

Комбинированная площадная томография. Hybrid Gridded Tomography

Ян Ф. Джоунс,¹ * Мик Дж. Сарг¹ и Пьер Б. Харди¹

Введение

Исторически сложилось, что работы по построению скоростной модели обычно сводились к одному из двух подходов: пластовому и основанному на сети наблюдений (Jones, 2003). В условиях Северного моря, где осадочные границы определяют изменения в поле скоростей, а геологическое строение “прибегает” к воспроизведению, основанному на пластовой модели, для построения скоростной модели до настоящего времени обычно применялся пластовый подход. Другими словами, мы поддерживали устоявшееся предубеждение, так как мы считаем, что оно является значительным геологическим ограничителем при поиске решения.

Напротив, подход, основанный на сети наблюдений в построении скоростной модели, обычно используется в условиях, где скоростной режим отделен от осадкообразования, и руководствуется, прежде всего, градиентами вертикального сжатия (скорость увеличивается с глубиной), контролируемые дегидратизацией, причем контуры кривой равных значений скорости субпараллельны морскому дну.

Однако, один лишь томографический подход с пересчетом на равномерную сеть (Hardy, 2003; Sugrue et al., 2004) иногда не способен сохранить быстрые вертикальные изменения скорости и, более того, для сейсмически проницаемых слоев с акустически жесткими границами нам все еще необходимо ограничивать модель данными для интерпретации (Campbell, et al., 2005; Evans et al., 2005). Руководствуясь этими идеями, мы внесли изменение в подход, основанный только на пересчете на равномерную сеть, заключающееся в применении послойных ограничителей на основных границах вертикальных скоростей.

В рассмотренных в данном исследовании примерах, которые типичны для многих месторождений в Северном море, мы применяем граф обработки, характерный для мощных меловых слоев с градиентом вертикального сжатия внутри мелового слоя. Природа этих градиентов сжатия может быть достаточно сложной и обладать многими участками, которые не явно проявляются в плане ясного и латерально протяженного сейсмического сигнала. Благодаря сжатию внутри мелового слоя мы можем переходить от режима с близкой к постоянной скоростью в самой верхней части мелового слоя к режиму с наклонным сжатием градиента и затем обратно к участку с постоянной (высокой) скоростью у подошвы мелового пласта, где мел настолько плотно спрессован давлением покрывающей толщи, насколько это возможно.

В построении модели для таких меловых объектов может быть два класса ошибок:

- Внутренняя слоистость в меловом слое может быть недостаточно хорошо представлена в модели слоистой среды из-за трудности в выделении четкой волны в случае, когда мы сталкиваемся с изменением в градиенте сжатия, а не с резким изменением в коэффициенте отражения.
- Ошибки в расчете значений для градиента сжатия могут проявляться как кажущаяся анизотропия. (Alkhalifa, 1997; Jones, et al., 2003).

¹ GX Technology, Великобритания

* Соответственный автор. E-mail: ijones@gxt.com

Обе эти разновидности ошибок приведут к неполноценному построению изображения, включая неточное латеральное позиционирование разломов. (Alkhalifa & Tsvankin, 1995; Hawkins, et al., 2001).

Типы ограничительных слоев для комбинированной томографии

В томографической основе мы выделяем два типа ограничительных слоев: “жесткий” и “мягкий”.

Жесткий ограничительный слой (такой как морское дно, кровля и подошва мелового пласта, или пикируемый канал верхней части разреза) приведет к построению модели, у которой без изменений остались последующие итерации над пропикированным слоем. Таким образом, мы переходим от глобальной томографии к неглобальной томографии с процессом последовательного снятия влияния вышележащих слоев (но все еще используем и слоевое ограничение, т.е. комбинированную томографию).

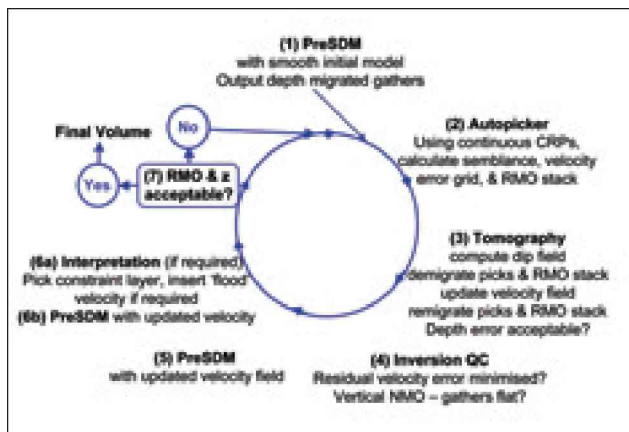
Мягкий ограничительный слой следует использовать, если пикируемый слой является очень неопределенным, как часто бывает в случае с плохо выявленным каналом верхней части разреза или сейсмически проницаемыми снятыми значениями кровли солевого пласта при схеме обработки формирования Цехштейна в Северном море. В последнем случае мы имеем положительный эффект от скорости в соляной толще, внесенной в модель под пробно пропикированным слоем, что помогает схождению инверсии, даже если мы и позволяем томографии изменять как скорость в пропикированном слое, так и положение самого слоя. В этом случае модель над выбранным значением мягкого ограничительного слоя может меняться.

