

Результаты тестирования алгоритмов глубинной миграции сейсмических данных, полученных в пределах Мраковской депрессии, Республика Башкортостан

■ Акуленко А.С., ПАО АНК "Башнефть", г. Уфа. E-mail: info_bn@bashneft.ru

■ Калинин А.Ю., Ляпин Н.В., Иванов П.Д., ООО "Совфрансгео", г. Москва. isfg@sovfransgeo.ru

В статье определяется роль сейсмической миграции в современном графе камеральной обработки. Анализируются результаты работ по тестированию миграционных алгоритмов, как средства возможного улучшения качества сейсмической модели изучаемой среды.

Выполнение сейсмической миграции, является одной из важнейших задач камеральной обработки данных. Данная процедура, прежде всего, направлена на получение сейсмического изображения, без искажений, заведомо присутствующих на временном, не мигрированном, волновом поле и, фактически, является ключевым инструментом для решения одной из главных задач разведочной геофизики – получению отображения геологической структуры [2]. В производственной практике сейсмическая миграция представляет собой двухстадийный процесс, центральная роль которого как по значимости, так и по положению представлена в следующем обобщённом графе камеральной обработки:

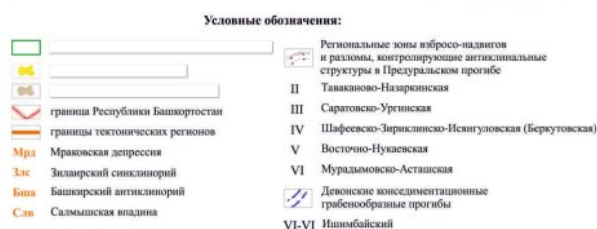
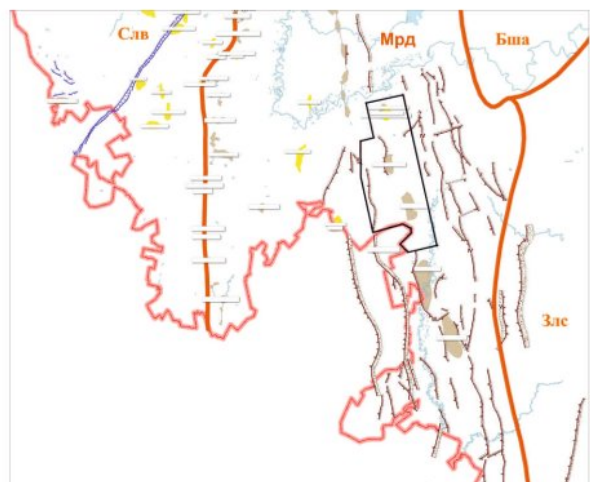
1. Сигнальная и кинематическая обработка данных;
2. Выбор типа аппроксимации изучаемой среды и построение соответствующей скоростной модели миграции;
3. Получение сейсмической модели изучаемой среды, посредством миграции исходных данных на основе полученной скоростной модели;
4. Амплитудная обработка полученных результатов;

Первая стадия указанного графа, представляет собой комплекс процедур обработки во временной области, направленных на формирование априорной сейсмической модели изучаемого участка, которая позволила бы получить предварительное представление о неоднородности изучаемой среды. На второй стадии, производится

построение соответствующей скоростной модели миграции. Среда с достаточно низкой степенью неоднородности, вполне успешно могут быть аппроксимированы средними скоростями, рассчитанными без привлечения априорного структурного каркаса и, выполненная в таком случае временная миграция, может обеспечить получение желаемого результата.

Если же изучаемая среда в существенной степени неоднородна, то задача по её параметризации усложняется, и аппроксимация производится с помощью серии параметров, основным из которых является модель интервальных скоростей, обеспечивающая возможность учёта преломления лучей. В данном случае, исходя из типа аппроксимации среды, выполняемая сейсмическая миграция классифицируется как глубинная. Третья стадия, представляет собой выбор и применение алгоритма, для преобразования динамических линий $t_0(x)$ временного разреза в динамические линии $tv(x)$ или $z(x)$ [1]. Четвертая стадия графа направлена на финальную подготовку полученной после миграции сейсмической модели к динамической и структурной интерпретации.

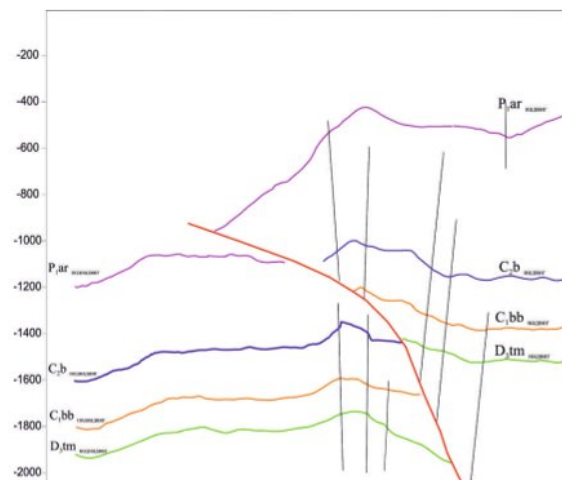
Высокая степень влияния качества выполненной временной обработки, а также корректности и точности построенной скоростной модели, на результат сейсмической миграции, очевидна. Для обоснования успешности выполнения данных работ проводятся масштабные тесты, активно



▲ Рис. 1. Фрагмент тектонической карты Республики Башкортостан.

