

Обработка данных

Усовершенствования в методе построения изображения геологической среды стимулируют поиски «неуловимых» углеводородов. Advances in subsurface imaging technology boost the search for elusive hydrocarbons

Frank Dumanoir,¹ Bin Wang и Simon Baldock, TGS (Houston) делают обозрение развития современной сложной обработки сейсмических данных и методики построения изображений и обсуждают предстоящие сложные задачи.

Cущественные улучшения качества данных, обусловленные прогрессом в области обрабатывающих алгоритмов и компьютерной технологии за прошедшие несколько лет, не являются чем-то необыкновенным. Обеспечение кубами 3D данных, обработанных посредством глубинной миграции до суммирования, принесло разведчикам недр возможность анализировать и искать резервуары с неуловимыми углеводородами в более сложных геологических ситуациях.

Как и в любом сложном научном исследовании, многие разделы различных дисциплин вносят вклад в достижение общей цели. Этот синергизм между разнообразными прикладными науками дает обоснование практической и экономической необходимости, которая побуждает и питает исследования.

Эта статья выдвигает на первый план несколько ведущих составляющих, которые делают задачу обнаружения и добычи углеводородов возможной в прежде неисследованных районах. Статья не является ни исчерпывающей, ни глубоко технической, а лишь приводит несколько примеров прогресса, совершенного в глубинной миграции, томографии, анизотропии, в учете кратных волн и затухания, построении скоростных моделей.

ПРОЦЕСС ГЛУБИННОЙ МИГРАЦИИ

Безусловно, ключевая область, на которую за прошедшие несколько лет были направлены самые большие усилия и внимание, заключалась в существенном развитии методик миграции. Комбинирование методик миграции для того, чтобы эффективно взяться за разнородные и противоречивые геофизические проблемы, является в настоящее время общепринятым.

В своей превосходной статье «Задачи сейсмической миграции и решения» Sam Gray и др. (J. Etgen, J. Dellingar, D. Whitmore, www.seismo.unr.edu/ftp/pub/louie/class/757/migration-probs.pdf), авторы дают историческую перспективу развития конкурирующих методик и сравнительные достоинства и недостатки каждой в способности создавать подповерхностные изображения. Отрасль прошла путь развития от отстаивания применения одного метода вместо другого до принципа интеграции методов. Мы больше не отстаиваем метод Кирхгоффа в противовес решению волнового уравнения, предпочитая вместо этого работать и с тем и с другим. Эта эволюция является непосредственным результатом резкого падения стоимости вычислений.

Миграция развивалась из требующего больших затрат дополнительного средства в конце (времени) проекта до шага, отнимающего львиную долю времени и стоимости в любом 3D процессе обработки.

Она является в настоящее время неотъемлемой частью создания и доводки конечного результата. Это произвело коренную ломку процесса выполнения проекта, который стал итеративным и требует использование ранее обработанных данных и геологической интерпретации. Геологическая интерпретация и осмысление геологических рамок являются решающими в ходе выполнения проекта и важными для получения лучших результатов, создавая промежуточные изображения в процессе усовершенствования скоростных моделей.

В настоящее время целевые группы, работающие над созданием изображений, чтобы обеспечить приемлемый результат, не могут опираться только на один алгоритм. Современный набор методов должен включать метод Кирхгоффа, служащий базой миграции, который остается по-прежнему основополагающим для глубинной миграции после суммирования данных 3D (PSDM). Здесь важно постоянно усовершенствовать алгоритм для повышения точности результатов и эффективного пользования таблицами времен пробега сейсмических волн. Метод Кирхгоффа по-прежнему является предпочтительным методом миграции при отображении круто падающих границ и выступов, сохраняя в то же время адекватный диапазон рабочих частот сейсмического сигнала.

Разновидности лучевой миграции Кирхгоффа существуют повсюду и давно обсуждаются в сейсмической разведке. Только в последние два или три года они стали предпочтительными методами для того, чтобы быстро перебрать массив данных в процессе построения скоростных моделей за приемлемое время и низкую стоимость. Лучевая миграция Гаусса может дать превосходные результаты. Этот алгоритм является изящным решением для того, чтобы скомпенсировать влияние многоканальных ограничений общепринятого алгоритма Кирхгоффа на возможность получения изображения с крутыми границами погружения и возвратными волнами, одновременно сохраняя ориентацию на исследуемый объект. Это делает лучевую миграцию Гаусса чрезвычайно гибким алгоритмом.

Более быстродействующие версии, или быстродействующие алгоритмы лучевой миграции, должны быть использованы с осторожностью, чтобы чрезмерно не повлиять ни на результат, ни на исходный сигнал. Интерпретатор должен быть осторожен, чтобы не внести слишком много априорной информации и не получить результат, не зависящий от исходных данных.

Не вызывает сомнения, что быстродействующая лучевая миграция обеспечивает резкий скачок вперед в поиске метода построения скоростной модели в квазиреальном времени. Не вызывает сомнений и то, что в течение короткого интервала времени (в пределах года?) мы будем владеть достаточной вычислительной мощностью, которая позволит быстрое выполнение многочисленных итераций при 3D PSDM.

¹ Frank Dumanoir, corresponding author; E-mail: Frank.Dumanoir@tgsnpec.com.

Обработка данных

Это предоставит интерпретатору возможность проверить многочисленные геологические гипотезы скорее в течение нескольких дней, а не недель.

Алгоритмы миграции, использующие волновое уравнение, традиционно дают большую надежду построения сейсмического изображения, но высокая стоимость их в реальном режиме времени и ограниченные углы наклона часто затмевают присущую технологическим приемам возможность использовать строгие скоростные модели для воспроизведения изображений подсолевых горизонтов. Это четко продемонстрировано на рис. 1. Миграция с использованием волнового уравнения не сложняется проблемой многоканальности, с которой сталкивается метод Кирхгоффа в районе развития солевых отложений, и способна работать в областях с контрастными границами такими, как поверхность раздела соль/осадки. Одно из ограничений волновых уравнений, связанное с возрастанием стоимости при расширении полосы частот, выгодно использовалось в итерационном процессе при построении модели для интерпретации сложной геометрии солевых отложений. Рабочие диапазоны частот могут быть ограничены 20 Гц и, по-прежнему, создавать интерпретируемые изображения поверхности солевых отложений.

Только после того, как в 2003 г. появились быстродействующие реализации волнового уравнения миграции, 3D PSDM на основе волнового уравнения могла быть выполнена за приемлемое время и доступную стоимость. Для образования волнового поля от линейного или площадного источника увеличение эффективности получено от применения комбинированных волновых полей точечного источника. Это позволило с явным преимуществом над лучевой методикой Кирхгоффа создать 3D мигрированный куб для построения скоростной модели, которая из-за стоимости построения была часто слишком грубо дискретизирована для того, чтобы создать детальные скоростные модели. Для скоростного анализа цели воспроизведения изображения являются другими, так как аналитики ищут качественные различия между скоростными моделями.

В районах, предрасположенных к развитию солевых отложений, был получен более короткий интервал между итерациями миграции, с использованием непрерывного так называемого подсолевого WEM сканирования. Оно является современным эквивалентом старого скоростного сканирования, использованного для выборки скоростей по наземным данным. Используя кубы 3D PSDM, мигрированные с использованием набора скоростей, варьирующих (в %) по отношению к опорной скорости, данные переинтерпретируются и отбираются для обновления скоростной модели. Этот подход особенно полезен, когда подсолевой сигнал слабый, или подсолевые границы не имеют достаточной апертуры (или малый угловой диапазон), делая ненадежной досуммированную выборку глубинной остаточной разности времени вступления отражённой волны (DRMO). Этот подход обеспечивает более точную скоростную подсолевую модель, которая, в свою очередь, может быть использована в подсолевой томографии.

