

Обработка данных

Применение миграции методом экстраполяции волновых полей на эксплуатируемых участках

Present-day use of wavefield extrapolation migration in production

Крис Суфлерис (Chris Soufleris)¹ и Кристоф Сторк (Christof Stork)² из компании WesternGeco, обсуждают новое поколение алгоритмов построения глубинных разрезов – миграцию методом экстраполяции волновых полей.

В последнее время значительная часть данных сейсморазведки при построении глубинных разрезов обрабатывается по алгоритму Кирхгофа, что дает значительные преимущества при разведке и эксплуатации. Благодаря гибкости и скорости методы Кирхгофа стали становым хребтом

процесса интерпретации и позволяют эффективно проверять и строить модели скоростей в разнообразных сложных геологических ситуациях. Эти устойчивые скоростные модели позволяют получать сейсмические разрезы недостижимой ранее детальности, что улучшило понимание сложных структур и помогло вывести буровиков на открытия, позволявшие по-новому увидеть весь участок работ, как при работах на подсолевые комплексы глубоководной части Мексиканского залива.

Широкое применение метода Кирхгофа позволило накопить большой опыт, а также лучше понять его ограничения. Недавно появилось новое поколение алгоритмов построения глубинных разрезов, которые дают существенное улучшение качества изображения по сравнению с методом Кирхгофа. В этих алгоритмах – миграции методом экстраполяции волновых полей (МЭВП), называемой также миграцией на основе волнового уравнения, – решается дифференциальное волновое уравнение вдоль одного луча и, тем самым, проводится экстраполяция волнового поля в глубину.

Сопоставление свойств МЭВП и алгоритмов Кирхгофа

В алгоритмах МЭВП не действуют ограничения метода Кирхгофа.

В методе Кирхгофа решается интегральное уравнение, заданное на сетке времен пробега, определяемой путем прослеживания лучей, что соответствует асимптотическому представлению функций Грина.

В методах Кирхгофа используется, как правило, одно вступление (обычно с наибольшей энергией), а также, в хороших реализациях, учитываются крупные (12–15 км) отражающие площадки и выделяются опрокинутые складки. Однако, зависимость от времен пробега, определенных прослеживанием лучей, делает такие методы чувствительными к поведению луча, который в сложной геологической ситуации может быть прослежен ошибочно, что приводит к возникновению шума в результатах миграции в слабоосвещенных зонах.

Напротив, при миграции по методу экстраполяции волновых полей используются полные функции Грина

¹Corresponding author: Chris.Soufleris@WesternGeco.com - WesternGeco, Schlumberger House, Gatwick, W Sussex, RH6 0NZ, UK.

²WesternGeco, 1625 Broadway, Suite 1300, Denver, Colorado, 80202, USA

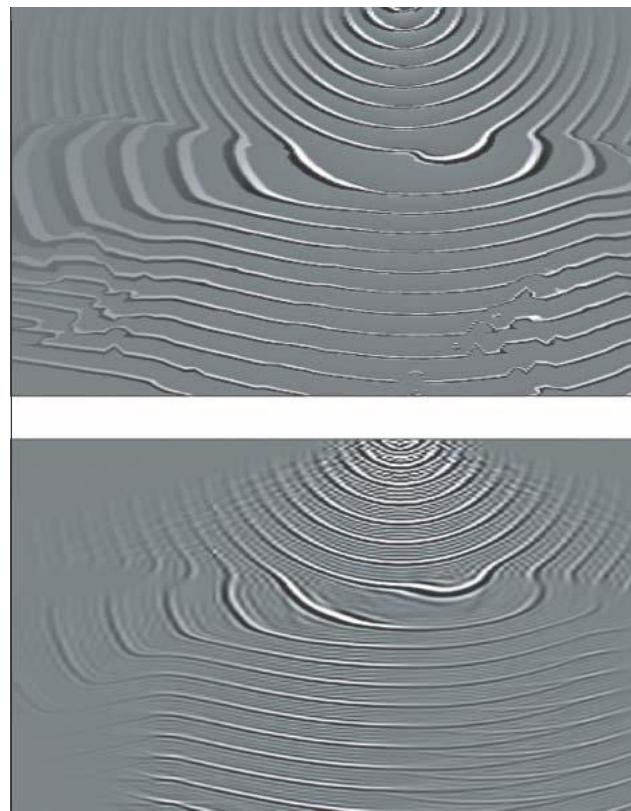


Рис. 1. Отклики на отдельный импульс, построенные путем миграции по Кирхгофу (вверху) и путем МЭВП (внизу) по части модели солнечной структуры SEG. Отметим, что эффекты распространения волн в сложном разрезе (дифракция, кратные волны и затухание амплитуды в затененной области) видны только при использовании МЭВП.

