

Преимущества обратной миграции RTM для изучения среды в зоне сложных надвиговых структур на примере Косью-Роговской впадины

■ Малышев М.В, Кокошин Е.Ю., Ляпин Н. В., Гребенкина Д.С, Феськова Т.В, Корнилова О.В., ЗАО «МиМГО», г. Москва.

Аннотация. В настоящее время технология глубинной миграции сейсмических данных до суммирования (PSDM) массово используется при разведке месторождений углеводородов для построения корректного изображения различных геологических сред.

Для промышленной сейсморазведки наиболее популярным видом PSDM является миграция на основе алгоритма Кирхгофа и аналогичных лучевых алгоритмов в силу простоты параметризации и относительной дешевизны вычислений. Стоит отметить, что данный алгоритм не всегда позволяет получить удовлетворительный результат в сложных сейсмогеологических условиях, для которых необходимо подбирать наиболее подходящий тип миграции и способ построения глубинно-скоростной модели (ГСМ).

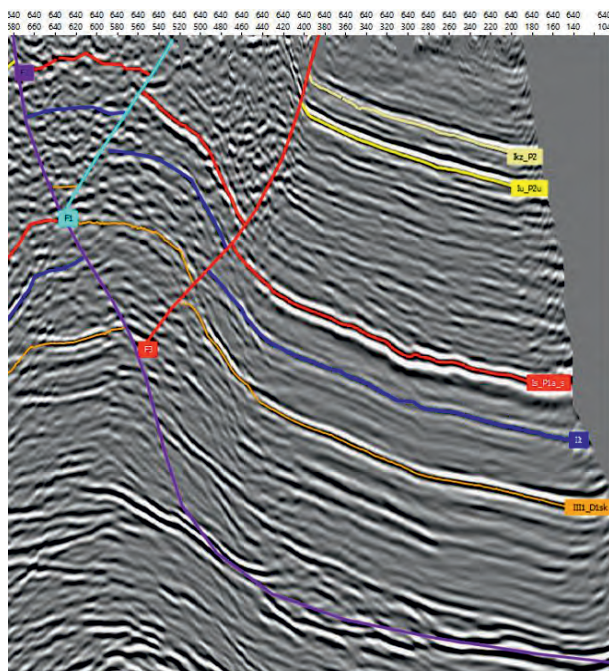
В данной статье показаны преимущества использования обратной временной миграции (reverse time migration - RTM) для получения изображения в районах со сложными надвиговыми структурами на примере Косью-Роговской впадины и описаны подходы к построению подходящей ГСМ, позволяющей использовать преимущества данного алгоритма миграции в полной мере.

Введение

В данной статье представлены результаты выполнения глубинной миграции до суммирования PSDM двумя различными методами (миграция Кирхгофа и миграция RTM) по сейсмическим данным, полученными в районе Косью-Роговской впадины. Данный район является типичным примером взбросо-надвиговой структуры, характеризуется залеганием контрастных по скоростным характеристикам терригенных и карбонатных пород. Поэтому полученный по результатам работ опыт о наиболее подходящем типе миграции и особенностях построения глубинно-скоростной модели, можно масштабировать на другие регионы со схожими сейсмогеологическими условиями, где наблюдаются крутые субвертикальные границы между контрастными по скоростям слоями пород. Следует отметить, что такие регионы, как правило, отличаются

слабой геофизической изученностью, что делает особенно перспективным применение обратной миграции RTM и описанных в статье подходов построения ГСМ для выявления новых потенциальных месторождений углеводородов.

Изучаемая часть Косью-Роговской впадины расположена на территории Ненецкого автономного округа в Предуральской части Тимано-Печорского бассейна. В структурно-тектоническом плане изучаемый участок охватывает восточный фрагмент взбросо-надвиговой Роговской антиклинали и приурочен к зоне сочленения двух тектонических элементов первого порядка – Воркутского поперчного поднятия и Косью-Роговской впадины Предуральского краевого прогиба. Объектами изучения являются карбонатные отложения силура, нижнего и верхнего девона, а также нижнего и среднего карбона.



▲ Рис.1 Фрагмент разреза на исследуемом участке работ с элементами взбросо-надвиговых структур.

Основная проблематика изучаемого района заключается в том, что продуктивные карбонатные коллектора осложнены сложной взбросо-надвиговой тектоникой и приуроченностью основных перспектив к поднадвиговой зоне, а также выходом вышезалегающих терригенных пород на дневную поверхность, что не может не ухудшать качество сейсмической записи (Рис 1).

В связи с этим очень важно было выполнить построение геологически-согласованной глубинно-скоростной модели и использовать оптимальный для данного региона алгоритм миграции.

Сейсморазведочные работы выполнялись по стандартной методике. Возбуждение сигнала выполнялось вибрационным источником сейсмических колебаний, по методике Flip-Flop. Расстановка - центральная псевдосимметричная (кирпич) на 20 приемных линий по 192 активных каналов на каждой. Расстояние между линиями возбуждения - 300 м, между линиями приема - 300м, $\Delta ПП = \Delta ПВ = 50м$. Номинальная кратность регистрации - 160.

Теоретическое обоснование применения обратной миграции RTM в надвиговых районах

Как известно, для получения наиболее достоверного изображения недр при изучении углеводородов основным методом является сейсморазведка и связанная с ней миграция сейсмических данных [1].

