

## Управляемая лучевая миграция: гибкий инструмент для структурных построений. Controlled beam migration: a versatile structural imaging tool

Vetle Vinje,<sup>1</sup> Graham Roberts<sup>2</sup> и Roger Taylor<sup>2</sup> обсуждают усовершенствование метода миграции гауссова пучка (пучок с интенсивностью, распределённой по закону Гаусса) для построения глубинного изображения в сложных геологических условиях, подтвержденное рядом конкретных примеров.

Досуммированная глубинная миграция гауссова пучка была описана Hill в его статье 2001 г. Она вышла в интересное для сейсмической разведки время, когда разведка и разработка начала концентрироваться на более сложных нефтегазовых комплексах пород в таких областях, как Северное море и Мексиканский залив. Одна из проблем, связанных с этим, была поиск приемлемого метода построения изображения по вступлению кратных волн, чтобы обеспечить построение достоверных изображений в сложных скоростных режимах, которые часто содержат в себе солевые тела.

В этом контексте алгоритмы Кирхгоффа по однократным вступлениям охватили предел сложности скоростной модели, соответствующей им, приведя к построению неполных изображений и обычным миграционным помехам ('улыбкам'). Были разработаны алгоритмы Кирхгоффа по кратным вступлениям волн, но стоимость времени прогона нескольких объединенных вступлений и связанных с ними поверхностей времен пробега в миграции сделали эти алгоритмы непривлекательной процедурой. Также существовала проблема, как управлять распределением амплитуд при этих кратных вступлениях. Алгоритм Кирхгоффа для кратных вступлений столкнулся с широким введением методов однонаправленной экстраполяции волнового поля (WEM или миграция волнового уравнения), которые, кажется, могут разрешить многоканальные задачи дня. Однако, они слишком дорогие в связи с существующей вычислительной мощностью и лишены множества притягательных особенностей метода миграции Кирхгоффа, таких как изображение наклонного падения и включение анизотропии, ТП (иллюстрация тактической цели) в частности.

Миграция гауссова пучка представила благоприятную возможность добиться эффективного многоканального изображения и сохраняет преимущества метода миграции Кирхгоффа, которых лишены алгоритмы WEM. Компания CGGVeritas внедрила метод лучевой миграции (Gray et al., 2002) и широко использовала его как способ построения изображения для областей сложного строения (Notfors et al., 2006; Sun et al., 2007; Roberts et al., 2008). Недавнее дальнейшее развитие метода привело к усиленной версии, известной как метод управляемой лучевой миграции (CBM), гибкому и важному

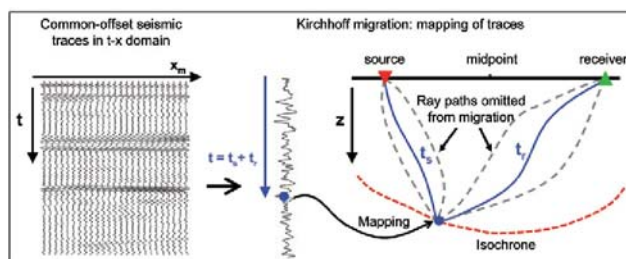


Рис. 1 Схематическое изображение основного механизма миграции Кирхгоффа. Временной импульс по трассе элементарного смещения отображается по всем глубинным координатам вдоль изохроны, где сумма времен пробега по траекториям лучей источника и приемника ( $t_s + t_r$ ) равна времени  $t$  импульса.

дополнению к комплексу построения глубинного изображения. Мы продемонстрируем преимущества метода CBM с отбором примеров по всему миру, диапазон которых от переобработанных старых данных до построения сложной скоростной модели PSDM и построения изображения самых последних массивов широкоазимутальных данных.