со всеми вступлениями и явно учитываются неединственность траекторий и сложное рассеяние, а также эффекты фокусировки и расфокусировки. МЭВП основана на более полном представлении естественного распространения волн в негладкой скоростной модели сложного строения.

На рис. 1 представлены характерные отклики на отдельный импульс, построенные путем миграции по Кирхгофу и путем МЭВП, причем в последнем случае отражено более сложное распространение волн.

Обработка данных

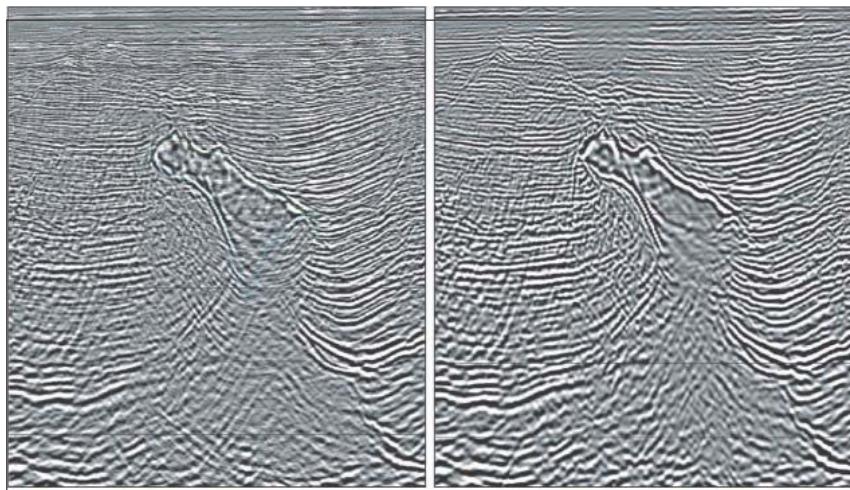


Рис. 2. Разрезы соляной структуры, погребенной в осадках, полученные миграцией по Кирхгофу (слева) и профильной МЭВП (справа). Применение МЭВП улучшило изображение по краям соляной структуры, в частности в затененной зоне под ней. Верхняя частота спектра сигнала при МЭВП – 20Гц.

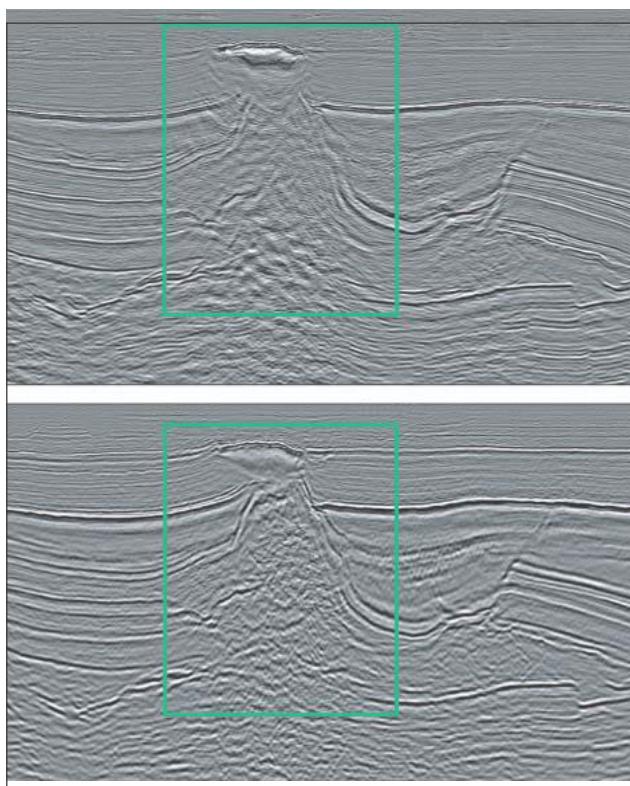


Рис. 3. Разрезы крутопадающей структуры с чем-то вроде отдельного соляного тела в верхней части, полученные миграцией по Кирхгофу (вверху) и профильной МЭВП (внизу). Верхняя частота спектра сигнала при МЭВП – 40Гц. Несмотря на одну и ту же скоростную модель, строение, в том числе – крутопадающие границы, видно более четко в результатах МЭВП.

