

## Много-азимутальная сейсморазведка с буксируемой косой 3Д в дельте Нила, Египет – предложения по обработке. Multi-azimuth towed streamer 3D seismic in the Nile Delta, Egypt - processing solutions

Walter Rietveld,<sup>1\*</sup> Ted Manning,<sup>1</sup> Mark Benson,<sup>1</sup> Jim Keggin,<sup>1</sup> Adrian Burke,<sup>2</sup> и Abdallah Halim<sup>2</sup>

### Введение

Много-азимутальные или широко-азимутальные сейсмические съемки – не новая технология, она уже с нами многие годы в форме наземных или донных океанических съемок. Литература богата примерами того, какие много-азимутальные данные высокой кратности могут давать удивительные улучшения по сравнению с их эквивалентом одно-азимутальными 3D данными (Rogno et al., 1999, Keggin et al., 2002, Gaus and Hegna, 2003, Arntsen и Thompson, 2003, Riou et al., 2005, Manley et al., 2006, Michell et al., 2006). Из теории и практических примеров мы знаем, что много-азимутальные данные дают улучшение соотношения сигнал-шум, улучшают подавление кратных и освещенные.

Однако, из-за аппроксимаций в современной теории обработки, после обработки много-азимутальных данных будут оставаться ошибки в финальных изображениях. При простом суммировании данных, которое хотя и на удивление устойчивая процедура делается предположения о том, что данные постоянны между съемками и это, скорее всего, не приведет к получению наиболее оптимального изображения.

В этой работе показано как много-азимутальные данные с буксируемой косой (MAZ) обрабатываются в районе дельты Нила, рассмотрены некоторые вопросы, поставленные выше и обсуждаются первоначальные этапы обработки в целях улучшения комбинированного изображения недр.

### Многоазимутальная съемка (MAZ)

Пять съемок площадью 630 км<sup>2</sup> с буксируемой косой было проведено в конце 2004 года над одной и той же площадью с инкрементом по азимуту 30°. В качестве шестого азимута использовались устаревшие данные 2000 года. Целью съемки было получения самого качественного сейсмического материала в районе до-мессинской залежи в целях оценки и разработки. С точки зрения разработки, съемка была очень эффективной и простой для получения данных, как это описывает Page et al. (2007).

### Поток обработки

Что касается больших контрастов скоростей, эта часть дельты Нила может характеризоваться глубоководной обстановкой, погружающимся сложным морским дном и тонким, но сложным по структуре слоем мессинских отложений, лежащих на глубине порядка 3 км. Этот слой состоит из ангидритовых отложений, систем каналов, и складчатого основания, при этом общая мощность обычно менее 200 м и сильно варьирует. Газ гидраты, залегающие вблизи морского дна и слоя мессинских отложений, являются основными причинами образования кратных волн. В этих относительно глубоких водах метод SRME (подавление кратных, связанных с поверхностью) (Verschuur et al., 1992)

стал наиболее предпочтительным способом подавления кратных, вслед за которым обычно использовался дополнительный метод Радона.

Из-за того, что мессиний вызывает сложные и короткопериодные изменения поля скоростей по латерали, построение точной скоростной модели не было успешным, что ограничило эффективность глубинной миграции до суммирования (PSDM). Таким образом, в текущем потоке обработки используется временная миграция до суммирования Кирхгофа (K-PSTM). Она требует одной гладкой модели скорости для всех азимутов в качестве основного инструмента построения изображения, вслед за ней идет непрерывный скоростной анализ отдельно по каждому азимуту. Одно дополнительное уточнение было добавлено к обработке. Перед миграцией данные по всем азимутам были бинированы, используя азимутальные ограничения, для того, чтобы ближние трассы косы попали в бин, соответствующий набору данных самого ближнего к реальному азимуту источник-приемник (Page et al., 2007).

### Ограничения потока обработки

Наиболее часто используемые способы выполнения SRME имеют явное предположение о случае 2D, и корректно будет предсказываться только кратные, относящиеся к поверхности, которые отразились в плоскости источников и приемников. Расширение до 3D стали возможными, но все еще дороги и имеют проблемы с дифрагированными кратными, ввиду сложной структуры поля волн и редкого шага геометрии наблюдений. Из-за складчатости дна, присутствия рассеяний, вызванных придонными газ-гидратами, наличием мессиния, мы знаем, что наши кратные обладают характеристиками 3D.