Рисунки 2 и 3, отобранные из серии сканирований восьми миграций, четко показывают, что исходное 100% скоростное поле не было идеальным в фокусировании сигнала под солью и что 85% скоростного поля более качественно отражает осадочный комплекс. В некоторых районах под солью метод WEM-сканирования может быть использован для выдачи выборок из данных, перемещенных на варьирующие в процентном соотношении серии скоростей относительно опорной скорости. Рис. 4 иллюстрирует, как могут быть использованы эти записи для получения более точной скорости.

Обсуждение алгоритмов глубинной миграции не будет полным без упоминания уравнения миграции волны с двойным временем пробега, или возвратно-временной миграции (RTM), которую считают идеальной целью («Holy Grail») миграции. Несмотря на то, что это теоретически самый лучший метод, стоимость остается одной из самых больших помех для его применения. Хотя предварительные результаты подтверждают перспективы этого метода, необходима осторожная реализация его, чтобы избежать искажений миграции. Это также необходимо, если скорость неизвестна с высокой степенью точности. Чувствительность RTM к точности определения скорости может быть в будущем исследована для развития более точной скоростной модели.

Kirchhoff

Beam

Wave Equation

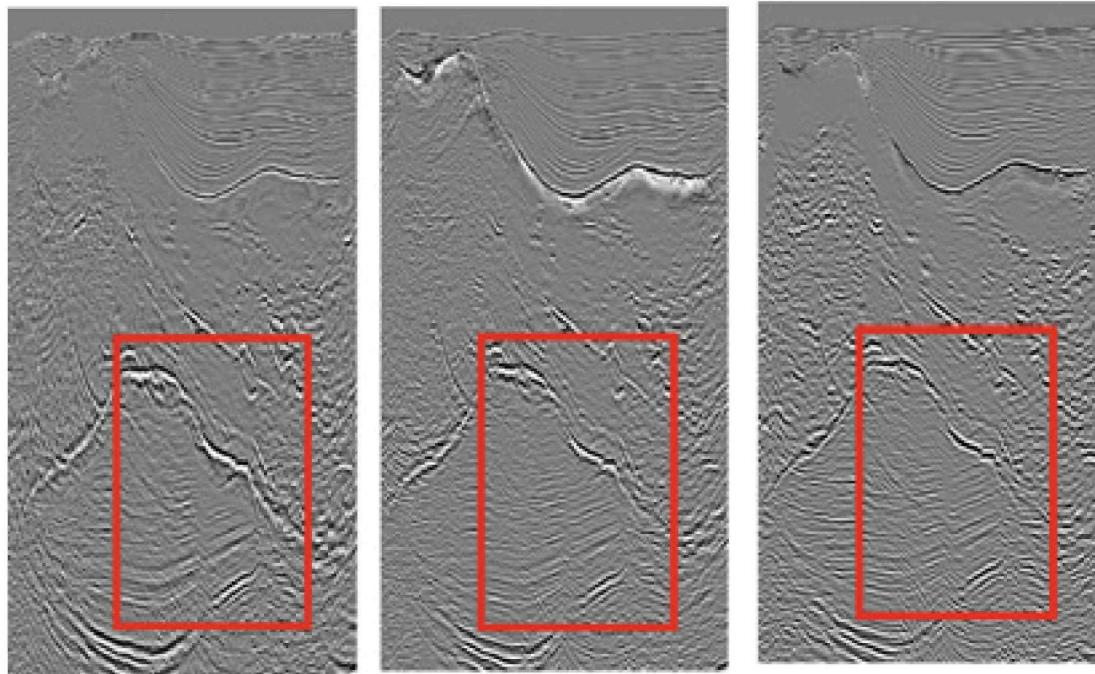


Рисунок 1.

Обработка данных

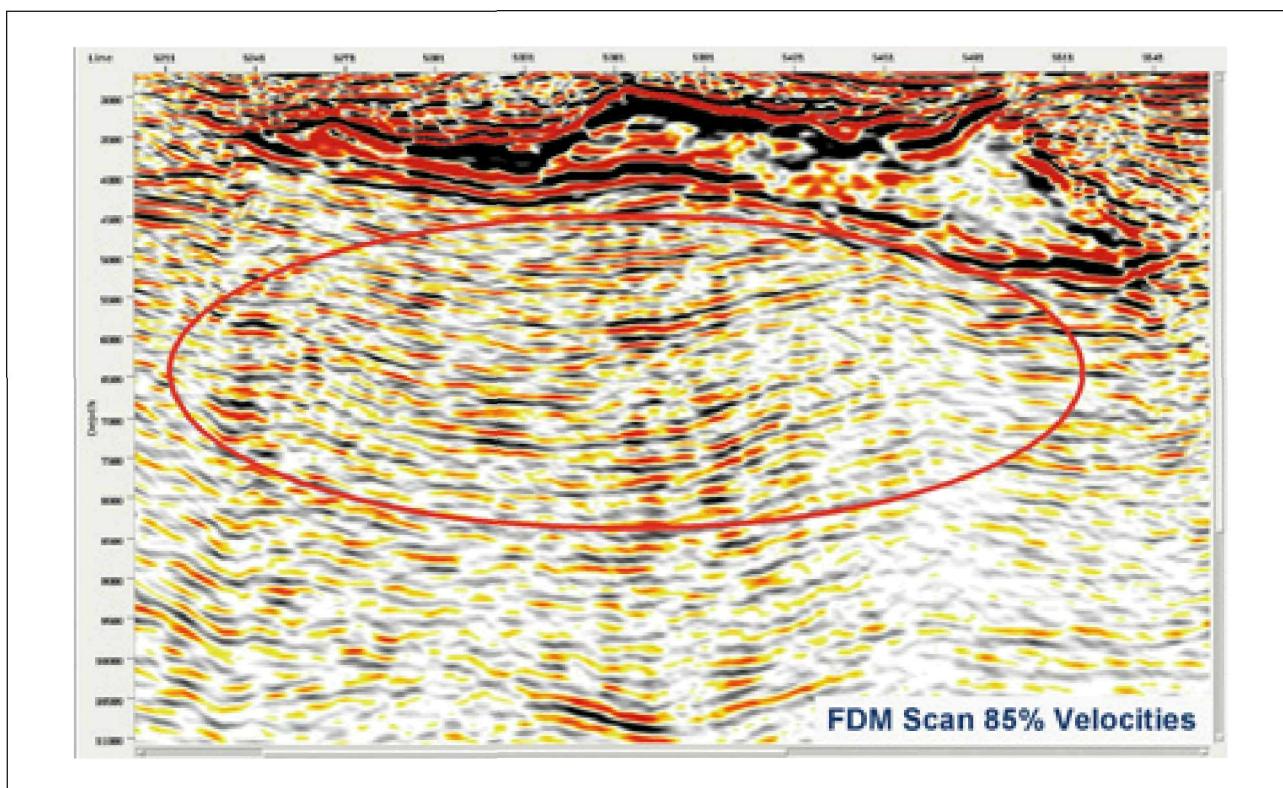


Рисунок 2.