Совместное применение МЭВП и методов Кирхгофа на практике

Следует ли отказаться от алгоритмов Кирхгофа, если разрезы по МЭВП оказываются лучше? Нет, пока рано. Оказывается, что преимущества МЭВП быстро сходят на нет при использовании неточной скоростной модели (Lafond et al., 2003). Это значит, что прежде, чем пытаться

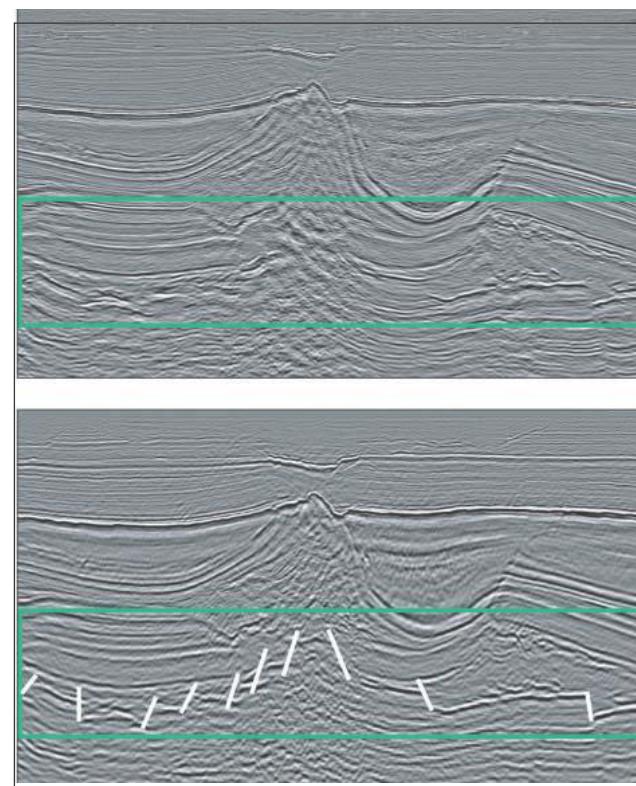


Рис. 4. Разрезы зоны развития многочисленных разрывных нарушений, полученные миграцией по Кирхгофу (вверху) и профильной МЭВП (внизу). Верхняя частота спектра сигнала при МЭВП – 40Гц. При одной и той же скоростной модели только на разрезе МЭВП возможна детальная интерпретация отражений от разбитого разломами основания соляной структуры.

воспользоваться преимуществами МЭВП, следует построить как можно более точную скоростную модель. Кроме того, это менее затратно. При построении глубинных разрезов на действующих месторождениях в настоящее время используется алгоритм Кирхгофа, и в этой работе мы рассмотрим, как алгоритмы МЭВП дополняют метод Кирхгофа, что позволяет использовать лучшие качества обоих подходов: быструю, и с низкими затратами, сходимость к надежной скоростной модели,