Процесс получения сейсмического изображения посредством миграции включает в себя два основных этапа: построение скоростной модели и непосредственно сама миграция сейсмических данных.

Построение скоростной модели — это итеративный процесс, который состоит из получения начальной модели, промежуточной миграции и уточнения модели скоростей. Эти этапы должны дополнять друг друга в зависимости от сложности геологической среды, так как у большинства миграционных методов есть свои ограничения и в конечном итоге выбор зависит от поставленных геологических целей и технологических возможностей компании.

Все миграции по типу решения дифференциального волнового уравнения на практике делятся на два основных метода: лучевые и волновые методы. В данной работе мы рассмотрели один из наиболее распространенных лучевых методов — миграция Кирхгофа, а также дополнили его одним из наиболее ресурсоемких и точных волновых методов — обратная временная миграция RTM.

Миграция Кирхгофа — это стандартный инструмент, основанный на суммировании дифракционных кривых. На практике [2] получение изображения $I(x)$ в миграции Кирхгофа выполняется путем переноса амплитуды $D(x_r, t = T(x, x_r, x_s))$ временной трассы в соответствующую ей по времени пробега волны

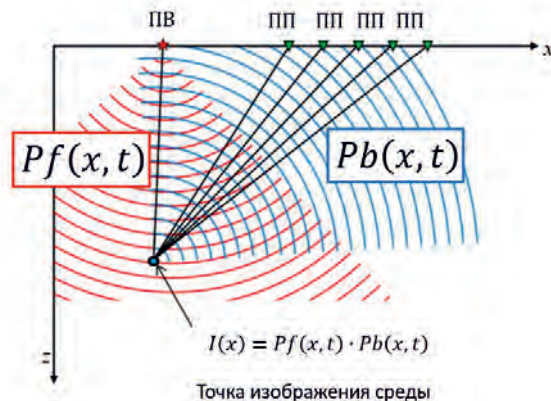
$t = T(x, x_r, x_s)$ от пункта взрыва x_s до пункта приема x_r точку глубинной области x с определенным коэффициентом распространения волны $W(x, x_r, x_s)$ (1):

$$I(x) = \int W(x, x_r, x_s) \cdot D(x_r, t) = T(x, x_r, x_s) dx_r \quad (1).$$

Этот метод позволяет достаточно быстро выполнять построение и уточнение глубинно-скоростных моделей в условиях с достаточно простой геологией и плавным изменением скоростей в среде. Однако, когда геологическая среда осложнена, как горизонтальным, так и субвертикальным смещением пород с достаточно большими скоростными контрастами оптимальным выбором являются волновые методы миграции, а в частности миграция RTM.

До недавнего времени считалось, что задача создания сейсмических изображений с субвертикальными наклонами границ была нерешаемой, так как волны, отраженные от таких границ, не достигали поверхности наблюдения при наземной сейсморазведке. Однако, за последнее время были хорошо изучены свойства двух типов волн: дуплексных и ныряющих, энергия которых достаточна для использования в целях получения сейсмического изображения. Так впервые было получено сейсмическое изображение вертикальной границы с использованием дуплексных волн в работе McMechan [3]. Он применил миграцию, основанную на двухстороннем волновом уравнении, реализованную с помощью техники обратного продолжения поля во времени, известной как RTM [1, 4].

Метод RTM заключается [4] в моделировании волновых полей в двух направлениях: прямое моделирование поля $Pf(x, t)$ из пункта возбуждения и обратное моделирование $Pb(x, t)$ из пункта



▲ Рис. 2. Схема кросс корреляции прямого волнового поля $Pf(x, t)$ и обратного волнового поля $Pb(x, t)$ в миграции RTM.

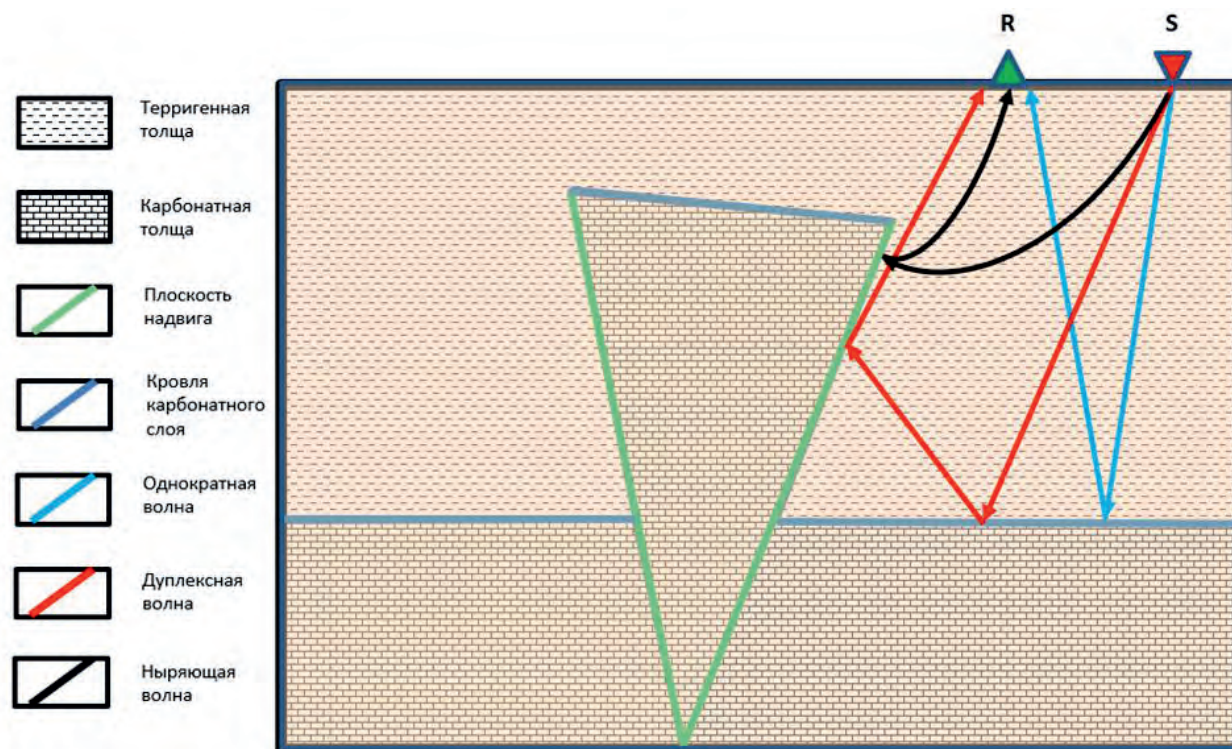
приема (Рис. 2). На каждом отрезке времени Δt выполняется кросс корреляция этих двух волновых полей из чего и складывается конечное изображение изучаемой среды $I(x)$ (2):