Построение скоростной модели и глубинная миграция до суммирования

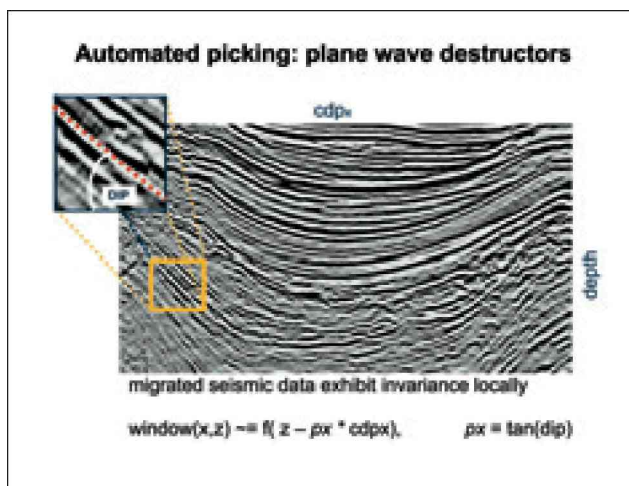
В следующих примерах, взятых из исследований на Северном море, мы придерживались одинакового направления. Первоначальная глубинно-скоростная модель была построена на основе скоростей суммирования, конвертированных в интервальную скорость по глубине. Морское дно было пропикированно, и по нему была построена сеть в качестве жесткого ограничения, основанного на первоначальной миграции, чтобы создать водную толщу в модели интервальных скоростей по глубине. Дальнейшие действия по этой схеме привели нас к нескольким итерациям комбинированного площадного томографического модернизирования (Hardy, 2003), как следует далее (Изображение 1):

- Прodelать глубинную миграцию до суммирования в режиме 3D на определенной сети, получив на выходе сейсмограммы с полным диапазоном удалений непрерывно вдоль линий скорости.
- Прodelать автоматический пикинг плоских волн на всех сейсмограммах, чтобы определить наклон, регулярность волны и поля остаточной кривизны.
- Ввести автоматически пропикированные данные в томографию и обновить поле скоростей.

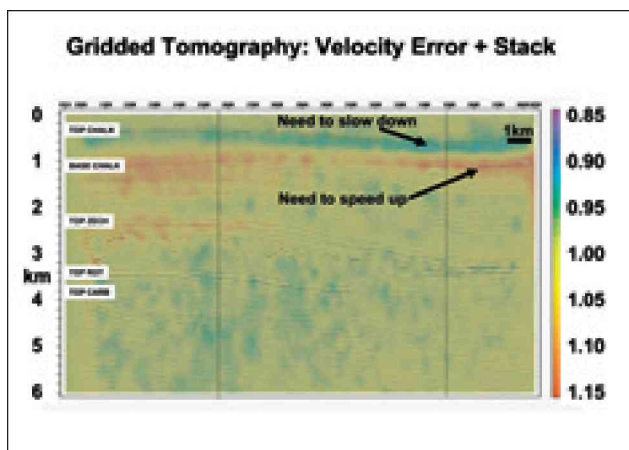
Для резких границ вертикальных скоростей (и в случае, когда анизотропия подлежит включению) горизонты пикируются как ограничение на площадной томографии (комбинированный подход). Ограничительные слои были пропикированы там, где мы прогнозировали появление значительных границ вертикальных скоростей.



Изображение 1 Схема операций итеративного комбинированного модернизирования, которое начинается с сейсмограмм ОТП по глубинной миграции до суммирования со сглаженной первоначальной моделью.



Изображение 2 В маленьком окне сейсмическая волна выглядит как линейный наклонный сегмент. Мы вычисляем наклон этого сегмента, и на сейсмограмме мы вычисляем подбор для остаточного приращения времени либо в линейно-ломаном направлении для каждого удаления, либо как общий подбор по всем удалениям.



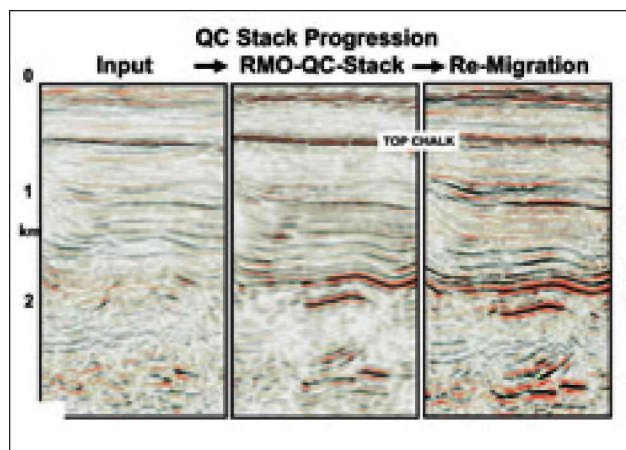
Изображение 3 Остаточная кривизна на сейсмограммах ОТП: значение 1.0 демонстрирует выравненные сейсмограммы ОТП, значение <1.0 - данная скорость слишком большая, >1.0 демонстрирует, что данная скорость слишком маленькая.

