

Обработка данных

Применение обратной временной миграции для отображения сложных частей разреза

(Application of reverse time migration to complex imaging problems)

Paul A. Farmer,¹ Ian F. Jones,^{2*} Hongbo Zhou,¹ Robert I. Bloor,¹ и Mike C. Goodwin² объясняют причины возрождения интереса к обратной временной миграции и дают некоторые примеры построения модели и миграции данных с Северного моря с использованием полного волнового уравнения для упругих волн.

Стандартные методы глубинной миграции данных до суммирования (preSDM), используемые для односторонней экстраполяции волнового поля (WE) от источника, позволяют строить сейсмический разрез геологической среды путем продолжения волнового поля источника и приемника вниз для каждого пункта возбуждения (ПВ). Условие построения разреза реализуется путем взаимной корреляции этих двух волновых полей в каждом уровне глубины, и затем суммированием вкладов от всех ПВ в апертуре для формирования разреза.

Одно из предположений при использовании этой методики заключается в том, что волновые поля распространяются по направлению экстраполяции только в одном направлении: вниз для волнового поля источника, и вверх для приемника, также называемое рассеянным волновым полем.

На практике, каждое из этих волновых полей в общем случае будет распространяться как вверх, так и вниз при наличии сложной скоростной модели среды, когда кручение (ныряние) траекторий сейсмических лучей имеет место, или когда образуются кратные волны. Кроме того, приближения в методиках экстраполяции обычно ограничивают углы наклона границ до семидесяти градусов. Более крутые угла падения, и рефракция лучей обычно отображаются по методу Кирхгофа, но в случае задачи для нескольких траекторий невозможно построить приемлемые разрезы.

Одна методика, которая может помочь в решении всех этих проблем миграции — это использование полного (двухстороннего) волнового уравнения. В данной статье мы использовали алгоритм обратной временной миграции (RTM) для анизотропной среды, для решения этих задач. Алгоритм RTM должным образом распространяет волновое поле через скоростные структуры произвольной сложности, правильно отображая границы с углами наклона более 90 градусов. Этот метод также имеет потенциал для отображения

среды по данным с внутренними кратными волнами, когда границы, ответственные за кратные волны, присутствуют в модели.

Хотя до настоящего времени данный подход считался экономически непрактичным, недавний прогресс в вычислительных мощностях, как в терминах скорости работы процессоров, так и в терминах весьма эффективной инфраструктуры технических средств, сделал метод RTM коммерчески жизнеспособным.

После обзора приближений, используемых в миграции, мы покажем примеры использования метода RTM для анизотропной среды для данных Северного моря, подчеркивая потенциальную выгоду построения модели и миграции с использованием полного волнового уравнения для упругих волн.

История развития

Метод RTM возможно не так известен как другие алгоритмы миграции, используемые в настоящее время, а полное (двухстороннее) волновое уравнение вероятно менее знакомо читателям, чем одностороннее упрощение. Следовательно, в следующих разделах мы потратим некоторое время на изложение основ данного метода. Читатели, уже знакомые с этими понятиями, могут напрямую обратиться к разделу результатов.

В начале 90-ых годов прошлого века ограничения производительности компьютеров ограничивали развитие методов миграции до миграции после суммирования. В то время, общий способ выполнения глубинной миграции после суммирования (postSDM) трехмерных сейсмических данных реализовывался в частотной области с использованием алгоритмов неявных конечных разностей (FD), впервые предложенных автором Claerbout (1976).

Для нахождения решения трехмерного волнового уравнения со схемами FD применялась методика 'разбиения', посредством которой независимое решение применялось к направлениям инлайнов (x) и кросслайнов (y). Это потребовало разделения уравнения с двойным квадратным корнем (содержащим переменные x и

¹ Корпорация GX Technology, Хьюстон.

² GX Technology Европа, Африка и Ближний Восток.

* Соавтор: Ian F. Jones, E-mail: ijones@gxt.com.

Обработка данных

у) на два независимых члена с квадратным корнем, каждый для одной из этих двух переменных. Это было разбиением, или разделением компонент x и y в данных, которое привело 'к численной анизотропии' или изменению импульсной передаточной функции, которая не обладала необходимой круговой характеристикой x - y для среды с постоянной скоростью. (Название возникает по аналогии с физической анизотропией, которая приводит к распространению волн с различными скоростями в различных направлениях, в результате которого образуется несферический фронт волны при нулевом выносе).

Каждый член, содержащий квадратный корень, был аппроксимирован разложением в ряд, усечение которого приводило к неправильному позиционированию энергии вне определенной наклонной границы на выходе процесса миграции. Такие приближения разложением в ряд не имеют внутреннего ограничения на угол падения границы, они просто ошибочно располагают энергию вне этой падающей границы. Поэтому, была придумана форма шума, выглядящего как энергия, распространяющаяся на невозможно высоких скоростях для данного угла распространения (которая попадает в бесконечно малую область пространства решения).

Кроме того, использование методов конечных разностей, для решения дифференциального члена второго порядка из волнового уравнения приводит к небольшой ошибке позиционирования энергии, которая зависит от частоты по отношению к размерам сетки дискретизации данных. Это дает начало явлению, напоминающему дисперсию, в которой различные частоты распространяются с различными скоростями. В процессе миграции одна ось синфазности с постоянным углом падения будет разбита на свиту различных осей синфазности с различным частотным составом и углом падения (Diet и Lailly, 1984).

Однако, введение явных схем продолжения, которые лишены артефактов FD, привело к повсеместному использованию надежных алгоритмов глубинной миграции до суммирования (postSDM), выделяющих границы с большими углами падения, в промышленности в середине 90-ых (Hale, 1991b, Soubaras, 1992).

Сравнение интегральных и дифференциальных методов

По большей части, эти FD и явные методы перестали применяться по мере замещения метода postSDM методом preSDM с использованием уравнения Кирхгофа с середины до 90-ых, когда построение трехмерных глубинных разрезов до суммирования стало в вычислительном отношении выполнимым вследствие появления эффективных процедур для моделирования прохождения лучей через сложно построенную среду. Кроме того, способность метода Кирхгофа (и других интегральных методов)

образовывать ограниченные подмножества сейсмического изображения сделала возможным промышленное приложение этого метода, особенно учитывая тот факт, что методы построения разреза должны применяться итерационно для построения скоростной модели. Ограничения ранних кодов миграции Кирхгофа быстро стали очевидными для сложно построенных сред, но тогда трехмерная миграция волнового поля до суммирования ещё оставалась невыполнимой. Поэтому промышленные усилия были направлены на усовершенствование миграции Кирхгофа, как в терминах амплитуд, так и в терминах обработки различных диапазонов времен вступления.

