

Обработка данных

Миграция глубинного разреза на основе волнового уравнения на примере данных по Северному морю

The case for applying wave equation depth migration in the North Sea

Ричард Легготт (Richard Leggott), Джон Коули (John Cowley) и Р. Гарет Уильямс (R. Gareth Williams) из компании Veritas DGC объясняют, как они, применив к данным по Северному морю миграцию глубинного разреза на основе волнового уравнения, получили (отчасти неожиданно) удовлетворительный результат.

Миграция глубинного разреза до суммирования по ОГТ (PSDM) стала признанным средством построения сейсмических разрезов в регионах со значительной изменчивостью скоростей по горизонтали. Использование PSDM оказалось полезным для интерпретаторов при работе с данными из разных частей Северного моря, в том числе для областей развития соляных структур, а также скоплений газа и мелководных проливов

До сих пор миграция глубинного разреза до суммирования по ОГТ проводилась с использованием алгоритма Кирхгофа. Этот алгоритм дает значительное улучшение по сравнению с алгоритмами миграции временного разреза, но все же является лишь аппроксимацией полного решения; при нормальной реализации он выделяет только одно отражение одного сигнала от одной точки разреза. недавно появились новые методы (миграция на основе волнового уравнения), которые позволяют обойтись без некоторых допущений, на которых основан алгоритм Кирхгофа. Новые методы требуют больших вычислительных затрат, но в ряде случаев дают лучшие результаты.

Миграция на основе волнового уравнения широко применяется к большим объемам данных по глубоководным частям Мексиканского залива, где складчатые и пластообразные соляные структуры сильно искажают форму волнового фронта, падающего на объекты поиска. Обычные варианты алгоритма Кирхгофа позволяют проследить эти объекты лишь частично, в то время как алгоритмы на основе волнового уравнения дают гораздо лучшее качество изображения и прослеживания амплитуд. До сих пор эти методы не часто применялись к данным по Северному морю, геологическое строение которого считается проще, у подсолевых структур Мексиканского залива. Тем не менее, мы полагаем, что и для Северного моря, особенно для его центральных и южных частей, где развита мезозойская и раннекайнозойская соляная тектоника, миграция на основе волнового уравнения (WEM) дает лучшие, чем алгоритмы Кирхгофа, результаты.

Алгоритмы Кирхгофа

При построении алгоритма миграции Кирхгофа используется высокочастотное приближение, позволяющее перейти от волнового уравнения к системе из уравнения эйконала и уравнения переноса. Уравнением эйконала определяются времена пробега волн, а уравнение переноса описывает перемещение энергии по волне.

Существует много способов решения уравнения эйконала, но в реализациях PSDM обычно используется лучевой метод. Траектории лучей можно рассчитать так,

чтобы они были точными решениями волнового уравнения для одной частоты из спектра волны. Пользуясь высокочастотным приближением (в рамках

которого градиент скорости мало зависит от длины волны) можно считать, что рассчитанные траектории применимы для всех частот. Это допущение позволяет увеличить скорость расчета времен пробега ценой снижения точности и разрешения. К сожалению, такой подход пригоден лишь для достаточно гладких скоростных законов, при которых работает высокочастотное приближение. Поэтому необходимо предварительное сглаживание скоростной модели перед расчетом лучей в ходе PSDM по алгоритму Кирхгофа.

Проследив много лучей, можно построить полный волновой фронт. В зависимости от скорости энергия может распространяться от поверхности к точке внутри разреза по нескольким траекториям. Но в большинстве вариантов алгоритма Кирхгофа изображение строится по одному лучу, поэтому в случаях, когда найдено более одного луча, из них следует выбрать единственный. Обычно выбираются траектории с минимальным временем пробега или (как в приведенных здесь примерах) с максимальной расчетной энергией. Прямым следствием использования единственной траектории будет то, что алгоритмы Кирхгофа не дают изображение по всему волновому фронту, а лишь по части его..

В идеале уравнение переноса следует решать параллельно с уравнением эйконала. Но вычислительные затраты в этом случае оказываются больше, чем при решении волнового уравнения напрямую. Чтобы сократить их, при расчете граничных условий на амплитуды делается ряд сильных допущений. Поэтому в сложных ситуациях алгоритмы Кирхгофа часто дают ложные аномалии амплитуд.