### Основы лучевой миграции

Hill (2001) дает описание теории и применения досуммированной глубинной миграции гауссова пучка лучей. Метод основан на пучках лучей, созданных на основании траекторий, которые обеспечивают кинематические и амплитудные показатели миграции. Методология разработана для данных одинаковых смещений и одинаковых азимутов, а сама миграция выполняется в области параметрической траектории. В результате она хорошо удовлетворяет требованиям, необходимым для применения к традиционному узко азимутальному сейсмическому массиву данных. Поскольку он является методом трассирования луча, подобно методу Кирхгоффа он сохраняет много особенностей этого метода, таких как построение изображения наклонного падения и целесообразное включение анизотропии ТП. Это делает его привлекательной задачей для областей, таких как Мексиканский залив и Северное море, где солевые тела создают волны наклонного падения и многоканальные вступления.

Полезно сопоставить основные принципы метода Кирхгоффа и метода лучевой миграции. Главная способность метода миграции Кирхгоффа состоит в отображении полученного временного импульса по всем координатам вдоль изохроны, где сумма траекторий лучей источника и приемника равна времени отображенного импульса. Это схематично приведено на рис. 1. Этот процесс повторяется для всех импульсов каждой полученной трассы, а амплитуды суммируются на их глубинных координатах. Для каждой глубинной координаты и пары источник-приемник амплитуды отображаются по траектории луча только одной комбинации источник-приемник. Другими возможными

<sup>1</sup> CGGVeritas Norge.

<sup>2</sup> CGGVeritas UK.

\*Corresponding author: vetle.vinje@cggveritas.com.

## Обработка данных

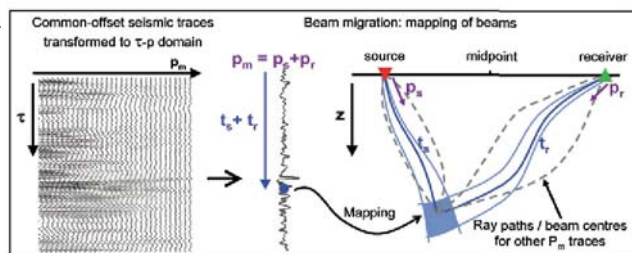


Рис. 2 Схематичное изображение основного механизма лучевой миграции. Выполнено локальное преобразование  $\tau$ - $p$ , и импульс по трассе  $p_m$  отображен в положении на глубине, соответствующей сумме времен пробега траекторий лучей источника и приемника ( $t_s + t_r$ ) при условии  $p_m = p_s + p_r$ . Волновое поле рассчитано вблизи траектории лучей для формирования пучков.

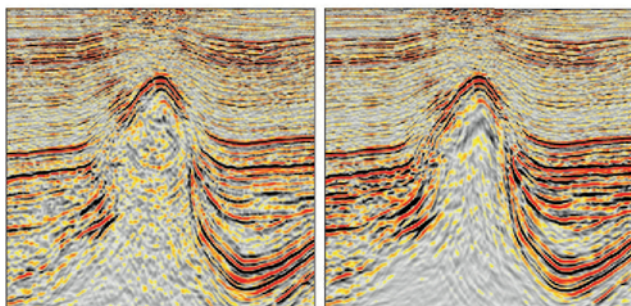


Рис. 3 Сопоставление изображений по методу Кирхгоффа (слева) и лучевому методу PSDM (справа) солевого диапира в Центральном грабене Северного моря. Лучевая миграция обеспечивает чистое изображение солевых флангов и осадков в окрестности солевого тела. Изображение Кирхгоффа загрязнено искажениями миграции, созданными на границах солевого тела, которые интерферируют с погружающимися осадками.

вступлениями, обусловленными многолучевостью сейсмической энергии, просто пренебрегают.

Лучевая миграция отображает локальные наклонные суммарные разрезы. Основной принцип схематически приведен на рис. 2. По полученным трассам общих смещений/общих азимутов преобразовывается локальное конусообразное в пространстве окно данных в  $\tau$ - $p$  область. Трансформация (преобразование) отображает данные из области срединной точки,  $x_m$ , в срединную область параметрической траектории  $p_m$ . Концептуально отображенные данные проще всего проявляются в показателях траекторий лучей. Траектория луча, связанная с источником, имеет параметр траектории  $p_s$ , а траектория, связанная с приемником, имеет параметр  $p_r$ . Можно показать, что взаимосвязь между параметрами траекторий источника и приемника  $p_m = p_s + p_r$ . Следовательно, трасса  $p_m$  может быть описана парой траекторий луча источника и луча приемника, подобных изображенным на рис. 2. В

процессе миграции амплитуды на трассе  $p_m$  отображаются в глубинных координатах, где параметры траекторий лучей источника и приемника удовлетворяют уравнению  $p_m = p_s + p_r$ , и где соответствующее время на трассе  $p_m$  равно общему времени пробега лучей источника и приемника.

