

Многоазимутальные 3Д исследования дают устойчивые улучшения при сейсмическом отображении дельты Нила. Multi-azimuth 3D provides robust improvements in Nile Delta seismic imaging

Jim Keggin,¹ * Mark Benson,¹ Walter Rietveld,¹ Ted Manning,¹ Peter Cook,¹ и Chris Page²

Введение

С тех пор, как в конце 60-х был впервые обнаружен газ в дельте Нила, большая часть программ по разведке была сфокусирована на малоглубинных плейстоценовых резервуарах, там, где газ четко связывался с яркими осями синфазности, которые наблюдались на сейсмических данных высокого качества и там, где успех разведки был очень высоким. Нефтяная геология более глубокого доплистоценового разреза фундаментально не отличается от плейстоценового, потенциальные резервуары которого состоят из систем преимущественно песчаных каналов, берущих начало в Ниле. Тогда почему мы не изучали более глубокие части разреза? Эта проблема двоякая:

1. Более глубокое залегание и более твердые породы означают, что пески коллекторы и углеводороды будут менее заметными на наших сейсмических данных.
2. Качество сейсмических данных в доплейстоценовом разрезе сильно меняется и обычно очень невысокое. (Рисунок 1). Плохое отображение является результатом искажения поля волн в мессинском ангидритовом слое, затухания, и присутствия сложного шума от множества дифракций.

Мессиний

Около пяти миллионов лет назад в конце мессинской эры, изолированное Средиземное море начало испаряться, что привело к образованию мелко-

водных морских осадков и залежей ангидритов по всему бассейну (Hsu et al., 1973). По мере того, как уровень моря продолжал падать, эти отложения были локально эродированы и переработаны, что еще больше усложнило их структуру. Сложное строение мессинской толщи можно ясно видеть на Рисунке 1. Акустические искажения и затухание сигнала во всем интервале являются причиной плохого качества сейсмических данных на глубине. Хотя, это не единственная проблема.

Многочисленные дифракции

Физические условия на глубинах воды более 1 км являются такими, что газ-гидраты формируются сразу под морским дном (Dodd, T., частн. беседа.). Эти газ-гидраты формируют сильную дифракцию, которая доминирует на малых глубинах немигрированного разреза. Также сильная дифракция наблюдается в Мессинской толще на глубинах порядка 3 км. Несмотря на то, что эти первичные дифрагированные волны очень хорошо подавляются процедурой миграции и дают изображение ряби на обоих уровнях, кратные волны в водной толще от этих осей синфазности, являются проблемой. Ясно, что кратную дифрагированную волну, заметную на Рисунке 2, будет трудно подавить при помощи традиционных методов обработки и она упорно остается на большей части наших данных.

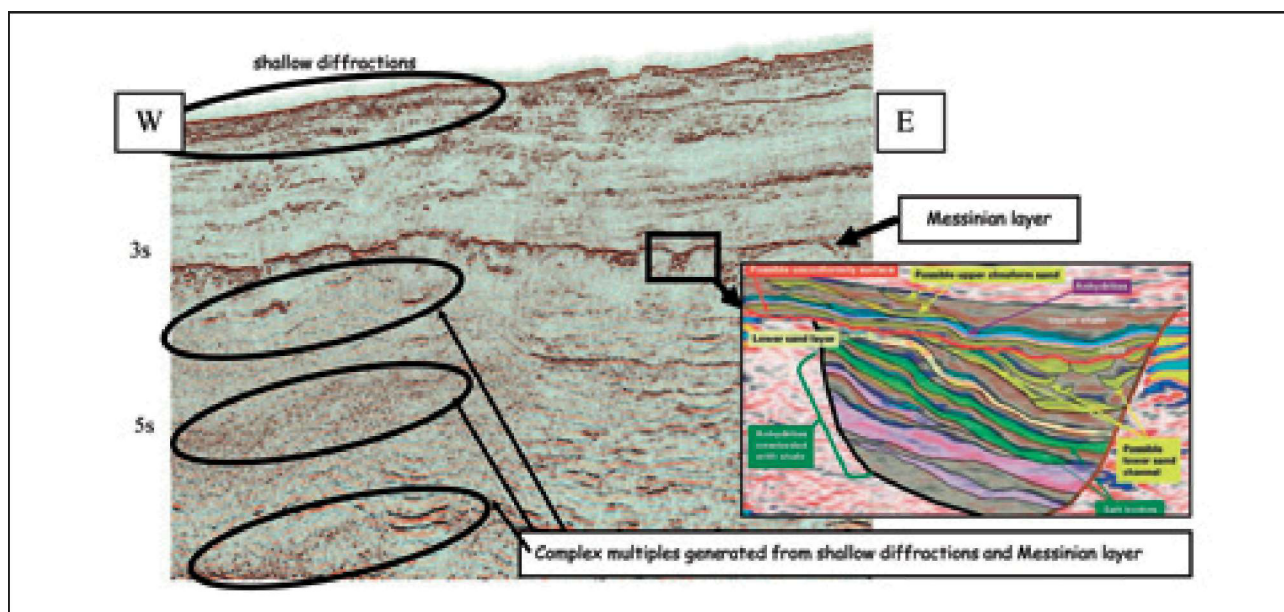


Рисунок 1 Изменение качества данных с глубиной.

¹BP.

²PGS.

*Corresponding author; E-mail: kegginja@BP.com.

