

## Предварительная обработка в условиях глубоководья: Восточное побережье Индии

Phil Smith,<sup>1</sup> Ian F. Jones,<sup>1</sup> Dave King,<sup>1</sup> Pranaya Sangvai,<sup>2</sup> Ajoy Biswal<sup>2</sup> и Mohit Mathur<sup>2</sup> обсуждают проблемы обработки сейсмических данных в сложных условиях, фокусируясь на значимости предварительной обработки а также моделирования скорости и стратегий глубинных построений, которые включены в процесс.

Переход от шельфа к условиям глубоководья приносит несколько специфичных задач геофизику-обработчику. Боковые кратные отражения затрудняют построение изображения более глубинного разреза, тогда как придонные аккумуляции газ-гидрата и аномальные скорости заполнения канала вызывают искажения в изображениях, если эти мгновенные характеристики скорости не корректно включаются в скоростную модель для глубинной миграции (временные изображения являются недостаточным решением в этих случаях).

Построение скоростной модели разреза с достаточной достоверностью и разрешением, для преодоления данных проблем, по большому объему данных, требует комбинации автоматического пикирования и детального ручного режима для некоторых осей синфазности. Однако для того, чтобы автопикирование работало надежно, нам прежде всего требуется получить четкие сейсмограммы предобработки, свободные от эффектов сложных рассеянных 3D кратных. Как следствие, самым лучшим вариантом при построении изображений является непреклонная связь с оптимальной предобработкой (концепция 'первенства изображения').

В данной работе, мы описываем наш подход к решению этих проблем, концентрируя наше внимание на предобработке, особенно, подавлении кратных и рассеянного шума. Мы также затрагиваем вопрос построения итеративной модели скорости и глубинных построений в рамках данного проекта (описано в Fruehn et al., 2008).

### Подавление кратных

Широко принято, что 'отвесные' кратные лучше подавляются при помощи методик подавления кратных, связанных с поверхностью (SRME) (Verschuur, et al., 1992). Предсказывающая деконволюция (Peacock and Trietel, 1969), параболическое преобразование Радона (Hampson 1986; Sacchi and

Ulrych, 1995) и тау-пи деконволюция (Yilmaz, 1987) не в состоянии адекватно подавить кратную от дна. Однако, тау-пи деконволюция часто является наиболее эффективной для подавления неполнократных волн на мелководье (Stewart, 2004; Stewart et al., 2007).

Традиционно, методы на основе разности скоростей, такие как параболическое преобразование Радона, использовались на глубоководье. Эти методы не работают на близких удалениях, где локально существуют малые разницы приращения времени между однократными и кратными. Эта проблема становится более серьезной, если имеются падения, там, где кратнообразующие границы становятся более сложными. В дополнение, аляйсинг кратных на дальних удалениях может привести к неадекватному разделению однократных и кратных волн в пространственном преобразовании. Это требует дополнительных этапов де-аляйсинга или преобразования, которое способно иметь дело с данными, имеющими аляйсинг. Альтернативным подходом к интерполяции в целях де-аляйсинга является выполнение преобразования Радона в маленьких перекрывающихся окнах в пределах ОСТ (подход 'пучка' Радона). В пределах каждого небольшого под-окна в сейсмограмме ОСТ, данные кажутся менее осложненными зеркальными частотами, поскольку мы не пытаемся разложить всю (параболическую) траекторию за один шаг.

Недавно, методика SRME стала популярной на глубоководье. В частности, кратные на близких удалениях, лучше подавляются с помощью SRME, чем при помощи параболического преобразования Радона. Объединение в каскад 2D SRME и Радона становится стандартным подходом для индустрии. Однако, сложность генерирования кратных и внеплоскостные эффекты могут существенно ограничить эту чисто 2D комбинацию. Методики, основанные на Радоне, могут не сработать для сложных кратных,

поскольку выпуклые оси синфазности в области ОСТ не попадают на нулевое удаление для траектории лучей, которые не лежат в плоскости оси источник-приемник. В этих случаях, должен применяться альтернативный метод.

Недавно, эти каскадные аппроксимации 2D были заменены 3D SRME, который более корректный с теоретической точки зрения. 3D SRME моделирует истинные траектории лучей 3D, связанные с отражением на свободной границе и погруженными рассеивающими объектами, а также с сложными участками поля кратных волн, которые получаются в результате топографии кратнообразующей границы.

Можно показать, что 2D SRME предсказывает времена прихода, которые оказываются слишком большими для рассеивающих объектов вне плоскости. Когда падение по кросслайну превышает 10°, предсказание 2D будет слишком далеко сдвинуто относительно реального времени прихода для адаптивного вычитания с целью избавления от ошибки. На рисунке 1 (представляем здесь по работе Stewart et al., 2007), мы показываем результаты моделирования синтетики для дальних удалений с одной однократной и кратной волной, для падения по инлайну 15° и падения по кросслайну 20°, и соответствующего положения кратной предсказанной 2D SRME. 3D SRME предсказание дает корректные времена прихода кратных.

