

# Морская сейсморазведка

## From narrow-azimuth to wide- and rich-azimuth acquisition in the Gulf of Mexico

### Получение узко-, широко- и много- азимутальных данных в Мексиканском заливе

Nick Moldoveanu и Mark Egan, Schlumberger WesternGeco, Отчет Хьюстона по опыту работ с использованием широко- и много- азимутальных данных, полученных при морских исследованиях.

Подсолевые отложения различного структурного типа составляют большую часть глубоководной акватории Мексиканского залива. Структура отложений изменяется от простых солевых пластин до соляных куполов и тел с очень сложным строением с множественными нависающими краями. В результате трехмерной сейсморазведки, проведенной на глубоководной части Мексиканского залива за последнее десятилетие, были сделаны существенные нефтяные открытия, и большинство залежей было найдено в подсолевых отложениях или внутри солевых тел. Прогресс в обработке данных в течение этого периода, особенно для сейсмических средств воспроизведения изображений, больше уделяли внимание интерпретации сложных структур в подсолевых зонах. Atlantis, Mad Dog, Tahiti, Shenzi, Puma, Neptune и Conger, являются только некоторыми из этих подсолевых структур, которые совместно содержат запасы эквивалентные многим миллиардам баррелей нефти.

Хотя некоторые из этих открытий были сделаны несколько лет назад, только часть всех ресурсов была разработана или находится в разработке. Главные причины этой задержки касаются проблем, с которыми сталкивается сейсморазведка, бурение, а также стоимость производственной инфраструктуры для глубоководных подсолевых отложений.

Качество сейсмических данных, требуемых для глубоководных подсолевых отложений отвечало целям поисково-разведочных работ, но, в большинстве случаев, не было достаточным для построения точной модели разработки резервуара. Главные проблемы для сейсмической интерпретации данных:

- Неполный охват месторождения
- Низкое соотношение сигнал-помеха для подсолевых случаев
- Недостаточная разрешающая способность сейсморазведки

Сейсмическая промышленность, нефтяные компании, и научные университеты пробовали решить эти задачи главным образом, улучшая алгоритмы обработки и интерпретации. Развитие методики построения скоростной модели основывается на применении томографии, так же, как тонкости трехмерной миграции по глубине до суммирования Кирхгоффа является ключом создания эффективных алгоритмов миграции в глубинном представлении. Существенные усилия были также направлены на многократное ослабление и, как результат - подавление кратных волн вызванных поверхностными условиями (SRME), метод был разработан для 2Д, и позднее, 3Д данных.

SMAART JV, совместное предприятие BHP, BP, Chevron, и Texaco, имело целью улучшить качество сейсмических данных для подсолевых отложений, используя новые SRME- типовые алгоритмы

для многократного ослабления и исследования новых способов получения сейсмических данных в глубоководной части Мексиканского залива. В статье, представленной в 2002 EAGE, на конференции во Флоренции (Pafhnenholz и др., 2002) SMAART JV объединил их открытия.

- Традиционные узко-азимутальные морские сейсмические данные, полученные в неохваченных зонах ниже осложненной части.
- Неосвещенные области могут быть уменьшены значительно путем регистрации широко-азимутальных сейсмических данных.
- Технологии вертикального и океанского донного кабеля (OBC) должны обеспечить адекватные широко-азимутальные данные, но имеются материальные и экономические проблемы на ультра больших глубинах для крупных съемок.
- Создание широко-азимутальных технологий требует объединенных усилий нефтяных компаний с сейсмическими подрядными организациями.

Widmaier и др., (2002) сообщал о важном прикладном эксперименте, проведенном в 2001 году. Он показал, что множественные дифракции могли быть ослаблены посредством сейсмического моделирования и получением небольшого набора широко-азимутальных данных. Улучшение подбора выборки азимута и выноса, так же как расчет большой кратности, способствует ослаблению преломленных кратных суммированием по ОСТ.