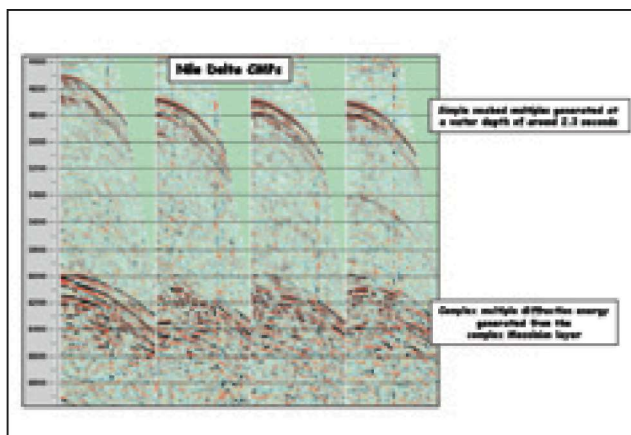


Рисунок 2 Кратный дифрагированный шум с кинематическим сдвигом со смещенной вершиной на ненулевом удалении.

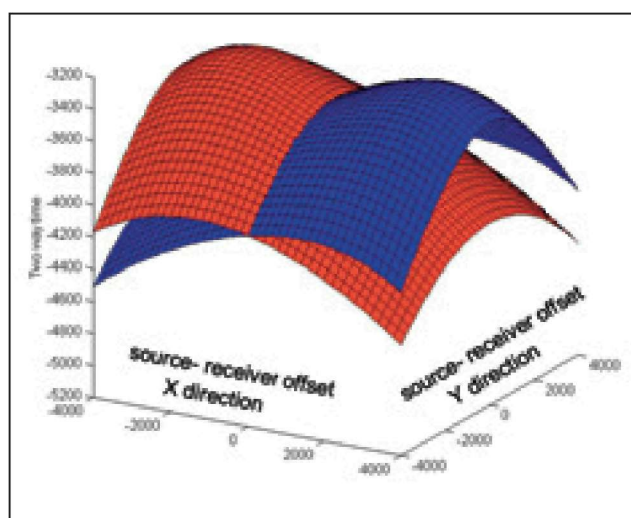


Рисунок 3 Аналитические годографы для кратной дифрагированной волны после применения НМО. Кинематический сдвиг варьирует с удалением и азимутом. Ось синфазности разделена вершиной на ненулевом удалении (кинематический сдвиг со смещенной вершиной).

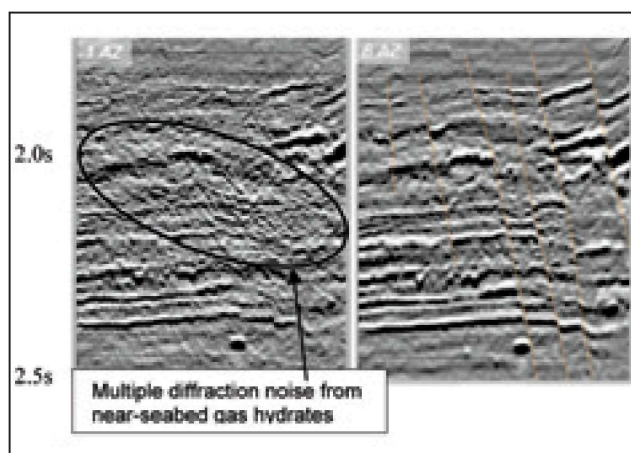


Рисунок 4 Кратные дифрагированные волны подавляются для лучшего прослеживания плиоцевого резервуара, осложненного разломами. Также улучшилось латеральное разрешение и освещение.

Как многоазимутальная сейсморазведка может нам помочь?

Многоазимутальная и широкоазимутальная сейсморазведка не являются новыми методами; они с нами уже много лет в форме наземных и донных океанических кабельных съемок. Литература богата примерами того, как много/широкоазимутальные данные высокой кратности могут приводить к ошеломляющим улучшениям по сравнению с их одноазимутальным 3D эквивалентом (например Arntsen and Thompson, 2002; Bouska and Johnson 2005; Gaus and Hegna, 2003; Rogno et. al., 1999.). Мы знаем из теории и практических примеров о том, что многоазимутальные данные дадут нам улучшение в соотношении сигнал-шум, улучшенное подавление кратных, и лучшее освещение разреза. Мы видим, что в дельте Нила многоазимутальный сейсмический метод должен решать наши главные две проблемы.

Проблема 1: Кратные дифрагированные

Кратные дифракции со своими сложными траекториями лучей и 'кинематическим сдвигом со смещенной вершиной' крайне трудно подавлять на традиционных данных с одним азимутом. Несмотря на то, что традиционный разрез ОГТ и некоторые существующие методики подавления кратных могут немного помочь подавить эти сложные пути шума, большая часть наших одноазимутальных данных засорена остатками шума. При расчете полноазимутальных времен пробега ОГТ для простой кратной оси синфазности дифрагированной волны, мы видим, что кинематический сдвиг меняется как по азимуту, так и по удалению (Рисунок 3). Таким образом, следует, что многоазимутальный разрез - лучший способ подавления этого нежелательного шума (Keggin et.al., 2002). Эта теория реализована на практике и улучшенное подавление кратных наблюдается на всех многоазимутальных данных, полученных на настоящий момент. Хороший пример приведен на Рисунке 4.