Несмотря на вопросы, относящиеся к регистрации и дискретизации, 3D SRME оказалась мощным новым аппаратом в арсенале методик подавления кратных, и была особенно успешна для нерегулярностей, связанных с изломом шельфа на акватории восточного побережья Индии, в приложении к глубинным подсолевым породам Мексиканского залива и Анголы, для смятых кратных от дна в водах Норвегии.

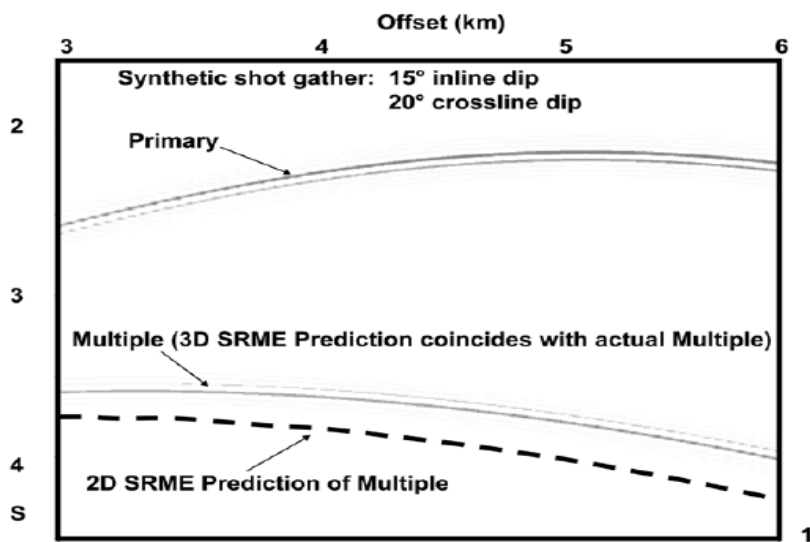
<sup>1</sup> ION GX Technology.

<sup>2</sup> Reliance Industries.

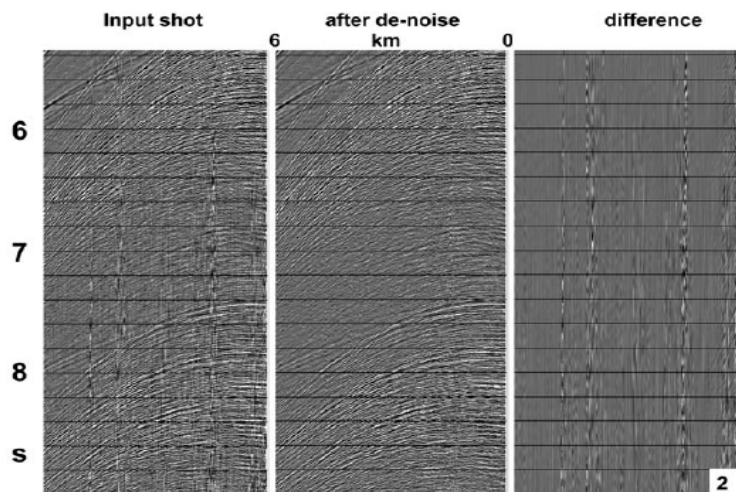
<sup>\*</sup> Автор для корреспонденции: [ian.jones@iongeo.com](mailto:ian.jones@iongeo.com).

## Данные

Данный проект имеет дело с первоначальной обработкой частей преимущественно с глубоководьем (>1.5 км), площадь съемки порядка 2100 км<sup>2</sup>. В рамках проекта требовалась 'быстрая' доставка частей данных (Sangvai, et al., 2008). Хотя вся область обрабатывалась в 3D SRME, 2D и 3D SRME и 3D preSDM со всеми данными препроцессинга.



**Рисунок 1** Синтетическая сейсмограмма ОПВ, полученная после моделирования лучевым методом 3D используя модель с падением по инлайну и кросслайну, показаны однократная и кратная волны, и предсказанное положение кратной волны из 2D SRME. Предсказанное положение кратной по 3D SRME совпадает с реальным положением кратной волны.



**Рисунок 2** Образец шумной сейсмограммы, до и после подавления шума, создаваемого зыбью и линейного (вызванного кабелем) шума, и график разности (QC).

Эти два куба формируют основу для сравнения, которое проводится в данной статье.