В этих итерациях был проделан дополнительный этап:

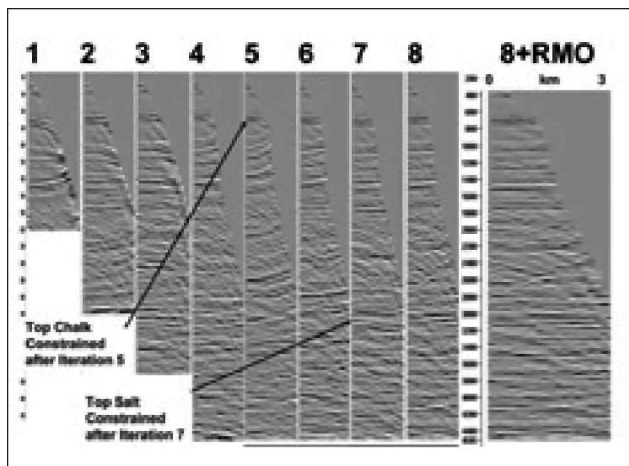
- d) Используя улучшенную скорость от предыдущего томографического модернизирования (с), проделайте новую глубинную миграцию до суммирования в режиме 3D, получив на выходе ограниченный суммарный разрез для структурной интерпретации (на сетке 50 м x 50 м).

Анизотропия без труда становится частью этого графа обработки, так как мы пропикировали горизонты, с которыми выполняется калибровка исходя из имеющихся способов контроля скважины. Вдобавок, использование пропикированного слоя в качестве “жесткого” ограничения сохранит калибровку анизотропической глубины во время последующих томографических итераций. Программа автоматического пикинга является запатентованным алгоритмом компании GXT, основанном на деструкторах плоской волны (Claerbout, 1992; Hardy, 2003). Определяемый пользователем инструмент для 3D исследований, содержащий элементы трасс для различных общих глубинных точек и удалений, перемещается по различным участкам данных. В каждой позиции вычисляются крутизна вдоль оси общих глубинных точек и остаточная кривизна поперек оси удалений (путем минимизации методом наименьших квадратов) (Изображение 2). Качество этих оценок также вычисляется. В результате такого пикинга определяется поле крутизны 3D и оценка остаточного приращения времени (Изображение 3). Для инвертирования больших задач, связанных с 3D исследованиями, используется подход, основанный на сопряженных градиентах. Как сопутствующее явление автоматического пикинга нами также был получен откорректированный суммарный разрез изображения с остаточным приращением времени (Изображение 4). Это хороший показатель того, обнаружила ли программа автоматического пикинга правильное остаточное приращение времени в процессе подготовки для топографического обновления. Она может продемонстрировать, насколько внимательно пикируется остаточная энергия кратных волн.

Следуя за автоматическим пикингом, томография (van Trier, 1990; Jeannot and Hardy, 1994; Hardy and Jeannot, 1999) берет остаточное остаточное приращение времени и полевые измерения наклона в сочетании с весами, основанными на “качестве” автоматически снятых значений, и создает томографическое решение, чтобы минимизировать значения остаточного приращения времени.



Изображение 4 Слева: разрез сейсмограмм ОПП по текущей итерации. В центре: после автоматического пикинга к этим сейсмограммам применяется поправка за остаточное приращение времени с использованием пропикированной остаточной кривизны, что улучшает разрез, но не производит движения в волнах. Справа: новое изображение от ремиграции после томографического модернизирования скорости, основанной на пропикированных остаточных приращениях времени.



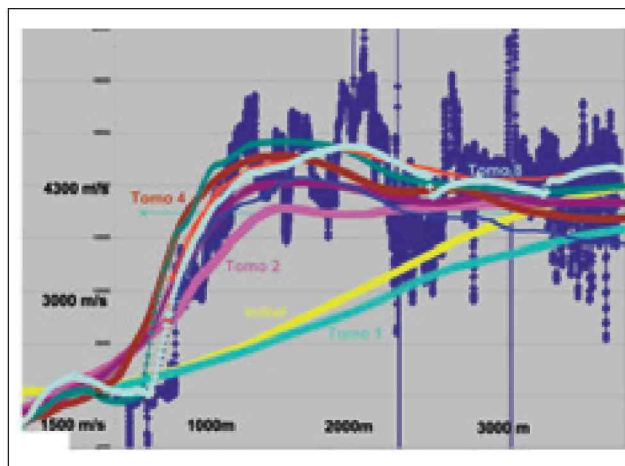
Изображение 5 Та же ОТП при положении скважины для каждой из восьми итераций усовершенствования модели. Справа: последняя итерация после остаточного приращения времени для окончательного разреза. Снятое значение верхней части мелового пласта было “жестким” ограничением, поэтому после итерации 5 над ним ничего не изменяется. Однако, выбранное значение кровли солевого пласта было использовано как “мягкое” ограничение, поэтому томография могла свободно изменять модель над солевым пластом.