Проблема 2: Освещение

Мессинский интервал состоит не только из ангидритов, но также из других мелководных морских и речных осадков, отложенных во время мессинского кризиса. Эти сложные системы, эвапоритовые (высокая скорость) или комплексы заполнения каналов (более высокая или низкая скорость) дают высоко нерегулярную и латерально изменчивую структуру скорости. Прохождение сейсмических волн через

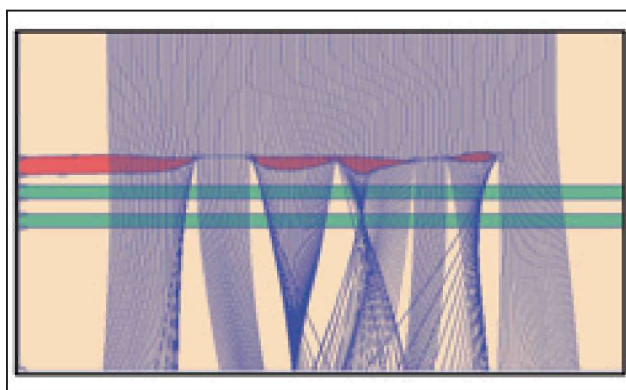
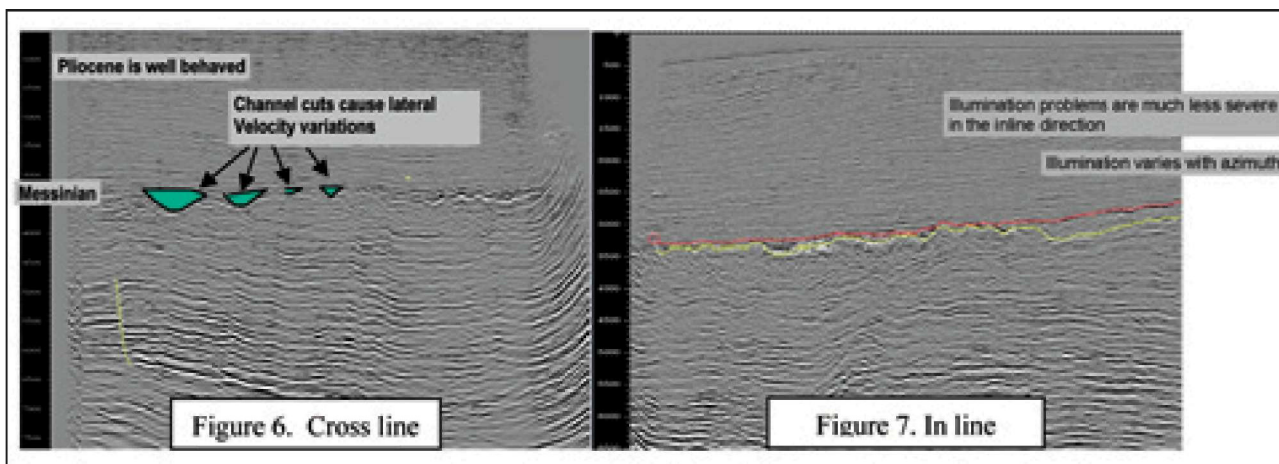


Рисунок 5 Неравномерное освещение получается из-за искажений поля волн, проходящих через сложнопостроенную мессинскую толщу. Этот простой пример с трассированием лучей иллюстрирует фокусировку и расфокусировку энергии на нулевом удалении через низкоамплитудные тела канала, а не более высокоскоростные ангидриты.



Рисунки 6 и 7 Нерегулярное освещение получается в результате искажений поля волн внутри мессинской толщи. Этот профиль говорит о низком качестве изображения после проведения миграции таких нерегулярно освещенных волн. Эффект гораздо менее выражен в направлении инлайна благодаря подстреливанию.

этот интервал приводит к рассеянию и искажению, которые проиллюстрированы с помощью простого трассирования лучей на модели на Рисунке 5.

Влияние этого искажения поля волн ясно видно на наших сейсмических данных, и что интересно, этот эффект всегда более явный при наблюдении вкрест профиля одноазимутальной 3D съемки с косой. Нерегулярные амплитуды, как результат искривления луча, дают зубчатый эффект, остающийся после миграции при гладком поле скоростей (Рисунок 6). При рассмотрении в направлении и инлайна, этот эффект меньше, поскольку более регулярное освещение достигается посредством подстрела аномалий скоростей, сравнимых с малой длиной волн (Рисунок 7). Возможность получения более регулярного освещения и лучшего изображения при помощи многоазимутальной регистрации логически следует из

этих наблюдений.

Первые шаги к многоазимутальным изображениям

Для того, чтобы узнать, можно ли реализовать эти новшества в дельте Нила, была проведена двух-азимутальная съемка в районе Западного Средиземноморья в 2003. как часть более крупной разведочной съемки, порядка 500 км² традиционных 3D данных были получены поверх, и перпендикулярно профилям существующей съемки. Параметры регистрации были похожи на данные более ранних работ, за исключением от азимута sailed azimuth. Оба набора данных были обработаны параллельно с использованием одной и той же схемы обработки.