Упомянутые приближения процесса распространения волн позволяют эффективно строить с помощью алгоритма Кирхгофа сейсмическое изображение. От ряда допущений можно отказаться, но тогда снижается та самая эффективность, которая делает алгоритмы Кирхгофа столь полезными и привлекательными.

Алгоритмы на основе волнового уравнения

Численное решение волнового уравнения не требует высокочастотного приближения. Вычислительные затраты при этом будут больше, чем для традиционных алгоритмов Кирхгофа, но современные компьютеры позволяют сделать применение волнового уравнения эффективным. Эффективность можно выразить в терминах расчета падающих и отраженных волн. Например, в типичном алгоритме построения разреза для одной расстановки одновременно будут рассчитываться продолжения вниз волновых полей падающих волн от источника и отраженных волн от приемника. Далее

Обработка данных

для построения изображения на каждой глубине используется условие наличия изображения, например корреляция волновых полей.

Снижение, за счет принятых допущений, вычислительных затрат при продолжении поля вниз достигается ценой снижения точности для крутопадающих границ. Несмотря на это, многие допущения, принимаемые в алгоритмах Кирхгофа, в методах продолжения волновых полей не используются. Далее для удобства методы продолжения волновых полей будут называться миграцией на основе волнового уравнения (WEM).

Искажения волнового поля соляными структурами

Пластовые залежи соли распространены в глубоководной части Мексиканского залива. Скорость упругих волн в этих телах выше, чем во вмещающих осадочных породах. Кроме того, граница соли и осадков часто имеет сложное строение. Эти две особенности приводят к сильной фокусировке и расфокусировке упругой волны на границе соль-осадки. Такое искажение волны может привести к тому, что некоторая точка разреза будет подсвечена несколькими лучами от одного источника – к ситуации, когда миграция по алгоритмам Кирхгофа не дает удовлетворительных результатов.

В последние годы показано (Zhang et al, 2003), что алгоритмы WEM дают существенно лучшее изображение подсолевых структур Мексиканского залива, чем процедура PSDM по алгоритмам Кирхгофа. На разрезах отмечаются более четкие и непрерывные отражающие границы, лучшие соотношения сигнал-шум и амплитуды.

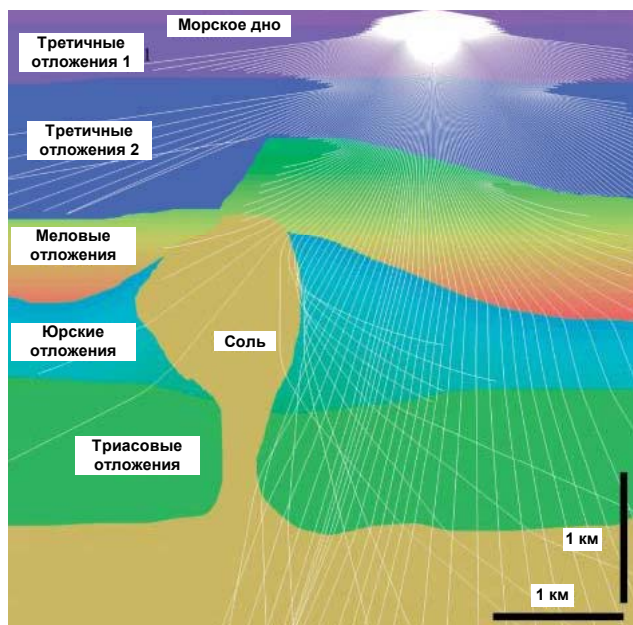


Рис. 1. Модель соляного диапира в южной части Северного моря. Цветом показана скоростная модель, белыми линиями – траектории лучей. Правее соляной структуры отмечаются кратные отражения в глубоких слоях. Лишь малая часть лучей, а значит, и энергии проходит из соли в отложения мела, юры и триаса.

В терминах волновых полей такой результат объясняется использованием полного волнового поля, а не части его, как в алгоритмах Кирхгофа с выбором единственной траектории луча

Можно ли ожидать от WEM таких же преимуществ при изучении геологии Северного моря? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим сначала несколько схематических моделей и последовательных вариантов обработки.