$$I(x) = \int_0^T Pf(x, t) \cdot Pb(x, t) dt \quad (2).$$

За счет использования траектории сложных волновых полей как раз и достигается возможность улучшения изображения в условиях со сложной тектоникой и значительными скоростными контрастами. Так миграция RTM в отличие от классической миграции Кирхгофа позволяет восстанавливать сейсмическое изображение с использованием практически всех типов волн (Рис.3).

Для проверки гипотезы о том, что метод миграции в обращенном времени лучше работает в условиях с хорошо выраженными скоростными контрастами и с существенными смещениями слоев по сравнению с миграцией Кирхгофа было проведено тестирование алгоритмов миграции на синтетических данных модели Sigsbee. Модель Sigsbee характеризуется такими условиями, что делает ее идеальной для оценки эффективности различных методов миграции.

В ходе тестирования были получены результаты, подтверждающие, что миграция RTM обеспечивает более высокую точность и детализацию изо-

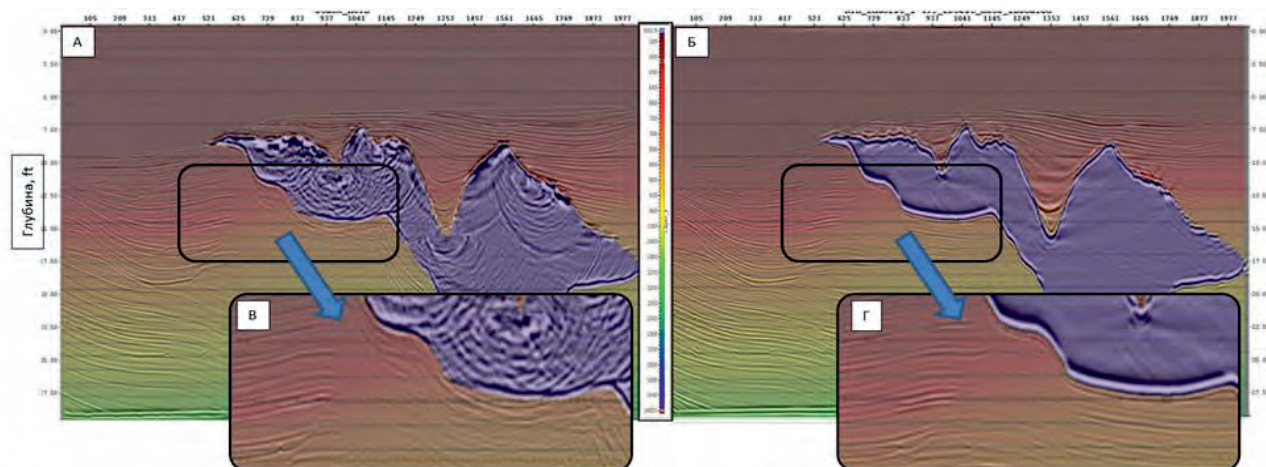


▲ Рис. 3. Модель геологической среды и ход лучей различных типов волн.

бражений особенно в тех местах, где традиционные методы миграции, такие как миграция Кирхгофа, могут сталкиваться с трудностями. Отражения, находящиеся под влиянием высокоскоростной аномалии сложной формы, связанной с соляным телом, более сфокусированы на разрезе RTM (Рис.4).

Прирост сейсмической информации на разрезе получен только за счет разницы в используемых алгоритмах миграции.

Таким образом, алгоритм миграции RTM позволяет получить более когерентную волновую запись по сравнению со стандартным алгоритмом миграции Кирхгофа для изображения среды надвиго-взбросового характера, поскольку, в отличие от последнего, позволяет учесть наличие всех типов волн в таких сложных геологических районах. Однако для корректного учета указанных волн, необходимо построение глубинно-



▲ Рис. 4. Сопоставление результатов миграции (А) Кирхгофа и (Б) RTM в наложении с исходной моделью скоростей и увеличенные фрагменты разрезов миграции (В) Кирхгофа и (Г) RTM.