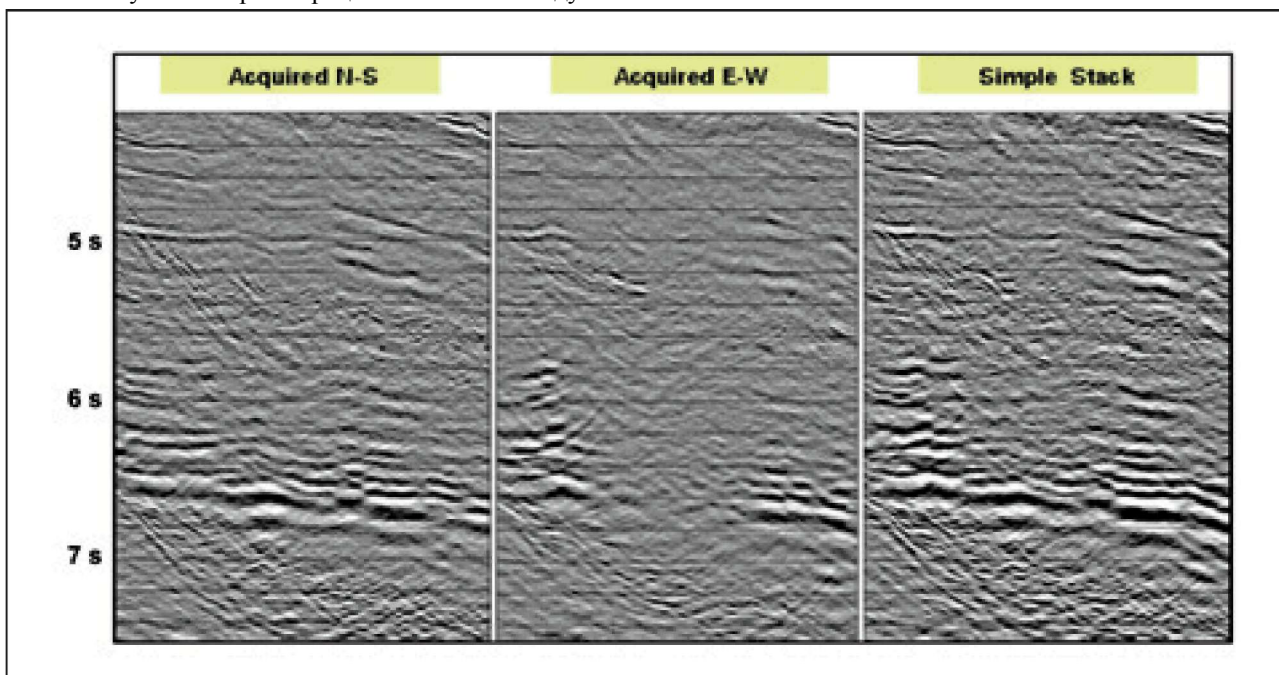


Рисунок 8 Простой суммарный разрез ортогональных данных 3D заполняет пробелы в освещении.

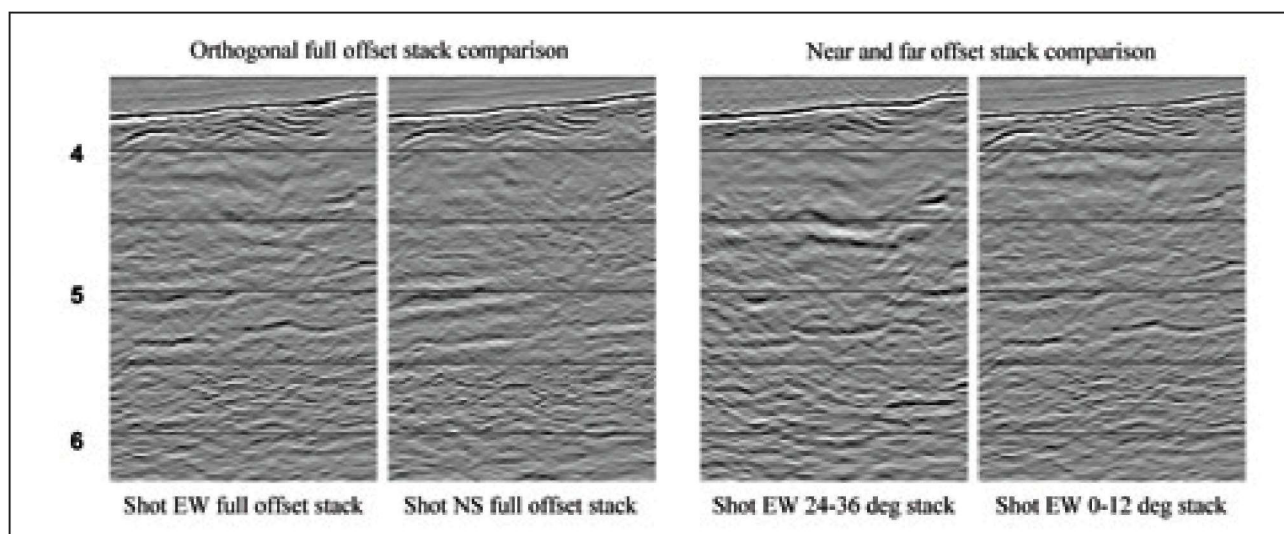


Рисунок 9 Ортогональные суммарные разрезы для всех наборов удалений кажутся более похожими друг на друга, чем пара для ближних и дальних углов для тех же азимутов.

На рисунке 8 показано, что ортогональная съемка 3D осветила землю совсем другим способом с различными типами шумов. И что важно, мы видим что простой процесс суммирования был достаточно устойчивым и дал улучшенное изображение с меньшим соотношением сигнал-шум. Ясно, что суммарный разрез никоим образом не идеален и мы можем сделать большее, чтобы улучшить эту процедуру – это является предметом следующей

статьи в этом номере (Rietveld et al.) – но не должно вызывать удивления, что суммирование разных азимутов должно быть устойчивой процедурой. Мы знаем благодаря десятилетнему опыту, что суммирование диапазона удалений в пределах одного азимута хорошо работает! Можно поспорить, что уже нет ничего трудного в выравнивании трасс с различными азимутами по сравнению с выравниванием трасс с разными удалениями. На рисунке 9 проиллюстрирован этот вопрос в другой точке в пределах двух-азимутальной съемки.