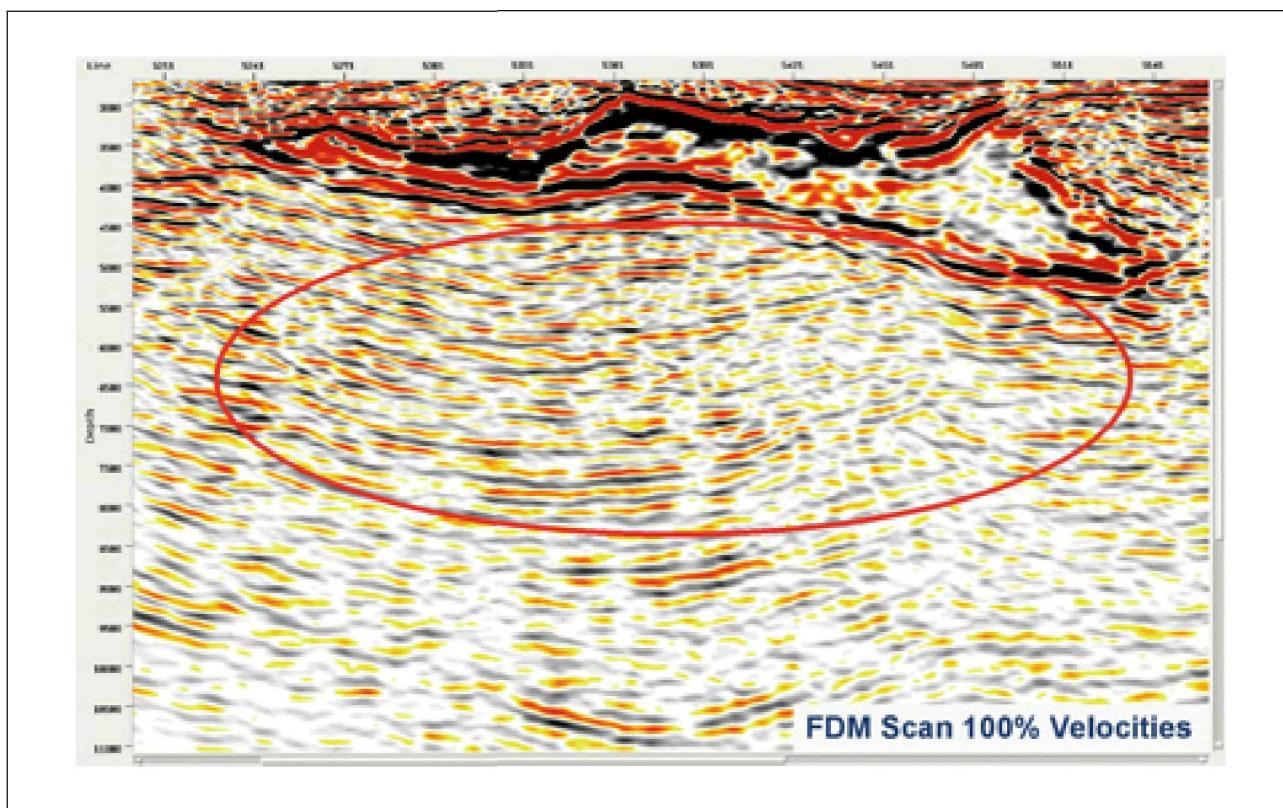
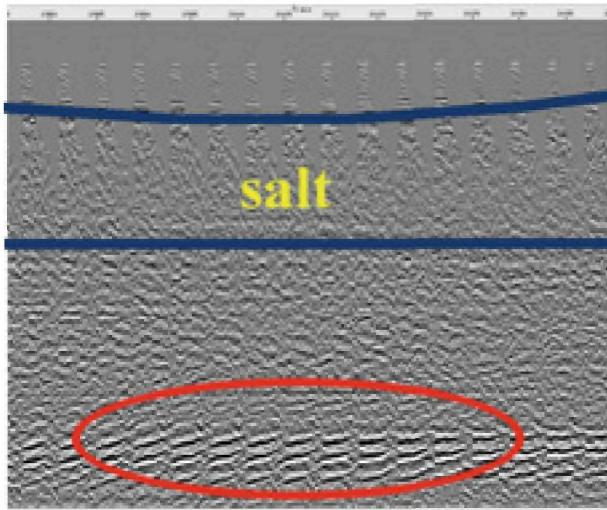


Рисунок 3.

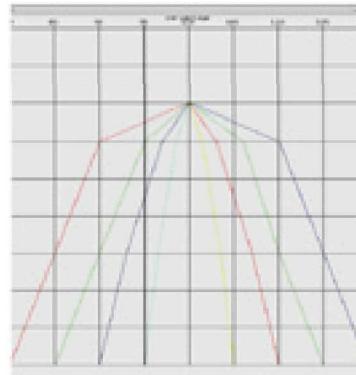
Обработка данных

Residual curvature and migration



Curvature (gathers)

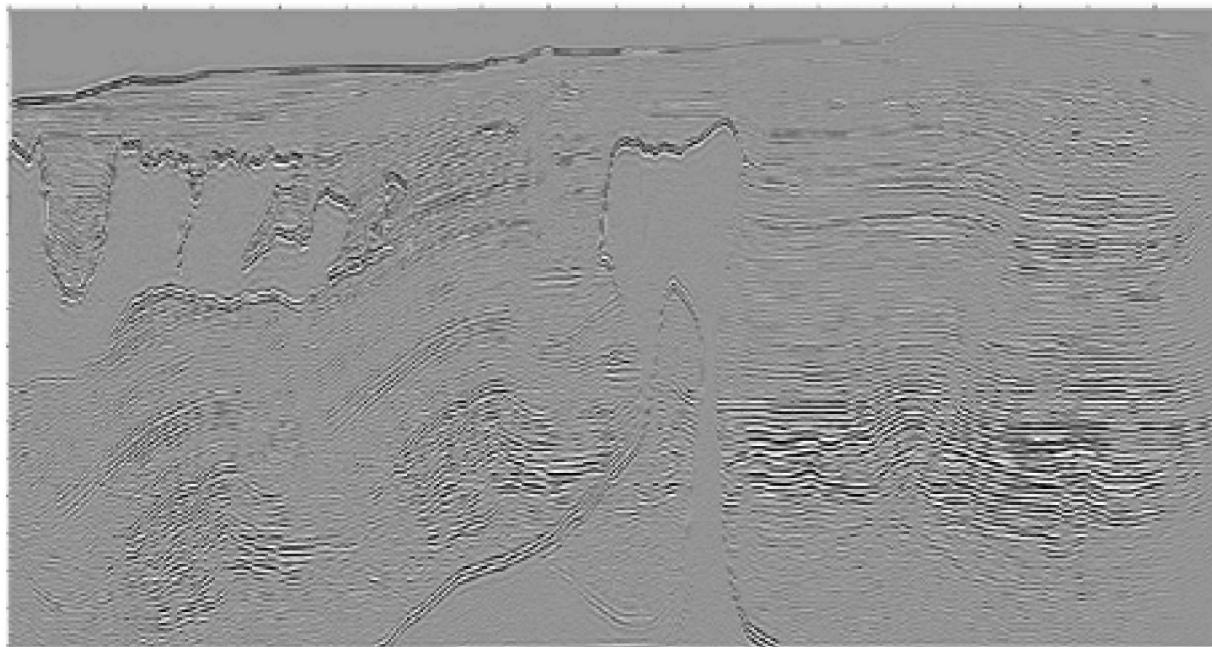
Velocity Percentage



Scans

Рисунок 4.

Two-way RTM



Data courtesy of BP

Рисунок 5.