привлекаются новые технологические и методологические решения. Вопрос же поиска оптимального миграционного алгоритма, как средства, позволяющего повысить информативность получаемой после миграции сейсмической модели, при выполнении производственных проектов, рассматривается менее интенсивно, или не рассматривается вовсе. Данная ситуация вполне объяснима, как по причинам существенной продолжительности и ресурсоемкости тестирования подобного рода, так и с позиции ценовой доступности алгоритмов миграции. Таким образом, вариант производственного использования миграции по алгоритму Kirchhoff, обеспечивающему приемлемое соотношение ресурсоемкости – качество, рассматривается, в качестве базового как сервисными компаниями, так и заказчиками работ.

В то же время, для сред с высокой степенью неоднородности, ценность возможного получения даже незначительного прироста информативности результирующей



▲ Рис. 2. Схема структуры карлинского типа.

сейсмической модели за счёт использования оптимального миграционного алгоритма, увеличивается. Как следствие, тестирование, направленное на поиск данного алгоритма или, в альтернативе, получения подтверждения технологической достаточности использования базового, становится более актуальным, ресурсы, затрачиваемые на выполнения данной задачи, оправданными.

Данная стратегия была использована компанией ПАО АНК "Башнефть", при планировании технологического графа переобработки сейсмических данных МОГТ-3D, полученных в пределах восточного борта Предуральского краевого прогиба и реализована на практике компанией ООО «Совфрансгео».

В региональном тектоническом плане, изучаемый участок расположен на восточном (внутреннем) борту Предуральского краевого прогиба, в пределах Мраковской депрессии, в зоне складок карлинского типа, генетически приуроченных к протяженному Саратовско-Ургинскому взбросо-надвигу (рис. 1). К структурам карлинского типа (рис. 2) относятся структуры, формирование которых связано с образованием взбросо-надвигов. Большая часть дизъюнктивов и пликативов осложнена опережающими разломами.

По сейсмогеологическим условиям тектонических блоков:



▲ Рис. 3. Дифференциация регистрируемого волнового поля по сейсмогеологическим условиям тектонических блоков. По данным ПАО АНК "Башнефть", 01.11.2017.

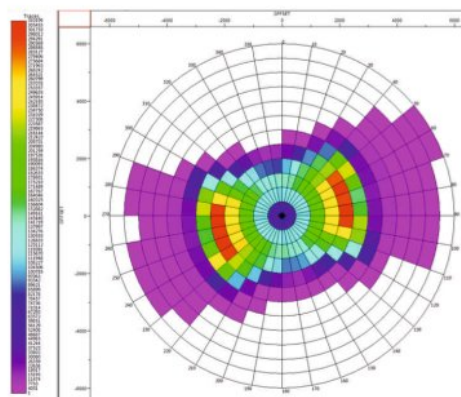
Тектонические особенности изучаемого района во многом определяют сложность глубинных сейсмогеологических условий района работ (рис. 3), которые, в сочетании с непростыми поверхностными сейсмогеологическими условиями, приводят к априорной неоднозначности параметризации волнового поля, при выполнении стадий кинематической обработки и серьёзным затруднениям при восстановлении динамических характеристик сейсмической записи в процессе сигнальной обработки.

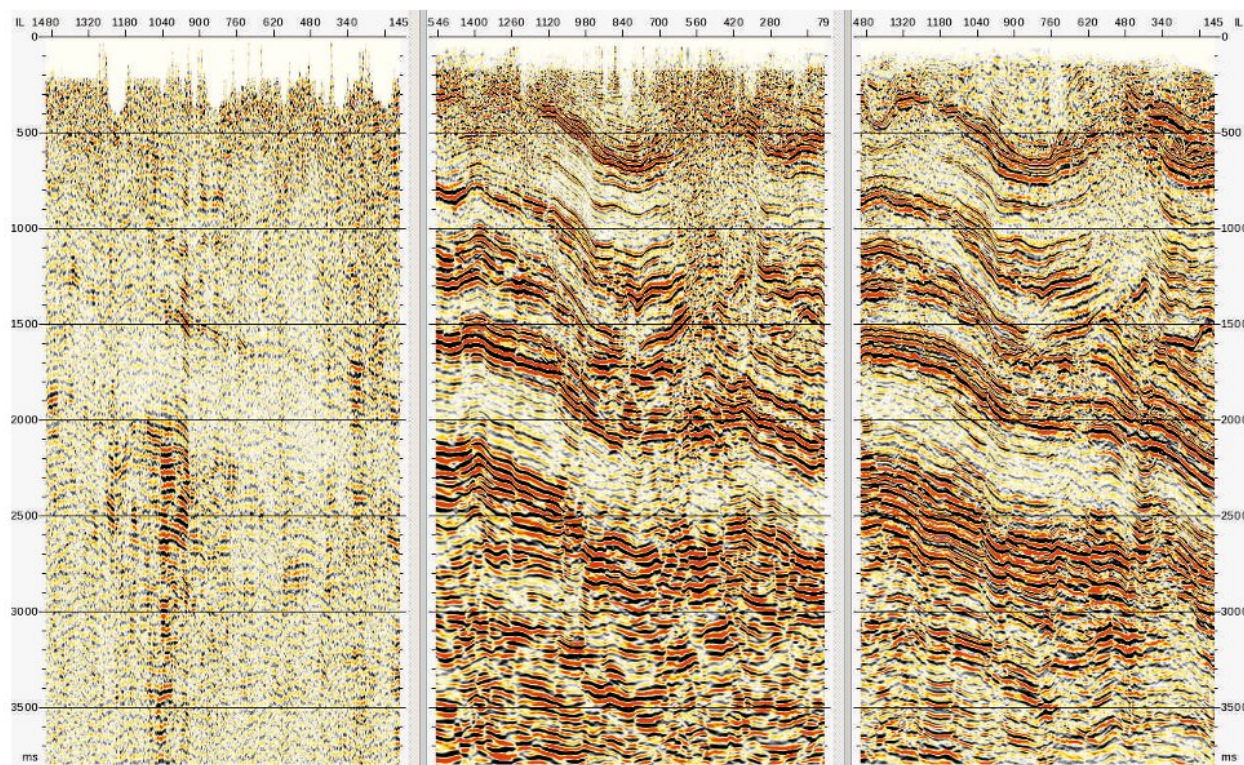
Несмотря на геологическую сложность, рассматриваемый участок является перспективным в плане изучения, что подтверждается серией открытых газоконденсатных и нефтегазоносных месторождений. Полевые работы МОГТ-3Д на рассматриваемом участке, были выполнены в 2007 году с применением вибрационных источников AMG с системой управления VE 416, группируемых в линию на базе 40 м, использовались сейсмоприёмники GS-20DX (группа из 12 сейсмоприёмников на базе 50 м.), регис-