Сейсмической промышленности и нефтяным компаниям требуется менее четырех лет для того, чтобы получить данные широко азимутальных съемок в Мексиканском заливе. BP с подрядчиком сейсмических проектов Veritas провел первую широко азимутальную съемку буксируемыми косами Мексиканского залива - по площади Mad Dog в конце 2004 г. и начале 2005 г.. Shell провел съемку широко азимутальными буксируемыми косами в начале 2006 и BHP и партнеры, провели много азимутальную буксированную съемку в течение весны и лета 2006 по площади Shenzi. Эти важные события были освещены на собрании ОБЩЕСТВА ГЕОФИЗИКОВ-РАЗВЕДЧИКОВ в 2006 г. WesternGeco был сейсмическим подрядчиком и для компаний Shell и BHP, чьи широко- азимутальные съемки потребуются для краткого рассмотрения геометрии широко-азимутальных наземных и OBC съемок.

#### Наземная, OBC и OBS широко-азимутальная геометрия

Аспектное отношение для сейсморазведки определено как максимальное удаление по crossline, разделенное на максимальное удаление по inline (Vermeier, 2002). Съемки проводили с условием, что если соотношение

# Морская сейсморазведка

больше чем 0.5, предполагают широко-азимутальную съемку. Мы иллюстрируем в этой теме три широко-азимутальные съемки для наземных, OBS, и донных систем (OBS или точка)

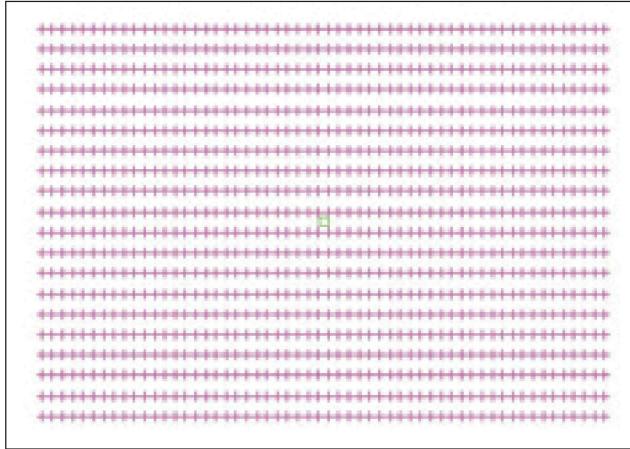


Рис 1а Геометрия наземных наблюдений.

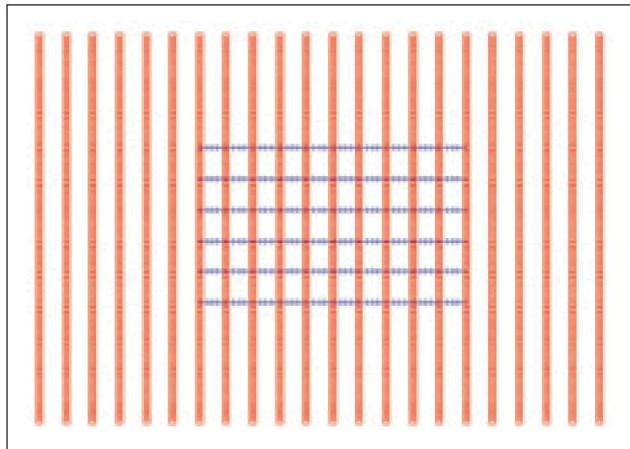


Рис 1б Геометрия OBS наблюдений.

Активные перекрытия для наземной, и съемки донной косой(OBS) показаны на рисунке 1. перекрытия для наземной съемки - один профиль приемников и для морской съемки донными косами (OBS) все наблюдения приемников будут проходить без перекрытий. Геометрия съемки OBS – региональная геометрия с каждым приемником, окруженным регулярной сеткой точек расположения источника (иллюстрация 2). Этот тип геометрии идеален для малых съемок, где поправка приемника не должна быть смещена. Сравнение распределения азимута/смещения (круговая диаграмма) показана на рисунке 3. Можно отметить, что узлы съемки имеют лучшее распределение азимутального смещения, чем у соотношения 1.

На ультра больших глубинах Мексиканского залива, использование OBS или узловой системы является или невыполнимым или неэкономным, вынуждая сейсмическую промышленность и нефтяные компании, обратить свой взгляд на широко азимутальные буксируемые источники.