Практически используются скорее лучи, чем траектории. Лучи здесь рассматриваются как «плотные пучки», находящиеся в пространстве поля времен пробега второго порядка в окрестности траектории. В основном трассы  $p_m$  определяют траектории лучей, поэтому лучевая миграция эффективно перемещает непосредственно траектории лучей и, следовательно, способна отражать многократные вступления. Другими словами, если теоретически мы имеем возможность отобразить все возможные траектории лучей, то мы сможем переместить все возможные вступления. Это находится в противоречии с методом миграции Кирхгоффа, который использует только траектории лучей, чтобы воспроизвести времена пробега. Последние разработки метода лучевой миграции CGGVeritas, которые расширили ее возможности как задачи построения структурного изображения, свелись к методу CBM. Метод разделяет те же самые основные принципы, что и метод лучевой миграции, и сам по себе может рассматриваться как «полная» миграция, которая не требует априорной структурной информации иной, чем скоростная миграционная модель. Основные преимущества метода CBM, сопоставленного с методом лучевой миграции, заключаются в улучшении изображения отношения сигнала к помехе и улучшении изображения наклонного падения, которые оба являются особенно важными при построении изображения сложной структуры.

### Применение лучевой и управляемой лучевой миграции

Одним из преимуществ метода лучевой миграции является его удобство. Он полностью совместим с хорошо обоснованной последовательностью процессов обработки узко азимутальных общих смещений и совсем недавней последовательностью процессов обработки широко азимутального вектора общего смещения, используемыми для метода миграции Кирхгоффа. Это означает, что метод легко может быть включен в существующие программы PSDM в качестве конечного продукта миграции и использован для создания мигрированных сейсмограмм для скоростного анализа.

Как ранее упоминалось, существует несколько особенностей метода лучевой миграции, которые делают его эффективным способом построения структурного изображения. Многоканальность позволяет ему построить когерентные изображения при наличии сложной скоростной структуры, которые часто сильно загрязнены миграционными искажениями на изображениях Кирхгоффа. Траекторная/лучевая основа метода означает, что он может создавать изображение наклонных и опрокинутых структур, и что VTI и TTI анизотропии относительно легко согласовать. Это дополняется хорошо известной способностью метода Кирхгоффа эффективно выдавать



## Обработка данных

ориентированный на объект выход (т.е. тестировать профили и сейсмограммы), который может быть использован для быстрого обоснования сложных моделей. Построение в сложных условиях скоростной модели по программам PSDM может включать многократные итерации улучшения модели и миграции, особенно в случаях, которые включают солевые тела или анизотропию. Это может занимать месяцы работы, большей частью которой может быть интерпретационная выборка геометрии солевого тела или целевых горизонтов для привязки к скважине. Предполагая целесообразную многократную миграцию, которая является более быстрой, чем методы WEM, и которая естественно создает общее изображение сейсмограмм, метод лучевой миграции может играть роль в уменьшении проектной продолжительности цикла. В частности существенный вклад может внести метод CBM. Его способность усилить плотность сигнала и создавать изображение наклонного падения обеспечивает «чистое» изображение, которое облегчает структурную интерпретацию, потенциально расширяя ее до различных интерпретационных стадий программы PSDM. Эти преимущества также имеют место для мигрированных сейсмограмм, которые являются соответственно «чистыми» и лучше определены отражениями. Это приводит к более высокому качеству остаточной информации о разности времен вступления для использования в скоростной томографии, что в свою очередь, ведет к более высокому качеству конечной скоростной модели и, в конечном счете, конечному изображению высшего качества.