Шести-азимутальная съемка при разработке месторождения

Вдохновившись результатами двух-азимутальной съемки 2003, в конце 2004 года было получено 630 км² шести-азимутальной съемки. С точки зрения проведения работ, получение многоазимутальных данных очень простое и эффективное. Это уже обсуждалось в работах Rietveld et al. и Page et al. В этом томе. Целью этого исследования было получение сейсмических данных как можно более высокого качества на до-мессинской залежи в целях оценки и разработки. Геометрию съемки можно визуализировать в виде схематических лучевых диаграмм ОГТ – Рисунок 10. На практике, съемка проводилась с 10 косами, которые находились на расстоянии 100 м, поэтому азимутальная дискретизация менее частая чем показано на картинке с траекторией лучей. Графики распределения удаление-азимут показаны для двух ситуаций: нулевое отклонение косы от курса и отклонение косы. Поскольку в процессе миграции получают данные в некоторой окрестности объема входных трасс, распределение удаление-азимут после миграции на многоазимутальных данных должно рассматриваться скорее как на Рисунок 11, чем дискретное представление как на рисунке 10.

Поток обработки

Сложность строения и складчатость мессинского интервала вызывает резкие латеральные аномалии скоростей, и глубинная миграция до суммирования, теоретически, будет более предпочтительным методом отображения структуры. На практике, трудность построения сложной модели скорости препятствует широкому применению этого метода. Поэтому в настоящее время предпочитают

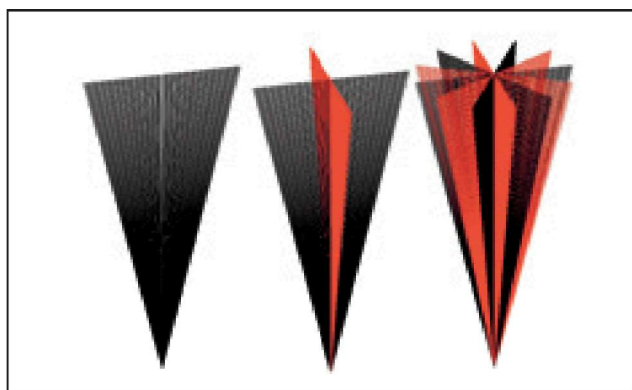
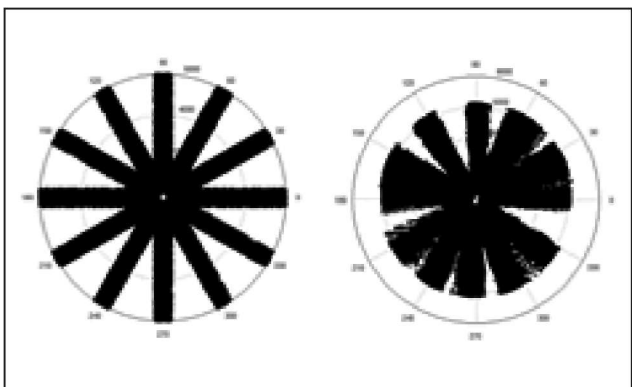


Рисунок 10 Одиночные, двойные и шести-азимутальные траектории лучей ОГТ.

Рисунок 11 Распределения удаление -азимут для десяти кос, с отклонением косы от курса и без него.



использовать поток обработки, в котором временная миграция до суммирования Кирхгофа является главным инструментом получения изображения. Для построения изображений всех азимутов было использовано одно гладкое поле скоростей. Основная философия обработки данных MAZ очень простая и имеет много общего с обработкой данных 4D. Все шесть азимутов проходят через одну и ту же установленную схему обработки с одними и теми же скоростями построения изображения. Остаточное выравнивание трассы проводится непосредственно перед суммированием. (Manning et al., 2006, Rietveld et al., 2006) Важно отметить, что в нашем случае, несмотря на освещение и вариации шума, большая часть улучшений в качестве изображения являются результатами простого суммирования с остаточным выравниванием, что дает дальнейшее улучшение. Можно проводить аналогии с традиционными суммарными разрезами для одного азимута, для которых остаточная кинематика дает улучшение по сравнению с ручной пикировкой скоростей суммирования.

Результаты и влияние на разработку месторождений

Заметные улучшения можно наблюдать при картировании коллектора, как над, так и под мессинием. Под мессинием, были откартированы системы каналов с гораздо большей детальностью и надежностью. Это привело к лучшему пониманию структурных элементов системы (Рисунок 12). Это напрямую вносит вклад в описание статических моделей коллекторов. Получение данных ВСП (вертикального сейсмического профиля) дало высококачественную привязку к сейсмическим данным и позволяет улучшить предсказания эффективной мощности залежи по сейсмическим данным. Это в свою очередь, ведет к получению более эффективной оценки и разработки программы бурения. Улучшения в латеральном разрешении привели к перемещению оценочной скважины с целью избежать 'линеамента' ранее некартированному на одноазимутальных данных (Рисунок 13). Разбуривание в этой точке могло бы, в лучшем случае означать трудности корреляции с сейсмическими данными и