Обработка данных

ТОМОГРАФИЯ

Объемная, автоматизированная, высокоразрешающая томография (грид) стала абсолютно необходимой для точной скоростной оценки PSDM. Хотя она в течение нескольких лет является стандартной частью последовательности операций получения изображения и обновления скоростей, использование ее сильно ограничено для детализации 3D скоростной модели надсолевого осадочного комплекса. Используя разномасштабный, итеративный подход, сначала получают длинноволновые характеристики скоростных аномалий, а затем дополнительными итерациями последовательно добавляются коротковолновые аномалии.

Много попыток было нацелено на уменьшение шага гридирования, с тем, чтобы ячейки были достаточно небольшими при выборке малоглубинных аномалий. Основное преимущество заключается в том, чтобы создать такую модель, которая бы учитывала такие аномалии, как малоглубинные скопления газа, которые могут оказывать сильное воздействие на более глубинные изображения. Большинство методик, чтобы приблизиться к решению, заглушают отражения от солевых отложений и их влияние на траектории сейсмических лучей.

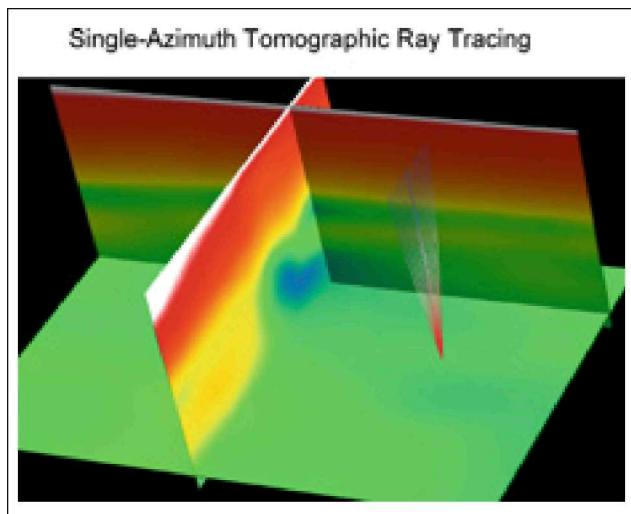


Рисунок 6.

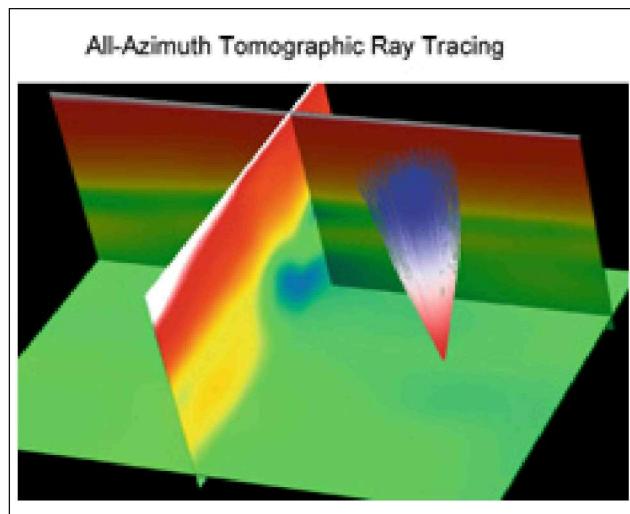


Рисунок 7.

**PSDM stack
before/after subsalt tomography**

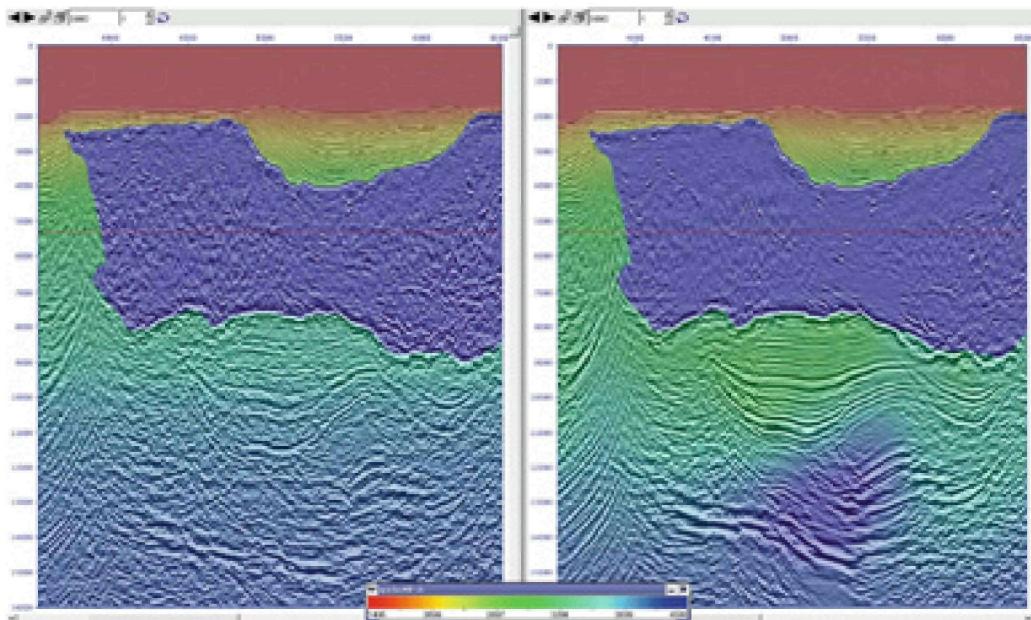


Рисунок 8.

Обработка данных

Проблема состоит в том, что скорости под и вблизи солевых тел являются критическими для построения точной модели. С ростом использования широко азимутальных методик съемки становится необходимым перейти к полно-азимутальному лучевому трассированию вместо традиционного одно-азимутального лучевого трассирования (рис. 6 и 7). Это особенно удобно и вероятно необходимо для съемки ОВС (донная сейсморазведка) и для развития широкозападных/многоазимутальных морских методик. Рис. 8 демонстрирует примеры подсолевой томографии и результаты улучшенного подсолевого изображения в Мексиканском заливе.

АНИЗОТРОПИЯ

Чтобы повысить качество алгоритмов, сделать их более быстродействующими и эффективными в геологическом отношении, поиск продолжается по многим направлениям.

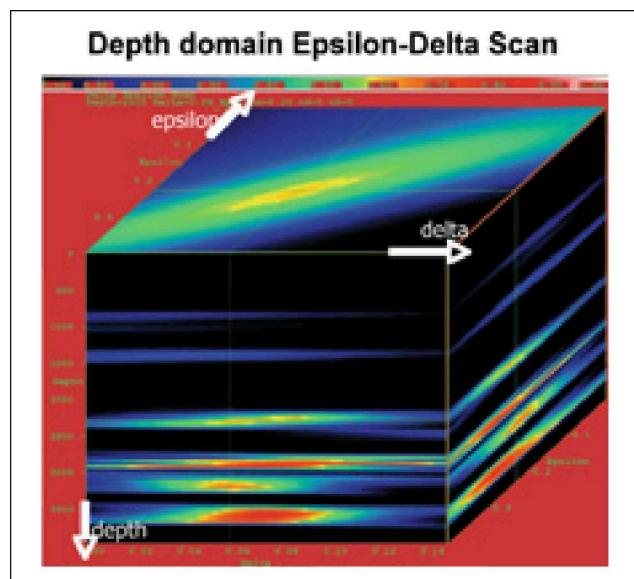


Рисунок 9.

Анизотропия находится на острие проблемы. При современном состоянии развития алгоритмов миграции существует возможность учета анизотропии среды, однако, одной из проблем является оценка параметров анизотропии. Основной принцип заключается в возможности оценить Эпсилон и Дельту, используя методы сканирования и экстраполации от известных эталонных точек, обеспеченных скважинным каротажем. Затем, чтобы отрегулировать соответствующим образом скоростное поле, используется автоворотка.