Терминология, которая мы используем в данной статье, также заслуживает внимания. Некоторые авторы понимают под сокращением 'WE' термин 'волновое уравнение', что в некотором смысле исключает понятием расчетных схем Кирхгофа. Однако все методы миграции считаются решениями 'волнового уравнения', и, таким образом, будет неточным исключать схемы Кирхгофа из этой терминологии. Некоторые альтернативные предложения состояли в разделении вычислительных схем на 'интегральные' и 'дифференциальные' (или на 'экстраполяцию' и 'продолжение'). Здесь обращаем ваше внимание на дифференциальный метод типа экстраполяции волнового поля (WE), поскольку его сокращение взаимозаменяемо и обычно (неправильно) используется как сокращение для миграции волнового уравнения.

В течение прошлых пяти лет, по мере уменьшения стоимости компьютеров, наблюдался скачок в развитии методов WE, но в этот раз до суммирования. Методы WE состоят в использовании одностороннего скалярного волнового уравнения и являются относительно простыми для описания по сравнению со схемой Кирхгофа, но в принципе они являются более дорогостоящими, что может негативно сказываться на стоимости их применения при необходимости выполнения большого количества итераций для построения скоростной модели. В случае миграции Кирхгофа, обычным действием является вывод данных для обновления модели, сортированных по выносу на поверхности (что выражается в получении похожих друг на друга сейсмограмм общего пункта приема (ОПП)). Для области пунктов возбуждения и других методик экстраполяции волнового поля, требуются различные аппроксимации для создания сейсмограмм для скоростного анализа.

Как было упомянуто ранее, с подходом WE удастся получить лучшее приближение к истинным амплитудам распространения волн, особенно в разнородных скоростных средах по сравнению с методами Кирхгофа, и данные алгоритмы можно продолжать на двухсторонние (полные) волновые схемы. Подходы продолжения волнового поля

Обработка данных

Табл. 1. (взята из работы Jones & Lambare, 2003)

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Методы Кирхгофа и Гаусса являются самыми известными. Обычно реализуются во временной области, но могут быть реализованы и в частотной области.

Отличительная особенность – отделение вычисления времен пробега от процесса построения разреза. Таким образом, можно вычислить подмножество разрезов без необходимости отображения всего куба данных

Сильные стороны:

Позволяет получить подмножества разрезов отображаемого куба данных, включая выносы (поэтому методы эффективны, с точки зрения затрат для итерационного построения модели). Хорошая реакция на большие углы падения. Позволяет получить решения полного волнового уравнения (с учетом рефрагированных волн).

Слабые стороны:

По своей сути метод кинематический и обычно он позволяет найти скоростное поле только одной траектории, которое недостаточно точно дискретизовано для вычисления времени пробега. После того, как времена вступлений интерполируются обратно на сейсмический интервал, их трудно распространить на решение полного волнового уравнения.

являются самыми известными по причине их внутренней способности к учету множественных траекторий сейсмических лучей (в отличие от схемы Кирхгофа). За недавнее время также наблюдается возрастающий интерес к полному (двухстороннему) волновому уравнению (Warepaar, и др., 1987), как с позиции обратной временной миграции (Whitmore, 1983, Yoon, и др., 2003, Bednar и др., 2003, Farmer, 2006, Zhou, и др., 2006), так и с позиции большого количества других приближенных методик экстраполяции волнового поля (Shan и Biondi, 2004, Zhang и др., 2006).

В табл. 1 собраны все доводы за и против подхода Кирхгофа (интеграл) и подхода продолжения волнового поля (WE).

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ, МЕТОДЫ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ И ПРОДОЛЖЕНИЯ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

Метод продолжения волнового поля с использованием конечных разностей является самым известным из этого набора. Обычно он применяется вместе с процедурой исправления дополнительного сдвига фаз.

Каждая глубинный срез (слайс) волнового поля вычисляется по ранее вычисленному срезу, таким образом, для получения всего разреза, необходимо вычислить все глубинные срезы. Допустимый угол падения границ зависит от порядка используемого разложения (поэтому метод потенциально дорогостоящий).

Сильные стороны:

Отображает границы более простым способом. Учитывает амплитуды. Применение в данном методе полного двухстороннего волнового уравнения позволяет учитывать все траектории лучей, включая дифрагированные, рефрагированные и (возможно) кратные волны.

Слабые стороны:

Позволяет отображать весь куб данных (поэтому метод дорогостоящий). Позволяет получить хорошую реакцию на большие углы падения, однако при этом дорого стоит. Данные до суммирования можно получить неявно, вследствие этого, трудно выполнить рентабельное итерационное построение модели без 'сдерживающих' предположений (например, предположение о моноазимутальности). Очень дорого обрабатывать данные по этому методу с использованием решения полного двухстороннего волнового уравнения (но метод может выполнять аппроксимацию двумя односторонними проходами).

Аппроксимация полного волнового уравнения для упругих волн

Полное решение волнового уравнения для упругих волн не есть то, что мы обычно хотим получить. С точки зрения промышленной целесообразности, мы делаем различные предположения и упрощения, разделяющие множество решений на группы, от более простых к более сложным. Не удивительно, что эта прогрессия решений составила тандем с увеличением доступной производительности компьютеров и разработкой интерактивных средств обновления модели (для оценки параметров). Краткий обзор этих упрощений, и их

Обработка данных

связей с фундаментальным уравнением распространения упругих волн можно найти в переиздании работы 'Classics of Elastic Wave Theory' (Pelissier, и др., 2006), которое было сделано обществом SEG и содержит описание развития уравнений движения с 17 до 20 столетия прошлого века. В более узком контексте глубинной миграции, эти упрощения также обсуждаются в переиздании общества SEG 'Pre-Stack Depth Migration and Velocity Model Building' (Jones, и др., 2006).

Начиная с формулировки Стоксом уравнений Навье, которые определяют распространение упругой волны в твердых телах, и заканчивая некоторыми в вычислительном отношении легко управляемыми алгоритмами, наше первое упрощение этих уравнений состоит в отбрасывании членов, определяющих распространение поперечных волн. Формулировка Стокса является более общим изложением того, что получается после использования соотношений Коши для изотропного случая, соотношений Кристоффеля для анизотропного случая, и уравнений Навье для формулировки закона распространения упругих волн в среде с единственной константой упругости (Pelissier, и др., 2006).