Прежде всего, данные подвергались процедуре подавления выбросов, шумов ряби, и линейного шума. После чего применялось, SRME, за которой следовало высокоразрешенное параболическое преобразование Радона с подавлением зеркальных частот, подавление кратных волн со смещенной вершиной (ASMA), FX деконволюция, и фильтрация с высокочастотной границей пропускания (100 Гц для мелководья, 65 Гц на глубине). Последние этапы выполнялись для подавления кратных, не относящихся к поверхности, остаточного шума, и зеркального остаточного шума, который не был смоделирован в SRME. Этот зеркальный шум можно ослабить напрямую, используя 3D SRME, но это требует интерполяции до более плотного интервала между трассами, что нельзя назвать экономически выгодным подходом, при том, что остаточный зеркальный шум можно эффективно ослабить с помощью методики Радона.

На Рисунок 2 приведена шумная запись до и после подавления шума, вызываемого зыбью и линейного шума (от кабеля), и график разности для QC. Удаление такого шума регистрации и выбросов, делает данные пригодными к выполнению разнообразных преобразований 2D. Без адекватной обработки с подавлением шум, последующие 2D преобразования будут распространять шум по сейсмограмме, безнадежно ее засоряя.

На Рисунок 3 мы демонстрируем последовательность использованных методов подавления кратных. На Рисунок 3а показана сейсмограмма 2D SRME QC, на которой показано местоположение выбранного ОСТ; 3b демонстрирует сейсмограммы после подавления шума (после NMO); а 3с - 3f демонстрируют сейсмограммы после каскадного применения 2D SRME, преобразования Radon, ASMA, и полосового фильтра. Конечный продукт всех этих этапов подается на вход в 3D preSDM и позже в модуль автопикировки скоростей.

На Рисунок 4, мы демонстрируем данные после NMO, отсортированные по выборкам ОСТ после применения методики SRME (примененной к сейсмограммам ОПВ). Мы сравниваем данные после подавления шума (4а) с результатами 2D SRME (4б) и 3D SRME (4с). Сложные лучевые траектории для



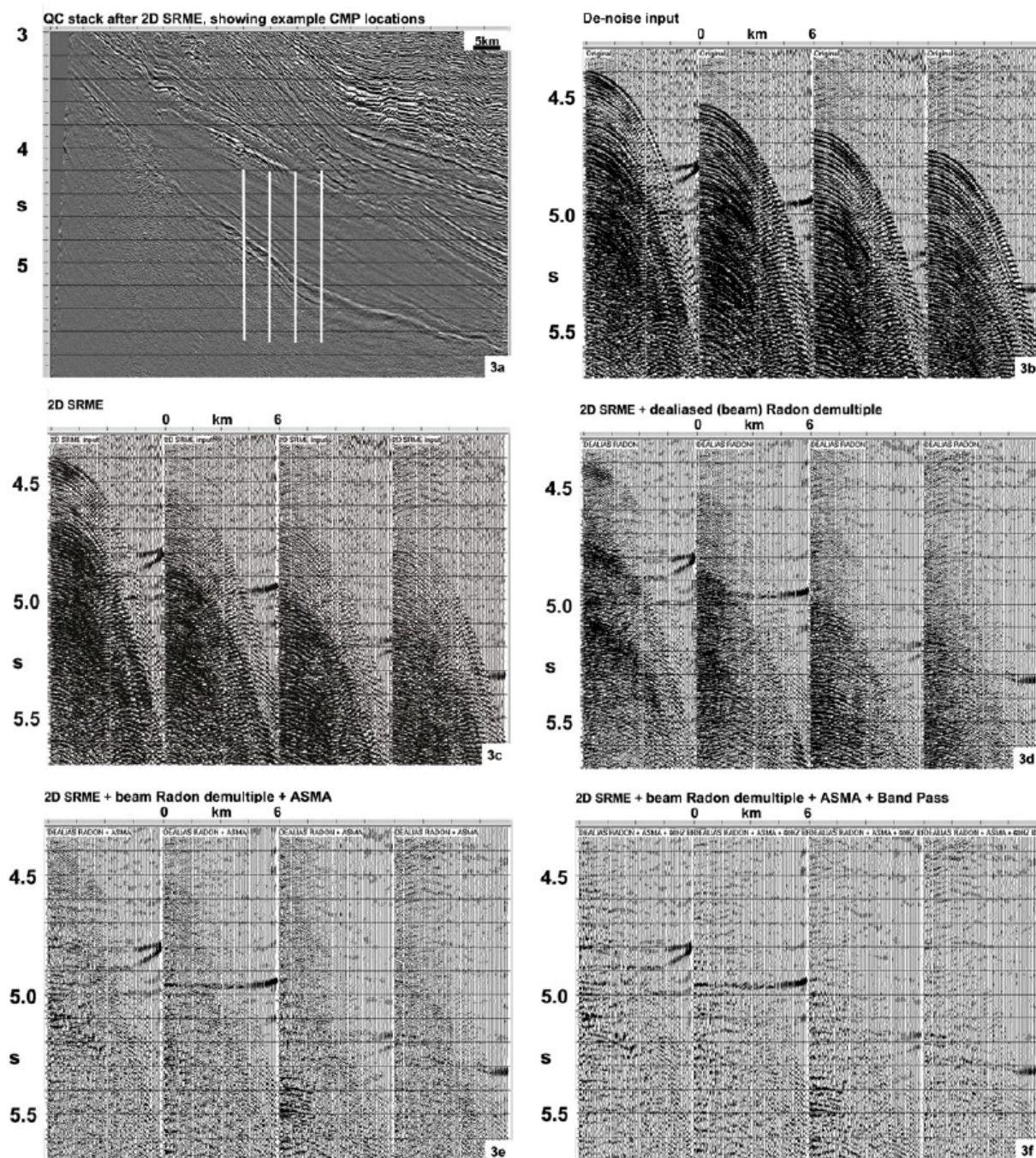
первой кратной от дна и соответствующих осадков, дают сдвиг максимума в поведении приращения времени, что можно видеть в области ОСТ. Вслед за 2D или 3D SRME, можно применить дополнительные методы ослабления шума (как показано