Модель южной части Северного моря

Первая схематическая модель (рис. 1) представляет соляное тело из южной части северного моря. В левой части рисунка виден крупный соляной диапир, перекрытый разбитым слоем отложений мелового возраста с большим вертикальным градиентом скоростей. Белыми линиями показаны траектории лучей, прослеженных от источника на поверхности. Высокий контраст скоростей на краю диапира вызывает значительное преломление лучей. Такой сильный изгиб лучей эквивалентен частичному отражению от поверхности сложной формы. Как следствие, лучи, отраженные от края соли обратно в осадочные слои, пересекают много других лучей. Таким образом, существует много траекторий, ведущих от поверхности к точкам вблизи соляного диапира. Более того, времена пробега для многих траекторий близки, а распространение происходит в одних и тех же геологических слоях, поэтому можно ожидать, что и амплитуды будут близки. Таким образом, необходимо трассировать все лучи

Заметьте, что разлом в кровле мела вносит искажения в форму волновых фронтов. Слева от разлома, например, «тень разлома» прослеживается даже в третичных отложениях. Для данного положения поверхности траектории до глубинных объектов не подвержены влиянию разлома. Но, если пункт возбуждения окажется ближе к разлому, а целевой горизонт – глубже, траектории могут быть сильно искажены влиянием, как разлома, так и соляного тела.

Резкий (отрицательный) контраст скоростей на подошве мела также приводит к сильному искривлению лучей. В данном случае сравнительно простая геометрия подошвы мела не вносит значительных искажений в распространение волн. Но если форма границы будет более сложной, возникнет фокусировка и расфокусировка упругих волн. В этом случае, кроме прочего, возникнут дополнительные кратные волны.

Анализ плотности траекторий позволяет также выявить особенности распространения волн. Траектории идут реже там, где из-за профиля скоростей возникают сильные отклонения; по той же причине происходит размазывание энергии вдоль волны. Такая картина, наблюдаемая левее диапира на рис. 1, показывает, что в данном случае через соль проникнет лишь малая часть энергии. Напротив, там, где профиль скоростей приводит к малому расхождению или даже к схождению лучей, траектории сгущаются, что наблюдается правее соляного диапира.

Обработка данных

Как показано выше, большинство процедур PSDM, основанных на алгоритмах Кирхгофа не отслеживают неединственные траектории лучей, и, стало быть, не следует ожидать, что при построении изображения энергия учитывается полностью. Кроме того, в алгоритмы Кирхгофа подавляют сильную изменчивость скоростей, что может привести к появлению в результатах обработки артефактов, называемых «улыбка миграции» («migration.smile»)

Поэтому можно ожидать, что алгоритм WEM в ситуациях такого типа может дать лучшее изображение.

Искажения упругих волн в южной части Северного моря

Чтобы понять воздействие этих неоднородностей скорости на волновой фронт, мы сформировали модельный набор данных, представлявший собой импульсную характеристику по центровым лучам от единственного сигнала. Пункты возбуждения и приема располагались в той же точке, что и источник лучей на рис. 1. Импульсная характеристика будет иметь те же структуру и амплитуду, что и волновое поле, продолженной вниз.

На рис. 2 и 3 представлены импульсные характеристики в моменты времени 1.5, 2, 2.5 и 3 с. На рис. 2а-г представлены результаты применения алгоритма Кирхгофа, на рис. 3а-г – алгоритма WEM.

На времени 1.5 с (рис. 2а и 3а), существенных различий между алгоритмами Кирхгофа и WEM не видно. На этих ранних временах волна еще не достигла неоднородностей разреза, осложняющих поле скоростей, поэтому допущения алгоритма Кирхгофа еще работают.