## Реализация широко-азимутального получения



Рис 2 Геометрия OBS (узловые) активных наблюдений: приемник (синий) и источник (красный).

получения. Полученные параметры даются в Таблице 1.

Параметры	Земля	OBC	OBS (точечный)
Шаг приемников	50 м	50 м	300 м
Шаг профиля приемников	100 м	400 м	300 м
Шаг источников	50 м	50 м	50 м
Шаг профилей источников	200 м	250 м	50 м
Максимальный inline вынос	1400 м	4000 м	7000 м
Максимальный crossline вынос	1000 м	3500 м	7000 м
Активное перекрытие приемников	20 профилей x 56 приемников	6 профилей x 50 приемников	40 профилей x 40 приемников
Перекрытия	1 профиль приемников	6 профилей приемников	Константа
Соотношение	0.714	0.87	1
Максимальная кратность	70	60	432

Таблица 1 Параметры съемки для много азимутальной съемки: Земля, OBC, и OBS (узел).

## Морская сейсморазведка

Естественное увеличение традиционных узко-азимутальных морских сейсмических исследований, получаемых одним судном, приводит к широко азимутальным исследованиям. Используя ту же самую геометрию морских исследований, съемку проводят несколько раз в различных направлениях (Keggan и др., 2006). Азимутальное распределение смещения для общей мульти азимутальной съемки, которое стрелялось в шести направлениях показано на рисунке 4. В Мексиканском заливе этот тип буксируемого источника до этого не использовался. Однако, на некоторых проектах в Мексиканском заливе, две или более съемки были получены в различных направлениях, и эти съемки могли быть подвергнуты переработке как мульти азимутальные съемки (Karoog, 2006).

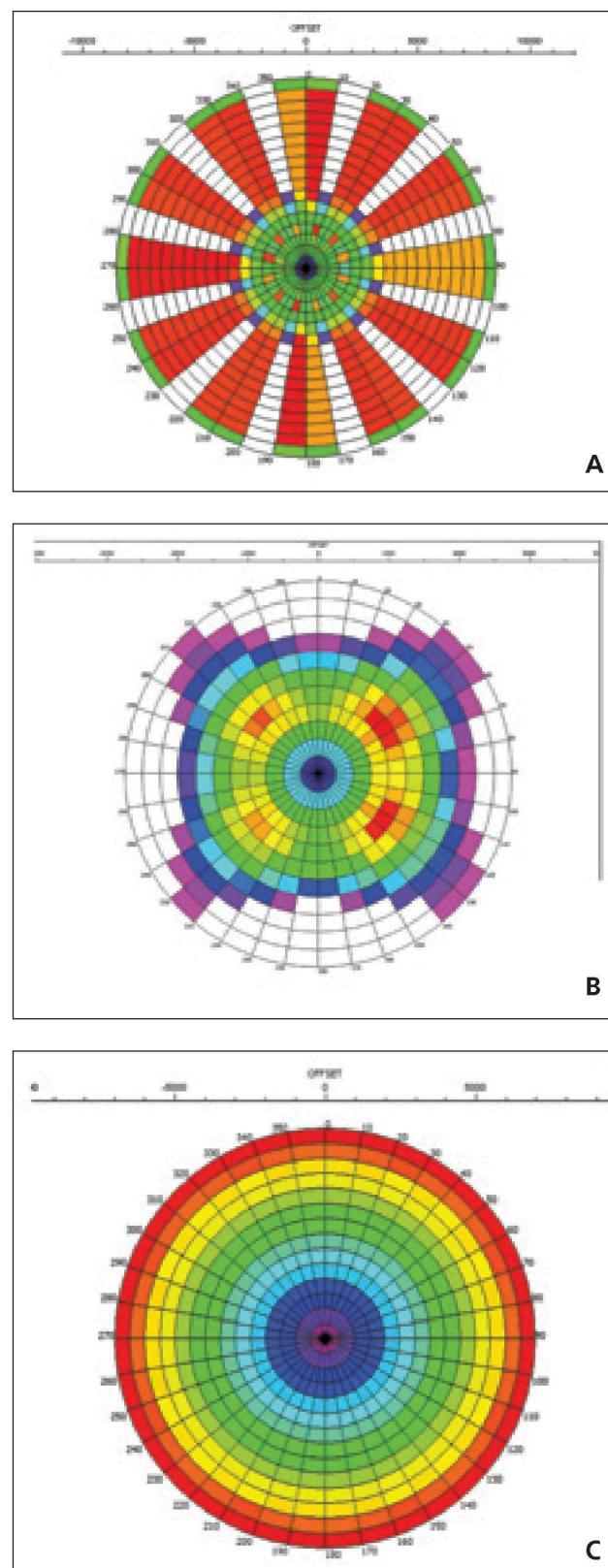
Широко азимутальные исследования с буксируемыми сейсмическими косами требуют, по крайней мере, одного судна - буксира и двух судов источников. Пример широко азимутального получения данных буксируемыми косами с использованием одного судна - буксира, и двух судов источников был представлен Коркораном и др., (2006) и показан на рисунке 5. Параметры съемки даны в Таблице 2.