на рисунке 3f) для того, чтобы разобраться с зеркальным шумом, другим типом шума и кратными, не связанными с поверхностью. Мы также приводим результат применения этой пост-обработки а также применения FX деконволюции

к результатам 2D SRME (4d) и 3D SRME (4f).

На Рисунке 5, мы демонстрируем сравнение QC разреза по кросслайну (до выполнения 3D preSDM)

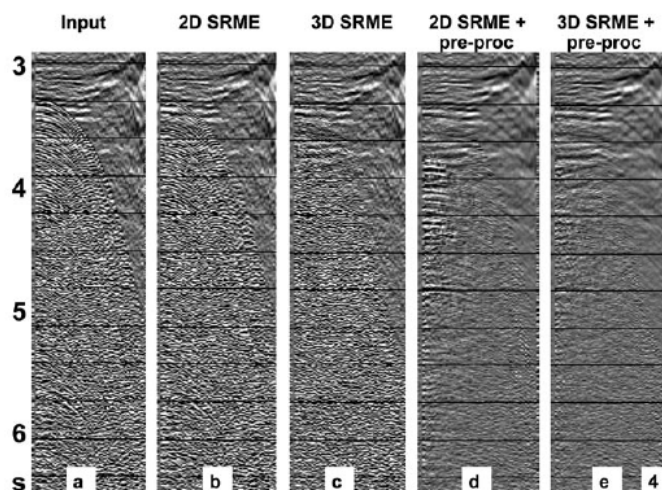
На Рисунке 5а дается пример 2D SRME, где мы видим полосовой



**Рисунок 3** Последовательность используемых методик подавления кратных. 3а демонстрирует 2D SRME QC разрез, на котором показано положение сейсмограмм ОСТ; 3б демонстрирует сейсмограммы после подавления шума (после NMO), 3с - 3ф демонстрируют сейсмограммы после использования каскада процедур 2D SRME, Радона, ASMA, и полосовой фильтрации.



шум, который присутствует в 3D SRME. На Рисунке 6с показан



**Рисунок 4** Сейсмограммы OCT с NMO  $2^{020}$  порядка. а) Входные; б) После применения 2D SRME; в) После применения 3D SRME, д) 2D SRME + пост-процессинг; е) 3D SRME + пост-процессинг.

области, представляющей интерес (крупное несогласие вблизи отметки 4.4с). Эта остаточная ось кратной волны будет распространяться при выполнении миграции и ее будет трудно подавить на этой стадии. Наоборот, после 3D SRME (5b), разрез практически свободен от кратных этого типа. Как часть теста QC, было выполнено preSTM на результатах 2D SRME и 3D SRME, при использовании одинаковой скоростной модели. На Рисунке 6а мы видим preSTM для инлайна на данных после 2D SRME, а на 6б показан результат после

разностный разрез, который представлен в том же масштабе амплитуд, что и другие два разреза. Это является хорошим индикатором того, что было упущено на 2D SRME, и его влияния посредством миграции на окончательное изображение.

#### Построение скоростной модели и глубинная миграция до суммирования

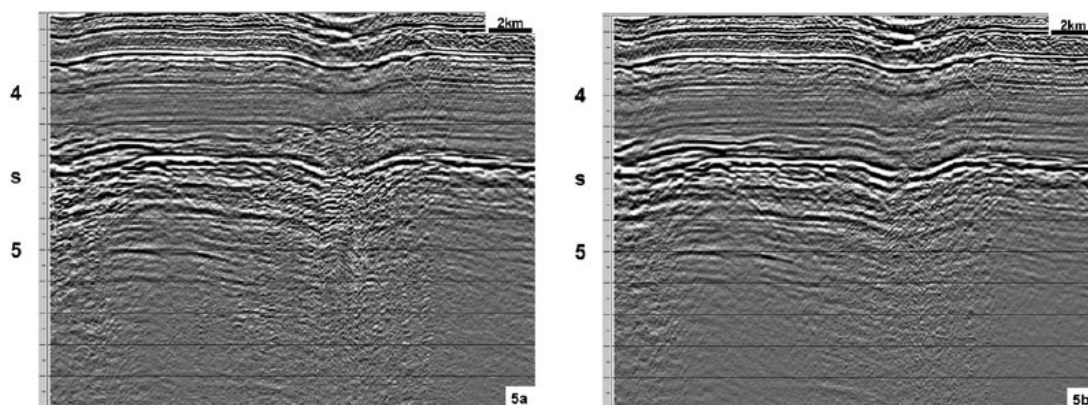
В условиях присутствия локальных аномалий скорости, таких как аномалий, связанных с узким заполнением каналов или аккумуляциями газ-гидратов,