#### Рассмотрение конкретных случаев

Метод лучевой миграции широко применяется во всем мире компанией CGGVeritas и использует различные его преимущества.

##### Пример 1: Структурное изображение солевых диапиров

Первый пример взят по Центральному грабену Северного моря и демонстрирует улучшенное изображение в присутствии больших скоростных контрастов, где, вероятно имеет место многоканальность. Рис. 3 показывает участок вдоль профиля через солевой диапир после миграции, использующей конечную скоростную модель. Изображение по методу Кирхгоффа загрязнено миграционными искажениями, связанными с отсутствием непрерывности траекторий (и, следовательно, поверхностей времен пробега) на границах соли. 'Усы' миграции Кирхгоффа интерферируют с волнами наклонного погружения на сторонах солевого тела, приводя к плохому изображению.

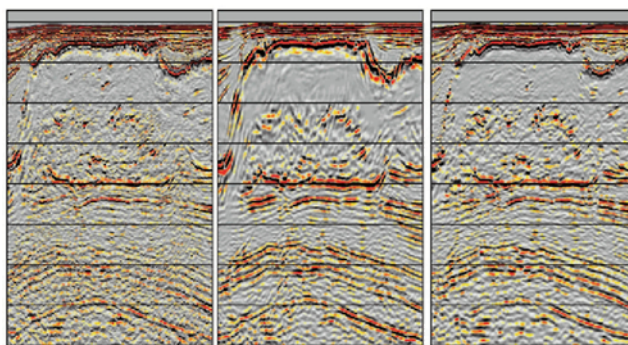
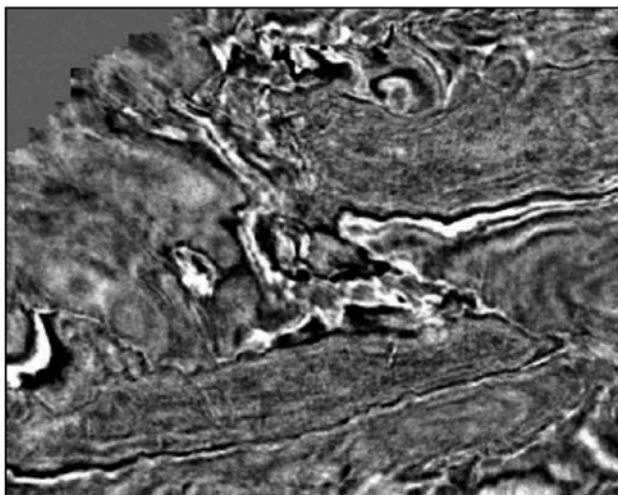


Рис. 4 Сопоставление PSDM изображений Кирхгоффа (слева), CBM (в центре) и WEM (справа) на стадии миграции модели соли Мексиканского залива. Изображение CBM обеспечивает результаты, сопоставимые с WEM, для построения изображения основания соли и подсолевых отложений.

При сопоставлении метод лучевой миграции, который объединяет многократные вступления, сглаживает по однократным вступлениям разрывы траекторий лучей, чтобы обеспечить изображение, относительно свободное от искажений. В результате получаем улучшенное изображение наклонного падения осадков на флангах солевого тела.

##### Пример 2: Построение скоростной модели с плоской поверхностью соли

Подсолевая разведка в Мексиканском заливе преследовала цель разработать алгоритмы PSDM и последовательность действий. Процесс построения скоростной модели в этом случае очень длительный, требующий нескольких итераций для построения точной модели соли, а затем усовершенствования поля скоростей подсолевых осадков. Рис. 4 приводит пример применения метода CBM для выполнения миграции солевой модели. В этом смысле интерпретация солевого тела завершена и начинается исправление скорости подсолевых осадков. Метод миграции Кирхгоффа для одиночного вступления не способен обеспечить чистое изображение досолевых осадков из-за сложных перекрывающихся пород. Односторонний метод WEM с его более строгой обработкой сложного распространения волнового поля через соль способен создать чистое изображение осадков. Метод CBM работает здесь очень хорошо и создает сопоставимый, или даже лучший результат с очень хорошо определенным основанием соли и подсолевыми осадками. Важным здесь является то, что будет лучшее качество изображения и сейсмограмм после миграции (в отношении когерентных волн и плотности сигнала), более