Эта последовательность внедренных в промышленность решений за прошлые два десятилетия может выглядеть следующим образом:

Отбрасывание сдвиговых членов для получения решения только для Р-волны

Разделение решения на восходящие и нисходящие части, и их расщепление, для нахождения решения одностороннего волнового уравнения

Уход от потребности измерения вертикальных производных давления на поверхности земли (необходимое граничное условие для нахождения решения дифференциального уравнения в частных производных второго порядка), и поиск решения для угла падения, близкого к вертикальному, путем модификации параксиального (параболического) решения.

Возможно, главное различие между RTM и другими методами миграции состоит в способе, которым пропагатор обрабатывает данные. К примеру, один из более известных односторонних алгоритмов миграции, алгоритм WE берет зарегистрированные данные, и волновой пакет с ограниченной полосой частот, и распространяет их обоим через построенную земную модель. Шаг экстраполяции, требуемый для этого, зависит только от пространственного интервала между трассами зарегистрированных данных и выбранного интервала дискретизации по глубине для выходных данных (а интервал дискретизации по глубине зависит от желаемой максимальной частоты). Для алгоритма RTM, выполняется решение прямой задачи во временной области, а

для экстраполяции данной частоты обычно нужно приблизительно 10 отсчетов на длину волны (Alford и др., 1974). Если мы удвоим моделируемую частоту, то мы будем иметь в два раза больше отсчетов на единицу длины, и, так как мы имеем три пространственных измерения, в которых волна распространяется, стоимость моделирования увеличится пропорционально кубу частоты. Также мы должны обеспечить точно выдержанную постоянную частоту дискретизации по времени, и, таким образом, увеличение общей стоимости будет пропорционально четвертой степени частоты.

Промежуточный вариант учета рефрагированной волновой энергии с помощью односторонней схемы WE состоит в использовании двух проходов односторонней схемы. В этом подходе мы, сперва, продолжаем поле вниз, используя одно из решений с квадратным корнем (и сохраняя затухающее волновое поле, которое соответствует сложному решению с квадратным корнем). Затем мы мигрируем сохраненные сложные члены с корнем, изменяя направление распространения на противоположное. С такой схемой (использующей примерно двойное время вычисления односторонней схемы) мы можем отобразить дифрагированные и рефрагированные волны (вступления от двойных отражений: Bernitsas и др., 1997, Cavalca и Lailly, 2005). Однако эта схема не может учесть множественные отражения сейсмических волн [и отобразить оси синфазности рефрагированных волн (Shan & Biondi, 2004)].

Используя метод RTM, который мы рассматриваем в данной статье, мы получаем полное решение двустороннего волнового уравнения для упругих волн. Вариант метода, использованный в практическом примере, который приводится в данной статье, использует пространственное решение восьмого порядка и учитывает полярную анизотропию с вертикальной осью симметрии (VTI) (Zhou, 2006). Метод RTM имеет потенциал для миграции всех кратных волн, хотя, в этом случае, необходимо наложить некоторые ограничения на граничные условия. Хотя теория говорит о том, что регистрация данных должна быть сделана на двух (горизонтальных) уровнях, а не на одном, который мы обычно имеем на поверхности земли (Mittet, 2006), практика показывает что, кратные волны могут быть с пользой обработаны для детализации сейсмического разреза земных недр. Это может иметь особенное значение при построении разрезов по данным ВСП (VSP).

Однако, для отображения кратных волн, в нашей модели необходима подробная и точная информация о скоростных контрастах, связанных с ними (то есть модель должна включать все границы, которые образовывали бы существенную энергию многократного отражения). Такая точность описания не всегда возможна (или практична) и

Обработка данных

достижима. Следовательно, мы все ещё стремимся подавить энергию кратных волн в процессе предварительной обработки.

Для демонстрации потенциала RTM в области отображения сложнопостроенных тел, мы сначала рассмотрим сложный пример синтетических данных, сделанных с использованием метода конечных разностей для изотропной среды (благодарность компании BP, пример был впервые продемонстрирован в Париже на семинаре EAGE по построению моделей: Billette и Brandsburg-Dahl, 2005). На рис. 1, можно видеть результат работы одностороннего WE, а на рис. 2 результат работы RTM. При построении разреза односторонним

методом, мы неспособны учесть энергию рефрагированных волн, которые мешают увидеть залегающую выше соль, а крутые участки основания соли либо не отображены (вследствие алгоритмического ограничения по углу наклона), либо не освещены сейсмической съемкой. Крутые углы падения и энергия рефрагированных волн, так же как энергия от других волн с двусторонними траекториями, учитываются методом RTM, в результате чего получается хороший разрез. Примеры однонаправленной миграции, показанные в этой статье, были получены с использованием алгоритма интерполяции Фурье с разделением шага (SSFPI).

Результаты

Данные с Северного моря, которые рассматриваются в данной статье (Jones, и др., 2006) демонстрируют один из классических соляных куполов грибовидной формы, типичных

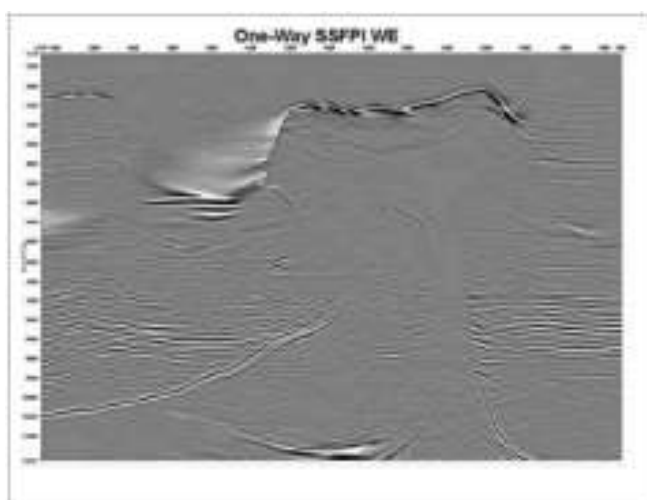


Рис. 1. Разрез подсолевых отложений, сделанный по методу миграции SSFPI одностороннего WE, миграция плохо отображает края соли и подсолевых структур.