Каждый профиль пунктов взрыва съемки требует шесть временных замеров с косой, расположенной в 200 м., 1400 м., и 2600 м. на каждой стороне линии пунктов взрыва. Точки расположения источника по профилю пунктов взрыва повторены шесть раз. Круговая диаграмма для этой съемки показана на рисунке 6.

Мы будем использовать этот пример широко азимутальных исследований с буксируемыми сейсмическими косами, чтобы объяснить главные параметры, которые определяют строение и стоимость съемки. Критические параметры построения - максимальное удаление по кросслайну и шаг по профилю пунктов взрыва, и они определяются на основе синтетического моделирования и миграции синтетических данных (Коркоран и другие). Выделение целевого объекта и многократное ослабление - главные критерии для определения результатов моделирования.

Число кос на судно	8
Длина косы	9000
Расстояние между косами	150 м
Интервал приемников	12.5 м
Число источников на первом судне	2
Число источников на втором судне	2
Интервал источников	37.5 м
Шаг по профилю источников	450 м
Выборка возбуждения	150 м x 450 м
Максимальный вынос (инлайн)	9300 м
Максимальный вынос (кросслайн)	4150 м
Число проходов	6
Соотношение	0.44 м

**Таблица 2** Основные параметры для много азимутальной съемки буксируемых источников.



**Рис 3** Круговая диаграмма для (a) Наземной съемки, (b) OBS съемки (c), OBS съемки.

## Морская сейсморазведка

Максимальный вынос по кроссслайну, поделенный на определенную ширину косы, определяет число проходов, или то, сколько происходит съемка в районе. Для этого примера широко-азимутальной геометрии получения данных, выносные линии применялись с обеих сторон линии пунктов взрыва, и это удваивает число повторений. Применение линий выноса с обеих сторон линии пунктов взрыва означает, теоретически, что обратные азимуты собраны, и они избыточны для формирования изображений. Однако, наземные и морские съемки ОВС, имеют избыточные азимуты – обычно потому, что они могут улучшить отношение сигнал-помеха, уменьшая влияния получения данных, и облегчая вычисление статических поправок.

Шаг по профилю пунктов взрыва и шаг расстановки приемников определяют выборку источника. Плотная выборка источника благоприятна для ослабления кратных волн и формирования изображений. Выборка источника может быть улучшена, уменьшением шага по профилю пунктов взрыва. Последовательные источники, в границах отстрела выборки по инлайну, которая является равной основным временам интервалов выстрела числа источников. А возможный шаг, для улучшения действующего осуществления выборки источника и состоит в отстреле двух источников, одновременно используя технологию кодировки источника и затем сортировка источников при обработке. Одновременные взрывы, стреляющиеся