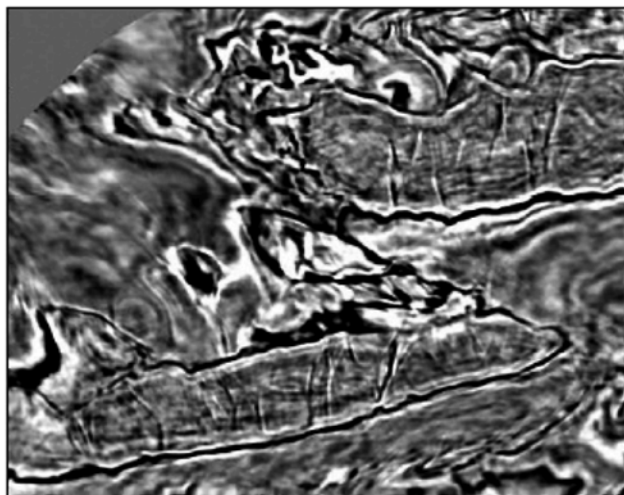


Рис. 5 Сопоставление PSDM глубинных срезов Кирхгоффа (слева) и CBM (справа) по кровле резервуара нарушенного фундамента. Фундамент сильно нарушен и имеет сложную топографию. Метод Кирхгоффа PSDM старается разрешить (сделать более четким) изображение внутренних нарушений, в то время как CBM обеспечивает чистое изображение границы фундамента и наклонно погружающихся разломов (зон трещиноватости).