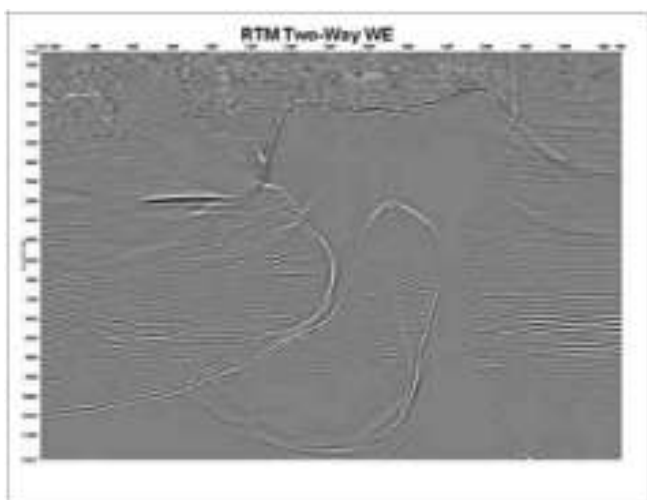


Рис. 2. Разрез подсолевых отложений, сделанный по методу миграции RTM, на котором видно существенное улучшение отображения краев соли, и даже разреза ниже соли. (Благодарность за входные синтетические данные компании BP, построение разреза было сделано GXT).

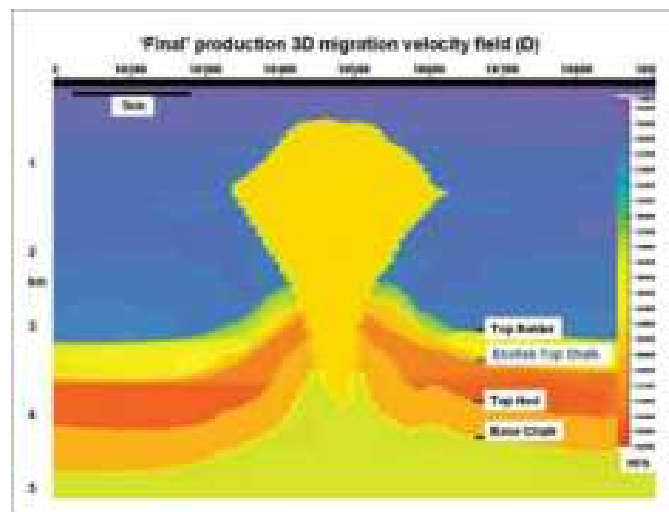


Рис. 3. Итоговая модель для профиля D.

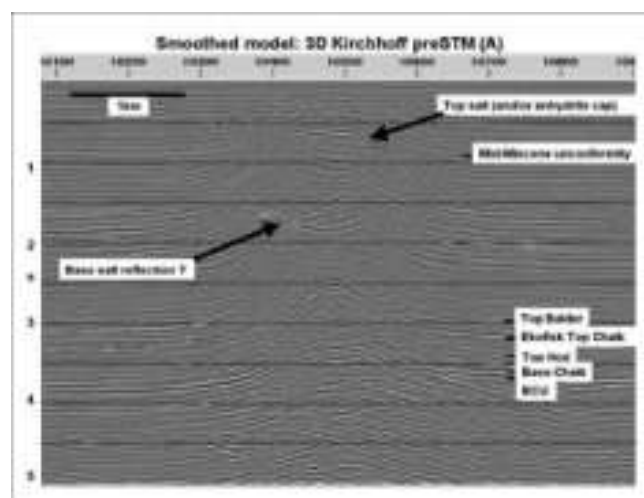


Рис. 4. Результат работы метода preSTM Кирхгофа для профиля, расположенного близко к куполу (A), на котором отчетливо видна энергия отражения основания соли.

Обработка данных

для некоторых частей Северного моря. Неправильно пологозалегающие карбонатные пласты бы перевернуты в процессе осадконакопления, поскольку внедрение солевого диапира происходило одновременно с осадчением пород (Davison и др., 2000, Thomson, 2004). Коммерческий проект WE недавно был завершен, и поэтому мы имели 'конечную' модель (рис. 4), так же как и результаты сравнения разрезов, построенных по методу обычного одностороннего WE и методу Кирхгофа. Например, на рис. 4 показан результат работы метода preSTM Кирхгофа, на котором видно отражение от основания соли.

Как и в случае с любыми сложными данными, или при попытке понять работу нового алгоритма, результаты решения прямой задачи часто бывают поучительны. Имея это в памяти, мы сделали некоторую двумерную трассировку лучей через модель среды по профилю, расположенному близко к центральной части этого солевого тела. Наш основной интерес при этом состоял в том, чтобы выявить классы энергии, которые можно использовать при отображении крутых осей синфазности краевых частей соли. На рисунке 5а показаны траектории лучей, проходящих через верхнюю часть солевого тела как энергия Р волн и отображающих краевые части соли. На рисунке 5b показаны соответствующие траектории лучей для волн типа PSSP. На рисунке показаны траектории лучей для волн с двойным отражением, которые отражаются от краевых частей соли и от пологозалегающей кровли отложений Balder и кровли меловых отложений. Преобладающим классом энергии, освещающей края соли, по нашему мнению является класс волн с двойным отражением. В этом случае мы не были в состоянии однозначно выделить вступления волн PSSP на реальных данных (хотя позже мы сделаем некоторые замечания к этому классу волн). Энергия рефрагированных волн не присутствовала в этих данных, поскольку вертикальные градиенты скорости в покрывающей толще были небольшими и включали существенную скоростную инверсию в середине Миоценового стратиграфического несогласия.

Используя данную итоговую модель, полученную традиционными методами, мы сделали RTM, ограничивая частоту моделирования 17 Гц. Результаты RTM ясно указали несостоятельность традиционного метода построения модели, и мы попытались усовершенствовать модель с помощью итерационного обновления модели RTM. На рисунках 6, 7, 8, и 9 показаны соответственно результаты работы методов preSDM Кирхгофа, WE preSDM, другой профиль, обработанный по методу WE preSDM после фильтрации высоких частот для выделения полосы частот RTM, и результат работы метода RTM с использованием итоговой модели, взятой из коммерческого проекта. Нужно