Вслед за завершающим этапом в построении модели обычно применяется глубинная 3D миграция Кирхгофа до суммирования, производя на выходе все сейсмограммы на окончательном варианте плотной сети. Для более требовательных геологических условий томография дополняется выделением горизонтов на мигрированных изображениях экстраполяции волнового поля и/или выполнением автоматического пикинга на мигрированных сейсмограммах плоских волн с экстраполяцией волнового поля как ввод данных для дальнейшего томографического обновления.

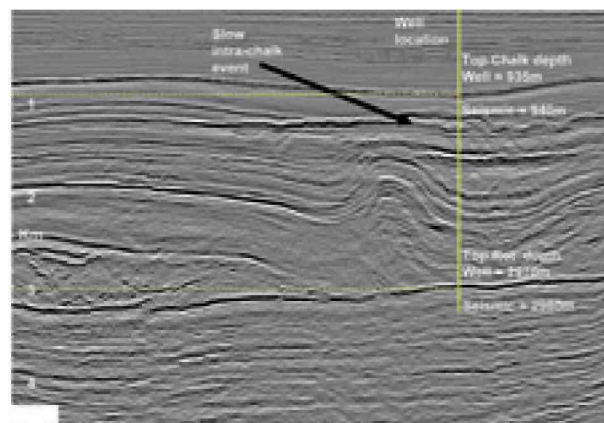
Пример 1: Газоносный комплекс пород, южная часть Северного моря.

Первый пример взят из изучения конкретного случая по слиянию четырех исследований, покрывающих примерно 430 кв.км., которое было переобработано, чтобы получить последовательный единый входной куб для получения изображения глубинной миграции 3D до суммирования (Campbell, et al., 2005).

Последующие итерации томографии (Изображение 5) слились для сглаженного воспроизведения акустической каротажной кривой, хотя это и не является явным ограничителем техники обновления (Изображение 6). Во время построения модели были получены хорошие привязки к скважине, также была применена изотропная миграция (Изображение 7). Ясным репером по всему исследованию является волна в верхней части мелового слоя, которая представляет резкое вертикальное увеличение по скорости; следовательно, она была включена в качестве ограничителя жесткого слоя при пятой итерации построения модели. С другой стороны, кровля эвапоритов Цехштейна имеет резкую скоростьную границу с окружающими отложениями, но изменяющуюся акустическую границу, поэтому она время от времени может становиться сейсмически проницаемой, что делает трудным выполнять последовательный пикинг в данном разрезе. Мы включили (примерный) верхний горизонт Цехштейна как мягкое ограничение в томографию: таким образом, мы получили положительный эффект от наличия в модели высокой скорости в солевой части разреза для последующей итерации, но позволили томографии изменять скорость (отсюда положение волны), чтобы избежать смещения модели.



Изображение 6 Акустические свойства по сейсмограммам, показанным на Изобр.5 и соответствующий профиль скорости миграции для последовательных итераций обновления модели. Скважина не используется в томографии в явной форме, но используется как способ контроля качества и/или для оценки параметров анизотропии.

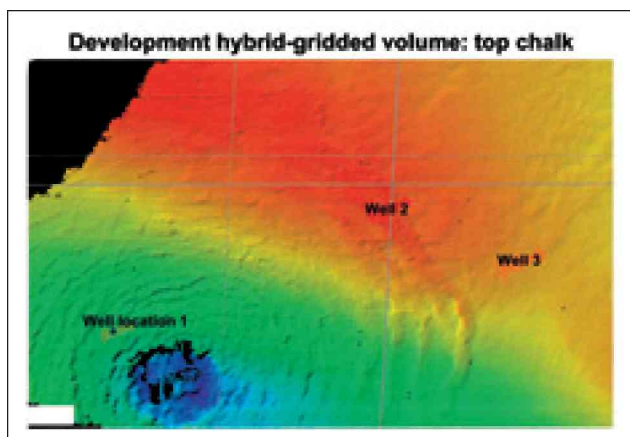


Изображение 7 Окончательное изображение при местонахождении скважины

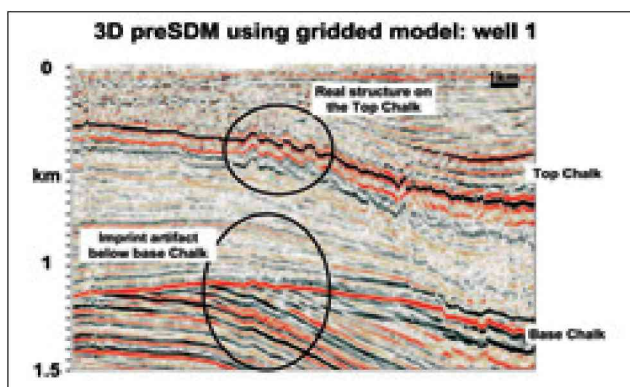
Пример 2: Каменноугольный газоносный комплекс пород. Южная часть Северного моря.