Возможно, один из разочаровывающих аспектов обработки, встречающийся интерпретаторами и, особенно, геофизиками-разработчиками, заключается в том, что скважинные данные не соответствуют сейсмике, различаясь где-то от 5% до 15%. Сейсмика обычно слишком глубинная, что существенно влияет на стоимость работ, особенно, когда имеют дело с отображением траппов на сильном рельфе. Рисунки 9 и 10 приводят примеры сканирования куба Эпсилон и Дельта и метод, использованный для автоворотки V и 'S'. Результаты приведены с использованием особой модифицированной версии 3D модели SEG-EAGE. Конечные WEM изображения анизотропии, использующие точную модель и модель, оцененную по Эпсилон-Дельта сканированию, чрезвычайно близки (рис. 11 и 12).

КРАТНЫЕ ВОЛНЫ

Если бы миграция требовала только просто обработку и точное воспроизведение изображения! К сожалению, природа не является такой простой или доброжелательной к нам. Любая попытка проведения миграции напрасна, если внешний интерфейс обработки данных не в состоянии улучшить отношение сигнал/шум до приемлемого уровня и – самое важное – ослаблен, если не полностью исключен многократный сигнал, присущий любым фактическим данным. В настоящее время существуют в основном два главных метода, направленных на улучшение отношения сигнал/шум: SRME и Radon.

Существует два направления, по которым сейсморазведка старается подойти к 3D прогнозу кратных отражений:

- Данные получены исключительно 3D SRME, базирующейся на конволюции

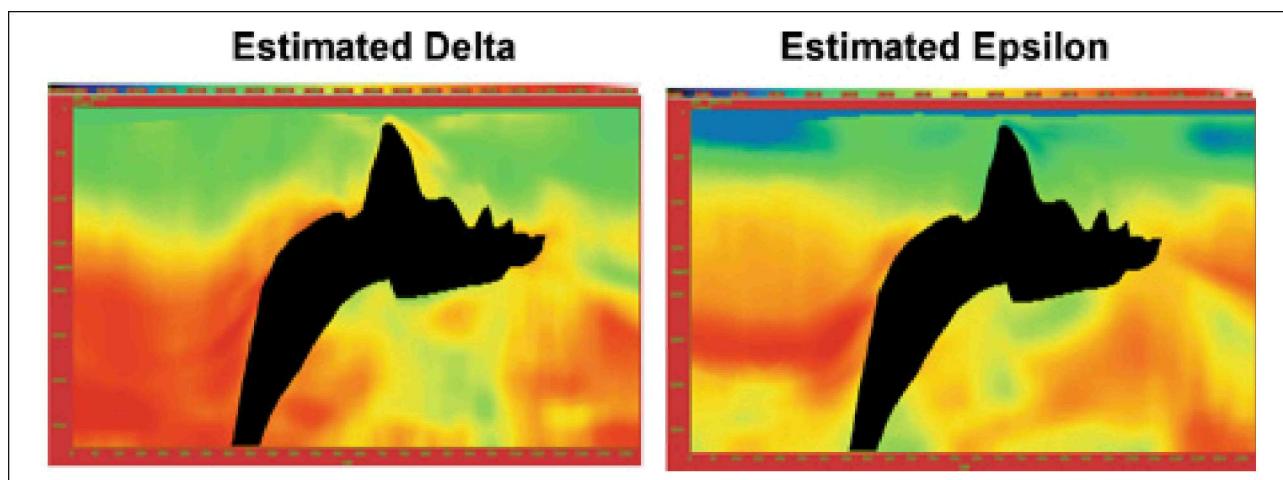


Рисунок 10.

Anisotropic WEM with Estimated Model

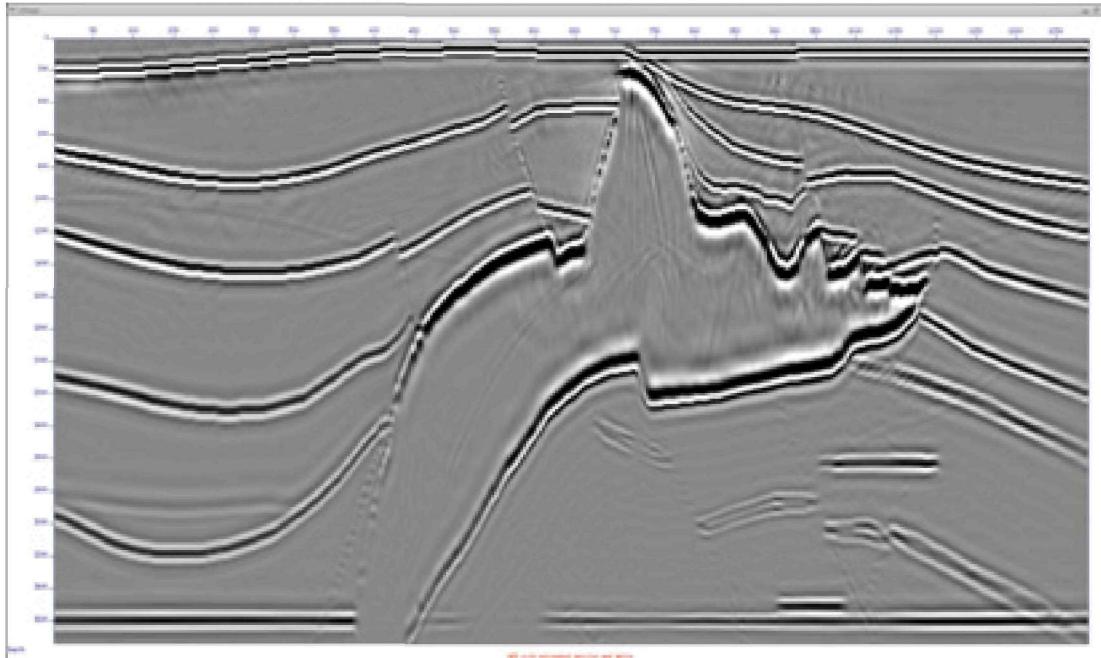


Рисунок 11.