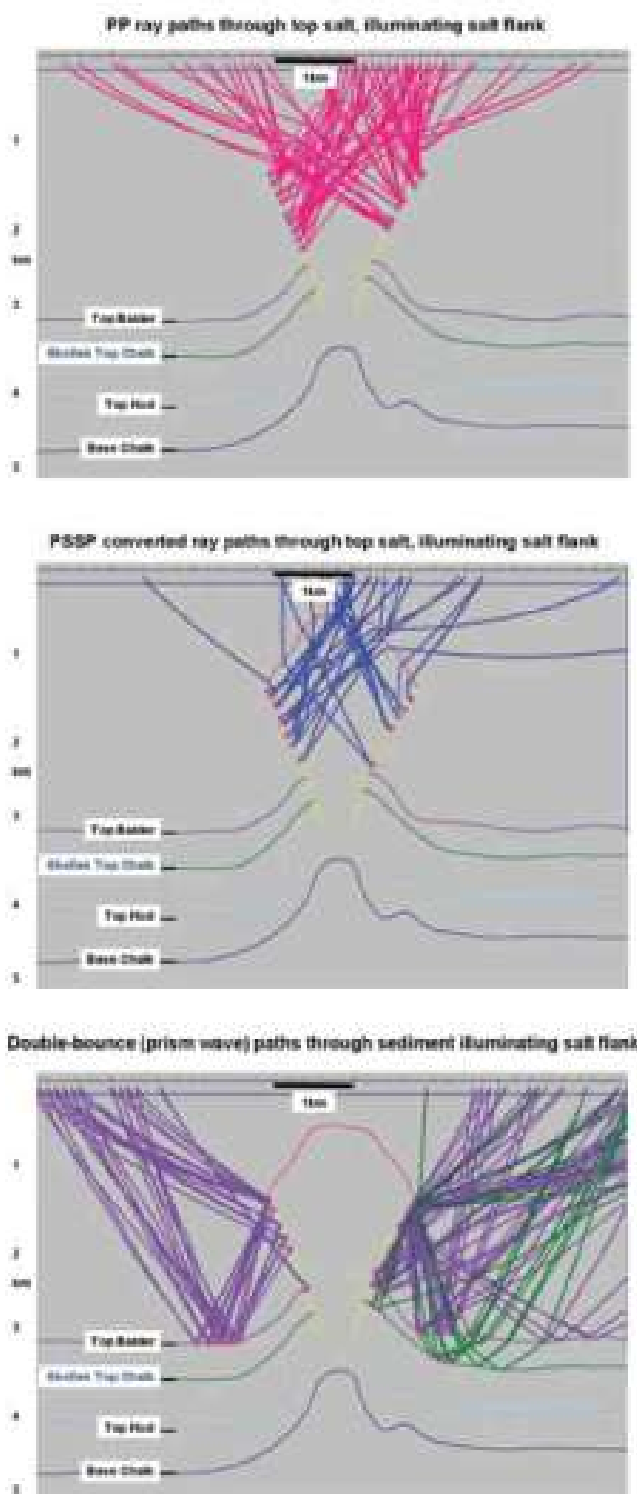


Рис. 5. а) Траектории лучей для волн PP, проходящие через кровлю соли; б) Траектории лучей для волн PSSP; в) Энергия волн с двойным отражением, одно из которых происходит от крутых краевых частей структуры.

отметить, что, поскольку эти изображения были заархивированы в течение различных этапов теперь уже законченного коммерческого проекта, они немного отличаются в терминах интервала между входными и выходными трассами,

Обработка данных

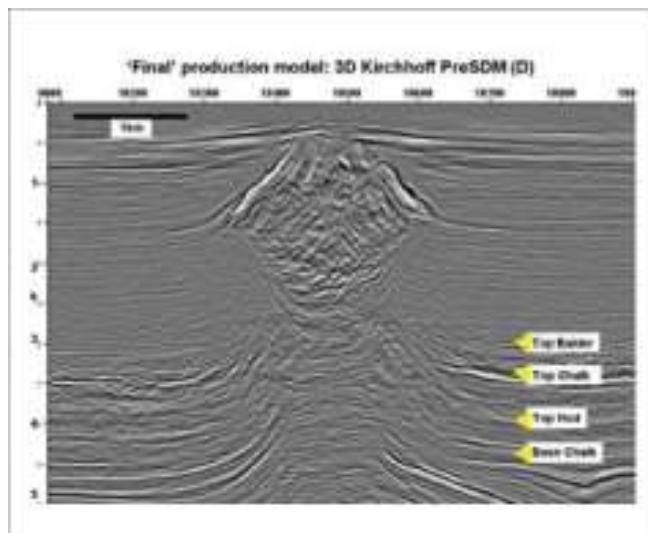


Рис. 6. Результат работы метода preSDM Кирхгофа для профиля D.

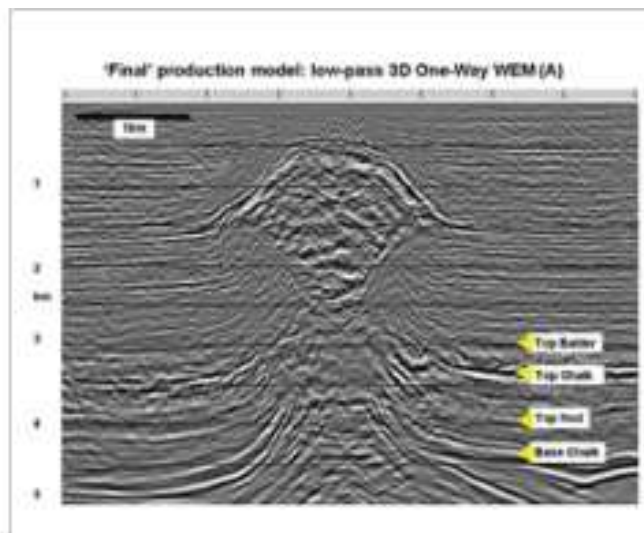


Рис. 8. Результат работы метода SSFPI WE preSDM с низкочастотной фильтрацией для профиля D.

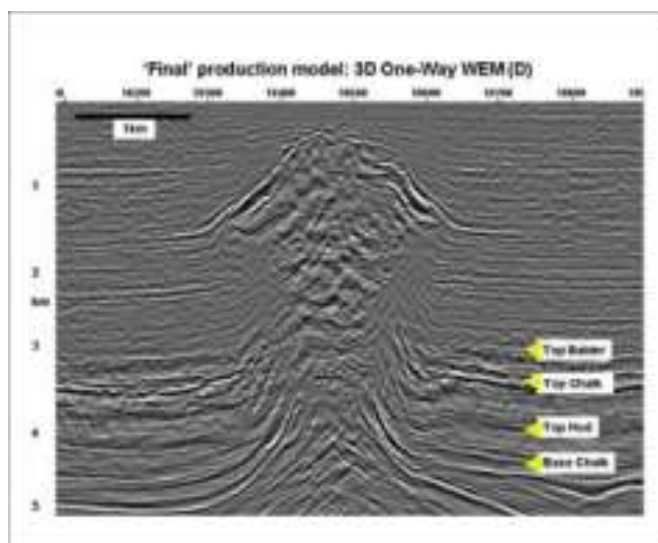


Рис. 7. Результат работы метода SSFPI WE preSDM для профиля D.