Параметр	Значение
Количество активных каналов	1080
Номинальная кратность	45
Размер бина, (м)	25x25
Максимальное расстояние ПП-ПВ	3386 м
Максимальное расстояние по X	2675 м
Максимальное расстояние по Y	1475 м
Шаг ЛПП и ЛПВ	300 м
Шаг ПП и ПВ	50 м

▲ Табл. 1. Методико-технические параметры сейсморазведочных работ МОГТ 3Д.

▼ Рис. 4. Зависимость количества трасс от азимута.





▲ Рис. 5. Анализ результатов камеральной обработки. Слева-направо:
Исходное волновое поле;
Результат камеральной обработки 2008 г (3DKPSDM (scale -to-time));
Результат камеральной обработки 2017 г (3DKPSDM (scale -to-time)).

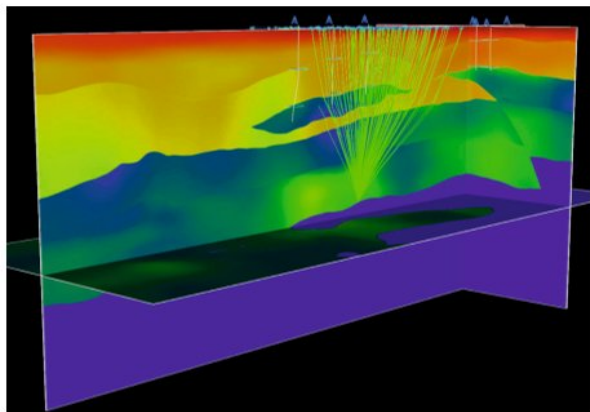
трация сейсмических колебаний выполнялась телеметрической сейсмостанцией UL-408 XL. Исходя из параметров (табл. 1), съёмка относится к классу узкоазимутальных [4] с полным, но существенно неравномерным, освещением азимутов (рис. 4). В течение 2008 года была выполнена камеральная обработка и интерпретация полученных данных, с последующим поисковым и разведочным бурением.

Для продолжения исследований данного района, требовалось либо расширение области геофизической изученности, что является дорогостоящим и крайне длительным процессом, либо переосмысление уже имеющейся информации, что более экономично, как в отношении вложений, так и сроков. Таким образом, решение, принятое ПАО АНК "Башнефть" о необходимости переобработки и переинтерпретации имеющихся данных МОГТ-3D было логичным, и, как показали финальные результаты

выполненной на данный момент переобработки, эффективным (рис. 5).

Сопоставляя результаты, полученные в 2008 и 2017 годах, можно отметить, что на сейсмической модели после переобработки, отсутствуют массивы ложных малоамплитудных разрывных нарушений, а также ложные малоразмерные структурные поднятия, обусловленные недостаточно точной параметризацией поля времен статическими поправками в 2008 году. Существенно улучшена прослеживаемость отражений, геометрия осей синфазности стала выдержаннее по площади. Таким образом, можно уверенно говорить о том, что задача по получению представления о геологической структуре решена в 2017 году более успешно.

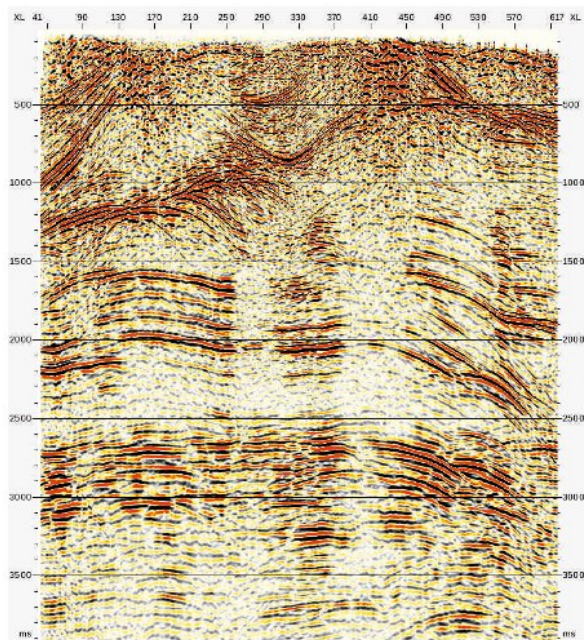
Фундамент, для получения данных результатов, был заложен в процессе выполнения временной обработки, но результирующая сейсмическая модель, конечно же,



▲ Рис. 6. Глубинно-скоростная модель, аппроксимирующая изучаемую среду.