скоростной модели, которая наиболее полно описывает надвиговую структуру и скоростные контрасты среды.

Построение глубинно-скоростной модели

Тектонически и геологически исследуемая площадь представлена аллохтоном карбонатного состава в терригенной толще. Скорость карбонатов резко отличается от вмещающих терригенных пород. Таким образом площадь представлена контрастными по скоростям породами со сложными границами между ними. Опыт нашей компании однозначно показывает, что в таких условиях для успешного применения глубинной миграции до суммирования PSDM для построения изображения необходимо иметь глубинно-скоростную модель (ГСМ) максимально точно описывающую положение контрастных границ между породами (Рис. 5 - В). Данный подход особенно необходим для поднадвиговых зон, где терригенная скорость часто игнорируется (Рис. 5 - Б), что приводит к недоучету траекторий распространения различных типов волн, в процессе миграции PSDM.

В рамках следования указанным принципам построения глубинно-скоростной модели в зоне надвигов и контрастных

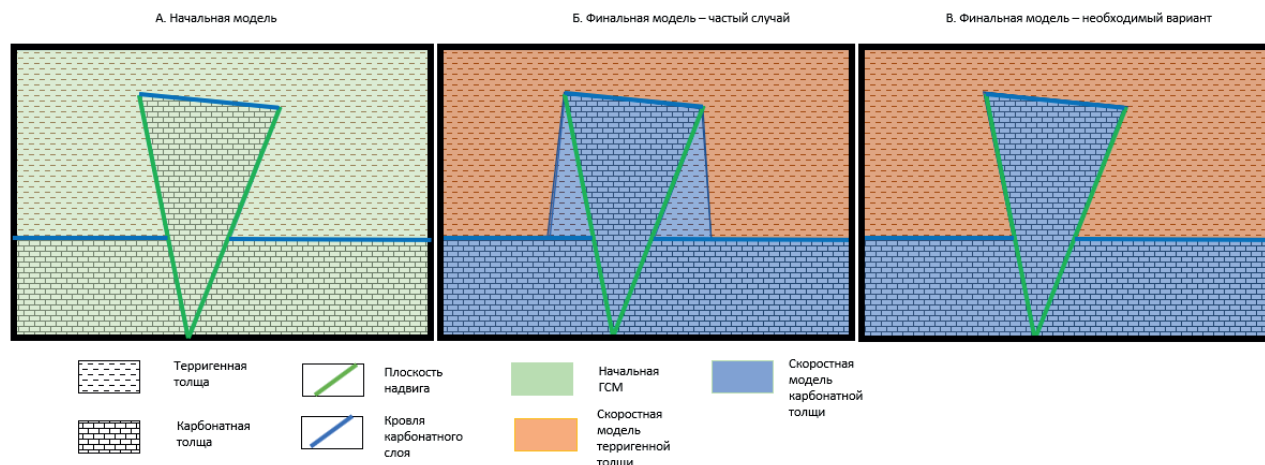
границ, задача построения корректной глубинно-скоростной модели была решена в несколько этапов.

На предварительном этапе построение начальной глубинно-скоростной модели (Рис. 5 - А) производилось путем комбинирования скоростной модели верхней части разреза (ВЧР), созданной на основе инверсии первых вступлений, и модели интервальных скоростей, полученных путем преобразования Урупова-Дикса скоростей суммирования.

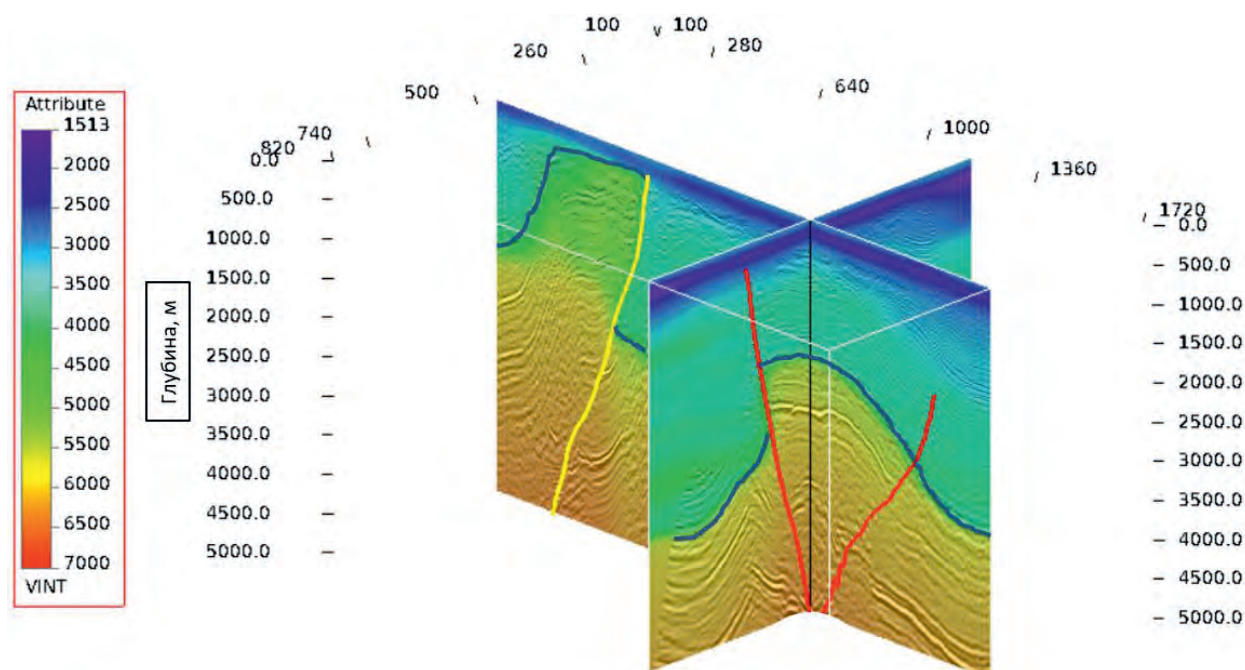
Полученная начальная глубинно-скоростная модель была использована для уточнения с использованием алгоритма сеточной томографии. Всего было выполнено 5 итераций томографической инверсии по мигрированным данным. Для перемиграции данных на каждом этапе уточнения скоростной модели использовалась миграция Кирхгофа.