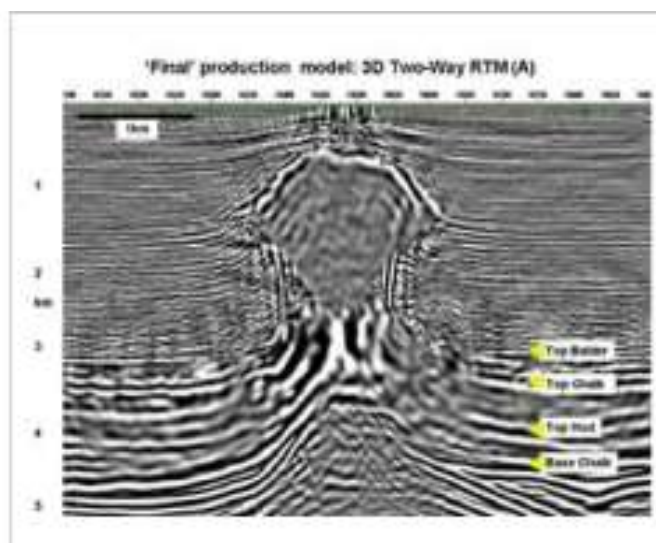


Рис. 9. Результат работы метода RTM для профиля A. Все пять рисунков были использованы для построения итоговой промышленной трехмерной модели.

вейвлетной обработки и итоговой полосы частот. Однако эти различия не влияют на выводы, сделанные в данной статье.

Мы видим по результатам RTM, что мы имеем очень крутые краевые части солевого тела (возможно от перевернутой границы мела). По результатам трассировки сейсмических лучей, вероятно, что эти крутые оси синфазности порождаются волнами с двойным отражением.

Результаты интерпретации солевого тела в этой модели, сделанной на основе WE, кажутся неправильными возле краев соли, особенно в правой части (оценка области эквивалентности для сейсмических свойств соли была сделана для ограничения диапазонов изменения параметров модели в левой части солевого тела, что видно на данных рисунках). Результат RTM указывает на то, что соль вероятно немного менее широкая, с почти

Обработка данных

вертикальными краями ниже небольшого выступа. Кроме того, результат RTM указывает на то, что максимальные отражения от кровли отложений balder и меловых отложений, вероятно, загнуты резко вверх до упора в соль, а не проходят через модель с пологой антиклинальной формой, как это было в промышленной модели.

В то время использовались две модели отложений для оценки потенциала RTM к обновлению модели. Сначала использовалась

модель сплошной породы (рис. 10а) со средними существующими поверхностными скоростями (без кровель отложений balder и отложений мела и т. д.). Вторая модель отложений содержала кровлю отложений balder (первое большое увеличение скорости) и последующую кровлю отложений мела. Конфигурация этих высокоскоростных слоев ниже положения (отсутствующей) соли была представлена в виде пологой антиклинали (рис. 11а).

Обработка данных

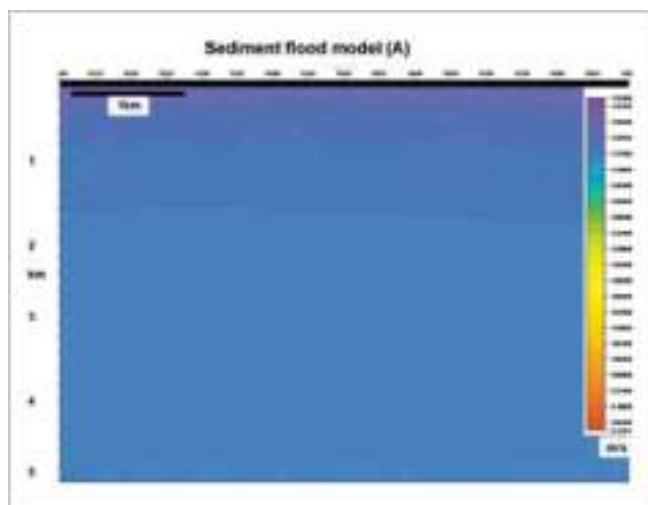


Рис. 10а. Модель сплошной осадочной породы для профиля А.

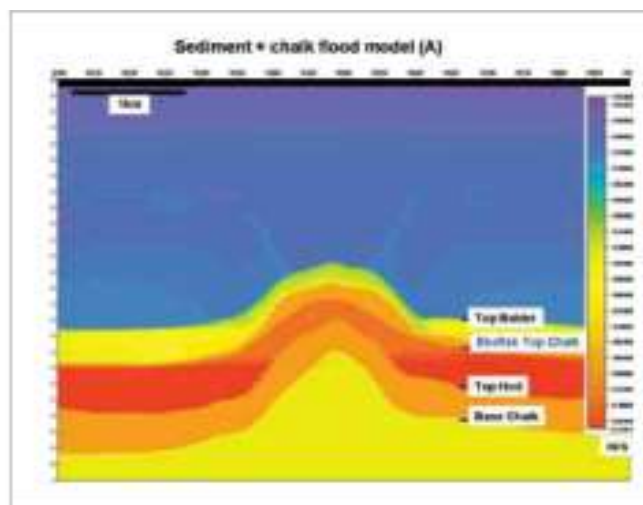


Рис. 11а. Модель отложений 'осадочные + меловые отложения' для профиля А.

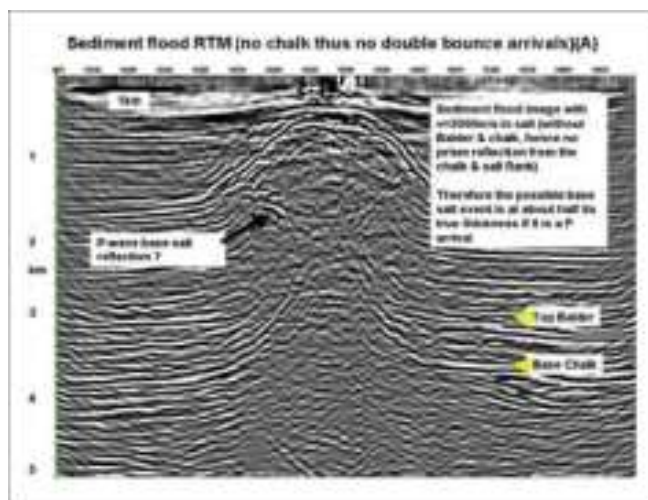


Рис. 10b. Результат работы метода RTM с использованием модели сплошной осадочной породы для профиля А.