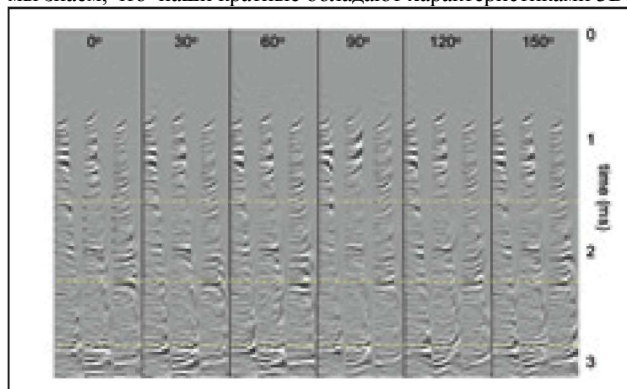
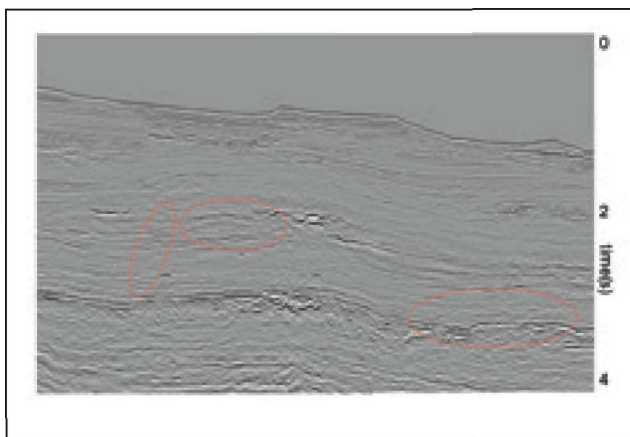


Рисунок 1 Сейсмограммы после K-PSTM для шести различных азимутов. Отметьте, что никакой остаточной миграции не применялось и что отображенные данные все находятся над мессинским слоем (на ~3 с).

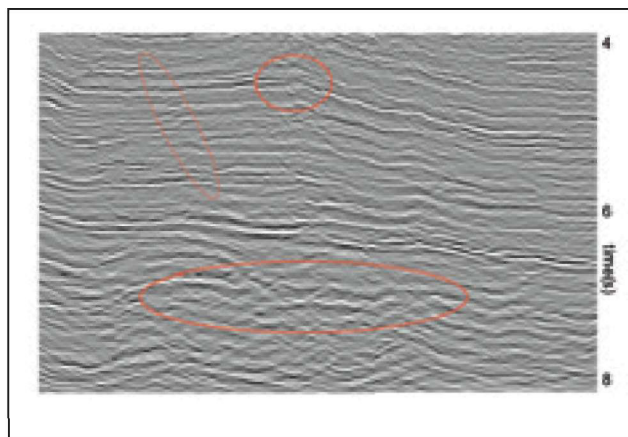
<sup>1</sup> BP.

<sup>2</sup> PGS.

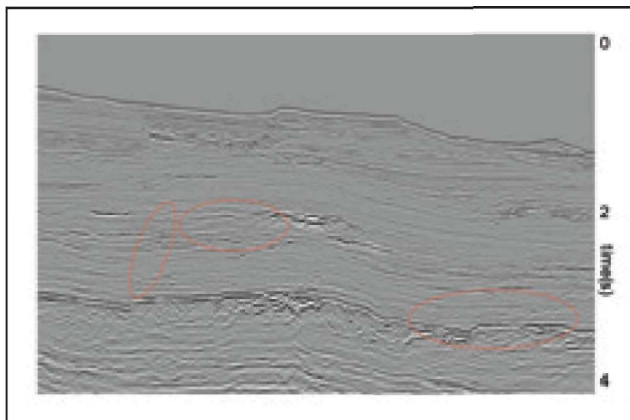
\* Corresponding author; E-mail: Walter.Rietveld@bp.com.



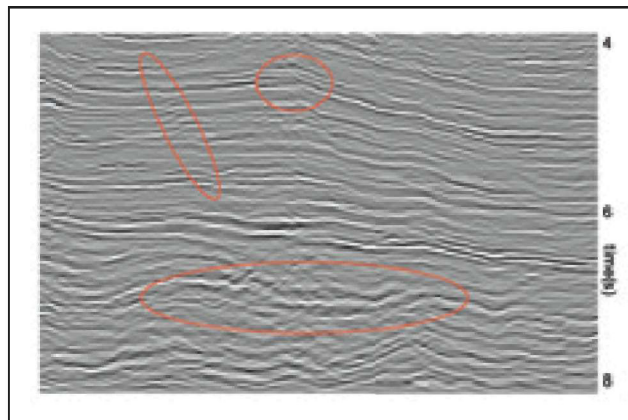
**Рисунок 2а** Непосредственный суммарный разрез после K-PSTM для устаревших одно-азимутаотных данных, малоглубинный участок. Мессинский слой виден вблизи 3 с.