Второй пример включает слияние восьми исследований, охватывающих примерно 1500 кв. км., которое было переобработано, чтобы получить последовательный единый входной куб для построения изотропного изображения как с временной миграцией до суммирования, так и с глубинной миграцией до суммирования для оценки исследования (Parouin, et al., 2004; Evans et al., 2005). После того как построение первоначальной модели и проект миграции с применением чисто площадной томографии были завершены, мы еще раз рассмотрели часть данных по новой разведочной скважине, используя комбинированную площадную технологию. Полученные изображения дают хорошее разрешение разреза цехштейна и разреза по угленосным отложениям (Spencer et al., 2004), улучшенного на обработке разных лет.

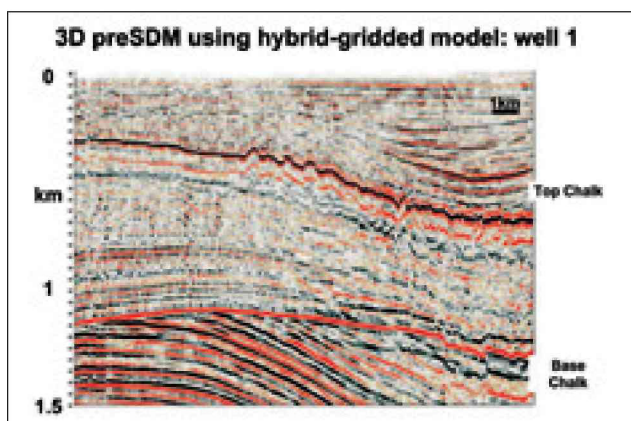
Первым ограничительным пропикированным слоем была верхняя часть мелового разреза (Изображение 8). Здесь мы видим участок “кратера”, по-разному описанного в литературе как кратер от удара метеорита, а также структуру с выходящей солью. Мы видим концентрические края вокруг этого участка, которые в вертикальном профиле на верхней части мелового слоя показаны как рябь (Изображения 9 и 10).



Изображение 8 Горизонт верхней части мелового слоя, пропиксированный как первый “жесткий” слоевой ограничитель для комбинированной томографии. Концентрические кольца, связанные с кратерообразной структурой, видны в нижней левой части.



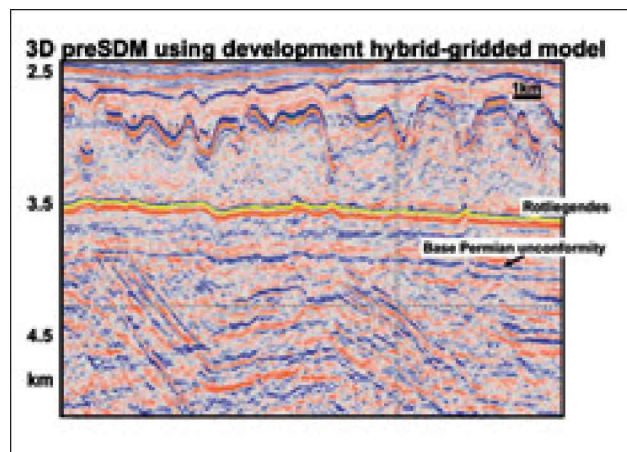
Изображение 9 Глубинный разрез вдоль линии наблюдения, пересекающий точку нахождения скважины 1 по исключительно площадной томографической модели. Волнистые линии на верхней части мелового слоя, связанные с кратероподобным участком, ясно видны. Под этими волнистыми линиями мы видим помехи в изображении, возникающие от скорости, рассеивающейся по верхней части мелового разреза.



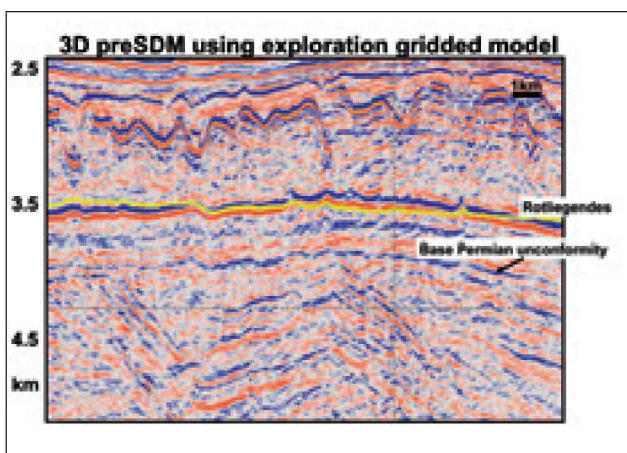
Изображение 10 Глубинный разрез вдоль линии наблюдения, пересекающий точку нахождения скважины 1 по комбинированной площадной модели. Волнистые линии на верхней части мелового слоя, связанные с кратероподобным участком, все еще ясно видны. Однако, влияние этих волнистых линий под верхней частью мелового слоя было удалено, что произвело более корректное изображение.