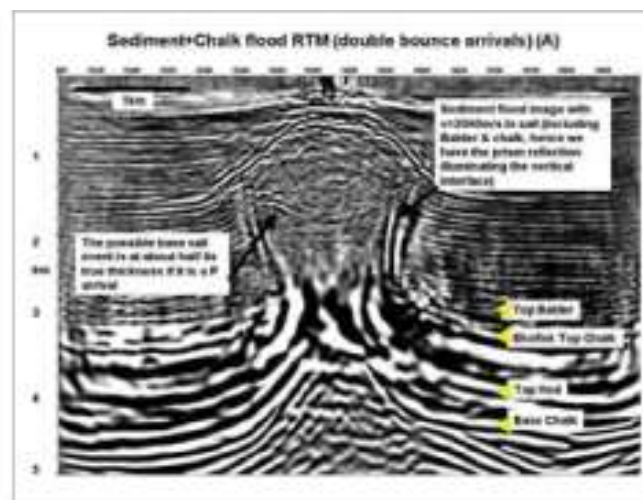


Рис. 11b. Результат работы метода RTM с использованием модели отложений 'осадочные + меловые отложения' для профиля А.

По результату работы RTM с использованием модели сплошной породы (рис. 10b), мы видим устойчивое изображение кровли соли, но не видим крутых осей синфазности. Крутые оси синфазности, интерпретируемые как волны с двойным отражением, отсутствуют в этих данных, потому что скоростная модель не включает пологозалегающую кровлю отложений balder и отложений мела, которые необходимы для образования одной из поверхностей для двойного

отражения. Однако в результате работы RTM с использованием модели отложений 'осадочные + меловые отложения' (рис. 11b), мы ясно видим эти крутые оси синфазности. Это четкое свидетельство того, что крутые оси синфазности представляют собой вступления сейсмических волн с двойными отражениями, одно из которых происходит от пологозалегающей кровли отложений balder и/или горизонтов мела, а другое отражение происходит от крутых краевых частей солевого тела (или

Обработка данных

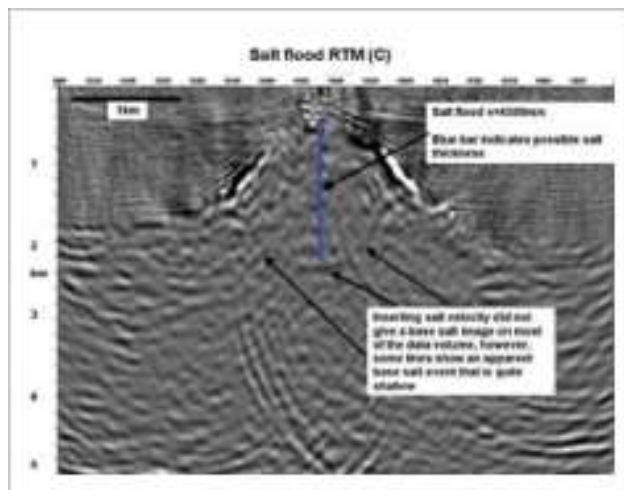


Рис. 12а. Результат работы метода RTM с использованием модели отложений, включающей соль, для профиля С.

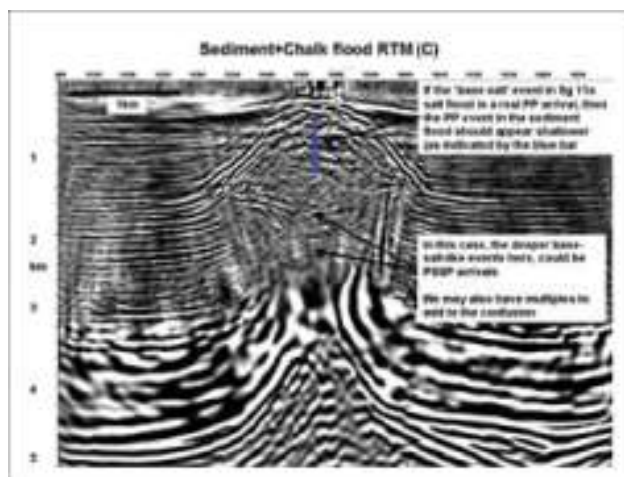


Рис. 12b. Результат работы метода RTM с использованием модели отложений 'осадочные + меловые отложения' для профиля С. Ось синфазности на а), которая могла бы быть вступлением волны РР от основания соли, должна появиться приблизительно на середине мощности соли на разрезе б), сделанном по модели 'осадочные + меловые отложения'. Синяя полоса отображает интерпретируемую мощность соли на а), и соответствующую предсказанную мощность соли для б).

осадочной породы).

Такие модели отложений помогают выделять крутые оси синфазности, порожденные лучами с траекториями, которые проходят только через осадочные породы (как показано на изображении трассировки лучей на рис. 5с). Для траекторий лучей, которые проходят через соль (согласно рис. 5а) мы нуждались бы в добавлении отложений соли в модель. Это было сделано; однако, для большей части профиля не удалось добиться ясной видимости основания соли. Это может свидетельствовать о том, что наша пикировка кровли соли не достаточно точная. Также известно,

что этот соляной купол имеет покрывающую породу ангидрит с переменной мощностью и с высокой скоростью (~6000 м/с). Это не было включено в модель, поскольку мы не смогли выделить эти горизонты: это также может внести свой вклад в недостаточно точное отображение основания соли. Мы знаем, что энергия волны, отраженной от основания соли, присутствует во входных данных, так как она видна на результате работы preSTM (рис. 4), и результате работы RTM с использованием модели сплошной осадочной породы. На рисунке 12а показан результат работы RTM для профиля С с использованием модели, включающей отложения соли, который демонстрирует возможное отражение от основания соли. Модель отложений соли включает солевые отложения всюду ниже средне Миоценового стратиграфического несогласия. На рис. 12b для сравнения показан результат работы RTM для профиля С с использованием модели отложений 'осадочные + меловые отложения'. Если отражение от 'основания соли' в модели, включающей соль, представляет собой энергию волн РР, то это отражение должно появиться приблизительно на середине её мощности на соответствующих результатах (заметьте, что, тогда как скорость в соли была 4500 м/с, скорость в осадочной породе в области соли была только 2000 м/с, а не половина скорости в соли).