Anisotropic WEM with Exact Model

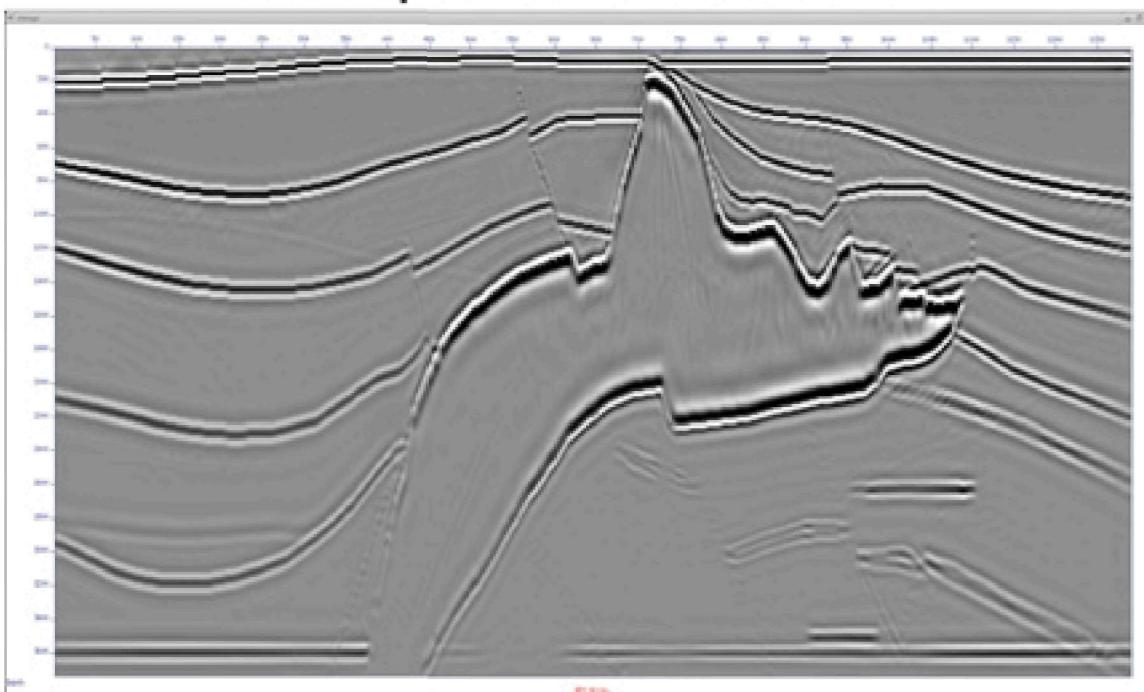


Рисунок 12.

Обработка данных

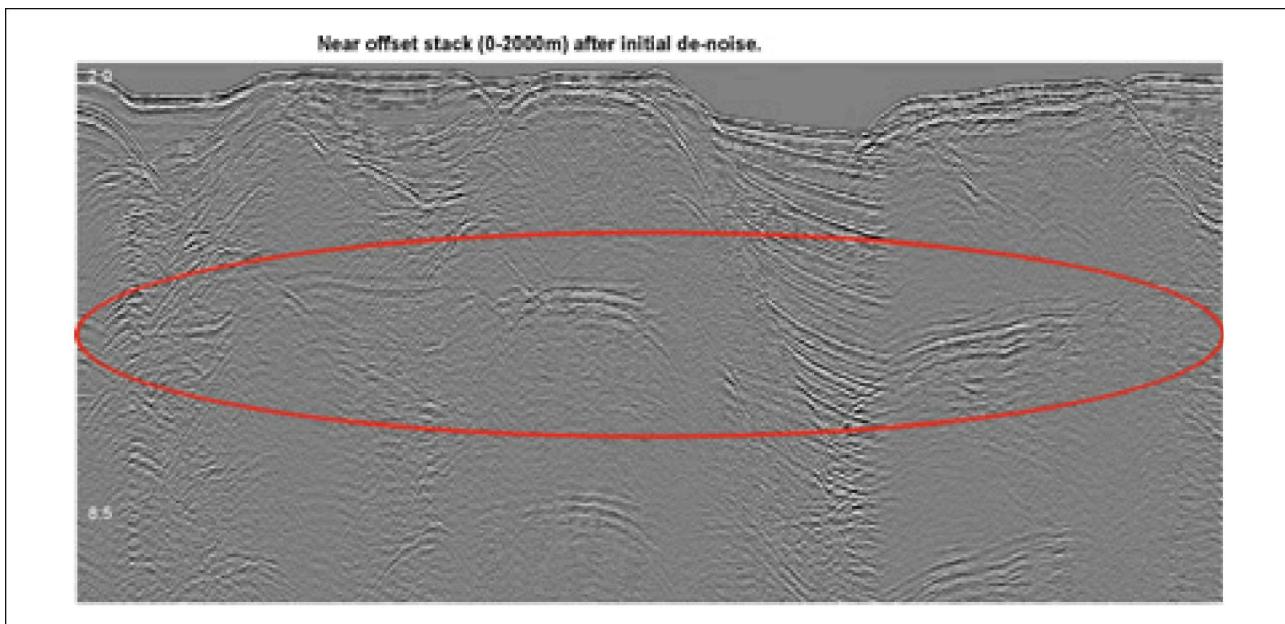


Рисунок 13.

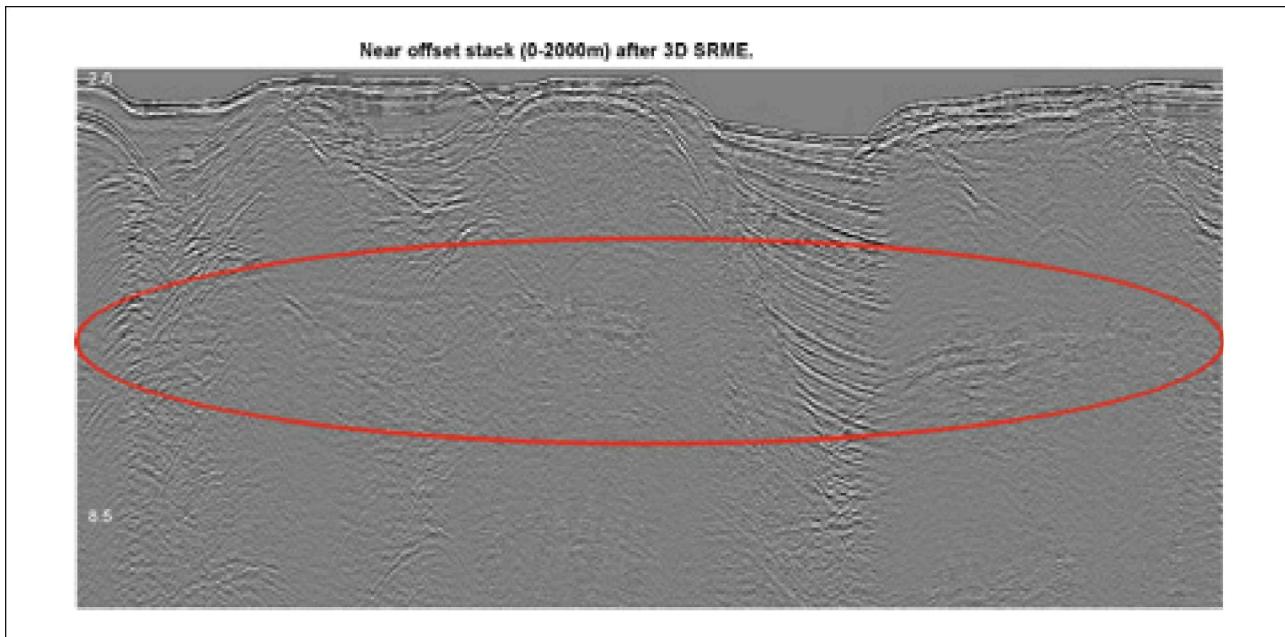


Рисунок 14.

- Экстраполяция волнового поля основана на 3D прогнозе кратных отражений.

Даже при подходе с реализацией 3D SRME методика в состоянии уменьшить содержание кратных волн до контролируемого уровня, только если используется в сочетании с некоторыми другими методами. Проблема качественных данных обостряется в областях, предрасположенных к развитию соленоидных отложений, где данные экранированы образованиями соли или генерируются ложные сигналы, которые должны быть рассмотрены до любой скоростной и миграционной обработки (рис. 13 и 14). Перспективная область исследования заключается в моделировании кратных волн с помощью экстраполяции волнового поля. На следующих рисунках приведены примеры ослабления кратности волн по синтетическим данным, использующим экстраполяцию волнового поля.

60

Перспектива этого метода по ослаблению помех, связанных с наличием кратных отражений в данных, становится более важным фактором, поскольку многоазимутальные данные становятся все более распространенными. Примененный WFE в области обычного взрыва обеспечивает точный и эффективный путь для ослабления связанных с поверхностью кратных волн (рис. 15 и 16). Это особенно характерно для широкоазимутальных съемок, где «дополнительные взрывы» могут быть сформированы группировкой многих отдельных взрывов, возбужденных в одном месте.