На времени 1.5 с (рис. 2б и 3б) оба алгоритма дают близкую кинематику; отметим, однако, что в результатах WEM видно уменьшение амплитуд на входе волны в соляной диапир, а в результатах алгоритма Кирхгофа – нет. Это соответствует результатам анализа траекторий лучей рис. 1. На остальных разрезах рис. 2 и 3 этот эффект также виден. Ошибочно высокие амплитуды внутри соляного тела и под ним, отмечаемые в результатах алгоритма Кирхгофа, могут объяснить частое появление «улыбок миграции» на таких разрезах

На времени 2.5 с (рис. 2в и 3в), импульсные характеристики также кинематически различны. В результатах WEM виден фронт волны, отраженной от края диапира, что также соответствует результатам анализ траекторий на рис. 1. Поскольку алгоритм Кирхгофа не отслеживает неединственные траектории, в его результатах виден лишь фронт, соответствующий траектории луча с максимальной энергией. Та же картина наблюдается на времени 3 с (рис. 2г и 3г).

Результаты WEM соответствуют результатам анализа траекторий лучей на рис. 1. Результаты алгоритма Кирхгофа неполны и не дают достаточной информации по амплитудам. Таким образом, можно ожидать, что применение алгоритма Кирхгофа приведет к фокусировке энергии, шуму на разрезах, а также к неверному определению амплитуд. Вопрос лишь в том, насколько серьезны эти эффекты для реальных данных.

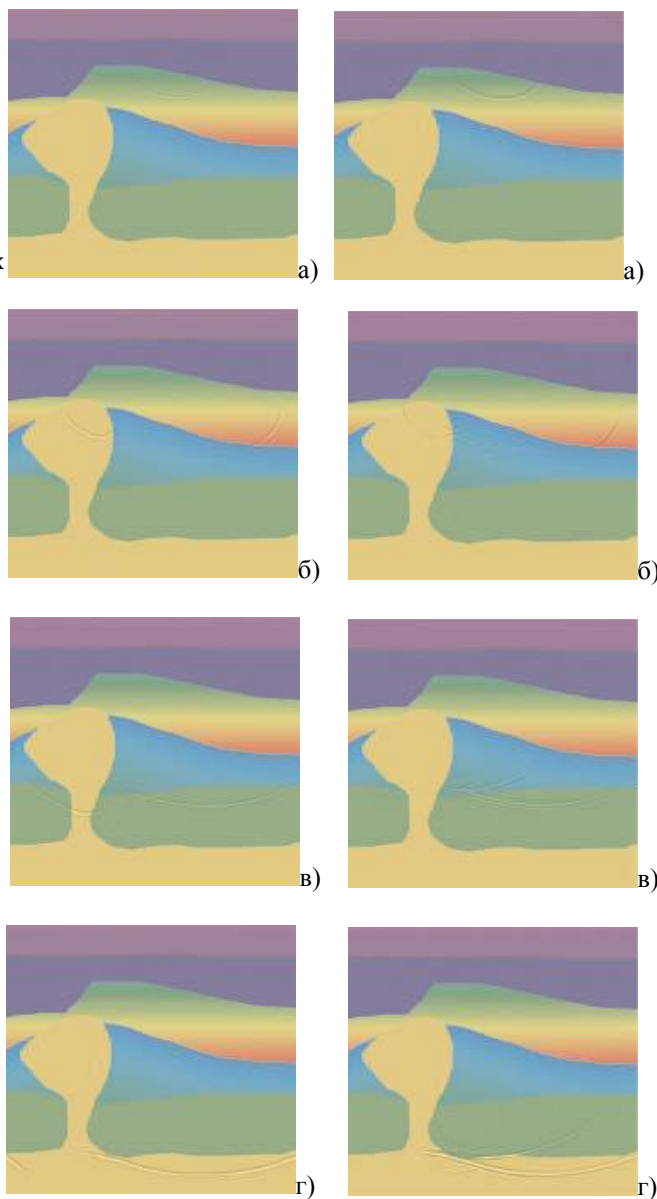


Рис. 2а-г (слева) Результаты применения алгоритма Кирхгофа со скоростной модели рис. 1 на временах 1.5 с (а), 2 с (б), 2.5 с (в), 3 с (г). Левее и ниже соляной структуры амплитуды завышены. Справа от структуры видны остатки, связанные с отбором одной траектории.

Рис. 3а-г (справа) То же, но с применением алгоритма WEM. Низкие амплитуды левее структуры переданы верно. Справа от структуры использованы все траектории.