в худшем случае повторного бурения при стоимости \$10-20 миллионов. Одно это обосновало сейсмическую программу. Разнообразие и дискретизация азимутов также может стать ключевым вопросом в понимании диапазона неоднозначности строения недр. Эта неоднозначность относится ко всем измерениям – от предсказания порового давления до привязки скважины к объему газа в залежи. Например, для получения шести чувствительностей, представляющих диапазон возможных результатов предсказаний глубин можно использовать шесть значений скоростей. Однако, все эти данные являются важным вопросом управления данными. Каждый азимут включает один полный суммарный разрез, несколько разрезов по углам, и 'разрез разрезов'. Это дает более 30 основных наборов данных, которые надо загрузить в рабочую станцию. Разнообразные кубы атрибутов, такие как AI дополняют проблем к управлению данными. При таком большом числе данных, различные потоки обработки применяются к разным задачам, например планированию скважин, где небольшие под-кубы для каждого азимута и частичные суммарные разрезы для этих азимутов можно просматривать последовательно в таких программах как Geoprobe. Анализ данных продолжается с целью сокращения числа необходимых данных. Например, для представления всего диапазона достоверности может быть достаточно проанализировать только один минимум, скорее всего, и максимум. Идентификация таких моментов для каждой задачи является ключевой. С большими усилиями, которые сейчас тратятся на понимание азимутальных вариаций изображения и скорости, другие возможности представляются сами собой. Азимутальные вариации свойств пород и влияние их на привязки сейсмики к скважинам сейчас находятся под прицелом.

Улучшенные изображения резервуара на ранней стадии разработки месторождения повлияет на всю программу оценки и разработки. Ранние инвестиции на получение изображений в десятки миллионов долларов помогут оптимизировать и сократить риски программ разработки, стоимостью несколько миллиардов долларов.

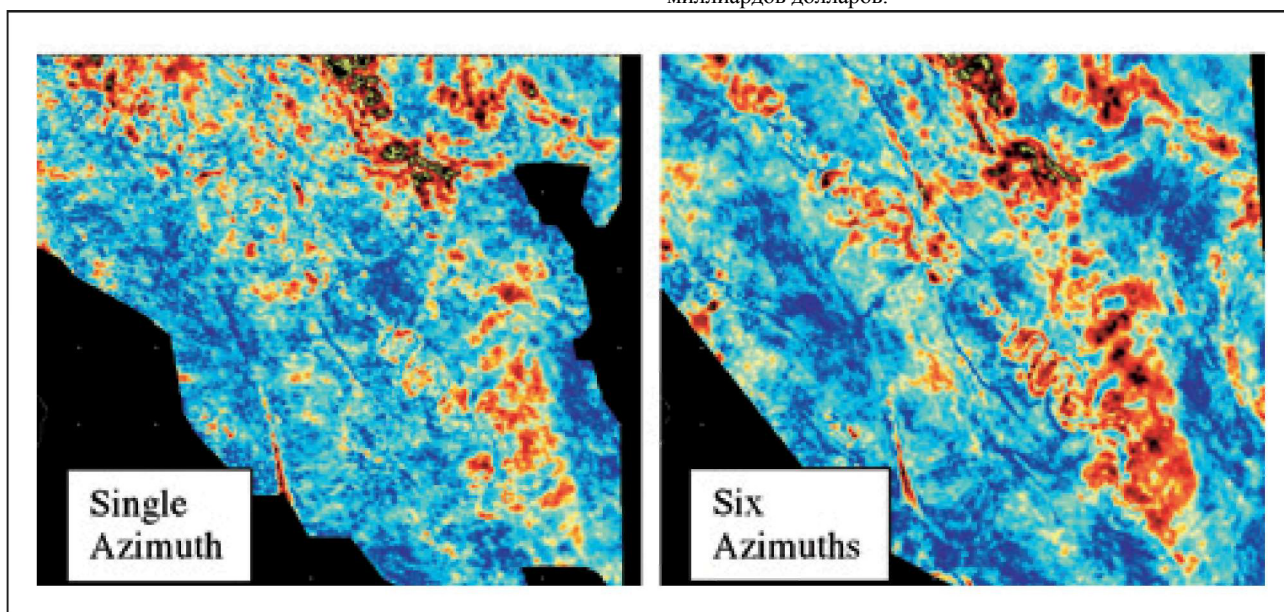


Рисунок 12 Извлеченные из интерпретированного горизонта среднеквадратические амплитуды на глубине около 5.5 км. Улучшенное латеральное разрешение, освещение и соотношение сигнал-шум позволяют улучшить изображение этих систем каналов. Детали, необходимые для принятия решений по разработке месторождений теперь можно откартировать с большей надежностью.