скоростная модель, построенная только на слоистом представлении, будет неадекватна (Jones, 2003). Более того, подход только на основе гридового представления также может вызвать проблемы (Jones et al., 2007).

В данном проекте, мы используем гибридно-гридовый подход, в котором мы объединяем традиционную томографию для грида, высокоразрешенную томографию грида, автопикировку слоев и детальные слои, интерпретируемые в ручном режиме (Fruehn et al., 2007, 2008). Начальная интервальная скорость по глубинам была получена по скорости суммирования во временном масштабе (сглаженная и преобразованная в интервальную скорость в глубинном масштабе), а дно было пропикировано по результатам миграции со скоростью в водном слое и добавлено в начальную модель в качестве явно заданного слоя. Скорость в воде была выбрана по сканам искажений миграции.

Вслед за этим, было выполнено несколько итераций обновления гридовой томографической модели. Это подразумевает выполнение автопикировки (в данном примере на основе деструктора плоских волн - Claerbout, 1992; Hardy, 2003) по плотной сетке сейсмограмм общих точек отражения, и ввода ошибки пикировки скорости и информации о падении в программу гридовой томографии 3D. Программа основана на методе сопряженных градиентов, и способна иметь дело с большими объемами данных 3D.

Ввиду возможных скоплений сводного газа под слоем газ-гидратов, мы прежде всего полагались на



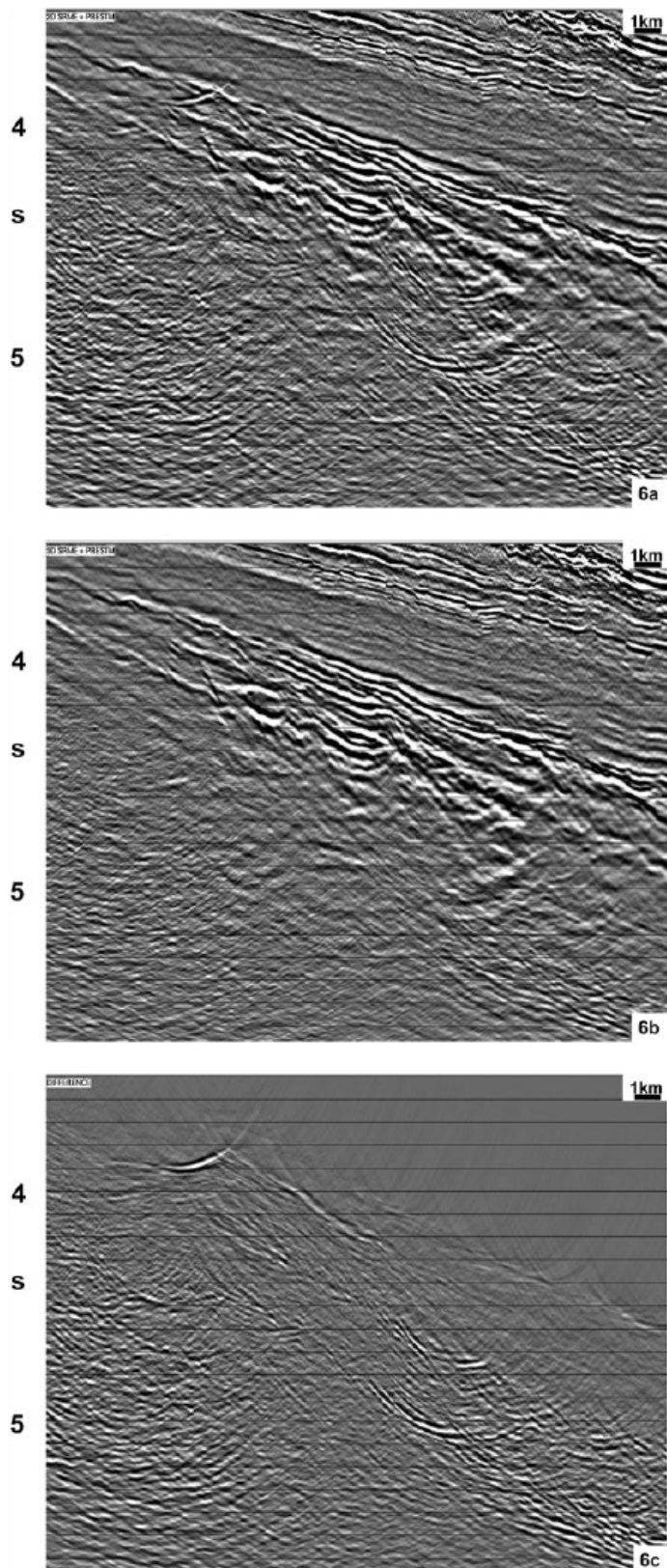
**Рисунок 5** Немигрированный разрез QC в направлении кросслайн, и QC preSTM. 5а демонстрирует результат 2D SRME; 5б - результат 3D SRME. Полоса шума, располагающаяся в интервале крупного несогласия вблизи 4.4с, подавляется 3D SRME. Остаточная ось синфазности кратных волн на результате 2D SRME будет распространяться при миграции и ее будет трудно подавить на этом этапе.