Искажения волновых полей в Центральном грабене

Вторая схематическая модель представляет район Центрального грабена. Разрез скоростей для модели представлен на рис. 4.

Обработка данных

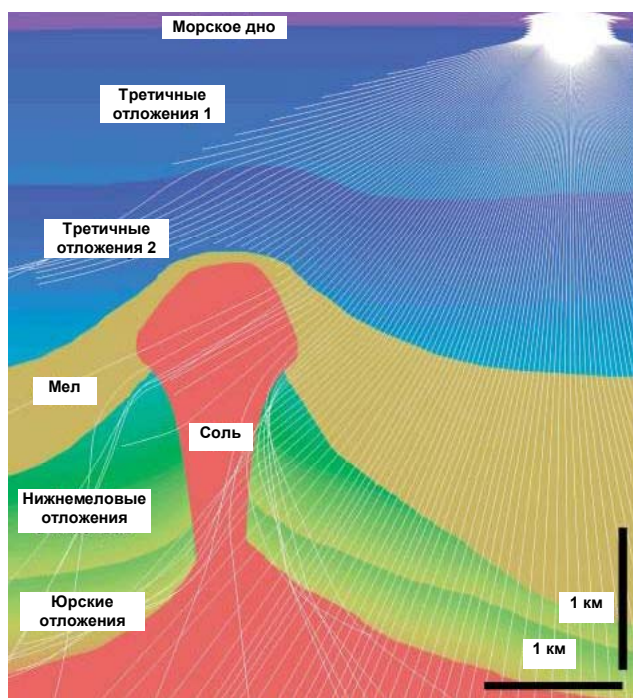


Рис. 4. Модель Центрального грабена. Скоростная модель показана цветом, траектории лучей – белыми линиями. Снова видны перекрытие траекторий и их неравномерное распределение

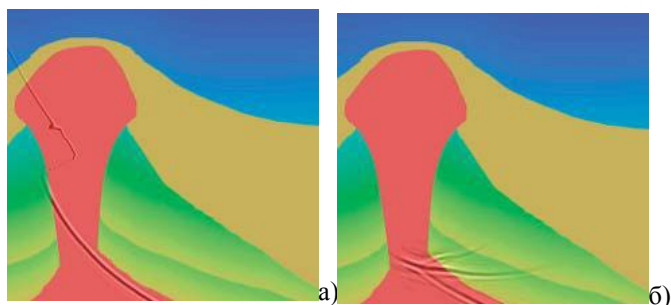


Рис 5а Результаты применения алгоритма Кирхгофа со скоростной моделью рис. 4. Видны неверная передача амплитуд внутри соляной структуры и неполная обработка правее нее.

Рис 5б То же для алгоритма WEM. Верно переданы низкие амплитуды внутри соляной структуры; справа от нее обработка проведена полностью.

Там же показаны траектории лучей от источника на поверхности. Как и в примере для южной части Северного моря, видны области перекрытия, а также разрежения траекторий лучей.

Как и в предыдущем примере, на рис. 5а и 5б сравниваются импульсные характеристики по центровым лучам по результатам WEM и алгоритма Кирхгофа. Как и в предыдущем случае, в результатах WEM виден фронт волны, отраженной от края диапира.