На полученной площадной модели мы ясно видим отпечаток верхней части меловой структуры на подошве мелового слоя, а также другие волны. Используя комбинированный подход там, где верхняя часть мелового слоя включена в модель как жесткое ограничение, а площадное поле скоростей было сверху и снизу, мы устранили отпечаток, таким образом, улучшив изображение подмеловых отложений.

Прямо над изучаемым уровнем на изображениях 11 и 12 мы видим несогласие подошвы пермского слоя и верхнюю часть волны красного лежня. На изображении 11, показывающем изображение, полученное с помощью комбинированного подхода, мы видим снятое значение слоя красный лежень, выделенное желтым. Это значение накладывается на более ранний (исключительно) площадной результат на изображении 12. Ранний вариант красного лежня при сравнении с комбинированным снятым значением демонстрирует длинноволновую структурную кривизну, что, вероятно, неправильно. Новое изображение демонстрирует улучшенную фокусировку на круглопадающих каменноугольных волнах, залегающих непосредственно под подошвой пермского несогласия, а также имеющих более постоянные привязки к скважине.



Изображение 11 Комбинированное площадное изображение, демонстрирующее несогласия красного лежня и подошвы пермских отложений.



Изображение 12 Полностью площадное изображение, демонстрирующее несогласия красного лежня и подошвы пермских отложений: снятое значение красного лежня на изображении 12 наложено сверху, показывая длинноволновое различие между изображениями на изучаемом уровне, что наиболее вероятно является следствием погрешности определения скоростей в покрывающей толще в более ранней обработке.

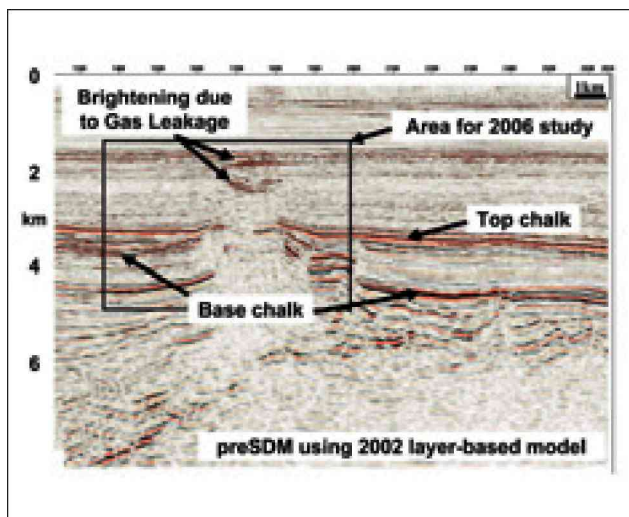
Пример 3: Южный Арн, Датская часть Северного моря.

Данные, показанные в этом примере, взяты из Гессовского южноарнского месторождения в датском участке южного центрального грабена Северного моря (Sugrue et al., 2004). Максимальное удаление составило 4200 м., что предоставило достаточное разрешение по скорости на заданной глубине (~3000 м.) с приемлемым спектром частот (~60 Гц). Мы видим участок с непроницаемой горизонтально лежащей покрывающей толщей, под которой компрессионное сжатие и структурная инверсия по всему меловому слою привели к появлению структурного поднятия на уровне последовательности строения мелового резервуара. Меловая последовательность истощается над этим вытянутым антиклинальным хребтом и асимметрично утолщается за пределами структуры с более толстой меловой последовательностью, развитой справа (в западной части) хребта. Над структурой утечка газа вызывает осветление сейсмического изображения (Изображение 13).

Чтобы участвовать в интерпретации недавно пробуренной скважины (2006), в 2006 г. был выполнен детальный анизотропический комбинированный площадной томографический проект с ограничительными слоями и пропиккированными горизонтами. Ранее, в 2002 г. была выполнена программа поисковых работ на этих данных, а в 2004 г. был начат проект разработки.

Вследствие этого у нас имеется уникальная возможность сравнить три различных подхода к построению модели (пластовый, площадной и комбинированный), которые обладают одной и той же нижележащей томографией и алгоритмом миграции (также как и одинаковыми вводными данными).

Построение модели и миграция для проекта разработки были выполнены в 2002 г. с использованием итеративного сканирования ОТП с послойной моделью, включающей верхнюю и нижнюю части мелового слоя в качестве основных скоростных границ с единым градиентом сжатия внутри мелового слоя. Как тонкое, так и толстое меловые отложения были представлены единым слоем, так как промежуточные внутримеловые горизонты были прерывистыми. Оглядываясь назад, было бы лучше включить слой в толстое меловое отложение, чтобы объяснить изменения в режиме сжатия градиента.



Изображение 13 Профиль по месторождению Южный Арн, показывающий меловый хребет.