получена в процессе выполнения стадий сейсмической миграции. В соответствии с технологическим графом, первоочередными задачами при выполнении миграции, являлись: выбор типа и построение адекватной скоростной модели. Анализ априорной сейсмической модели, показал, что описание изучаемой среды с помощью средних скоростей, не позволит учесть в должной мере проявления соляного диапиризма, наличие контрастных акустических границ, большой градиент изменения толщин солевого и надсолевого комплексов. Вследствие этого, параметризация изучаемой, в существенной степени, неоднородной, среды, была выполнена посредством последовательного перехода от упрощенной модели мгновенных интервальных скоростей к глубинно-скоростной модели более сложного класса, представляющей собой набор параметров Томсена [6], позволяющих учесть анизотропные (VTI) и градиентные характеристики (рис. 6).

Точность построенной на данном (и любом другом) участке глубинно-скоростной модели (ГСМ), конечно же, в полной мере зависит от объема имеющейся на момент построения геолого-геофизической информации. Однако, степень учёта данной информации в сочетании с результатами выполненного контроля качества на уровне мигрированных сейсмограмм, позволяет



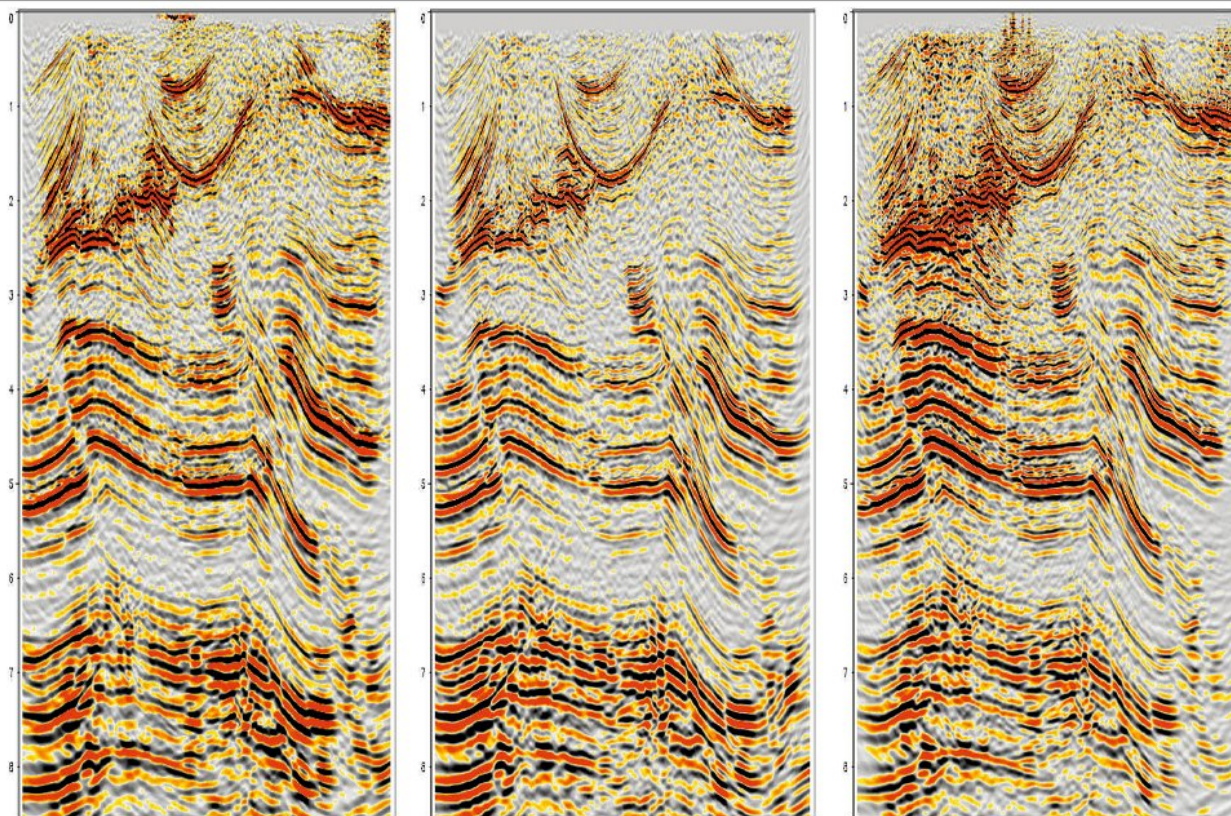
▲ Рис. 7. Пример волнового поля тестового участка до миграции.

говорить о том, что построение ГСМ было выполнено успешно и дальнейшее её усложнение, не целесообразно.