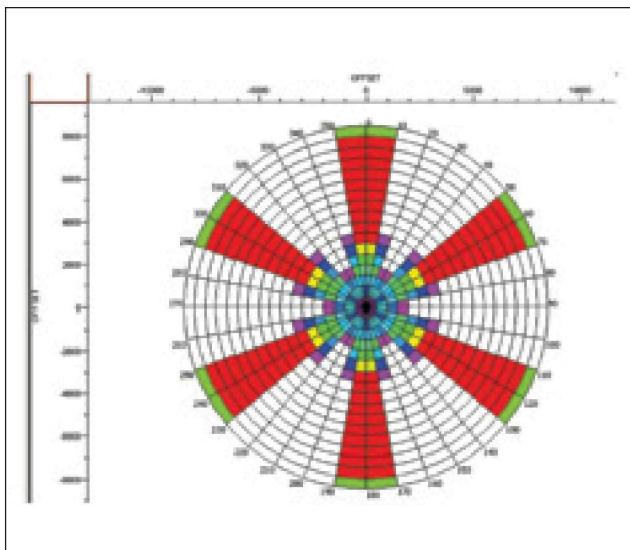


Рис 4 Круговая диаграмма для 6 азимутальной съемки.

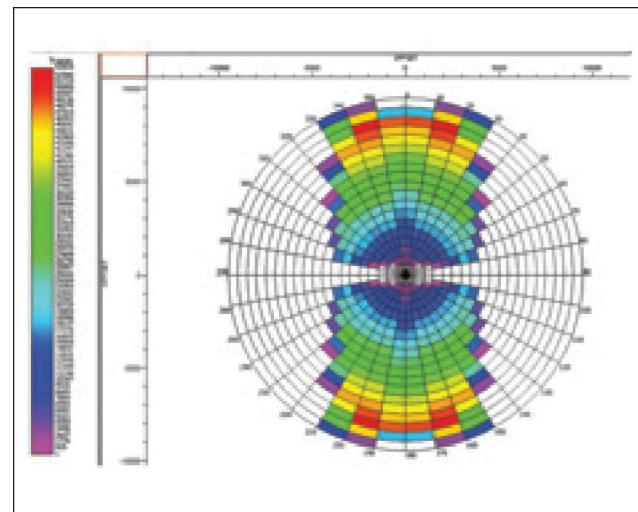


Рис 6 Круговая диаграмма для много азимутальной морской съемки

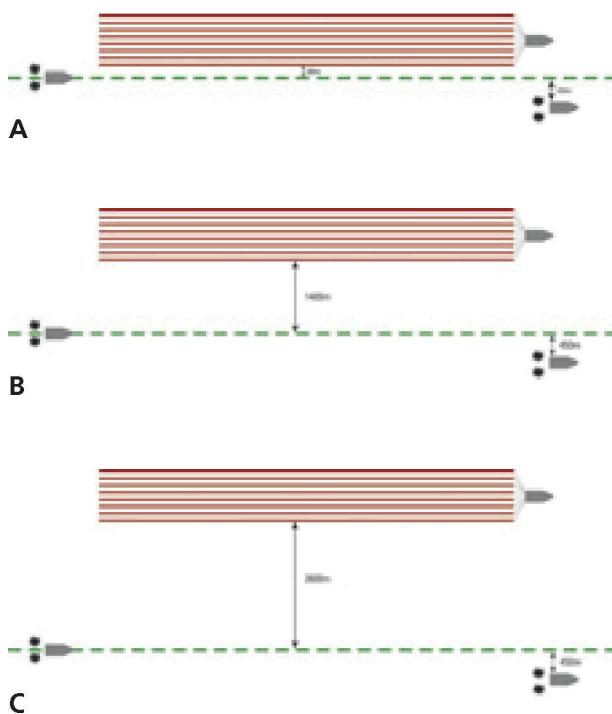


Рис 5 Много азимутальная геометрия морскими косами с 6 проходами.

## Морская сейсморазведка

Стоимость широко азимутальных исследований с буксируемыми сейсмическими косами пропорционально зависит от числа повторений и числа профилей пунктов взрыва. Широко-азимутальная съемка, созданная для целей поисково-разведочных работ может потребовать меньшего числа измерений и большего интервала профилирования. Как сравнить широко азимутальные исследования буксируемыми сейсмическими косами с наземными исследованиями и съемкой ОВС? Одно существенное различие вызвано ортогональной геометрией, связанной с наземными исследованиями и параллельной геометрией съемки ОВС, из-за буксировочных кос.