высокоразрешенную гридовую томографию, и могли выделять небольшие объекты с интервальной скоростью  $\sim 1250$  м/с, которые выделялись на фоне скоростей в осадках -1600 м/с. Для задания более детальных узких каналов, мы основывались на ручной интерпретации кровли и подошвы объектов канала, и сканах скоростей над потенциальным заполнением канала.

На Рисунке 7, мы приводим сравнение 2D и 3D SRME и демонстрируем результаты после 3D preS-DM. Миграция вслед за применением 2D SRME (7a) над областью приоритета показывает полосу шума, которая наблюдалась над целевым интервалом (крупным несогласием). Эта остаточная ось кратной волны распространилась при выполнении миграции и ее трудно устранить на данной стадии. Наоборот, после 3D SRME по всему кубу (7b), на мигрированных данных нет этого типа кратных. (Отметим, что на данных 3D SRME выполнялась процедура регуляризации трасс перед миграцией, но это не имеет большую значимость; а также, что скоростная модель была уточнена после применения 3D SRME, поэтому это сравнение не совсем справедливо, но его достаточно для получения представления о влиянии 3D SRME).

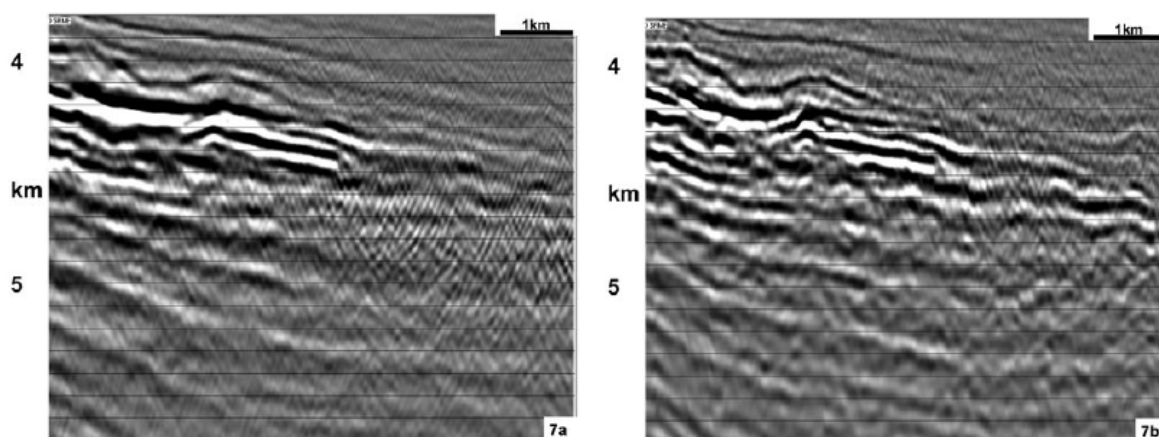
Эти результаты демонстрируют улучшение на существующих данных 3D preSTM 2004 г. (на которых также было выполнено 2D SRME), как для малоглубинной части разреза, на котором были большей частью, устранены эффекты опускания осей синфазности, так и для более глубинной части разреза, где ранее наблюдались рассеянные остаточные кратные, которые затеняли потенциальные целевые объекты. На Рисунке 8, мы проводим сравнение инлайна preSTM (8a) с результатами preSDM (8b). Финальный preS-DM выводился до глубин 15 км, но на данном изображении, 12 км были переведены во временной масштаб для сравнения. Изображение preSDM демонстрирует улучшение четкости вблизи участка несогласия благодаря подавлению остаточной кратной волны при помощи 3D SRME. На изображении preSTM имеется латеральные сдвиги порядка 1.5 км на значении двойного времени 6 с (~9 км глубины) на крутопадающих осях синфазности в левой части разреза,