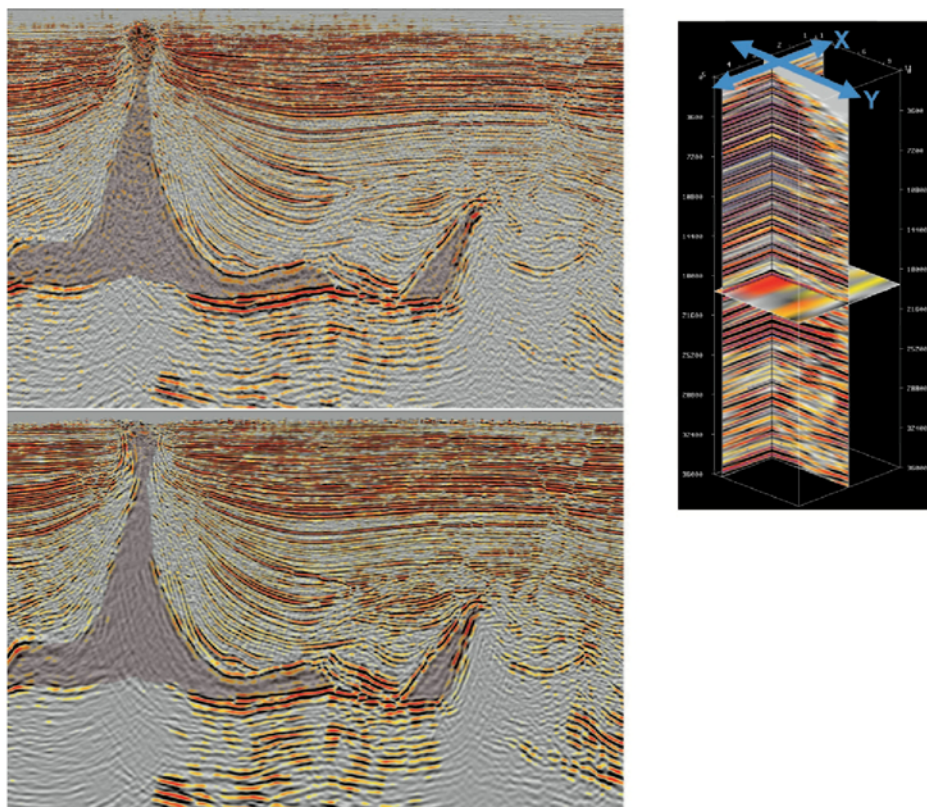


Рис. 6 Сопоставление изображенных широко азимутальных данных с областью вектора общего смещения Кирхгоффа (слева) и CBM (справа) PSDM. Данные по съемке прибрежной акватории США над солевым диапиром. Также показана сейсмограмма трехмерного изображения CBM COV, использованная при построении скоростной модели с широко азимутальной томографией. Изображение CBM обеспечивает улучшенное изображение более сложных осадочных структур вблизи правой стороны соляного тела и показывает более высокое содержание сигнала. Кроме широко азимутальной геометрии существует освещенная пустота под диапиром.

эффективное обновление скорости, которое приведет к лучшим конечным результатам PSDM, как было ранее описано.

#### Пример 3: Структурное изображение нарушенного фундамента

Этот необычный пример взят по оффшорной области Вьетнама, где нарушенный гранитный фундамент образует резервуар. Продуктивными зонами в фундаменте являются основные наклонные разломы, которые сопровождаются трещиноватостью и пористостью растворения. Данные были первоначально обработаны методом Кирхгоффа PSDM, который установил несколько потенциальных объектов для бурения. Массив данных позже был переобработан по методу CBM, и рис. 5 приводит сопоставление результатов. Сочетание многоканальности, улучшенного наклонного падения и улучшенного отношения сигнала к помехе, обеспеченных методом CBM, оказало огромное влияние на результативное изображение. Контакт фундамент-осадки и внутренние разломы четко проявлены на вертикальных разрезах и на глубинных срезах (как показано), позволяя более эффективное установление объектов под бурение.

#### Пример 4: Построение широко азимутального изображения прибрежной зоны

Регулярно в прибрежной зоне приобретаются широко азимутальные массивы данных, и разработан рабочий процесс для учета азимутального содержания. Традиционный метод узкодиапазонного элементарного смещения расширен до области вектора смещения (COV), чтобы учесть азимут смещения. Рис. 6 приводит сопоставление изображений по методам Кирхгоффа и CBM по рабочему процессу COV для широко азимутальной наземной съемки над солевым диапиром в США. Результат метода CBM показывает дополнительное поднятие по

сравнению с результатом по методу Кирхгоффа, уменьшение шума и обеспечение лучшего изображения более сложных осадочных структур на правой стороне тела. Однако, кроме широко азимутальной геометрии здесь присутствует ярко выраженная пустота под центром диапира.

Также рис. 6 приводит сейсмограмму трехмерного изображения по методу CBM COV. Сейсмограмма содержит смещения в направлении вдоль и поперек профиля, что означает, что скоростной анализ и выборка остаточного смещения по времени теперь являются трехмерными задачами. По-прежнему метод CBM может способствовать автоматической выборке этих волн (теперь поверхностей в 3D сейсмограмме) улучшением плотности сигнала. Это обеспечивает лучшее качество информации по остаточному смещению для широко азимутальной томографии и приводит к усовершенствованной конечной скоростной модели.

#### Пример 5: Построение изображения слабоизогнутых морских данных

Массивы данных наземной съемки, а также существующие в действительности помехи могут иметь правильную геометрию и быть слабоизогнутыми, что будет усиливать шум при построении изображения. Хотя интерполированные/регуляризованные данные могут уменьшить пробелы в покрытии и улучшить однородность видов смещений, существует предел, который может быть получен особенно при более длинных смещениях, где пробелы в покрытии самые выраженные.

Рис. 7 приводит данные по старой наземной съемке над солевой структурой в северо-западной Европе, которые явились предметом последней программы переобработки.