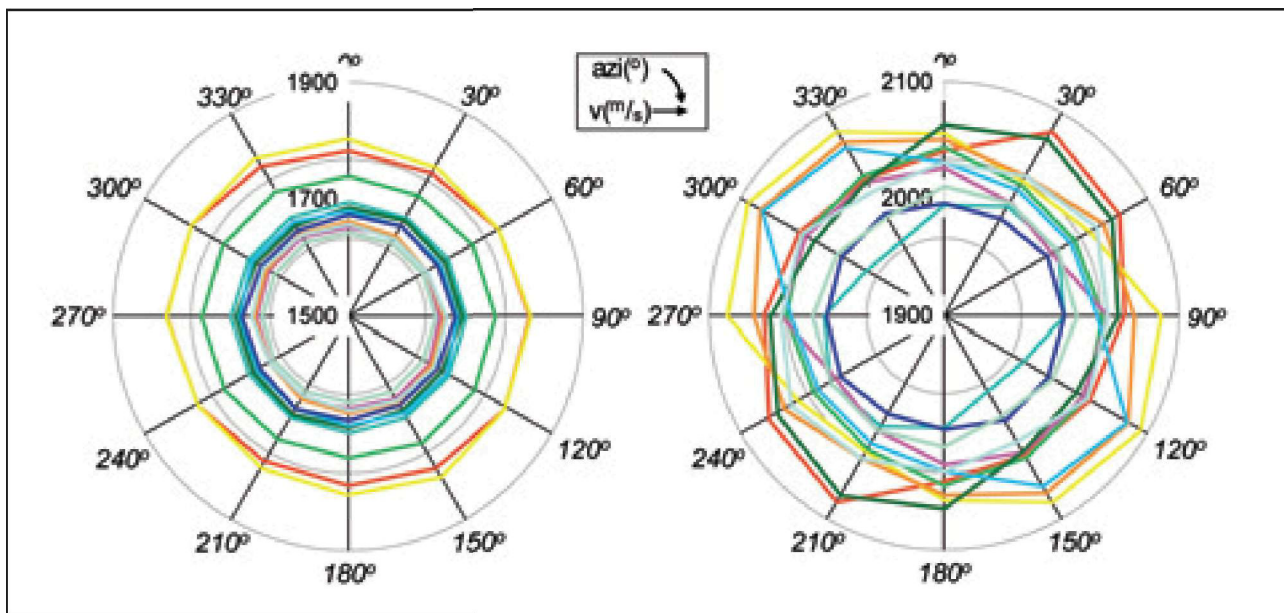
**Рисунок 2с** Суммарный разрез после K-PSTM для устаревших одно-азимутаотных данных, глубокий участок. Отметим переменное качество данных.



**Рисунок 2б** Суммарный разрез по шести азимутам после K-PSTM. Отметим улучшение в выделенных зонах.



**Рисунок 2д** Суммарный разрез по шести азимутам после K-PSTM. Отметим улучшение в выделенных зонах.



**Рисунок 3** Автопикированные скорости после K-PSTM как функция азимута, малоглубинный пост-мессинский слой ~2 с (слева) и более глубокий, до-мессинский, ~4 с (справа). Латеральное удаление точек анализа 2.5 км.

Таким образом, использованный метод 2-D SRME+Radon дает только частичное решение.

Из-за 3-мерности Земли с большими латеральными вариациями скорости, различием в направлении регистрации будут получать дискретные данные по отдельным участкам недр и потенциально будут получены абсолютно разные скорости. Способ грамотного получения изображений по этим данным - PSDM, когда будут прослеживаться истинные траектории сейсмических лучей. Gaus и Hegna (2003) и Riou et al. (2005) описывают метод PSDM и его приложения к много-азимутальным данным. Как было упомянуто, сложность мессинского слоя такова, что нельзя получить устойчивую скоростную модель, ни с помощью томографии, ни путем традиционного подхода, применяемого в Мексиканском заливе при интерпретации соляной толщи, когда пикируются кровля и основание соли и их вводят в гладкую модель скорости осадков. Это объясняется тем, что сложность строения мессинской толщи не просто структурная, но важно, что внутреннее распределение скорости в относительно тонком слое, также высоко изменчиво.

Таким образом, в качестве основного способа построения изображений был использован метод K-PSTM, с анализом остаточной кривизны после миграции в целях улучшения данных. Использование миграции до суммирования во временной области, а не в глубинной, также даст некоторые ошибки латерального позиционирования. Очевидно, что обе эти ошибки будут меняться как функции азимута регистрации, поэтому вызовут ухудшения качества конечного изображения. Если наблюдается значительная азимутальная анизотропия, это надо учитывать при миграции, если вы хотите использовать одно поле скорости для получения изображений данных по всем азимутам. Неучет этого также приведет к разнице остаточной кинематики на азимуте и также ошибкам латерального позиционирования, даже при глубинных отображениях.