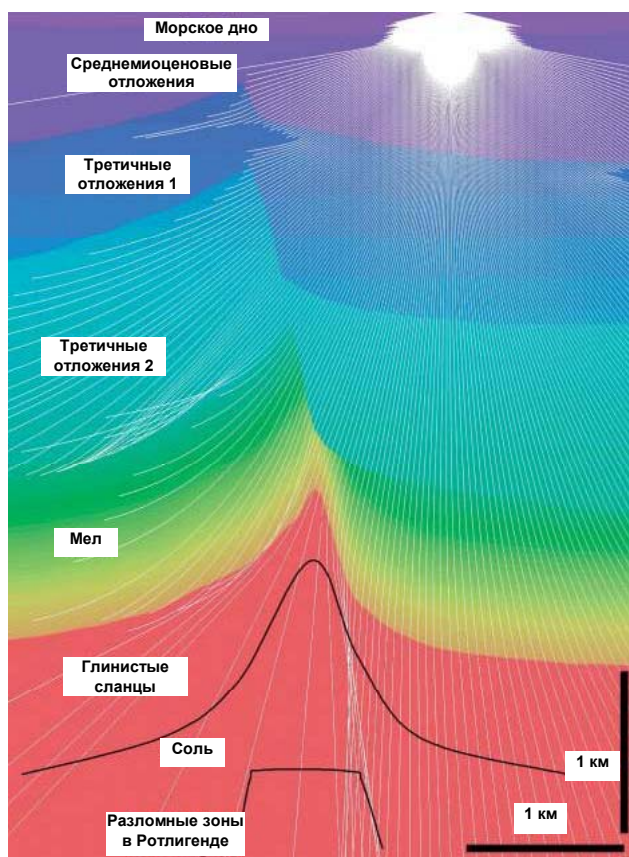


Рис. 6. Модель блока Ротлигенд под разломом в мелу и соляной линзой. Обозначения скоростей и лучей те же. Даже в этой простой модели видны перекрытия лучей и зоны пониженных амплитуд.

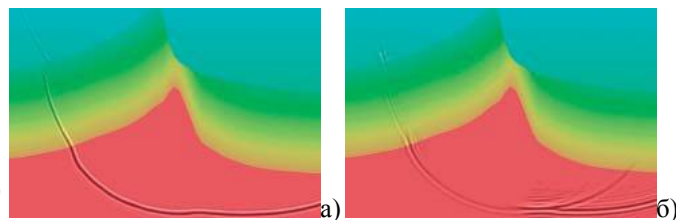


Рис. 7а. Результаты применения алгоритма Кирхгофа со скоростной моделью рис. 6. Как и ожидалось, амплитуды переданы неверно, обработка не завершена.

Рис. 7б. То же для алгоритма WEM. Сложное изменение амплитуд передано заметно лучше; обработка проведена полностью.

В результатах алгоритма Кирхгофа он не прослеживается. Кроме того, в результатах алгоритма Кирхгофа присутствуют высокоамплитудный фронт в пределах диапира, хотя траектории лучей показывают, что внутрь диапира проникает лишь малая часть энергии волны.

Таким образом, и в другой геологической ситуации мы пришли к тем же выводам, что и в предыдущем примере.

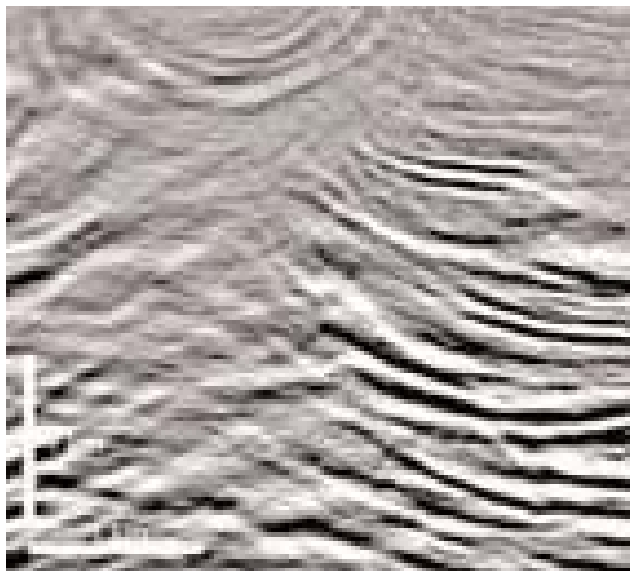


Рис. 8а. Фрагмент разреза в южной части Северного моря после применения алгоритма Кирхгофа. Слева внизу – основание соляного диапира. Ошибки миграции частично заглушают полезный сигнал искажают положение краев структуры.

Разломная зона в домеловых отложениях и соляная линза

На рис. 6. представлена еще одна, более простая ситуация, относящаяся к южной части Северного моря – блок Ротлигенд (Rotliegend) под разломом. Показаны скоростная модель и траектории лучей от источника на поверхности. Под разломом заметна существенная фокусировка лучей.