Для калибровки изотропной глубинно-скоростной модели была произведена оценка невязок по опорным горизонтам с отбивками. Осложнялся этот процесс тем, что в пределах площади пробурена только одна скважина. После калибровки на скважинные отбивки были рассчитаны параметры анизотропии – дельта и эпсилон.

В результате была получена геологи-



▲ Рис. 5. Схема построения ГСМ в надвиговой зоне.



▲ Рис. 6. Финальная модель и результат миграции.

чески-согласованная анизотропная глубинно-скоростная модель, наиболее полно описывающая зону надвига, особенно терригенную часть в поднадвиговой зоне. Полученная модель использовалась в последующих тестах алгоритмов миграции (Рис.6).

Результаты миграции

Для выполнения миграции Кирхгофа использовались данные, полученные в результате 3D сейсморазведки, которые были обработаны с использованием стандартных методов обработки. Миграция Кирхгофа выполнялась по панелям COV (common offset vector) с целью сохранения азимутальной информации и последующего азимутального анализа остаточных кинематических поправок,

что является необходимым в условиях такой сложной тектоники. Миграция RTM выполнялась по тем же данным, что и миграция Кирхгофа, но в сортировке ПВ для получения альтернативного варианта изображения сейсмической среды и последующего сопоставления результатов двух типов миграции. Параметры миграций отображены в таблице 1.

Анализ результатов показал, что миграция Кирхгофа позволяет эффективно восстанавливать сейсмическое изображение на относительно ровных участках, однако возникают серьезные проблемы с качеством изображения отражений среды и ее структурного плана в поднадвиговой зоне. Таким образом, можно констатировать, что поднадвиговая область является слепой

▼ Табл. 1. Параметры миграций Кирхгофа и RTM.

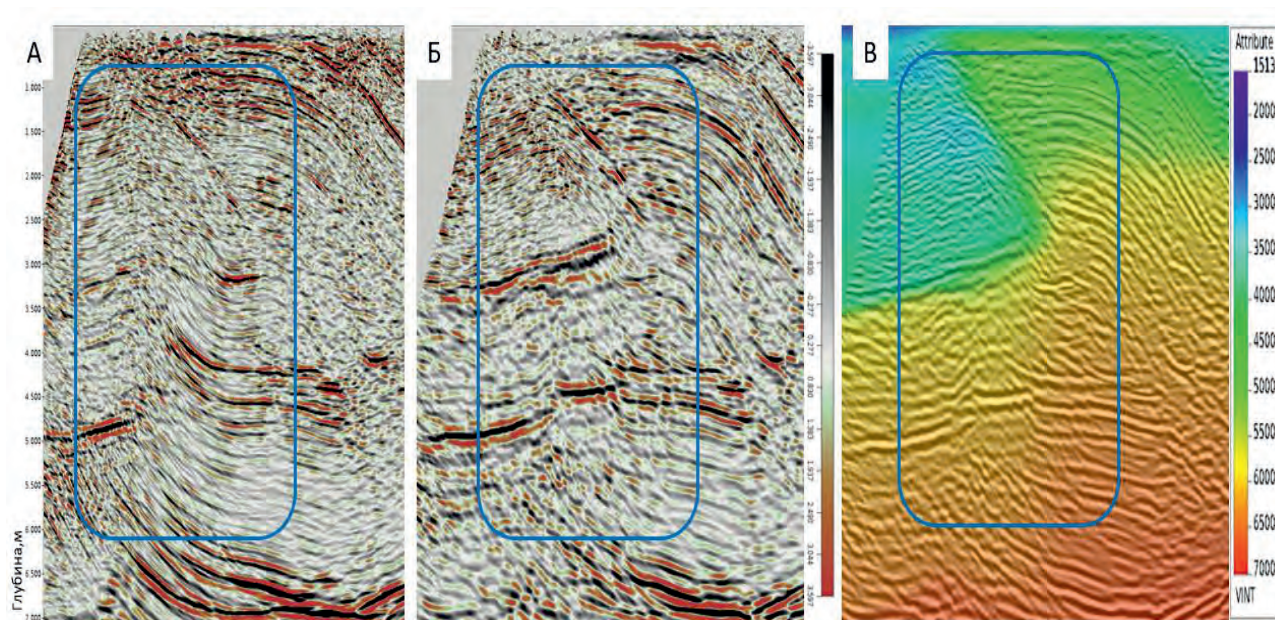
Параметры миграции Кирхгофа	Значения
Радиус апертуры	4000 м
Макс частота	100 Гц
Параметры миграции RTM	Значения
Радиус апертуры	4000 м
Частота импульса	40 Гц

зоной для миграции Кирхгофа из-за невозможности учета полного волнового поля. В свою очередь миграция RTM продемонстрировала более высокую точность и детализацию изображения среды, особенно в условиях с резкими контрастами скоростей, связанными с наличием взбросо-надвиговых структур (Рис.7-10).