2008 EAGE [www.firstbreak.org](http://www.firstbreak.org)

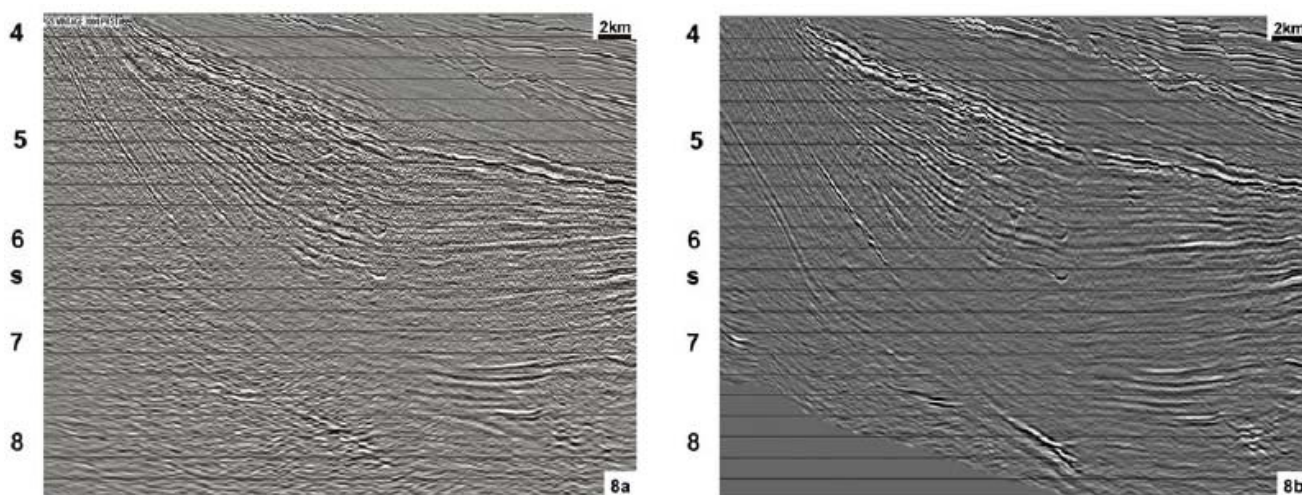


**Рисунок 6** QC preSTM с использованием той же скоростной моделью для данных 2D SRME (6a), для данных 3D SRME (6b), и для разностного разреза с тем же масштабом амплитуд, как и два других разреза (6c).

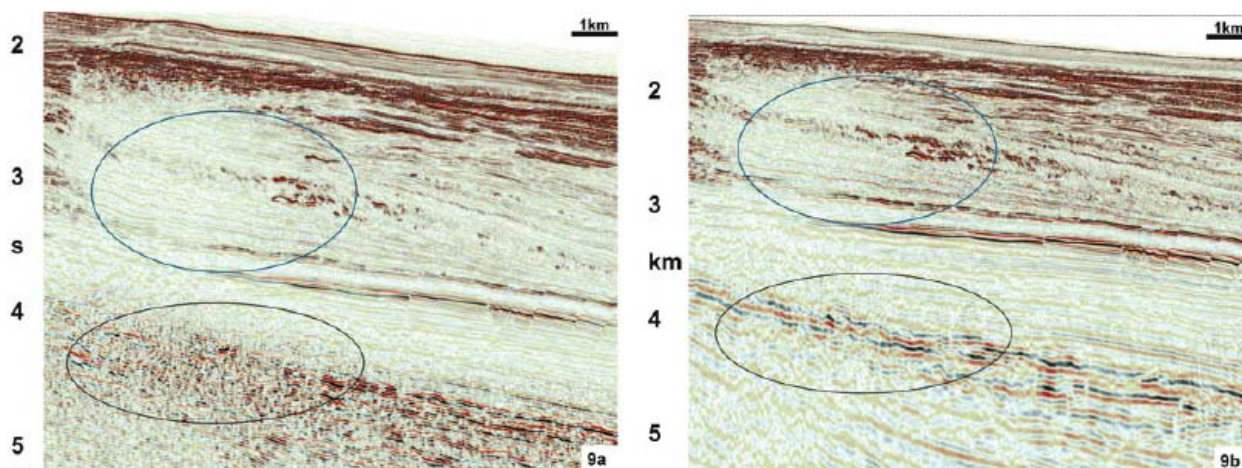




**Рисунок 7** 3D preSDM вслед за применением 2D SRME (7a) и 3D preSDM после применения 3D SRME и регуляризации трасс (7b). Отметим, что эти изображения характеризуются разными моделями скоростей ниже отметки 5 км, поскольку модель глубинного разреза была скорректирована после 3D SRME, но эти различия несут незначительные по сравнению с подавлением шумов.