Тогда как проект поисковых работ 3D по глубинной миграции до суммирования, обработанный в 2002 г. был изотропным, более детальная производительность 3D по глубинной миграции до суммирования (которая использовала только площадную томографию), обработанная в 2004, была анизотропной. Чтобы обеспечить справедливое сравнение, мы еще раз выполнили построение площадной модели изотропически на 2D профиле над структурой резервуара, чтобы проиллюстрировать операции, вовлеченные в полностью площадную томографию.

По большей части скорость остается без изменений до верхней части мелового слоя за исключением введения зоны низких скоростей, что соответствует светлым газовым зонам на сейсмиграмме. Однако, внутри и под меловым пластом мы видим резкие изменения в скорости, представленные площадным подходом. Справа от профиля простой градиент сжатия слоевой модели заменен более сложным режимом, а слева от вершины мы видим введение слоя низких скоростей под меловым слоем, внедряющееся в профильную структуру.

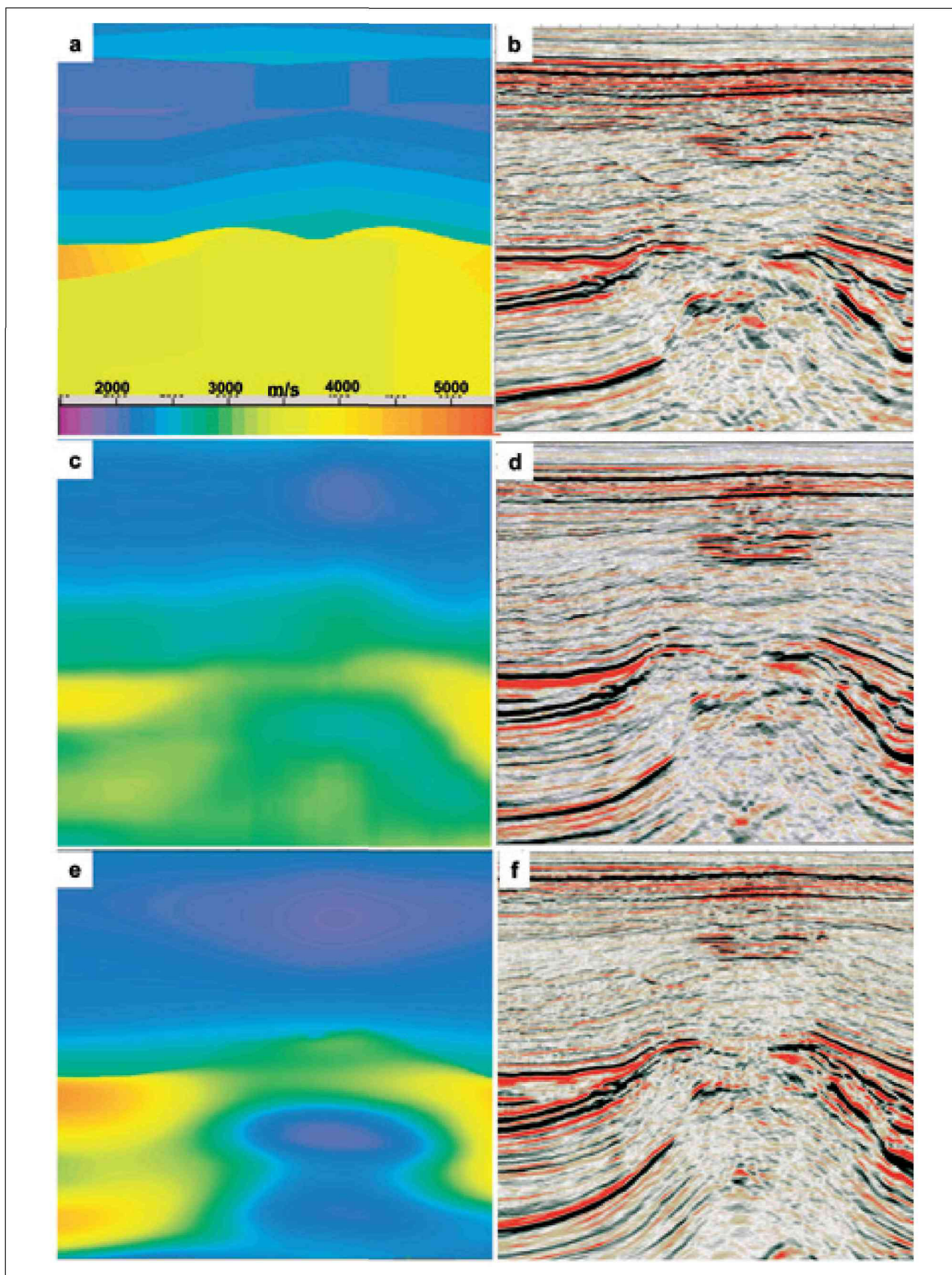
Мы обнаруживаем, что верхняя часть мелового слоя лучше изображена областью с почти постоянной скоростью и что режим с сильным градиентом начинается глубже внутри мелового слоя. Важно то, что градиент вертикального сжатия не является постоянным латерально по меловому объекту: при построении слоевой модели обычно в данном слое сохраняют постоянный градиент, так как у нас редко имеется достаточная увязка со скважиной, чтобы объяснить латеральную изменчивость в градиенте сжатия в слоевых моделях.