На рис. 7а и 7б показаны (в той же форме, что и ранее) результаты применения миграции по алгоритму Кирхгофа и WEM для модели блока Ротлигенд. Алгоритм Кирхгофа дал гладкий непрерывный волновой фронт. Напротив, в результатах WEM видна значительная изменчивость: высокие амплитуды в зоне фокусировки лучей под разломом, малые амплитуды в зоне расхождения лучей слева от разлома, а также фронт преломленной волны справа от разлома. Даже для такого разреза с более простой структурой есть основания ожидать, что результаты применения WEM окажутся лучше, чем результаты алгоритма Кирхгофа.

Полевые данные

из южной части Северного моря

Чтобы выяснить степень проявления вышеописанных эффектов на полевые данные, алгоритм WEM проверен на двух наборах полевых данных. В обоих случаях скоростной разрез строился и уточнялся с использованием алгоритма Кирхгофа. Затем для той же модели был применен алгоритм WEM. В обоих случаях можно ожидать улучшения изображения после корректировки модели по результатам WEM.

Первый пример относится к южной части Северного моря. При построении обоих разрезов использована вертикально-изотропная скоростная модель (vertical transverse isotropy velocity model).

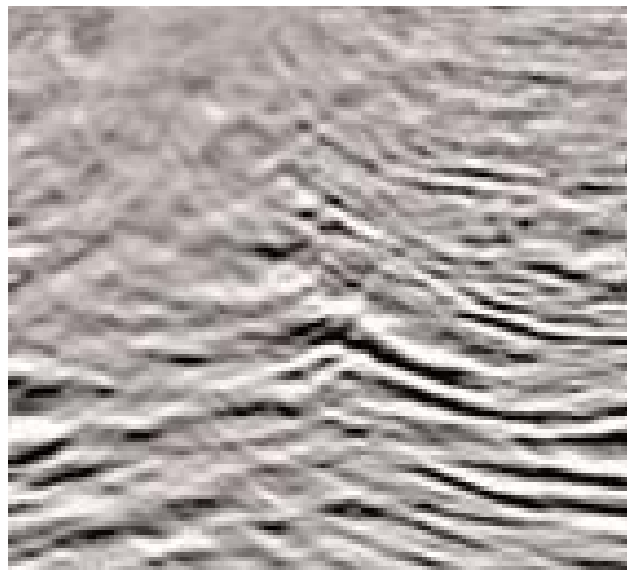


Рис. 8б. Тот же фрагмент после применения алгоритма WEM с той же скоростной моделью, что на рис. 8а. Изображение лучше, края соляной структуры видны четче. Видно строение разреза под солевой структурой.

На рис. 8а представлены результаты применения алгоритма Кирхгофа, а на рис. 8б – алгоритма WEM к отражению от нижней границы соляной структуры. Между разрезами есть три существенных отличия. Во-первых, в результатах WEM меньше артефактов – таких, как «улыбка» в пределах той же соляной структуры (левый верхний угол разреза по алгоритму Кирхгофа). Во-вторых, в результатах WEM осадки прослеживаются на меньших расстояниях от правого края соляной структуры, чем в результатах алгоритма Кирхгофа. В-третьих, в результатах WEM видно геологическое строение подсолевой толщи, которое в результатах алгоритма Кирхгофа скрыто.

Полевые данные из центральной части Северного моря

Второй полевой пример относится к центральной части Северного моря. При построении разрезов по обоим алгоритмам использована изотропная скоростная модель.

На рис. 9а показаны результаты применения алгоритма Кирхгофа по фрагменту вблизи основания соляного диапира. В левой части рисунка отчетливо видно слоистое строение осадков. В правой части видна соляная структура, край которой определяется нечетко, так как шум, связанный с погрешностью миграции, накладывается на полезный сигнал.

Результаты применения алгоритма WEM к тем же данным представлены на рис. 9б. На этом разрезе также четко видно слоистое строение осадков. В то же время граница осадков и соляной структуры проявилась гораздо четче, чем в результатах алгоритма Кирхгофа. По результатам WEM край соляного диапира определяется гораздо увереннее, чем по результатам алгоритма Кирхгофа.