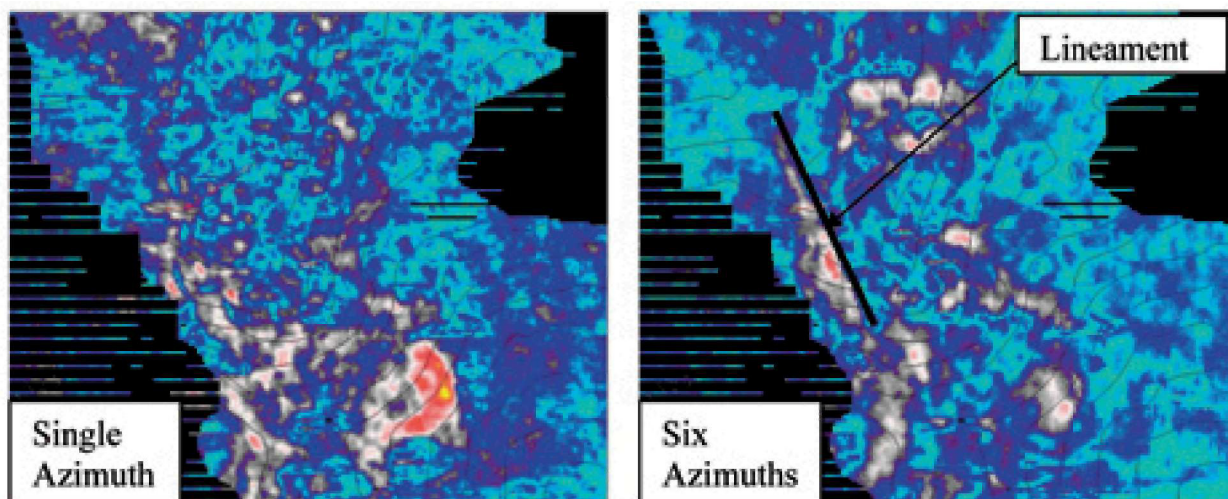


Рисунок 13 Извлеченные среднеквадратические амплитуды из одного из целевых горизонтов до-мессинской толщи. Улучшенное латеральное разрешение помогает идентифицировать 'линеament', что ведет к перемещению оценочной скважины. Лучшее понимание геологии недр и структуры улучшит циклы оценки и разработки посредством более разумного расположения и сбора нужных данных.

Многоазимутальная разведочная съемка

Промысловые работы, описанные выше, были проведены для лучшего картирования системы каналов, которые уже были видны на одноазимутальных данных. Как многоазимутальная методика будет себя оказывать в областях с плохим качеством данных (например, западный конец профиля, показанного на рисунке 1), где невозможно идентифицировать целевые объекты для разведки на основе традиционных данных 3D?

В 2006 году, две «трудные области» общей площадью около 2600 км² были покрыты смесью трех и шести-азимутальной сети MAZ съемки. Несмотря на то, что все еще остается много, что требуется сделать для обработки этих данных и интерпретация продолжается, ранние результаты соответствуют ожиданиям – лучшее освещение, лучшее соотношение сигнал-шум, лучшее подавление кратных, и лучшая латеральная разрешенность. (Рисунок 14). Одним из преимуществ методики MAZ является возможность добавлять кратность данных с постоянным инкрементом. Во всех описанных здесь съемках, исходная съемка 3D использовалась как съемка для одного из азимутов. В съемках, где у нас было всего три азимута, у нас есть выбор вернуться на более раннюю стадию и получить еще три.

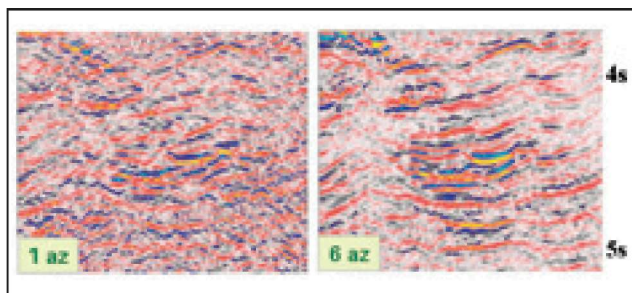


Рисунок 14 Данные, обработанные на борту. Лучшее освещение сложных кратных волн, а также лучшее освещение всего разреза дает лучшее изображение системы каналов.

Почему много-азимутальные работы, а не другие широкоазимутальные методики?

Нет сомнений, что суммирование диапазона азимутов и удалений улучшает наше изображение, но зачем использовать MAZ, а не другую геометрию наблюдений, которая также может дать разнообразие азимутов и удалений. Так как области съемки находятся на глубоководье без инфраструктуры, конфигурации с буксируемым кабелем считались операционно и экономически более привлекательными, чем океаническими донными кабелями/узлами. Здесь мы сравниваем MAZ с широкоугольной съемкой с буксируемой косой на нескольких судах (WATS), недавно успешно примененной в Мексиканском заливе (Michell et al., 2006).

В идеале, нам бы хотелось получить смоделированный отклик для обеих геометрий с использованием синтетических данных на основе конечных разностей (например, Regone 2006). На практике, сложная, складчатая и сильно изменчивая геология делает трудным построением модели, достаточно хорошей для получения реалистичных синтетических данных (и синтетического шума) по которым можно выполнять значимые сравнения. При решении какой тип геометрии мы будем использовать, существует много аспектов, которые надо учесть, включая стоимость и сложность использования. Без помощи данных моделирования, мы рассмотрели как две схемы дискретизации, приведенные на рисунке 15 будут отображать недра и решили, что оба метода имеют свои достоинства и несомненно помогут нам при решении задач построения изображений.

Мы верим, что обе 'расстановки' улучшат освещение и подавление шума, и что оба метода являются недо-дискретизированными версиями идеально полного дискретизированного волнового поля (Vermeer 1998). Полное сравнение и обсуждения разницы дискретизации лежит за рамками этой статьи и скорее всего будет темой будущих публикаций. В конечном счете, MAZ кажется более эффективной с точки зрения проведения работ и менее рискованным выбором, основанным на потоках обработки для одного азимута.

- Рабочая эффективность схемы регистрации MAZ связана с планом уменьшения риска получения некачественных данных во временных и бюджетных рамках.