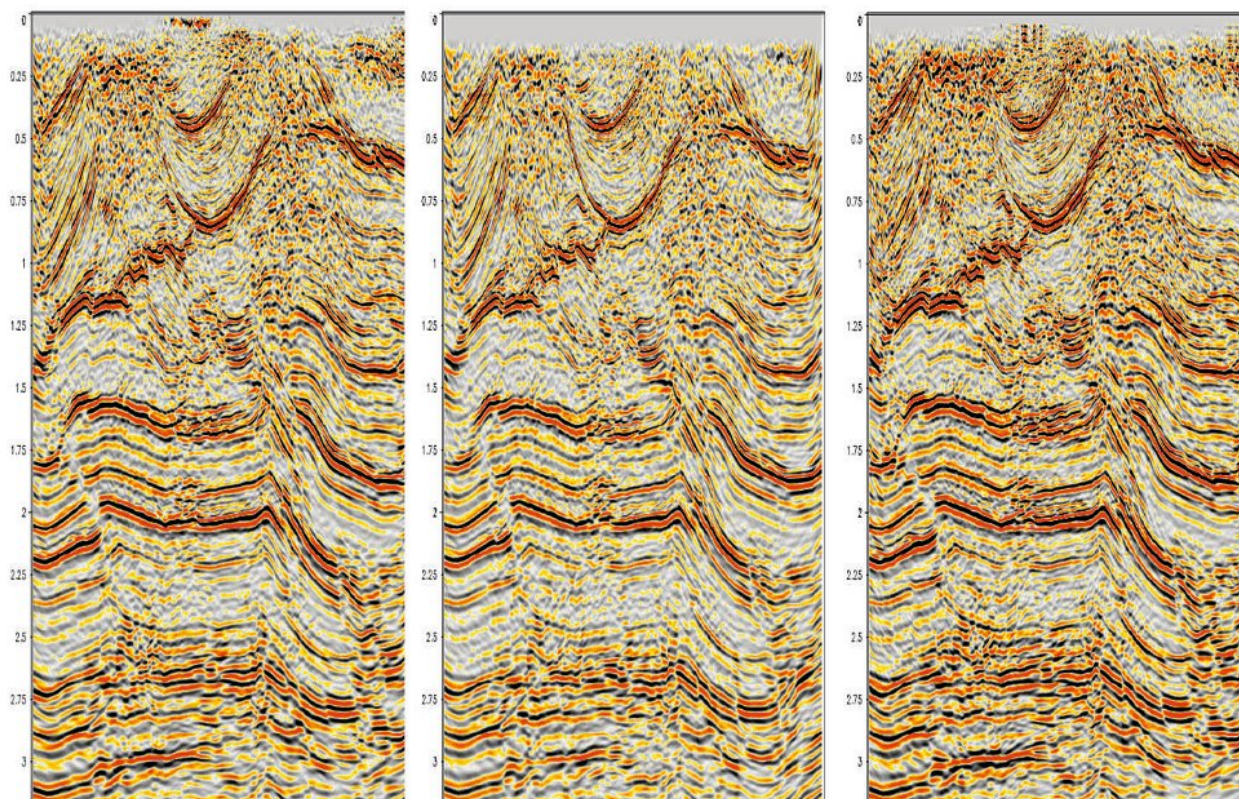
Для решения последующей задачи по выбору оптимального алгоритма миграции, прежде всего, были определены общие требования [2], которые, в целом, являлись и критериями оценки результатов расчёта по тому или иному алгоритму:

1. Приемлемое соотношение временных затрат на выполнение расчёта и качества получаемого результата;
2. Минимум собственных “миграционных” шумов и гибкость настроек параметров расчёта;
3. Корректный учёт неоднородностей, описанных через параметры построенной ГСМ;
4. Адаптивность и устойчивость алгоритма к недостаткам исходных данных (ГСМ и массива входных сейсмических трасс);

Исходя из операционной доступности, для выполнения практического тестирования были определены следующие алгоритмы миграции: Kirchhoff, Gaussian beam, RTM (Reverse Time Migration). Для тестового расчёта привлекался весь объём сейсми-



▲ Рис. 8. Результаты глубинной миграции до суммирования, полученные при применении различных алгоритмов. Домен – глубина. Слева-направо: Kirchhoff, Gaussian beam, RTM.



▲ Рис. 9. Результаты глубинной миграции до суммирования с применением АРУ, полученные при применении различных алгоритмов. Домен – время. Слева-направо: Kirchhoff, Gaussian beam, RTM.

Алгоритм	Объём данных, кв.км.	CPU	Время счёта, ч	Время счёта на 1 км.кв., ч	Ширина спектра	SNR	Вертикальная разрешенность, HZ
Kirchhoff	62	224	12	0,19	0-90	8	39
Beam	62	224	21	0,33	0-85	7	39
RTM	62	224	108	1,75	0-80	8,5	40

▲ Табл. 2. Врежяёмкость выполненнх расчётов и первичная оценка динамических характеристик полученных результатов.

ческих данных с целью получения результата в полосе, ограниченной по Inline. Данная полоса была выбрана по критерию максимально проявления на волновом поле неоднородностей изучаемого участка (рис. 7).

Перед расчётом, для каждого алгоритма тестировались и выбирались индивидуальные параметры, обеспечивающие получение наилучшего результата. Так же проводилась технологически необходимая доработка сейсмограмм, например, перед RTM миграцией было выполнено тестирование и последующая регуляризация по ОПВ по всему объёму сейсмических данных. Тем самым были созданы условия, при которых, результаты расчёта по каждому алгоритму должны быть оптимальны.

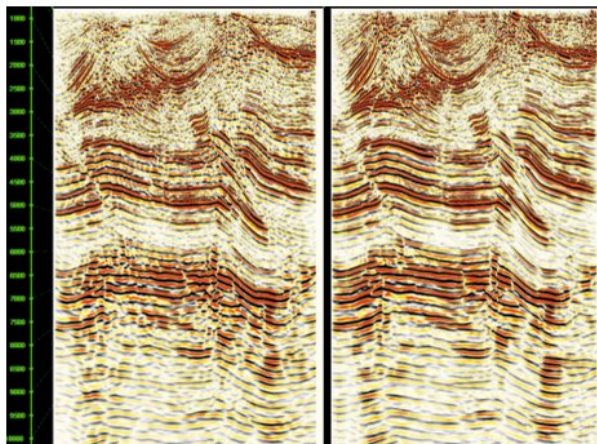
Анализ расчётов, выполненных по всем трём алгоритмам, показал общую схожесть мигрированных волновых полей в отношении фокусировки и прослеживаемости отражений (рис. 8). Данный факт более очевиден при применении АРУ (рис. 9).