### Анализ данных

На рисунке 1 показаны одни и те же три сейсмограммы после K-PSTM, для всех шести азимутов регистрации, без применения пост-миграционного сглаживания. Разница в кинематическом сдвиге очевидна. Как показано выше, каждый азимут «видит» разную часть недр. Если можно бы было получить точную модель интервальных скоростей, эти различия могли бы учитываться в PSDM. Также отметим, что эти различия уже видны в неглубокой зоне разреза, где мессиний (на 3 с) еще не вступает в игру.

Если мы игнорируем эти различия в кинематическом сдвиге и просто суммируем все данные вместе без сглаживания сейсмограмм, мы получим изображения на рисунке 2. На рисунках 2a и c показаны разрезы для одного азимута, по устаревшим данным. На рисунках 2b и d показаны те же разрезы по много-азимутальным данным. Улучшения очевидны. Уровень случайного шума существенно упал, как и артефакты миграции благодаря геометрии наблюдения. Кратные дифракции, которые прорываются через разрез на одно-азимутальных данных, также успешно подавлены путем простого суммирования всех азимутов.

Хотя проблемы освещения не очевидны на этом разрезе, общая прослеживаемость отражающих границ улучшилась

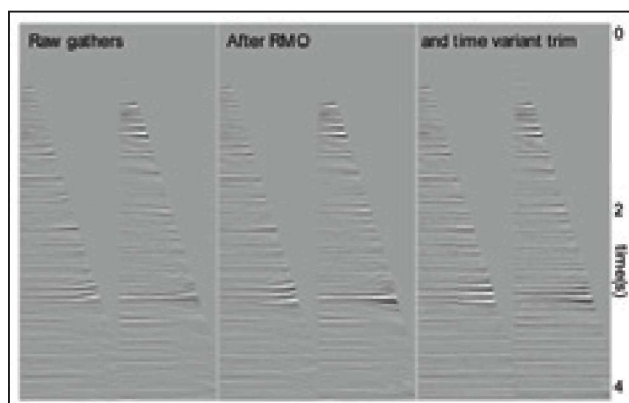


Рисунок 4 Переменяющиеся супер-сейсмограммы (шесть азимутов для каждого класса удалений, затем шесть азимутов для следующего класса удалений, и т.д.) сразу после миграции (слева), после RMO (в середине), и после переменной во времени trim статистики (справа). Отметим улучшение гладкости данных.

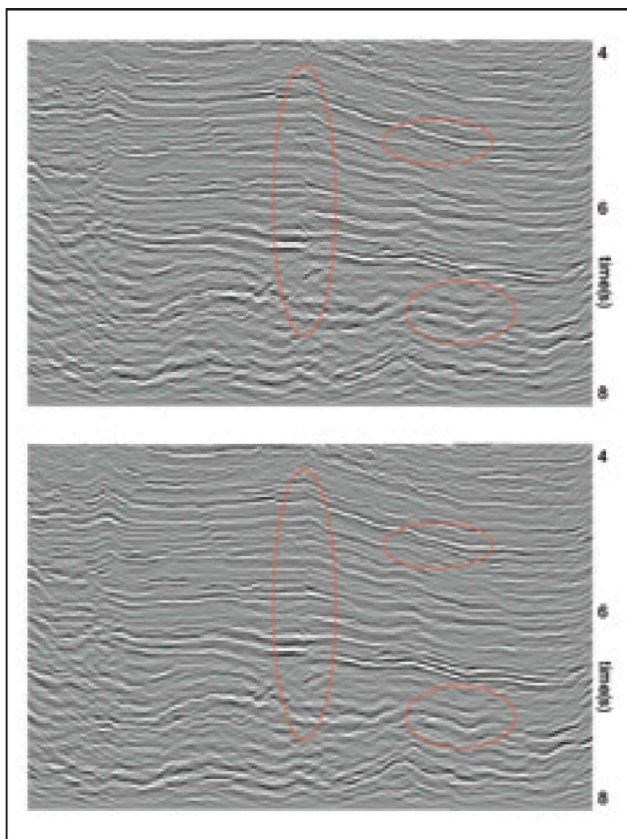


Рисунок 5 Влияние RMO и переменной во времени trim статистики на много-азимутальный суммарный разрез. Сумма без RMO и trim статистики (сверху) и с введенными RMO и trim статикой (внизу). Улучшения существенные, но важно выбрать оптимальный разрез.

как и латеральная разрешенность. Это можно объяснить тем, что боковые лепестки пространственного импульса подавлены суммированием разных азимутов.

На рисунке 3 показаны измерения разных скоростей, полученных по измерениям остаточных кинематических сдвигов в нескольких токах пост-мессинского разреза (слева) и сразу под мессинием (справа).