## Обработка данных

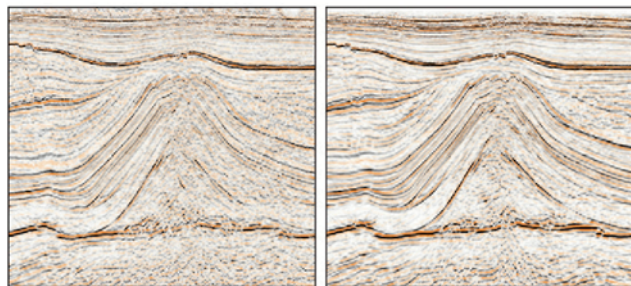


Рис. 7 Сопоставление слабо изогнутых наземных данных, полученных по солевой структуре в северо-западной Европе, изображенных по Кирхгоффу (слева) и CBM PSDM (справа). Изображение Кирхгоффа зашумлено из-за слабо изогнутого и рассеянного покрытия средне-дальних смещений, в то время как изображение CBM имеет преимущество на основании улучшенного отношения сигнала к шуму. Основание соли и целевых подсолевых горизонтов изображены намного чище по CBM.

Изогнутость данных низкая и переменная, а покрытие для средних-до длинных смещений редкое. Миграция по методу Кирхгоффа зашумлена во всех отношениях и не способна обеспечить когерентное изображение под солью, как предполагалось. Построение изображения методом CBM имеет преимущества из-за заметного улучшения содержания сигнала, который воспроизводит четкие структурные детали, такие как нарушения. Самое главное, он дает более четкое когерентное изображение основания соли и диапазона подсолевого резервуара.

## Выводы

Хотя метод лучевой миграции стартовал как область применения для построения изображения, чтобы заполнить пробелы между методом Кирхгоффа и методом одностороннего WEM, в настоящее время он по праву является общепризнанным как эффективный и универсальный самостоятельный инструмент построения изображения. Это продемонстрировано рядом приложений и географическим распространением представленных здесь примеров.

Мы предполагаем, что метод лучевой миграции останется важной частью инструментария построения изображения в будущем. Хотя задачи построения

изображения наклонного падения решены с введением методов двойного времени WEM (Reverse Time Migration – обратной временной миграции), он еще чрезвычайно дорог, чтобы использовать его для построения скоростной TTI модели. Это оставляет метод лучевой миграции в качестве единственного целесообразного действенного многоканального метода, который может выполнить обе эти функции. Независимо от того, как долго существует преимущество, остается факт, что метод лучевой миграции является целесообразным, эффективным и хорошо приспособляется к общепринятому рабочему процессу для узко- и широко азимутальных массивов данных. В частности, «расширенный» метод лучевой миграции, такой как CBM, может улучшить изображения для данных с плохим содержанием сигнала.

## Благодарности

Мы благодарим EMPG за разрешение использовать пример по северо-западной Европе и библиотеку данных компании CGGVeritas за разрешение использовать примеры по США и Северному морю.

Мы выражаем благодарность Carl Notfors, Sam Gray, Daoliu Wang, J.D. Liang, и Chu-Onng Ting за их большую поддержку в выполнении лучевой миграции совершенствовании управляемой лучевой миграции. Благодарим John Chen, Yan Huang, Beng Ong, Chu-Onng Ting, Jason Sun, Pierre Mitouard и Chris Purcell за работу над примерами; а также Gareth Williams, Peter Whiting и Richard Leggott за их обзоры и дискуссии по теме.

## Литература

- Gray, S., Notfors, C. and Bleistein, N. [2002] Imaging Using Multi-Arrivals: Gaussian Beams or Multi-Arrival Kirchhoff? *SEG 72<sup>nd</sup> International Meeting*, Expanded Abstracts, 21, 1, 1117-1120.
- Hill, N. R. [2001] Prestack Gaussian beam depth migration. *Geophysics*, 66, 1240-1250.
- Notfors, C., Xie, Y. and Gray, S. [2006] Gaussian beam migration: a viable alternative to Kirchhoff. *EAGE 65<sup>th</sup> Conference & Exhibition*, Extended Abstracts, G046.
- Roberts, G., Leggott, R., Wombell, R. and Williams, G. [2008] Beam migration in the North Sea. *Norwegian Petroleum Society Biennial Geophysical Seminar*, Kristiansand.
- Sun, J., Don, P., Sun, J., Tang, Q., Bone, G. and Giang, N. T. [2007] Imaging of fractures and faults inside granite basement using controlled beam migration. *ASEG 19<sup>th</sup> International Geophysical Conference & Exhibition*.