Миграционные артефакты проявляются на всех трех вариантах примерно в равной степени. Наибольшие расхождения отмечаются в плане перераспределения амплитуд сейсмической записи как по латерали, так и по вертикали. Однако, оценить корректность полученного распределения динамических характеристик на результатах миграции, не представляется возможным. Для решения данной задачи – основным методом являет-

ся сейсмическое моделирование, но так как изучаемая среда в существенной степени нестационарна, параметризация модели для решения прямой задачи, и сам расчёт, по срокам выполнения и сложности превысили бы квоты, отпущенные на выполнение текущего проекта. Таким образом, анализ полученных результатов, не позволил однозначно выделить оптимальный алгоритм. Проанализировав временные затраты (табл. 2), а также, приняв во внимание иные критерии оценки эффективности алгоритмов, был сделан вывод, что базовая глубинная миграция по алгоритму Kirchhoff (Wavefront) позволяет получить результат с наилучшим соотношением качества и ресурсных затрат.

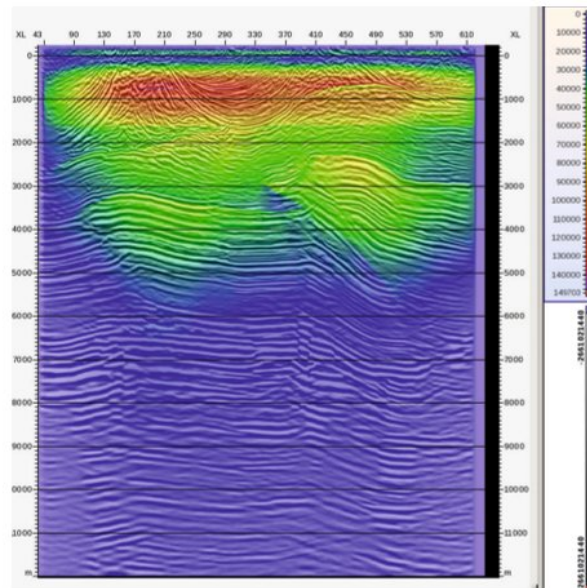
Полученные результаты вполне объективны, однако, принимая во внимание существенные ограничения параметров полевых наблюдений данного сейсмического проекта, а также фактор наличия иных алгоритмов миграции, не позволяют сделать вывод о однозначной бесперспективности применения алгоритмов миграции отличных от Kirchhoff в подобных сейсмогеологических условиях, тем более если участки – аналоги будут освещены посредством современных широкоазимутальных съёмок.

Данный тезис получает подтверждение, при рассмотрении результатов, полученных в ходе продолжения тестовых работ по поиску алгоритма, обеспечивающего прирост информативности сейсмической



▲ Рис. 10. Результаты глубинной миграции до суммирования, полученные при применении различных алгоритмов. Домен – глубина. Слева-направо: Kirchhoff, угловая миграция.

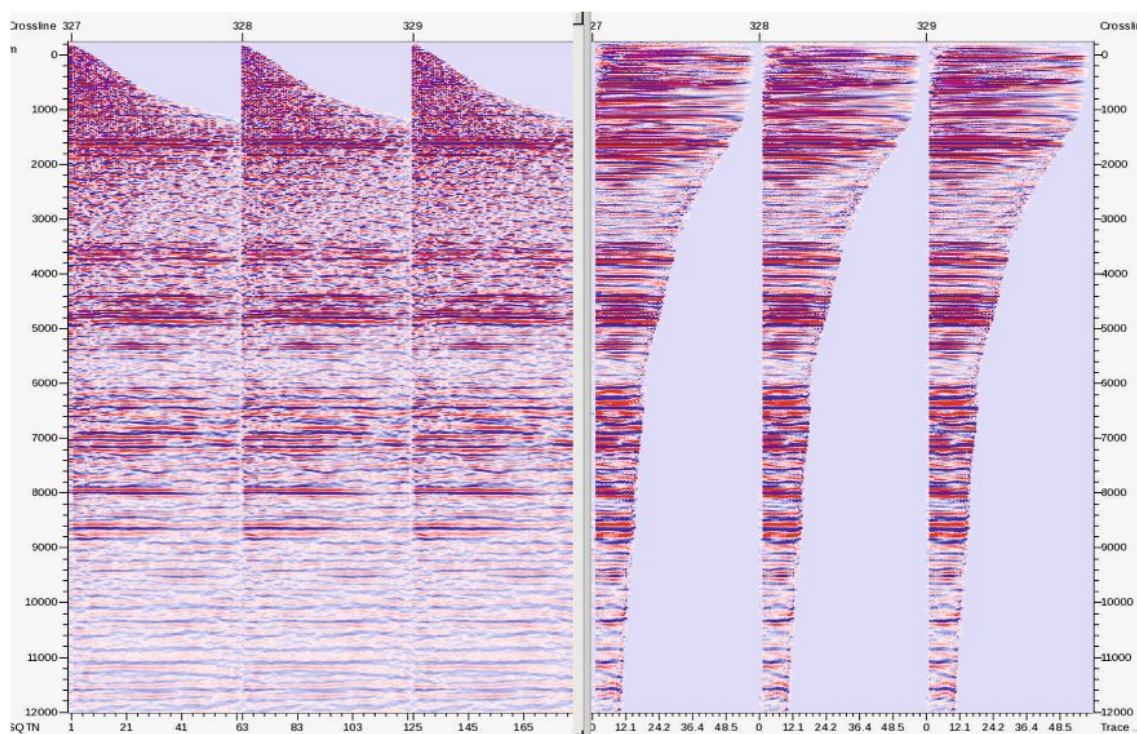
модели на рассматриваемом проекте. Был выполнен расчёт миграции по общим углам отражения (угловая миграция). Данный алгоритм [5] достаточно близок к Gaussian beam, однако, в используемой модификации, имеет ряд принципиальных отличий, основное из которых – трассирование лучей