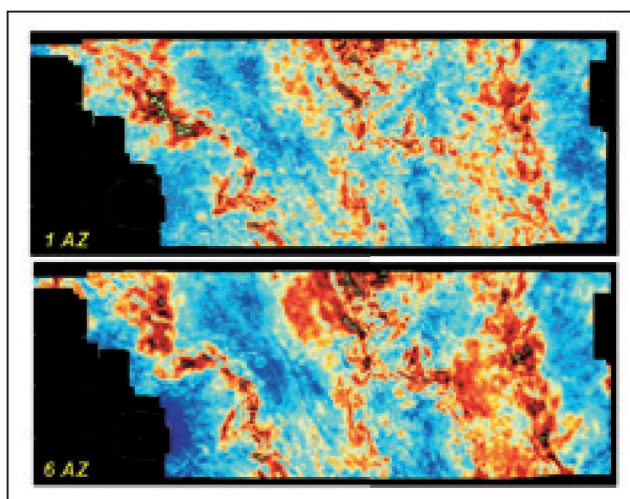


Рисунок 6а Амплитуды, извлеченные из кубов одноазимутальных (вверху) и шести-азимутальных данных MAZ (внизу) на времени около 5 с, видно значительное улучшение прослеживаемости амплитуды и латеральной разрешенности.

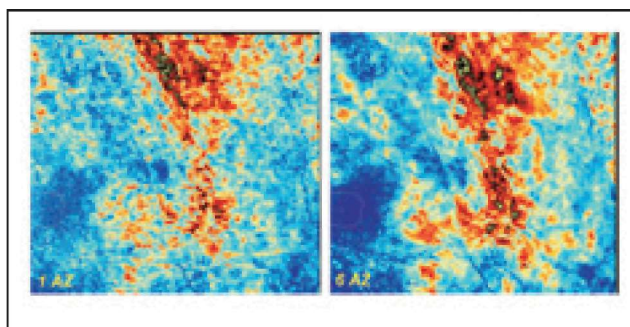


Рисунок 6б Амплитуды, извлеченные из кубов одноазимутальных (слева) и шести-азимутальных данных MAZ (справа) на времени около 6 с, видны существенные улучшения.

Азимутальная вариация местами сильна: тем не менее, нарушение целостности говорит о том, что именно неоднородность скорости является причиной, а не азимутальная анизотропия. В общем, проблемы, на которые указывает остаточный кинематический сдвиг, показанный на Рисунке 1, измеренный на рисунке 3, и очевидная ошибка позиционирования, связанная с этими скоростными различиями, не могут нас удержать от конструктивного суммирования (рисунок 2).

### Дополнительная обработка MAZ

Несмотря на то, что начальный грубый суммарный разрез как показано на Рисунке 2, отражает существенное улучшение данных, из Рисунка 1 очевидно, что все еще есть возможность добиться дополнительных улучшений, прежде всего, сгладив сейсмограммы, затем попытавшись 'исправить' ошибки латерального позиционирования.

Для того, чтобы иметь дело с остаточными явлениями миграции, отдельно на каждом азимуте были пропикированы автоматически кинематические сдвиги. Перед применением пикировки были сглажены. На рисунке показано как обрабатывали кинематические сдвиги, относящиеся к проблеме скорости (рисунок 4, середина). Для того чтобы иметь дело с

любыми остаточными временными ошибками между осями синфазности по разным азимутам, были использованы простые переменные во времени статические поправки (trim) (рисунок 4, справа). Опорным для trim статики был разрез по всем азимутам для всех удалений (Рисунок 2b). Реальные значения trim статики были отфильтрованы и сглажены, чтобы избежать пропусков циклов и искажения данных. Этот процесс trim статики должен запускаться с предосторожностью, поскольку остаточные кратные и другие пути шума также могут выравниваться. Результаты введения остаточной кинематики и trim статики наиболее заметны на разрезах частичных удалений и необходимы при получении атрибутов AVO. Заметим, однако, что если мы имеем дело с обращением фазы в AVO (класс 2p), применение этих поправок должно быть крайне аккуратным.

Эти дополнительные этапы обработки были применены к набору данных. На Рисунке 5 показана глубокая часть разреза после суммирования MAZ (аналогично рисунку 2c) и этот же участок после применения RMO и trim статики перед суммированием. Улучшения видны, но они небольшие по сравнению с улучшениями после перехода от одного азимута к много-азимутальной расстановке (рисунки 2). Однако, для получения самого лучшего разреза данных MAZ, для коррекции этих временных различий, необходимы RMO и trim статика. Сравнение амплитуд, извлеченных из кубов для глубокой части разреза (около 5 и 6 с) для устаревших одноазимутальных данных и шести-азимутальных данных MAZ приведено на Рисунке 6. Наилучшая прослеживаемость амплитуд и улучшенное латеральное разрешение, заметные по улучшению изображения разлома, очевидны.