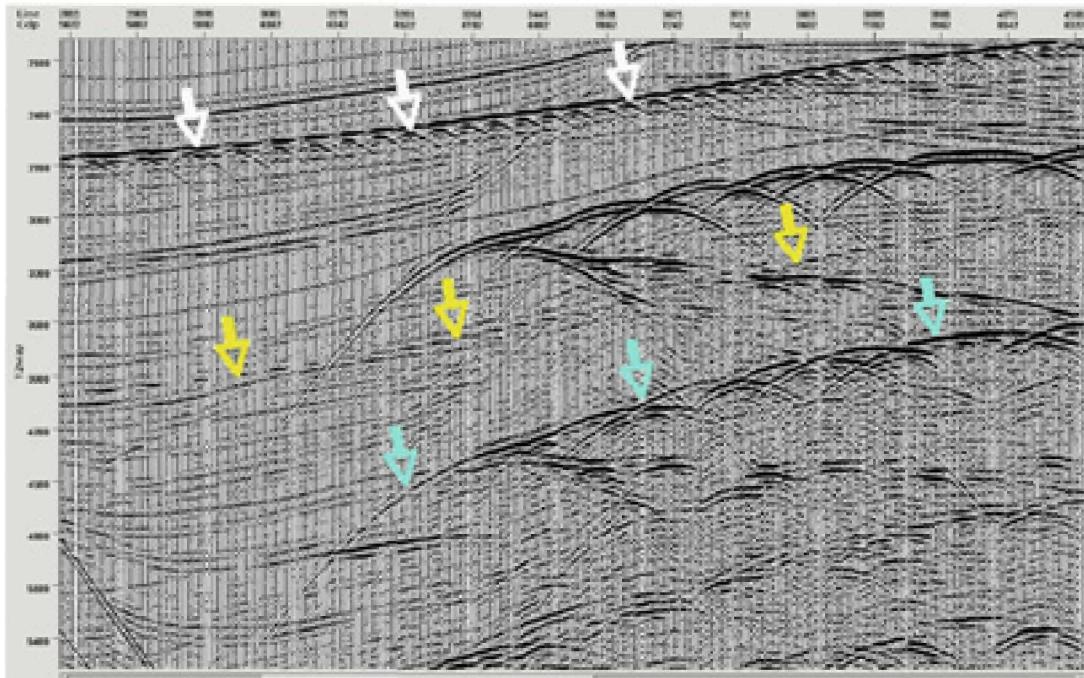
Zero Offset Section

Рисунок 15.

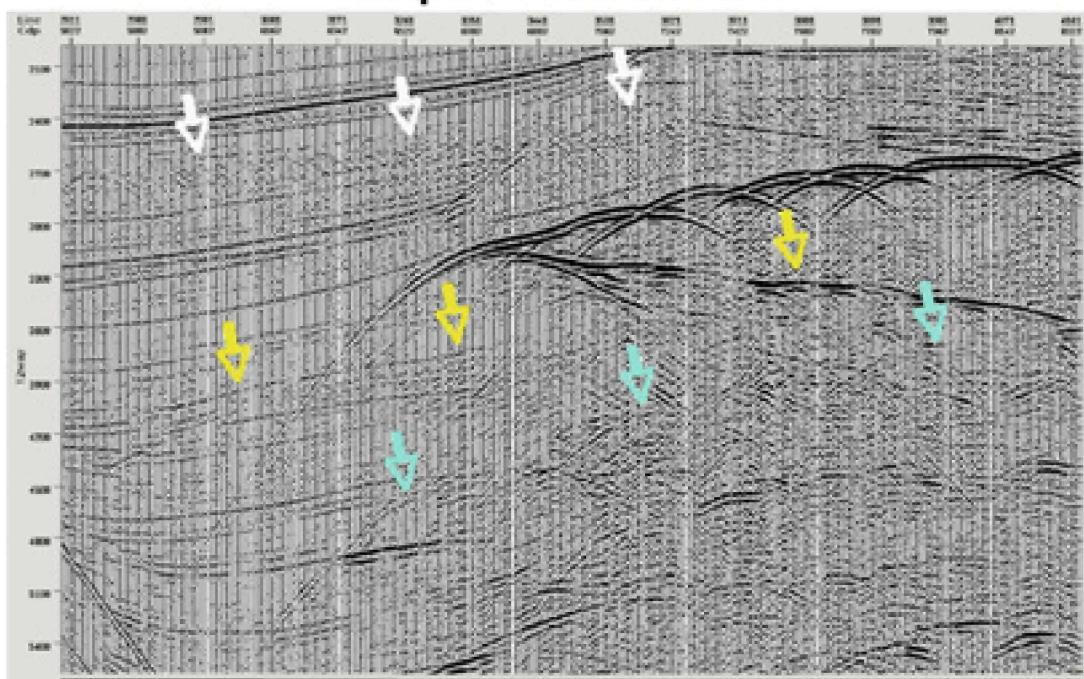
Adaptive Subtraction

Рисунок 16.

Обработка данных

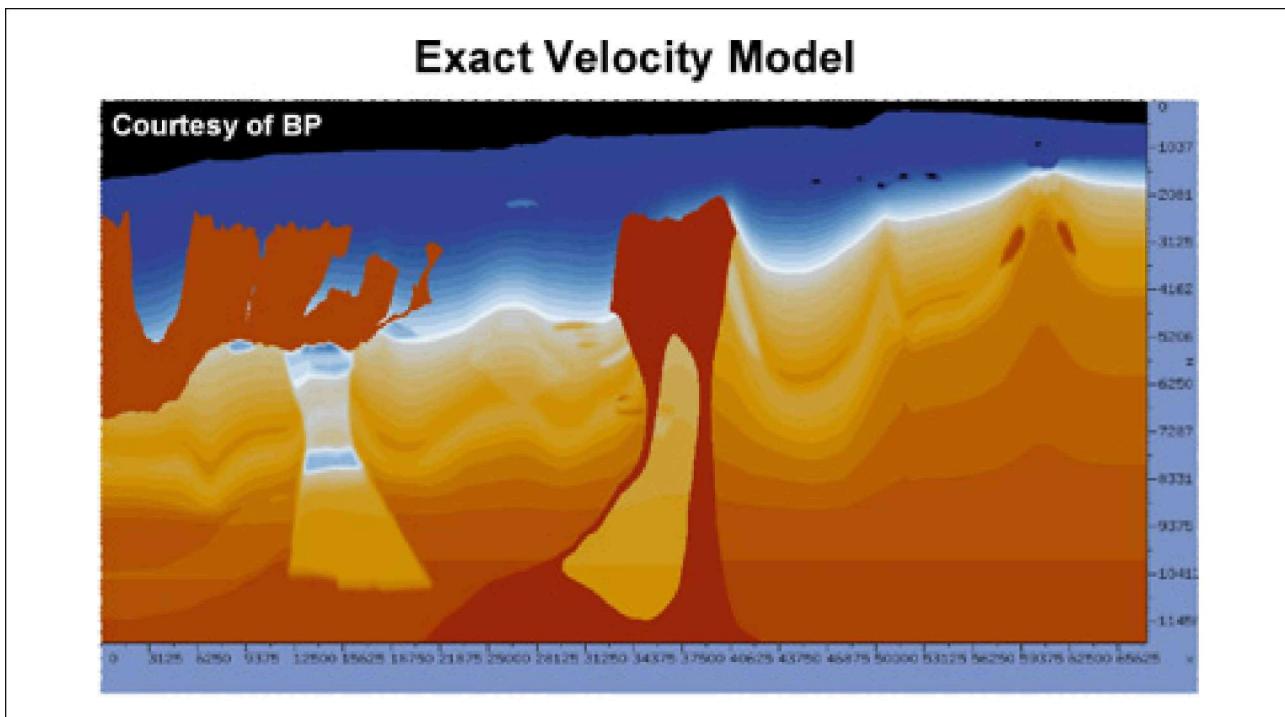


Рисунок 17.