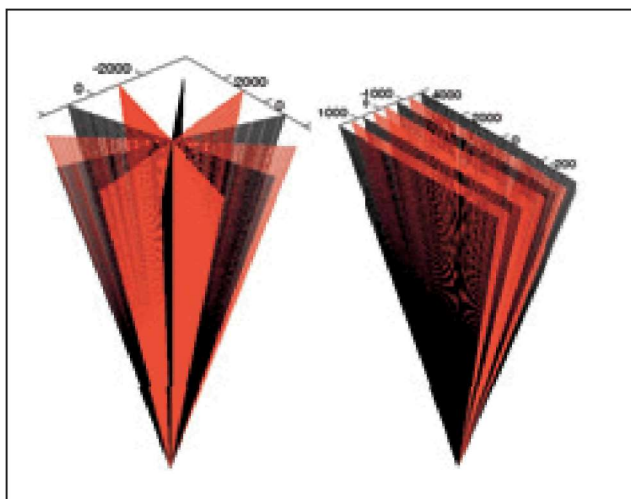


Рисунок 15 Простая визуализация траектории лучей для ОГТ MAZ и WATS. На практике, отклонение косы изменит этот рисунок, как показано на Рисунке 11.

- Эффективность обработки MAZ на основе доказанных последовательностей обработки узко-азимутальных данных дает уверенность в положительном результате.
- MAZ считается менее рискованным, чем WATS, который еще требуется испытать в поле и отличается незрелым набором процедур обработки, которые надо развивать.
- Геометрия типа WATS уже продемонстрировала подавление кратных дифракций в Норвегии (Keggin et al., 2002) и схожие преимущества уже наблюдались при тестировании двух-азимутальных данных 2003 в Египте. Это дает нам уверенность в результатах шести-азимутальной съемки.
- Подход к построению изображений во временном масштабе был состоятельным для хорошо проверенной стратегии обработки узкоазимутальных данных.

Возможность использования существующих данных и получения данных MAZ способом увеличения числа азимутов также весьма привлекательна. С помощью набора двух-азимутальных данных 2003 года для того, чтобы убедиться в этом методе, еще четыре азимута было предложено получить как способ понижения риска. Логика проста: два азимута улучшают данные, шесть азимутов будут еще лучше. Цикл обработки установлен и для получения улучшенного качества данных не требуется разработка новой технологии.

Выводы

Получаемые изображения высокой кратности и много-азимутальная сейсмическая методика является ключевой частью стратегии ВР в Египте при разведке и разработке.

- Улучшено соотношение сигнал-шум. В частности, шум кратных дифракций успешно подавлен.
- Достигнуто более равномерное освещение. Это дало более надежные и детальные карты амплитуд/атрибутов, с помощью которых мы можем откартировать системы до-мессинских коллекторов с большей степенью надежности. Для глубин до 6 км можно получить надежные карты атрибутов, которые позволят нам

идентифицировать и убрать риск определения системы резервуаров, которые были менее заметны на одно-азимутальных данных.

- Увеличение латерального разрешения заметно на много-азимутальных данных.
- Регистрация и обработка являются простыми с точки зрения проведения работ и эффективными.
- Многоазимутальное суммирование по меньшей мере устойчиво как традиционное суммирование одноазимутальных данных и метод не зависит от разработки наиновейших технологий.

Хотя метод много-азимутальной регистрации крайне эффективен в Дельте Нила, мы также признаем потенциал других многоазимутальных методик. На мелководье и для съемок вблизи областей с инфраструктурой, мы считаем геометрию ОВС оптимальным способом получения высококачественных широкоазимутальных сейсмических данных.

Благодарности

Авторы хотели бы выразить благодарность руководству ВР за их вклад и поддержку, Ed Jones за его проникновение в суть качества данных и их улучшение, PGS за получение и обработку данных, и ВР, RWE Dea, и EGAS за разрешение на публикацию данных результатов.

Литература

- Arntsen, B. and Thompson, M. [2003] The Importance of Wide Azimuth in Imaging, *65th EAGE Mtg.*, Abstract A40.
- Bouska, J. and Johnston, R. [2005] The first 3D/4C OBC in the Caspian sea: Acquisition design and processing strategy. *The Leading Edge*, 9, 910-921.
- Gaus, D. and Hegna, S. [2003] Improved Imaging by Pre Stack Depth Migration of Multi-Azimuth Towed Streamer Seismic Data. *65th EAGE Mtg.*, Abstract C02.
- Hsu, K., Ryan T., and Cita, M. [1973] Late Miocene desiccation of the Mediterranean. *Nature*, 242(5395), 240-244.
- Keggin, J., Widmaier M., Hegna, S., and Kjos, E. [2002] Attenuation of multiple diffractions by multi-azimuth streamer acquisition. *64th EAGE Ann. Mtg., Florence*, Abstract F039.
- Manning, E., Keggin, J., Rietveld, W., and Benson, M. [2006] Multi-Azimuth (MAZ) towed streamer data processing flow from the Nile Delta. *76th SEG Ann. Mtg.*, Abstract SPNA 3.4.
- Michell, S., Shoshitaishvili, E., Chergotis, D., Sharp, A., and Etgen, J. [2006] Wide Azimuth Streamer Imaging of Mad Dog; Have We Finally Solved the Subsalt Imaging Problem? *76th SEG Ann. Mtg.*, Abstract SS2.2.
- Regone, C. [2006] Using 3D finite difference modeling to design wide azimuth surveys for improved subsalt imaging. *76th SEG Ann. Mtg.*, Abstract SS2.2.
- Rogno, H., Kristensen A., and Amundsen L. [1999] The Staffjord 3D, 4C OBC Survey. *The Leading Edge*, 11.
- Rietveld, W., Keggin, J., Manning, E., Benson, M., Burke, A., and Halim, A. [2006] Multi-Azimuth Streamer Acquisition - Initial data analysis. *76th SEG Ann. Mtg.*, SPNA 3.3.
- Vermeer, G.J.O. [1998] 3-D symmetric sampling. *Geophysics*, 63, 1629-1647.