Обработка данных

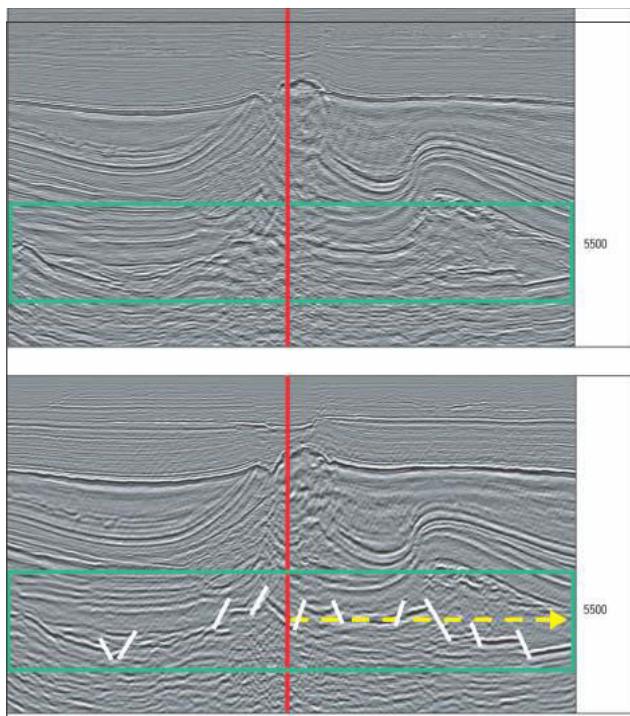


Рис. 5. Разрезы разломной зоны, полученные миграцией по Кирхгофу (вверху) и профильной МЭВП (внизу). Верхняя частота спектра сигнала при МЭВП – 40Гц. На разрезе МЭВП заметны более четкая дифференциация по отражающей способности и осложнение разломами, но отчетливое отражение от основания соляной структуры. Можно сравнить глубину отражающего горизонта на разрезе продольной и поперечной расстановки (рис.4). Красной вертикальной линией показано пересечение продольного и поперечного профилей.

которую затем можно детализировать и уточнить в местах с наиболее сложным строением, улучшив качество изображения и повысив достоверность интерпретации.

Приведенные примеры глубинных разрезов относятся к типичным работам на действующих месторождениях. Применен алгоритм профильной МЭВП (shot-profile WEM) с экстраполяцией волнового поля по «экранным путям распространения» (generalized screen propagators). В алгоритме предусмотрено выравнивание амплитуд для учета различной освещенности, ввод поправок Венцеля-Крамерса-Брилью-Джеффриса (Wentzel-Kramers-Brillouin-Jeffreys, WKBJ), антиалийсинговые процедуры, а также учет анизотропии. Профильная МЭВП является также гибким средством миграции данных, полученных с различными расстановками – наземными, морскими или скважинными (ОВС) и, в отличие от других вариантов МЭВП, может без ограничений работать со сложными трехмерными полями.

Поскольку затраты на выполнение профильной МЭВП возрастают, в частности, при увеличении числа ПВ и увеличении верхней частоты спектра сигнала, в приведенных примерах верхняя частота ограничена 40 Гц, и миграция проведена лишь для части данных. Сначала миграция проводится для 20% данных, затем – еще для 20%, а результаты двух прогонов объединяются. Таким образом, не увеличивая вычислительных затрат, удается сосредоточиться на сложном строении глубинной части. Такая гибкость полезна при практическом применении.

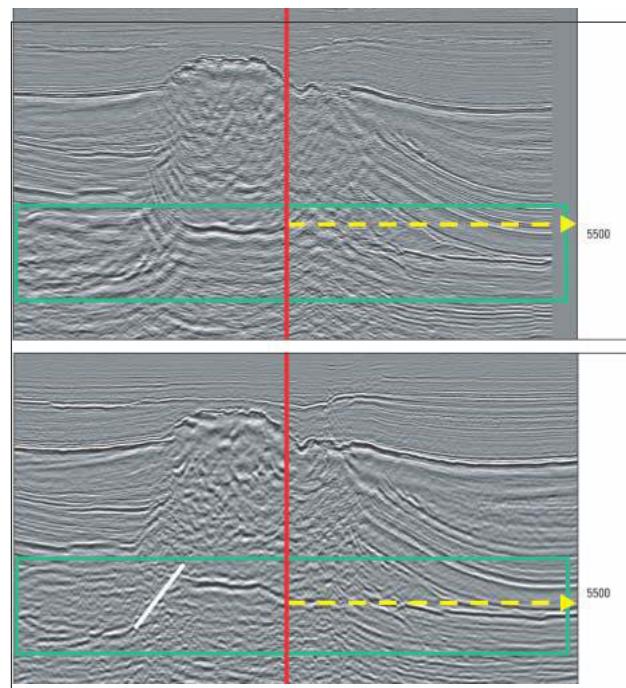


Рис. 6. Разрезы, полученные миграцией по Кирхгофу (вверху) и профильной МЭВП (внизу) по профилю, пересекающему профиль рис.4. Верхняя частота спектра сигнала при МЭВП – 40Гц. Красной вертикальной линией показано пересечение продольного и поперечного профилей. Отметим значительное расхождение глубины основания соляной структуры на разрезах по Кирхгофу и по МЭВП. На пересекающихся продольном (рис. 4) и поперечном (рис. 6) профилях МЭВП граница прослеживается на одной и той же глубине.