### Кратность или азимутальное покрытие

Поскольку у много-азимутальных данных, как показано на рисунке 2b, кратность в 6 раз больше кратности 60-кратных одно-азимутальных данных, как показано на рисунке 2a, можно сказать, что всякое улучшение сейсмического изображения просто происходит из существенного увеличения кратности. Однако если сравнить суммарный разрез одно-азимутальных данных (Рисунок 7a) с 60-кратным много-азимутальным разрезом на рисунке 7b, который был получен используя только каждое шестое удаление для каждого азимута, очевидно, что большая часть улучшений много-азимутальных данных происходит из-за азимутального разнообразия, а не увеличения кратности (Bouska, 1998). Отметим, что плотная дискретизация по удалениям необходима для любого типа мульти-трассной фильтрации в области ОСТ, ПВ или ПП.

### Оптимальное суммирование многоазимутальных данных: AddBack, 0+1=2

Проблемы освещения могут скорее ухудшить, чем улучшить качество суммирования мульти-азимутальных данных. Если взять двух-азимутальный суммарный разрез, из которого на одном азимуте содержится только шум, суммарный разрез MAZ будет лучше без шумного азимута. В этом случае одноазимутальный разрез даст лучшее изображение. В идеале разрез MAZ должен дать в два раза лучший разрез, делая его 'равным' по амплитуде другим участкам разреза, где оба азимута вносят конструктивный вклад, поэтому:  $0+1=2$ . Простым способом взвешивания суммы является расчет разности энергии, подавление случайного шума, и затем обратного добавления полученной когерентной энергии, с учетом полярности суммарных данных в этой точке.

В качестве иллюстрации этой процедуры обратного добавления, на рисунках 8a и e показаны два синусоидальных сигнала, которые мы хотим сложить. Оба засорены шумом (Noise1 и Noise2) и имеют пробелы 'освещения', на которые указывают стрелки. Идеальный, свободный от шума выходной сигнал суммы показан на Рисунке 8h. Линейное суммирование показано на рисунке 8f и показывает, как пробелы освещения дают слабые амплитуды отклика. На рисунке 8b показана разность двух сигналов. Если ее объединить обратно в сумму, учитывая полярность, получим результат на рисунке 8g, на котором показан полный синусоидальный сигнал, но также добавленный шум в областях пробелов освещения. Если профильтровать разность (рисунок 8b) от случайного шума, получим рисунок 8c, а затем объединим результат с линейным суммированием, получим сигнал на рисунке 8d, на котором у нас видно улучшенное отношение сигнал-шум и мы существенно восстановили сигнал. Эта простая схема, расширенная для возможности ввода шести азимутов, была проверена на наших данных MAZ и станет хорошим добавлением к набору инструментов, особенно в областях с переменным «освещением».

### Предложения по дополнительной обработке

Имеется несколько этапов, которые надо протестировать в переобработке, которые нельзя было включить в текущий поток в целях согласования устаревших данных азимута В-3 ввиду временных рамок проекта. Необходимо предварительно ввести поправку за смещение приемника

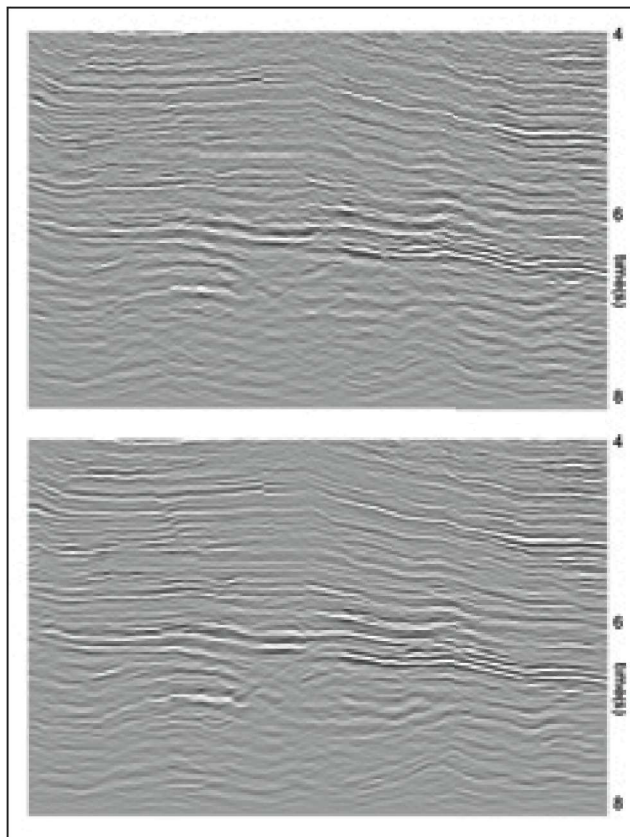


Рисунок 7 60- кратный суммарный одноазимутальный разрез (сверху) и 60-кратный многоазимутальный разрез (снизу) на котором показана глубокая часть разреза. Отмечается улучшенная прослеживаемость на разрезе MAZ.