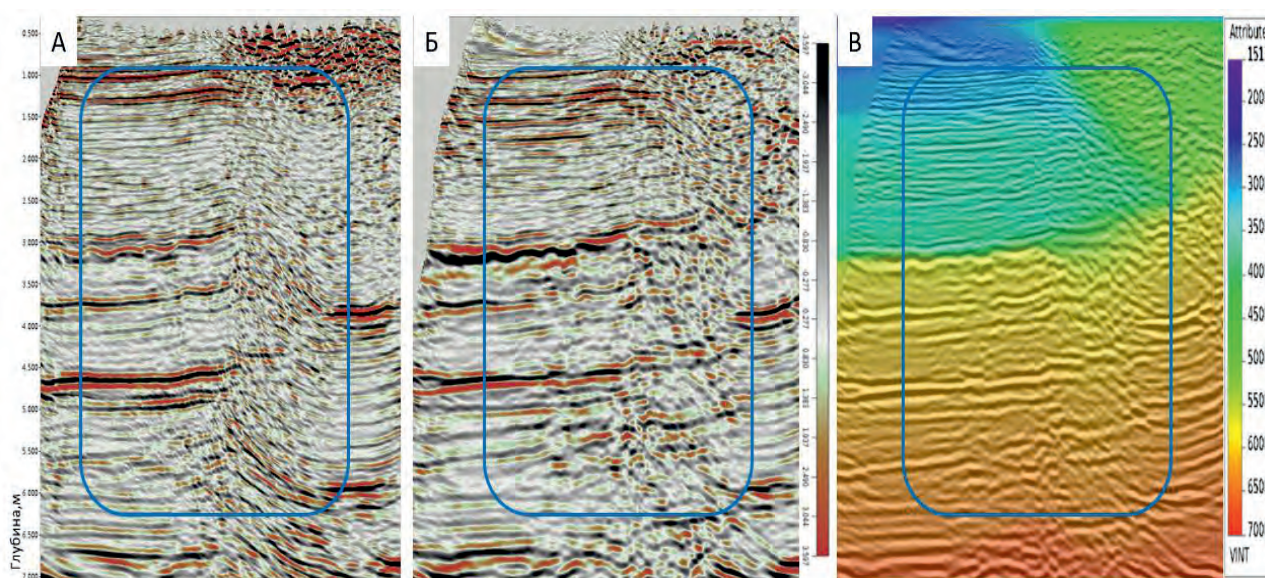
На Рис. 7-10 видно, что обратная миграция RTM позволяет восстановить

плоскость надвига, уточнить отражения под надвигом, а также зону сочленения автохтонного и аллохтонного блоков в отличие от миграции Кирхгофа.

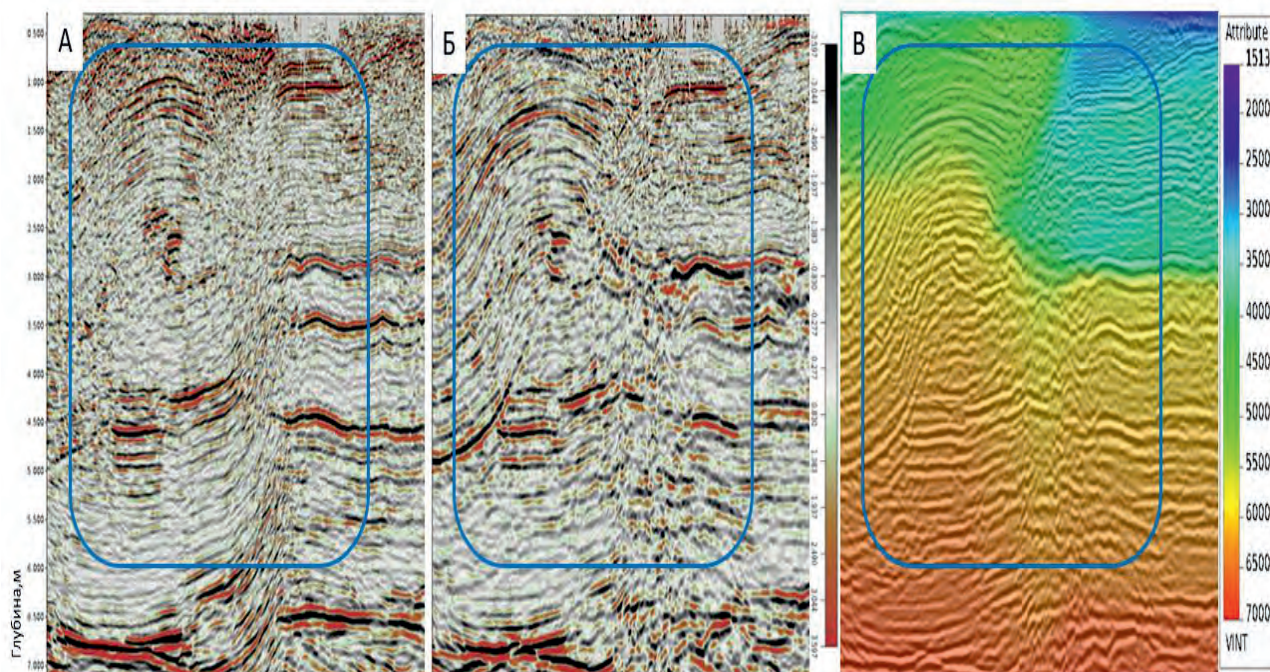
Рисунок 11 показывает, что обратная миграция RTM лучше фокусирует сейсмические отражения в складчатой зоне и характеризуется более высоким уровнем сигнала. Это позволяет уверенно выделять тектонические нарушения разного ранга.