На этапе построения скоростной модели нет необходимости проводить миграцию для всех данных: опыт показывает, что основная информация может быть получена при построении разреза лишь по части данных.

Во всех приведенных примерах при выполнении МЭВП использована скоростная модель, полученная методом Кирхгофа. На рис. 2 показано прямое влияние МЭВП на повторную интерпретацию данных по соляному телу и вмещающему осадочному разрезу. Успешная повторная интерпретация с использованием МЭВП стала возможна при ограничении верхней частоты на уровне 20 Гц.

На рис. 3-6 сравниваются разрезы действующего месторождения в Северном море, полученные методом Кирхгофа и путем МЭВП. На разрезах МЭВП отражения различаются отчетливее, а структуры определяются лучше. Следует отметить разницу в применении МЭВП в крупных работах на действующем месторождении и в менее масштабных на стадии проектирования и ввода в эксплуатацию, которые обычно сопровождаются значительными объемами уточняющего бурения. В первом случае для получения конечного результата может быть достаточно однократного выполнения МЭВП (рис. 2); во втором случае в ходе построения модели может потребоваться выполнить миграцию несколько раз с различными целями (например, определить положение краев соляной структуры и ее влияние на прослеживание структур под ней.).

Обработка данных

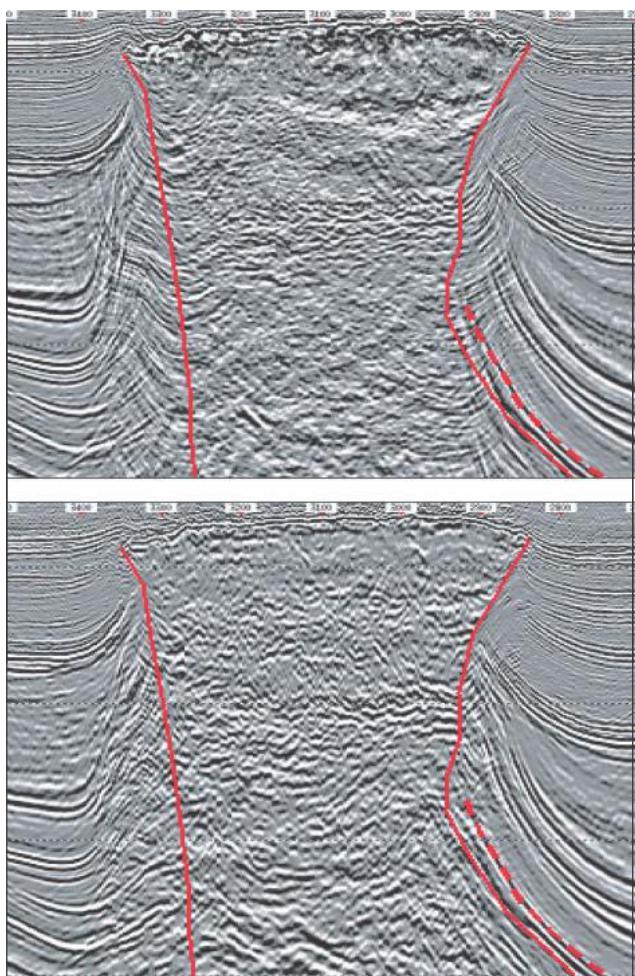


Рис. 7. Разрезы соляного диапира, полученные миграцией по Кирхгофу (вверху) и профильной МЭВП (внизу). На разрезе МЭВП западный край ясно определяется по обрыву осадочной структуры. Кроме того, по результатам МЭВП восточный край следует сместить от положения, определенного по Кирхгофу (показано пунктиром), в новое положение, западнее (показано сплошной красной линией).

