EAGE. Тюмень, Россия, март 2013.
7. *Давлетханов Р., Силаенков О.* Параметризация годографа для описания ВЧР // Научно-практическая конференция «Сейсмические технологии-2016». — Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, АО «ЦГЭ», ЕАГО. Москва, Россия, апр. 2016.