**Рисунок 8** Результаты для инлайна 2004 3D preSTM (8a), для которого было выполнено 2D SRME и новые данные (преобразованные во время) 2007 3D preSDM (8b). Изображение preSDM демонстрирует увеличение четкости вблизи несогласия благодаря подавлению остаточной оси синфазности кратной волны с помощью 3D SRME. На preSTM имеются латеральные сдвиги порядка 1.5 км на двойном времени пробега 6 с на более крутопадающих осях синфазности.



**Рисунок 9** Сравнение инлайна 2004 3D preSTM (9a) с результатами в глубинной области для новых данных 2007 3D preSDM (9b). Отмечается существенное улучшение в подавлении кратных на результате 3D SRME.

ввиду того, что при миграции было неправильно учтено искривление лучей.

На Рисунке 9, мы проводим подобное сравнение инлайна preSTM (9a) с результатами в глубинной области для preSDM (9b). Существенно улучшено подавление кратных на результате 3D SRME.

Для рассматриваемых данных, мы не стояли перед классической проблемой наличия множества траекторий лучей (моделирование траектории лучей показало, что соотношение скоростей между низкоскоростными аномалиями и окружающими осадками не было достаточно большим, чтобы давать много вариантов траектории), таким образом, для окончательной миграции хорошо подходит метод Кирхгофа с сохранением амплитуд, который и был использован.

#### Выводы

Для построения изображений в сложнопостроенных средах, необходимо применять широкий диапазон инструментов для подавления шумов и кратных различного класса. Это должно выполняться в области до суммирования так, чтобы на мигрированных сейсмограммах можно было выполнять автоматическую плотную пикировку для получения надежных корректировок моделей. Необходимым условием выполнения данной задачи является разнообразные методы подавления шума и кратных волн, а также гибкая система моделирования, и алгоритмы построения изображений с сохранением амплитуд.

Использование подобного подхода для обработки данных на акватории восточного побережья Индии привело к улучшению качества изображения

по сравнению с недавно выполненной миграцией до суммирования во временной области, без структурного искажения, вызванного локальной вариацией скорости в приповерхностных осадках, и дало сейсмограммы, пригодные для работы с атрибутами.

Объединение опыта интерпретации клиента на стадии построения модели - неопценимо. Такая интеграция позволяет интерпретатору все глубже проникать в геологию при построении моделей, таким образом, что дополнительное усилие будет сконцентрировано на целевых участках.

#### Благодарность

Мы благодарим коллег из Reliance Industries и ION GX Technology за помощь и советы на протяжении выполнения данного проекта, и наших коллег за разрешение на публикацию данной работы.

#### Литература

- Claerbout, J.F. [1992] *Earth Soundings Analysis: PVI*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Fruehn, J., Sherazi-Selby, H., Hardy, P., Tryti, J., and Steinsland N. [2007] High-resolution velocity model-building for pre-stack depth migration in the Nordsjon area, Norwegian North Sea. *69<sup>th</sup> EAGE Conference*, London. Extended Abstract.
- Fruehn, J.K., Jones, I. F., Valler, V., Sangvai, P., Biswal, A., and Mathur, M. [2008] Resolving Near-Seabed Velocity Anomalies: Deep Water Offshore South East India: *Geophysics*, in press.
- Hampson, D. [1996], Inverse velocity stacking for multiple elimination. *J. Can. Soc. Expl. Geophysics*, 22(1) 44-55.
- Hardy, P.B. [2003], High resolution tomographic MVA with automation. *SEG/EAGE Summer Research Workshop*, Trieste.
- Jones, I.F. [2003] A review of 3D preSDM velocity model building techniques. *First Break*, 21(3), 45-58.
- Jones, I.F., Sugrue, M.J., and Hardy, P.B. [2007] Hybrid Gridded Tomography. *First Break*, 25(4), 15-21.
- Peacock, K.L. and Treitel, S. [1969] Predictive Deconvolution: Theory and Practice: *Geophysics*, 34, 155-169.
- Sacchi, M.D. and Ulrych, T.J. [1995] High-Resolution velocity gathers and offset space reconstruction. *Geophysics*, 60, 1169-1177.
- Sangvai, P., Biswal, A., Mathur, M., Fruehn, J.K., Smith, P., King, D.G., Jones, I. F., and Goodwin, M.C. [2008] Complex Imaging Challenges: Offshore South East India. *7<sup>th</sup> Biennial Meeting of the SPG*, Hyderabad. Proceedings.
- Stewart, P. [2004] Multiple attenuation techniques suitable for varying water depths. *CSEG Annual Meeting*. Proceedings.
- Stewart, P.G., Jones, I.F., and Hardy, P.B. [2007] Solutions for deep water imaging: *Geohorizons*, January, 8-22.
- Verschuur, D.J., Berkhout, A.J., and Wapenaar, C.P.A. [1992] Adaptive Surface Related Multiple Elimination. *Geophysics*, 57, 1166-1177.
- Yilmaz, O. [1987] Seismic Data Processing. *Society of Exploration Geophysicists*.