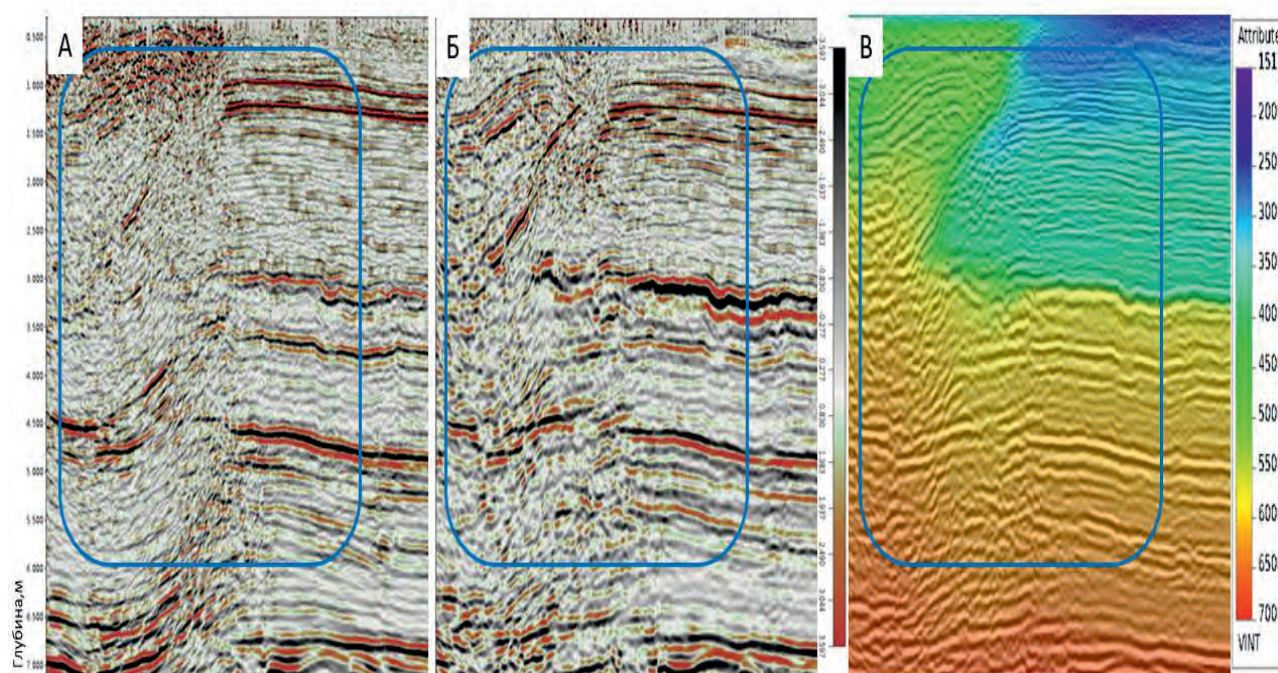
▲ Рис. 7. Сравнение результатов миграции (А) Кирхгофа и (Б) RTM, результат миграции RTM в наложении с моделью (В) по тестовой линии 1.



▲ Рис. 8. Сравнение результатов миграции (А) Кирхгофа и (Б) RTM, результат миграции RTM в наложении с моделью (В) по тестовой линии 2.



▲ Рис. 9. Сравнение результатов миграции (А) Кирхгофа и (Б) RTM, результат миграции RTM в наложении с моделью (В) по тестовой линии 3.