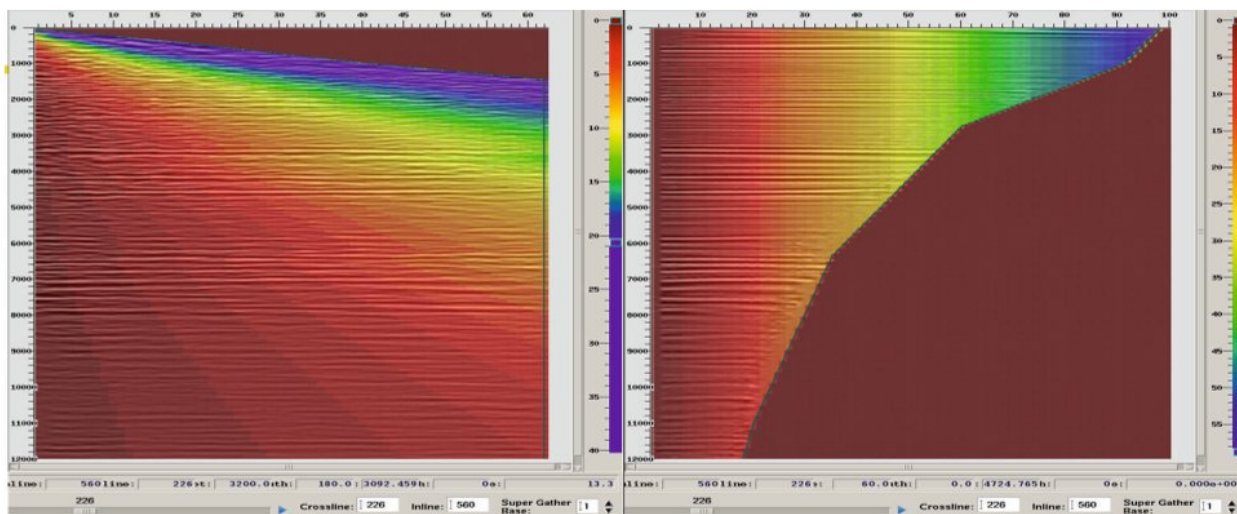


▲ Рис. 11. Атрибут фактической лучевой освещенности, совещенный с результатом угловой миграции. Домен – глубина.

из глубины к поверхности, а не наоборот. Для выполнения расчёта были использованы те же самые сейсмические данные и глубинно-скоростная модель, что и при тестировании других алгоритмов. Продол-

▼ Рис. 12. Пример мигрированных сейсмограмм, полученных при применении различных алгоритмов. Домен – глубина. Слева-направо: Сейсмограммы удалений (Kirchhoff), угловые сейсмограммы, отсортированные по углам раскрытия.





▲ *Рис. 13. Пример мигрированных сейсмограмм, полученных при применении различных алгоритмов, совмещенных с атрибутом углов раскрытия. Домен – глубина. Слева-направо: Сейсмограмма удалений (Kirchhoff), угловая сейсмограмма.*

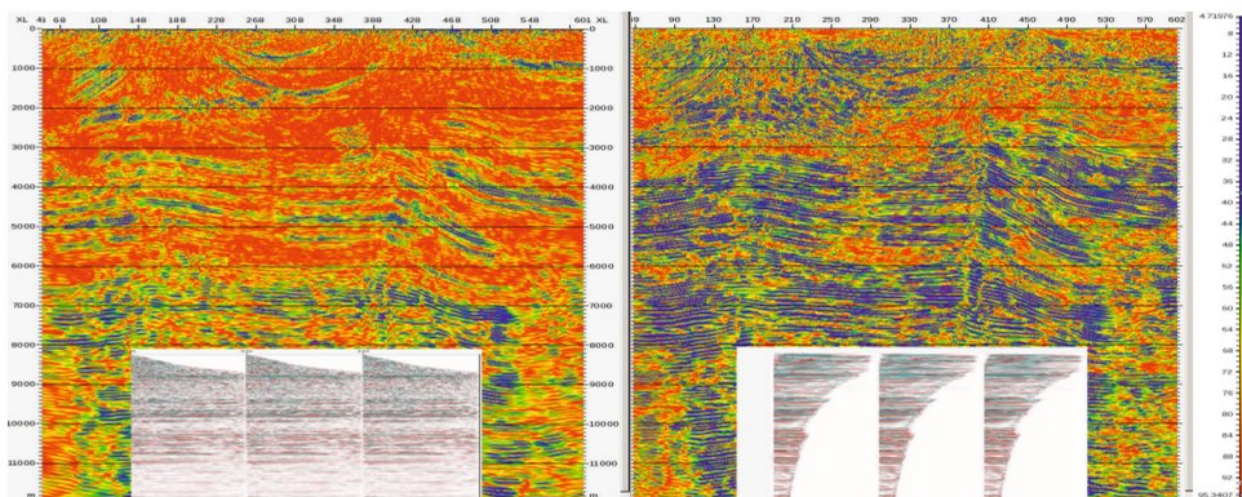
жительность расчёта угловой миграции сопоставима с Gaussian beam, то есть расчет, выполнялся примерно в два раза дольше, чем по алгоритму Kirchhoff, при этом, сопоставляя результаты расчётов по тестируемому алгоритму и базовому Kirchhoff, можно отметить следующее:

- Результат, полученный после угловой миграции – практически не содержит элементов “рассеянной компоненты” [3] (рис. 10). Данный эффект достигнут параметризацией расчёта лучевой трассировки. В результате, разрывные нарушения картируются более однозначно, улучшается прослежива-

емость отражений, как в зоне максимальной освещенности, так и в зоне, где данный параметр имеет не высокие значения (рис. 11). Распределение динамических характеристик не имеет существенных изменений относительно результата, полученного по алгоритму Kirchhoff, что также можно отнести к положительным аспектам, так как общая концепция распределения энергии не изменилась и не требует проведения длительного и ресурсоёмкого анализа и проверки.