На рис. 7 приведен пример применения профильной МЭВП, позволившего уточнить скоростную модель путем изменения положения крутопадающих границ соляной структуры. При сравнении результатов метода Кирхгофа и МЭВП может возникнуть желание поддержать новую технологию и показать те примеры, в которых разрезы МЭВП лучше разрезов по Кирхгофу. Опыт работы на действующих месторождениях показывает, что это не всегда так. Поскольку сложное геологическое строение по-разному влияет на эти методы, следует иметь ввиду, что алгоритм Кирхгофа устойчив. Сравнение будет правомочным для хорошей реализации метода, в которой используются времена пробега по вступлениям с максимальной энергией, оптимальными интервалом отсчетов и антиалийсинговыми процедурами, правильным обращением с амплитудами и возможностью работы с большими отражающими площадками.

Результаты профильной МЭВП можно выдавать после суммирования по ОГТ или по углам, в последнем случае вычислительные затраты будут выше.

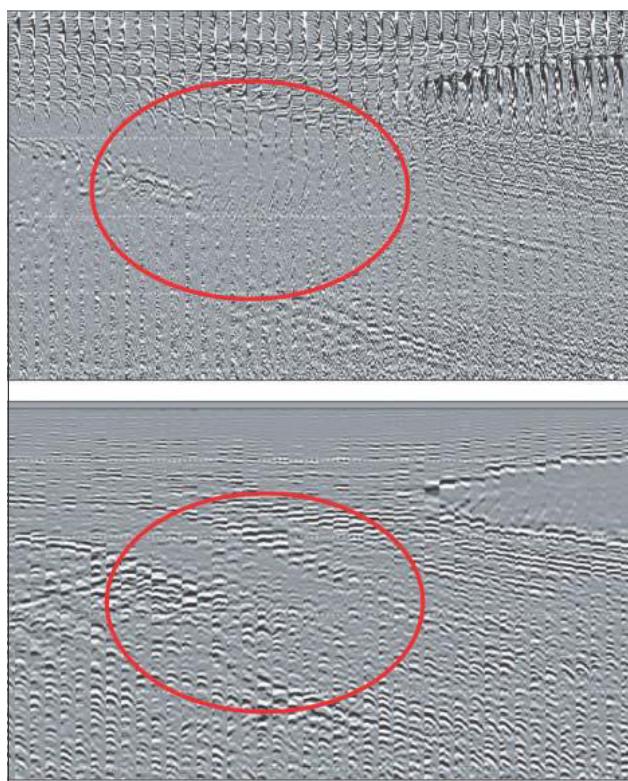


Рис. 8. Разрез по Кирхгофу после суммирования по ОПВ (вверху) и разрез профильной МЭВП после суммирования по углам падения (внизу). Хотя в обоих случаях использована одна и та же скоростная модель, на разрезе МЭВП отмечаются более высокие, чем по Кирхгофу, амплитуды отражений в затененной зоне к западу от конца соляного тела. По этим данным можно выделить структуру или уточнить скоростную модель в этой части профиля.

Суммирование по углам может быть полезно при проверке скоростной модели. Для таких данных можно оптимальным образом провести мьютинг и ввод поправок за вынос, а затем просуммировать их для получения улучшенного итогового разреза или использовать для обновления скоростной модели томографическими методами. Поскольку методы томографии с МЭВП еще только разрабатываются, при работах на действующих месторождениях можно применять обычные методы томографии с суммированием по углам падения.

На рис. 8 сравниваются разрезы, полученные с одной и той же скоростной моделью по алгоритму Кирхгофа с суммированием по ОПВ и с использованием алгоритма МЭВП с суммированием по углам. На разрезе МЭВП в затененной области прослеживаются оси синфазности, а на разрезе по Кирхгофу - нет. Разрезы МЭВП можно просуммировать по ОГТ для выделения структур в этой области или использовать для уточнения скоростной модели с помощью томографических процедур. Для таких разрезов МЭВП можно провести мьютинг и ввод поправок за вынос (рис. 9) и оптимальным образом просуммировать (рис. 10).

Применение МЭВП улучшает разрезы в областях со сложным строением с высоким контрастами скоростей и могут улучшить передачу амплитуд. Следует, однако, помнить, что на качество передачи амплитуд сильнее всего влияет точность скоростной модели, и никакой алгоритм не может обеспечить точную передачу амплитуд, если неверна скоростная модель.