с целью минимизации латеральной погрешности. Обратная Q фильтрация поможет улучшить разрешение и, ввести амплитудную поправку, восстановить дополнительные высокие частоты и лучше сбалансировать амплитуды. Амплитудная и спектральная балансировка удалений также поможет с амплитудами и разрешением. Несмотря на то, что методики моделирования скорости, такие как томографическая инверсия, до настоящего момента не помогли в построении детальной глубинной скоростной модели, простые данные синтетики показывают, что латеральные ошибки позиционирования в данных, вызванные погружением водного слоя, будут меняться с глубиной, и могут достигать 100 м по глубине в разрезе. Их можно корректировать путем добавления водного слоя к скоростной модели и миграции по глубине.

### Задачи обработки в перспективе

Успех применения MAZ в дельте Нила и наблюдения за средой через мессиний ведет к необходимости нахождения «дружественной» AVO альтернативы переменным во времени поправкам trim статики. Это предмет продолжающихся исследований. 3D SRME может быть полезна при подавлении кратных дифракций, в большей степени, чем выполнение простого многоазимутального суммирования. На этих данных можно также протестировать другой алгоритм миграции: в настоящий момент тестируются миграция во временной области на основе наименьших квадратов, улучшенное построение скоростной модели, и миграция вдоль луча.

### Выводы

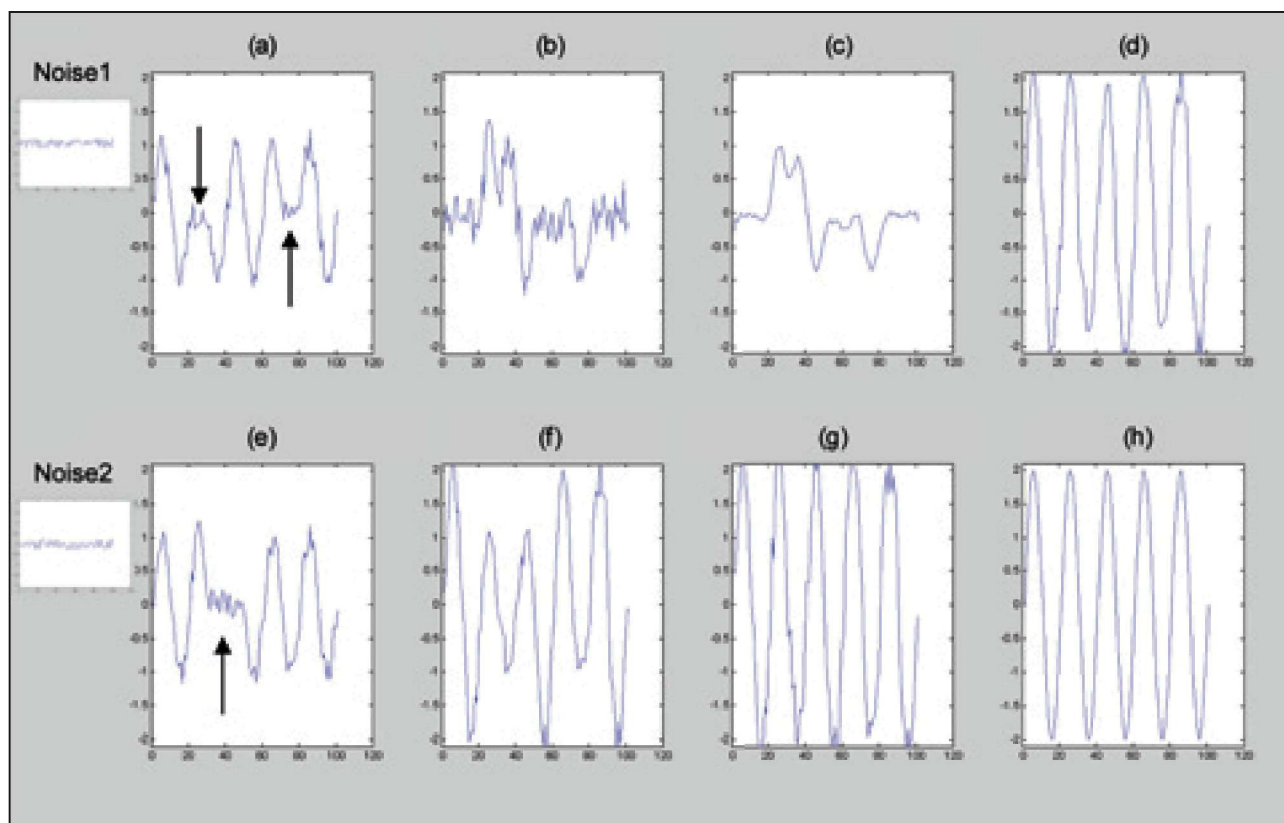
В этой работе мы показали, что многоазимутальные данные можно успешно комбинировать с основными процедурами обработки, среди которых основными компонентами являются SRME и K-PSTM. К вопросам кратных дифракций 3D, которые успешно подавляются, и вопросам скоростной модели можно подходить путем ввода кинематического сдвига шестого порядка и применения переменной во времени trim статики.