При рассмотрении результатов угловой миграции на уровне сейсмограмм, так же

▼ *Рис. 14. Пример атрибута “QC Factor”, рассчитанного по мигрированным сейсмограммам. Домен – глубина. Слева-направо: Kirchhoff, угловая миграция.*



можно отметить положительные эффекты. Полученные угловые сейсмограммы практически не требуют постобработки, (рис. 12), что сводит вмешательство в мигрированное волновое поле к минимуму. Углы раскрытия представлены более презентативной выборкой сейсмических данных в верхней, целевой части сейсмической записи (рис. 13). Данные аспекты, позволяют сделать вывод, что полученные угловые сейсмограммы более пригодны к динамическому анализу, чем сейсмограммы, полученные после миграции по алгоритму Kirchhoff. Вывод подтверждается результатами расчёта атрибута "QC Factor" (рис. 14), дающим представление о значениях среднеквадратичного отклонения функции распределения амплитуд по углам раскрытия, снятого по мигрированным сейсмограммам, от аппроксимации Аки-Ришадса.

Таким образом, сейсмическая модель, полученная после миграции по общим углам отражения, обладает рядом значимых преимуществ по сравнению с результатами миграции по базовому алгоритму Kirchhoff, даже в условиях съёмки МОГТ-3D с достаточно ограниченными параметрами. Расчёт выполняется в приемлемые сроки, которые с учётом экономии на процедурах постобработки, а так же оптимизации параметров миграции, превышают сроки выполнения миграции Кирхгофа не более чем на 40-50 процентов.

Учитывая тот факт, что выполненная угловая миграция, представляет собой частный случай полно-азимутальной угловой миграции, и значимость комплекса результатов, получаемых при реализации данного миграционного решения, существенно выше, в ПАО АНК "Башнефть" принято решение о перспективности дальнейшего тестирования угловых и

полно-азимутальных угловых миграций.

В заключение, хотелось бы подчеркнуть, что сейсмическая миграция является процессом, качество результатов которого может быть обеспечено и улучшено не только за счёт корректно выполненной обработки во временной области, построения адекватной скоростной модели, но также и за счёт подбора оптимального миграционного алгоритма. При принятии решения о необходимости тестовых работ, подобных изложенным в данной статье, важно понимание того факта, что универсального алгоритма миграции, который бы обеспечивал получение оптимального результата в минимальные сроки, в любых сейсмогеологических условиях, на сегодня нет. Мы можем говорить только о наличии базового алгоритма, эффективность применения которого, на участках со сложными сейсмогеологическими условиями, разумно ставить под сомнение и выявлять более перспективные алгоритмические решения. Следует так же отметить, что получение сопоставимых результатов при тестировании миграционных алгоритмов, прежде всего, говорит о высокой точности построенной скоростной модели миграции, и вовсе не означает бесперспективность работ в данном направлении. Принятие же решения о смене базового алгоритма, объективно, не может быть сделано на основе одного прецедента, что подтверждает необходимость и значимость инициирования компаниями – недропользователями тестовых работ подобного рода.

Литература

1. Глоговский В.М., Лангман С.Л., Фиников Д.Б. Погружение волнового поля – альтернатива миграции до суммирования // Нефтегаз. 1998. № 1. С. 165–171.

2. Козлов Е.А. Модели среды в разведочной сейсмологии. Тверь: ГЕРС, 2006. 479 с.

3. Ланда Е.И. Роль дифракционной компоненты волнового поля при построении сейсмических изображений // Технологии сейсморазведки. 2013. № 1. С. 5–31

4. Cordsen A., Galbraith M., Peirce J., 2000, Planning land 3-D seismic surveys (Geophysical Developments Series No.9): Tulsa, SEG.

5. Koren Z., Ravve I. Full-azimuth subsurface angle domain Wavefield Decomposition and Imaging // Geophysics. 2011. Vol. 76, N 1, January–February. P. S1–S13.

6. Thomsen L. Weak elastic anisotropy. Geophysics. 1986, 51, 1954–1966.

Подробнее об авторах

Акуленко

Александр Семёнович

менеджер по обработке сейсмических материалов ПАО АНК "Башнефть".

Окончил Гомельский государственный технический университет имени

П.О. Сухого в 2007 году.

Область научных интересов: полевые работы, обработка данных сейсморазведки.

Калинин

Алексей Юрьевич

главный геофизик ООО «Совфрансгео», кандидат технических наук.

Окончил Оренбургский государственный педагогический университет в 2001 году, Саратовский государственный университет в 2005 году, аспирантуру при Российском государственном геологоразведочном университете им. С. Орджоникидзе в 2009 году.

Область научных интересов: обработка данных сейсморазведки, полевые работы.

Ляпин

Николай Вячеславович

ведущий геофизик ООО «Совфрансгео» в секторе обработки сейсмических данных.

Окончил Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина в 2012 году.

Область научных интересов: обработка данных сейсморазведки.

Иванов

Павел Дмитриевич

геофизик 1 категории ООО «Совфрансгео» в секторе обработки сейсмических данных.

Окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова в 2016 году.

Область научных интересов: обработка данных сейсморазведки, глубинная миграция.