Структура под меловым слоем гораздо лучше определена с использованием площадной модели. Без сомнения, сопоставимого результата можно добиться, используя слоевую модель, если в построение слоевой модели вложить много времени и усилий.

На изображении 14 мы противопоставляем результаты по трем подходам в построении модели, демонстрируя скоростную модель и соответствующие 3D изображения глубинной миграции до суммирования. Сравнения не совсем справедливы, так как результат, основанный на слоевом подходе по исследованию 2002 г., был получен с применением изотропной миграции, а параметры анизотропии для проведения площадной в 2004 и комбинированной площадной в 2006 глубинной миграции до суммирования несколько различаются. Однако общие выводы все еще имеют силу: мы видим общее улучшение в качестве изображения (при условии, что предварительная обработка одинакова для всех миграций), лучшие привязки к скважине и хороший контроль латерального позиционирования по отношению к пересечениям скважиной разломов.

Пояснение

Мы вкратце представили способы построения моделей для сложного геологического строения и сопоставили результаты для улучшения в схеме построения слоевой модели, плотном площадном томографическом подходе, задаваемым автокорреляцией, и комбинированном площадном подходе. Хотя достижение выполнения операции по детальному построению модели с использованием пластового подхода должно быть возможно, более практичным оказалось использование площадного метода, когда мы имеем трудно различимые латеральные изменчивости в структуре скорости, и сочетание сетки скоростей со слоевыми ограничителями, когда мы имеем точные скоростные границы.



Изображение 14 Модель и изображение для трех подходов по построению модели, демонстрирующие последовательное улучшение.

Благодарность

Авторы хотели бы поблагодарить своих многих клиентов из Великобритании за их любезное позволение показать данные в первых двух примерах и компанию Hess Denmark и партнеров за их любезное позволение показать данные, а также наших коллег за помощь в проведении этой работой. Авторы хотят поблагодарить руководство компании GX Technology и ее материнскую компанию Input/Output за разрешение опубликовать эти результаты.

Ссылки

- Alkhalifah, T. [1997] Velocity analysis using nonhyperbolic moveout in transversely isotropic media. *Geophysics*, 62, 1839-1854.
- Alkhalifah, T. and Tsvankin, I. [1995] Velocity analysis for transversely isotropic media. *Geophysics*, 60, 5, 1550-1566.
- Campbell, A.G., Evans, E., Judd, D, Jones, LE, and Elam, S. [2005] A Southern North Sea Multi-Survey preSDM. 67th EAGE Meeting.
- Claerbout, J.F. [1992] *Earth Soundings Analysis: PVI*. Blackwell Scientific Publications.
- Evans, E., Papouin, M., Abedi, S., Gauer, M., Smith, P., and Jones, I.F. [2005] Southern North Sea preSDM imaging using hybrid gridded tomography: 75th SEG Annual Meeting.
- Hardy, P. and Jeannot, J.-P. [1999] 3-D reflection tomography in time-migrated space. 69th SEG Annual Meeting, 1287-1290.
- Hardy, P.B. [2003] High resolution tomographic MVA with automation, *SEG/EAGE Summer Research Workshop, Trieste*.
- Hawkins, K., Leggot, R., Williams, G., and Kat, H. [2001] Addressing anisotropy in 3D pre-stack depth migration: a case study from the Southern North Sea. *The Leading Edge*, 20, 5, 528-543.
- Jeannot, J. P. and Hardy, P. [1994] Practical traveltimes tomography of 2-D reflection seismic data. 56th EAGE Meeting, P. 60.
- Jones, LE, Baud, H., Ibbotson, K., and Audebert, F. [2000] Continuous 3D preSDM velocity analysis. *The Leading Edge*, 19, 3.
- Jones, LE, 2003, A review of 3D preSDM velocity model building techniques. *First Break*, 21, 45-58.
- Jones, LE, Bridson, M.L., and Bernitsas, N. [2003] Anisotropic Ambiguities in TI Media. *First Break*, 21, 31-37.
- Papouin, M., Gauer, M., Abedi, S., Evans, E., Smith, P., and Jones, I.F. [2004] Improving Seismic Data Quality in the Southern North Sea, Carboniferous. *PETEX 2004*, London, UK.
- Spencer, A. and Cooper, D. [2004] Keys to successful exploration of the SNS Carboniferous. *PETEX 2004*, London, UK.
- Sugrue, M., Jones, I.F., Evans, E., Fairhead, S., Marsden, G. [2004] Velocity estimation in complex chalk. *Geophysical Prospecting*, 52, 683-691.
- van Trier, J., 1990, Reflection tomography after depth migration: Field data results. 60th SEG Annual Meeting, 1279-1282.