Для реальных данных, полученных в случае сложнопостроенных солевых структур, мы часто наблюдаем энергию обменных волн (PSSP) на наших разрезах Р-волн. Эта энергия обычно претерпевает преобразование из Р в S на кровле соли, распространяется через соль как S волны, отражается от основания соли, и затем преобразовывается обратно в Р волну на кровле соли, и далее будет зарегистрирована сейсмоприемниками (рис. 5б). Интересно заметить, что мы даже можем наблюдать обменную энергию сейсмических колебаний при нулевом выносе, вследствие треугольной конфигурации некоторых солевых тел (Lafond, и др., 2003). В случае построения сейсмических разрезов упругих волн, такие вступления являются пагубным шумом, поскольку данные оси синфазности могут быть ошибочно приняты за отражения Р волн от основания соли. Для реальных данных, которые рассматриваются в данной статье, мы имеем различные отражения от основания соли, и некоторые из них могут обменными волнами (как видно на рис. 12b). Следовательно, важно распознать их, так как такие вступления могут легко спутать интерпретатора в процессе построения модели. Иногда мы можем использовать их, для выделения отражений от основания соли (Lewis, 2006).

Выводы

Сложные тела, типа соляных куполов, через которые проходит множество траекторий

Обработка данных

сейсмических лучей, не могут быть отображены с помощью традиционных односторонних пропагаторов. Существенное усовершенствование может быть достигнуто как при построении модели, так и при итоговой миграции данных, при использовании схемы миграции с двусторонним волновым уравнением.

Первый из названных пунктов возможно наиболее значителен: если мы не можем получить точную скоростную модель, то наша итоговая процедура построения сейсмического разреза не будет давать достоверное изображение.

Комбинация построения модели и миграции является ключом к успешному построению сейсмического разреза. Мы показали в этой работе, что итерационное приложение метода RTM может помочь выделить правильную конфигурацию соли, в то время как односторонний метод был не в состоянии сделать это.

Последовательное отображение солевого тела демонстрирует улучшенный вид крутых и опрокинутых краевых частей соли, наиболее вероятно освещенные волнами с двойным отражением. Погрешности в скорости и в параметрах анизотропии будут очень влиять на положения почти вертикальных осей синфазности, и таким образом несовпадения вертикальных границ краевых частей соли (или осадочной породы), замеченные в этом случае могли использоваться для обновления модели.

Благодарности

Мы хотим поблагодарить компанию BP за предоставление синтетических данных для солевых отложений сложного строения. Также выражаем свою благодарность Ivan Berranger, Debashish Sarkar, Brent Mecham и Mick Sugrue из GX Technology за помощь в подготовке примеров, и за полезное обсуждение данных. Хотим также выразить свою благодарность корпорации GX Technology за разрешение на публикацию результатов этого исследования.

Ссылки на литературу

Baysal, E., Kosloff, D. D., and Sherwood, J. W. C. [1983] Reverse time migration. *Geophysics*, 48, 1514-1524. Bednar, J.B., Yoon, K., Shin, C., and Lines, L. R. [2003] One Way vs Two Way Wave Equation Imaging - Is Two-Way Worth It?, *65th EAGE Meeting*, Expanded Abstracts, B11. Bernitsas, N., Sun, J., and Sicking, C. [1997] Prism waves - an explanation for curved seismic horizons below the edge of salt bodies. *59th EAGE Meeting*.

Billette, F.J., and S. Brandsberg-Dahl, 2005, The 2004 BP Velocity Benchmark. *67th EAGE Meeting*, Expanded Abstracts, B035

Cavalca, M., and Lailly, P. [2005] Prismatic reflections for the delineation of salt bodies. *75th SEG Annual International Meeting*.

Davison, I., Alsop, G.I., Evans, N.G., and Safaricz, M. [2000] Overburden deformation patterns and

mechanisms of salt diapir penetration in the Central Graben, North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 17, 601-618. Diet, J. P. & Lailly, P. [1984] Choice of scheme and parameters for optimal finite-difference migration in 2-D, *54th SEG Annual International Meeting*.

Farmer, P. [2006] Back to the future: New advances in reverse time migration provide sub-salt imaging solutions. *Hart's E&P*, May 2006

Jones, I.F., 1992, Comparative anatomy of 3D one-pass depth migration schemes. *62nd SEG Annual International Meeting*. Jones, I.F. and Lambare, G. [2003] Wave equation versus ray based imaging. *First Break*, 21, 2, 11-13. Jones, I.F., Sugrue, M. King, D., Goodwin, M., Berranger, I., Zhou, H., and Farmer, P. [2006] Application of reverse time migration to complex North Sea imaging, *PETEX Biennial Meeting*.

Jones, I.F., Bloor, R.I., Biondi, B., and Etgen J.T. [2006] Pre-stack depth migration and velocity model building. Series Editor: Michael A. Pelissier *SEG Geophysical Reprints*, in press Lafond, C., Jones, I.F., Bridson, M., Houllévigue, H., Kerdraon, Y., and Peliganga, J. [2003] Imaging Deep Water Salt Bodies in West Africa. *The Leading Edge*, 22, 9, 893-896. Lewis, J. [2006], The potential of mode-converted waves in salt interpretation. *SEG/EAGE summer Research Workshop, Utah*.

Mittet, R., 2006, *The behaviour of multiples in reverse time migration*. *68th EAGE Annual Meeting*. Pelissier, M.A., Hoeber, H., van de Coevering, N., and Jones, I.F. [2006] *Classics of Elastic Wave Theory*. Series Editor: Daniel A. Ebborn. *SEG Geophysical Reprints*, in press Shan, G., and B. Biondi [2004] *Imaging overturned waves by plane wave migration in tilted co-ordinates*. *74th SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts*, 969-972. Thomson, K., 2004, *Overburden deformation associated with halokinesis in the Southern North Sea: implications for the origin of the Silverpit Crater*. *Vis Geosci*, 9, 1-9. Whitmore, N. D., 1983, *Iterative depth migration by backward time propagation*. *53rd SEG Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*, S10.1. Yoon, K., Shin, C., Suh, S., Lines, L. R., and Hong, S., 2003, *3D reverse-time migration using the acoustic wave equation: An experience with the SEG/EAGE data set*. *The Leading Edge*, 22, 1, 38-41

Zhou, H., Zhang, G., and Bloor, R. [2006] *Anisotropic Acoustic Wave Equation for VTI Media*, *68th EAGE Meeting*. Zhang, Y., Sheng, X., and Zhang, G. [2006] *Imaging complex salt bodies with turning-wave one-way wave equation*. *SEG/EAGE summer research workshop, Utah*.