Обработка данных

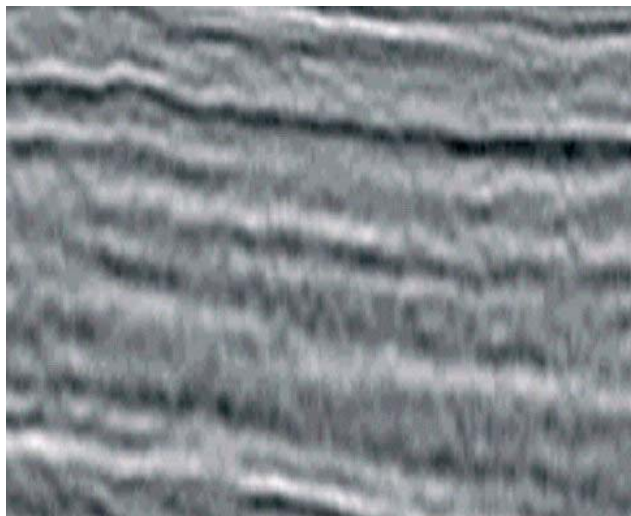


Рис. 9а. Фрагмент разреза в Центральной части Северного моря после применения алгоритма Кирхгофа. В середине виден соляной диапир. Из-за ошибок миграции трудно определить положение краев структуры.

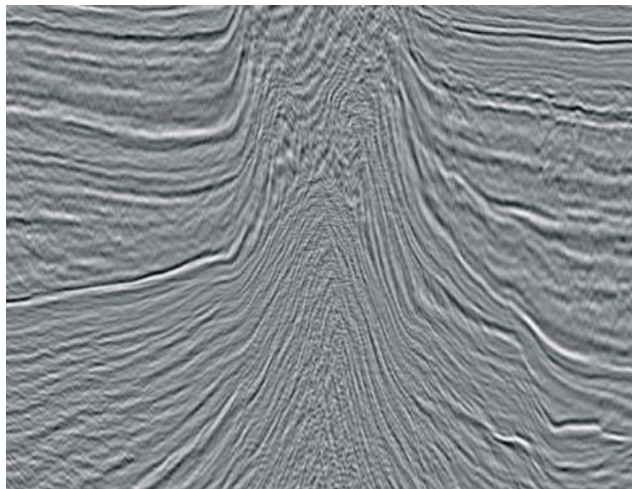


Рис. 9б. Тот же фрагмент после применения алгоритма WME с той же скоростной моделью, что на рис. 9а. Края соляной структуры определяются лучше, скоростную модель и результаты интерпретации можно скорректировать.

Заключение

На многих участках южной и центральной частей Северного моря присутствует сложная соляная тектоника. В таких местах траектории лучей сложны, поэтому при построении даже умеренно сложных разрезов алгоритмы Кирхгофа не могут точно передать полное волновое поле. Обработка модельных данных ясно показала, что алгоритмы Кирхгофа задействуют лишь часть волнового поля, а также могут давать искаженные амплитуды. Расхождение траекторий лучей и вытекающее отсюда уменьшение амплитуд снижают отношение сигнал-шум, и данные оказываются зашумленными, а после миграции могут даже быть забиты нежелательными артефактами. От алгоритмов WEM можно ожидать:

- лучшего выделения первичных отражений;
- устранение шума и «улыбок» при миграции;
- лучших итоговых скоростных моделей;
- лучшей сохранности амплитуд.

На полевых примерах заметно значительное различие результатов применения алгоритмов Кирхгофа и WEM.

Алгоритм WEM меньше искажает амплитуды и показывает геологическое строение на меньших расстояниях от соляных структур, чем алгоритмы Кирхгофа. Особенно велики преимущества WEM вблизи вершин и оснований соляных диапиров, а именно здесь находятся многие ловушки углеводородов. Следует ожидать, что на таких разрезах алгоритм WEM даст лучшее изображение залежи, чем алгоритмы Кирхгофа.

Благодарности

Авторы благодарят Ричарда Моргана (Richard Morgan) за составление геологических моделей, а также Ники Хатчинсон(а) (Nicky Hutchinson) и многих других коллег за участие в полезных дискуссиях.

Литература

Zhang Y., Sun J., Notfors C., Gray S., Chernis L., Young, J [2003] Delayed-shot 3D Prestack Depth Migration, *SEG annual meeting*