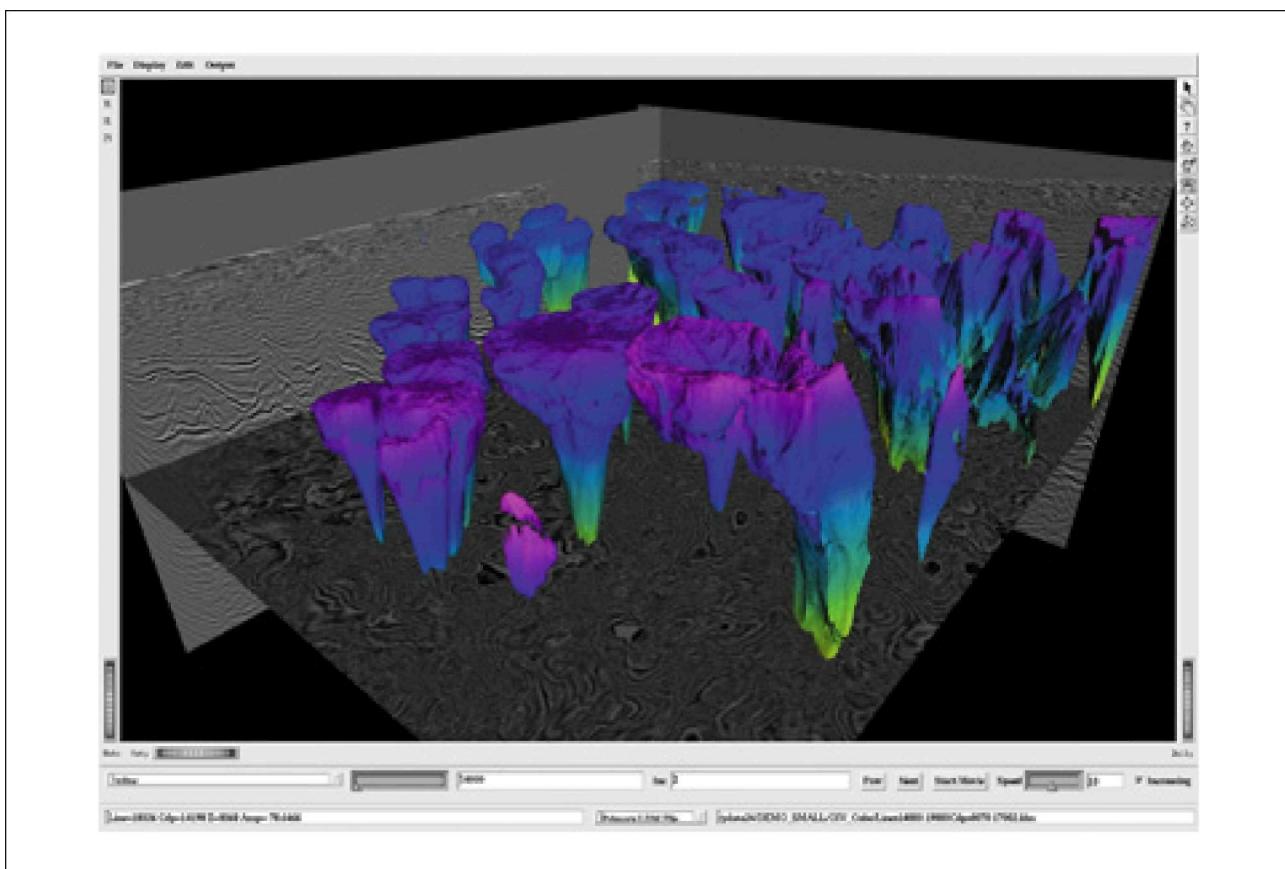


Рисунок 18.

Построение скоростной модели – следующая большая проблема?

Сейморазведка может справедливо утверждать, что алгоритмы обработки сигналов совершенствовались с поразительной скоростью и способны снять большую часть связанных с сигналом вопросов, возникающих при современной обработке данных. Построение и оценка скоростной модели все еще находятся в области, которая требует значительных усилий, и нужно проявить все мастерство к продолжению усовершенствования воспроизведения глубинного изображения.

Последняя скоростная модель BP-AIT (рис. 17), результаты которой широко известны, служит указателем работ, которые необходимо проделать. Она демонстрирует, что хотя алгоритмы миграции находятся на верном направлении, что доказано некоторыми хорошими результатами, и известна некогда созданная скоростная модель, доводка корректной скоростной модели оказалась чрезвычайно сложной проблемой.

При всех методах, изложенных выше, находящихся в распоряжении сейморазведки, VMB (построение скоростной модели) должно быть новым рубежом, который необходимо преодолеть. Несмотря на рассуждения о том, что применять для оценки скорости, или к очень разнородным скоростям, – суммирование, RMS, осреднение, или геологию (скважинный каротаж) – в течение нескольких лет выборка скоростей оставалась «падчерицей» обработки. Тем не менее, самая большая часть улучшений после переобработки получена благодаря лучшей оценке скоростей. Оценка скоростей является областью в цепи обработки, где мастерство и знание исследователя имеют первостепенную важность. Продолжаются попытки по развитию процедуры автоматической выборки, которая должна быть более эффективной и точной, чем выборка человеком. Эти попытки часто требуют некоторый тип направляющих функций, чтобы приблизиться к решениям.

Так как наземные сейсмические методы не обеспечивают необходимую и достаточную информацию, чтобы недвусмысленно (однозначно)

определить скорости, сейсморазведка будет продолжать опираться на интерпретационные и итеративные методики для достижения удовлетворяющих требованиям моделей, чтобы создавать подповерхностные изображения (рис. 18).

Заключение и выводы

В настоящее время на построение изображения оказывают воздействие различные важные разделы развития сейсмической методологии. Они тесно связаны с вычислительными ресурсами и используют результаты постоянного усовершенствования производительности компьютера, дисковой памяти и уменьшения стоимости на каждый гигабайт. Эти важные ключевые ингредиенты позволяют подключить сложные процессы обработки к постоянно расширяющейся 3D сети данных. Ввод в действие широкоазимутальной и многоазимутальной схем проведения сейсмической съемки, которые показали перспективность в усовершенствовании изображения от трудных для этой цели объектов под солевыми отложениями и в сложных геологических ситуациях, поднял сейсмическую методологию до увеличения на порядок размеров исходных данных.

Хотя эти ключевые компоненты без сомнения помогут активизировать исследования в 21-ом веке, длительный успех будет опираться на поддерживающие, реальные вложения капитала в дорогостоящие технологии изображения, чтобы развить новые методы, которые позволят создать самые лучшие по возможности отображения глубинных структур для поисков источников энергии.

Благодарности

Авторы хотели бы выразить благодарность TGS за разрешение написать эту статью. Особая благодарность также Young Kim и Zhiming Li за их проницательность, способность проникновения в сущность, критические замечания при подготовке этой статьи и помочь в формировании рисунков.