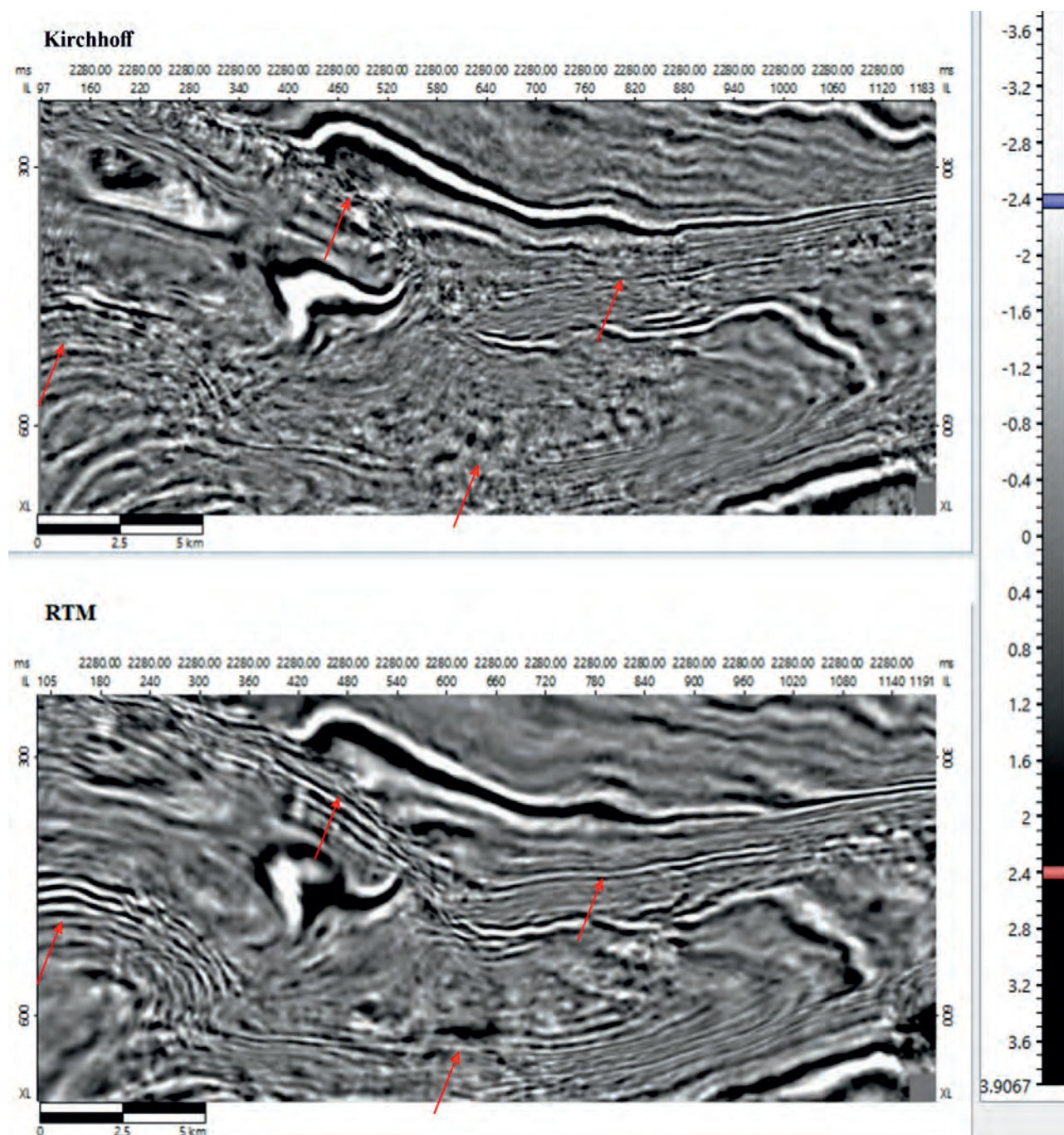
▲ Рис. 10. Сравнение результатов миграции (А) Кирхгофа и (Б) RTM, результат миграции RTM в наложении с моделью (В) по тестовой линии 4.

Выводы

В настоящей работе на примере сейсмических данных, полученных на территории Косью-Роговской впадины, показано, что алгоритм миграции RTM является предпочтительным из-за возможности учета полного волнового поля

для задач получения качественного изображения в зонах надвиговых структур, где наблюдается высокий скоростной контраст между аллохтоном и вмещающими породами.

Вместе с тем, показана важность создания геологически согласованной



▲ Рис. 11. Горизонтальный срез амплитудного куба на уровне 2280 мс по методу Кирхгофа (верхний) и RTM (нижний).

глубинно-скоростной модели, наиболее детально описывающей надвиговую структуру и контраст скоростей, особенно в поднадвиговой части. Для создания такой модели имеет высокое значение междисциплинарный характер работы команды геофизиков, геологов, интерпретаторов.

Также существует возможность дальнейшего улучшения глубинно-скорост-

ной модели, если использовать обратную миграцию RTM вместо традиционной миграции Кирхгофа на определенных этапах для переинтерпретации границ слоев между томографическими обновлениями ГСМ.

Из-за сложного тектонического характера данный район имеет слабую скважинную изученность и дефицит другой априорной информации, относясь к

высокорискованным областям ведения сейсморазведки. Поэтому изложенные в статье подходы предлагается тиражировать и на другие высокорискованные и не только районы сейсморазведки, где наблюдается схожий тектонический режим и контраст скоростей пород. Это открывает новые возможности по созданию геологической модели более надежного качества как в новых районах сейсморазведки, так и при переобработке и переинтерпретации архивных данных.

Литература

1. Jones, IF 2018, *Velocities Imaging and Waveform Inversion: The Evolution of Characterising the Earth's Subsurface*, European Association of Geoscientists & Engineers EAGE, Houten, Netherlands
2. Yilmaz, O. (2001) *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 1028 p.
3. McMechan G. A., 1983. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values: *Geophys. Prosp.*, 31. – 412-420.
4. Baysal E., Kosloff D.D., Sherwood J.W.C., 1983. Reverse time migration: *Geophysics*, 48. – 1514-1524.
5. Соборнов К.О., Колесник В.Ф., Жемчугова В.А., Никонов Н.И. Прогноз зон нефтегазоаккумуляции в зоне сочленения гряды Чернышева и Косью-Роговской впадины. Проблемы ресурсного обеспечения газодобывающих районов России. № 3 (35), 2018, стр. 105 – 117.