Обработка данных

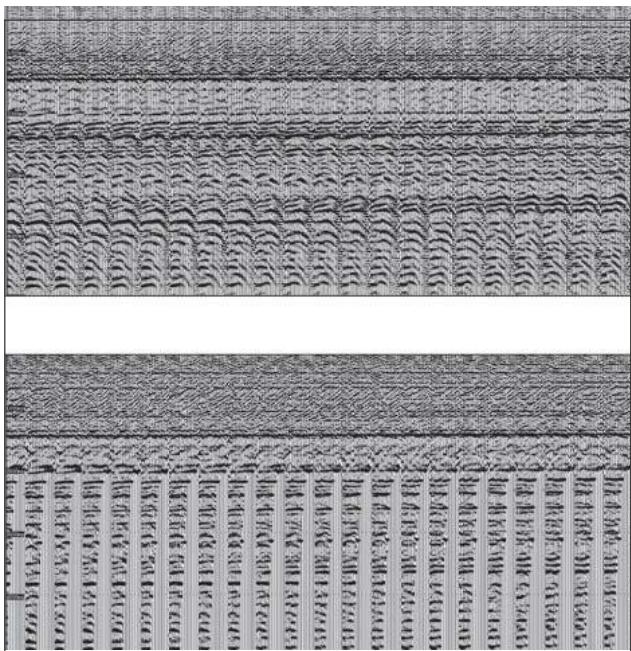


Рис. 9. Результаты профильной МЭВП после суммирования по углам до (вверху) и после (внизу) мьютинга и ввода поправок за вынос для углов 0-40 градусов. Мьютинг исходного разреза проведен путем прослеживания лучей в скоростной модели с сохранением только верных углов отражения в каждой точке разреза. Отметим, что угол отражения уменьшается с глубиной, и что в полном диапазоне углов видна только геология верхней части разреза.

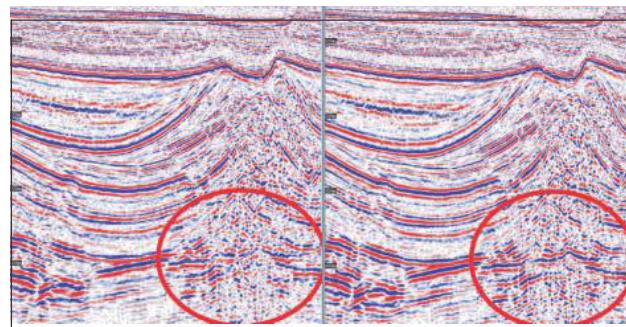


Рис. 10. Разрезы ОГТ результата профильной МЭВП после суммирования по лучу до (слева) и после (справа) мьютинга и ввода поправок за вынос. Отражения непрерывно прослеживаются на больших расстояниях.

West Africa. 65th EAGE Annual Meeting, Extended Abstracts, A-36.

Stork, C., and Kapoor, J. [2004] How many P values do you want to migrate for delayed shot wave equation migration. 74th SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts, 1041-1044.

Благодарности

Авторы благодарят компании Gaz de France, Production Nederland и Wintershall Noordzee, а также их партнеров, за обсуждение результатов интерпретации и за разрешение на демонстрацию их данных.

Заключение

В настоящее время при построении глубинных разрезов на действующих месторождениях используется сочетание устоявшихся алгоритмов Кирхгофа с новыми алгоритмами миграции на основе экстраполяции волновых полей. Эти два метода дополняют друг друга, сочетая скорость и гибкость метода Кирхгофа и высокое разрешение разрезов МЭВП, правильно учитывающих естественное распространение волны и способных выделять тонкие детали сложных негладких скоростных моделей.

Рекомендации к дальнейшему чтению

Etgen, J.T. [2002] Is Wave Equation Migration ready to replace Kirchhoff Migration? 64th EAGE Annual Meeting, Paper E-25.

Albertin, U., Watts, D., Chang, W., Kapoor, J., Stork, C., Kitchenside, P., and Yingst, D. [2002] Near-salt-flank imaging with Kirchhoff and wavefield extrapolation migration. 72nd SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts, 1328-1331. Kapoor, J., O'Briain, M., Stork, C., Woodward, M., Sherill, F., and Albertin, U. [2003] Integrating complementary tools for improved depth imaging. 73rd SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts, 446-449.

Lafond, C., Houllevigue, H., Kerdraon, Y., Riou, J.F., Bridson, M., and Jones, I. [2003]. Challenges in Deep Offshore Imaging.