Тот факт, что простое суммирование всех данных дает улучшения качества изображения, увеличения отношения сигнал-шум, прослеживаемость отражений и улучшение латеральной разрешенности, указывает на то, что геология такова, что латеральные скоростные контрасты и азимутальная анизотропия являются не главными вопросами.

В конце работы было показано, что разнообразие азимутов может быть более важной, чем разнообразие удалений и играет существенную роль в качестве финальных данных. Однако, надо понимать, что при обработке требуются более плотные выборки по удалениям для определенных типов фильтрации данных.

Получаемая высокая кратность шести-азимутальных изображений подтвердила предсказания теории:

- Улучшилось отношение сигнал-шум. В частности, шум кратных дифракций был успешно подавлен, как показано на рисунке 2.
- Было достигнуто более регулярное освещение. Это дало более надежные и детальные карты амплитуд /атрибутов, по которым мы можем откартировать системы до-мессинских резервуаров с большей уверенностью. Теперь до глубин 6 км можно получить надежные карты атрибутов, что позволит нам идентифицировать резервуары, которые были менее заметны на одноазимутальных данных, и снизить риск неправильного их выделения (рисунок 6).
- Увеличенная латеральная разрешенность видна на многоазимутальных данных.



**Рисунок 8** Иллюстрация процедуры суммирования (a) и (e) два входных синусоидальных сигнала. Оба загрязнены шумами (Noise1 и Noise2) и имеют пробелы в 'освещении', показанные стрелками. Идеальный выходной сигнал суммы показан на (h) линейное суммирование показано на (f) и иллюстрирует, как пробелы в освещении дают слабые амплитуды (b) показывает разность двух сигналов. Добавление ее обратно без подавления шума дает (g), который показывает полный синусоидальный сигнал, но также добавленный шум в «тихих» областях. Если профильтровать разность (b) от случайного шума это даст (c), затем объединить это с результатом линейного суммирования, получим (d) где отношение сигнал-шум улучшилось и сигнал был восстановлен.

## Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить Peter Cook и Ed Jones за их вклад в улучшение качества данных, PGS за усилия, направленные на получение и обработку данных, BP, RWE Dea, и EGAS за разрешение на публикацию этих результатов.

## Литература

Arntsen, B. and Thompson, M. [2003] The Importance of Wide Azimuth in Imaging. 65<sup>th</sup> EAGE Mtg, A40 Bouska, J. [1998] The other side of fold. *The Leading Edge*, 17, 31-36.  
Gaus, D. and Hegna, S. [2003] Improved Imaging by Pre Stack Depth Migration of Multi-Azimuth Towed Streamer Seismic Data. 65<sup>th</sup> EAGE Mtg. C02  
Keggin, J., Widmaier, M., Hegna, S., and Kjos, E. [2002] Attenuation of multiple diffractions by multi-azimuth streamer acquisition. 64<sup>th</sup> EAGE Ann.Mtg., Florence. Expanded Abstract F039  
Keggin, J., Benson, M., Rietveld, W., Manning, T., Cook, P., and Page, C. [2007] Multi-Azimuth 3D provides robust improve-

ments in Nile Delta seismic imaging. *First Break*, 25, 3  
Manley, D.M., Mohammed, S.F., Robinson, N.D., and Thomas, R.W. [2005] Structural interpretation of the deep-water Gunashli Field, Facilitated by 4-C OBS seismic data. *The Leading Edge*, 24, 922-926  
Michell, S., Shoshitaishvili, E., Chergotis, D., Sharp, J., and Etgen, J. [2006] Wide Azimuth Streamer Imaging of Mad Dog; Have We Solved the Subsalt Imaging Problem? 76<sup>th</sup> SEG Ann. Internat. Mtg, 2905-2908  
Page, C., van Borselen, R., Fromyr, E., Keggin, J., Manning, T., and Rietveld, W. [2007] Towed Streamer Multi-azimuth processing and acquisition. *First Break*, 25, 3. Riou, A., Kravik, K., Saxton, P., Lemaistre, L., Aubin, V., and Bertini, F. [2005] Hild, Multi Azimuth Seismic Experiment, 67<sup>th</sup> EAGE Mtg. B031.  
Rogno, H., Kristensen, A., and Amundsen, L. [1999] The Statjord 3D, 4C OBC Survey. *The Leading Edge*, Nov.  
Verschuur, D.J., Berkhout, A.J., and Wapenaar, C.P.A. [1992] Adaptive surface-related multiple elimination. *Geophysics*, 57, 9, 1166-1177.