Это показано на рисунке 7 с помощью декомпозиции абсолютного вектора смещения для инлайн и кросслайн компоненты наземных, ОВС, OBS, и широко-азимутальных съемок. Отношение изображения наземной съемки и съемки ОВС является большим, чем у широко азимутальной буксируемой съемки и это отражено на круговой диаграмме. Основываясь на критерии соотношения 0.5, исследования буксируемыми косами, которое мы анализировали, не является широко-азимутальной съемкой. Существует дефицит статистических данных для подтверждения, может ли этот критерий быть принят для съемок буксируемыми источниками, и мы продолжаем классифицировать описанную съемку как широкоазимутальную. Соотношение для традиционной съемки буксируемых источников, с геометрией, описанной в Таблице 1 - только 0.07, и классификация описанного исследования, как широко азимутального полностью оправдано.

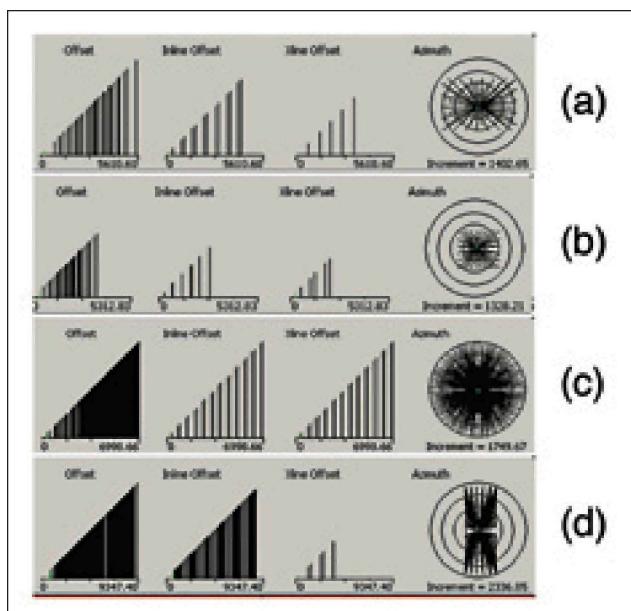


Рис 7 Абсолютный вектор (a) наземный, (b) OBC, and (c) OBS много азимутальной съемки морскими косами.

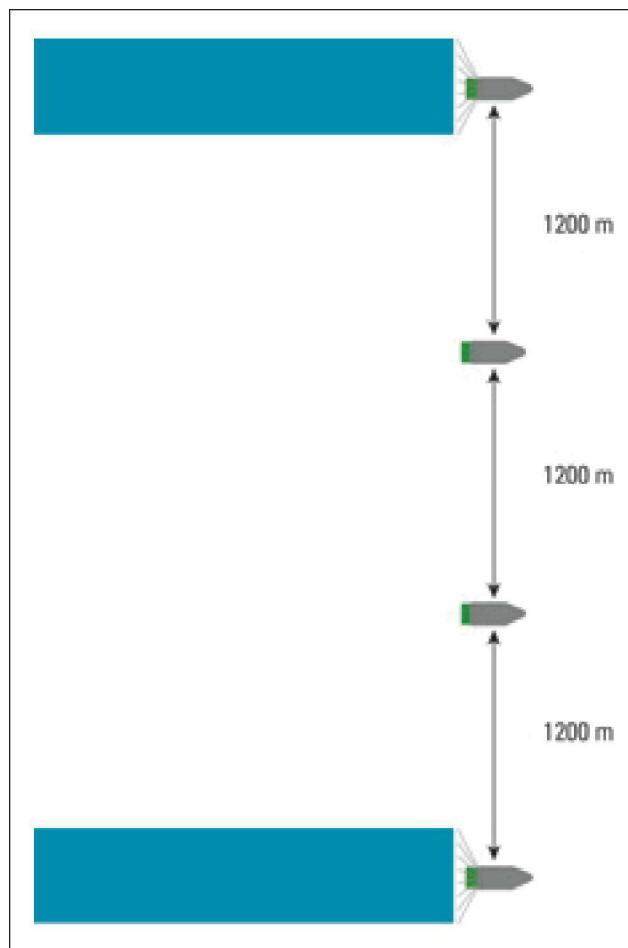


Рис 8 Широко-азимутальная геометрия для двух буксиров и двух судов источников.

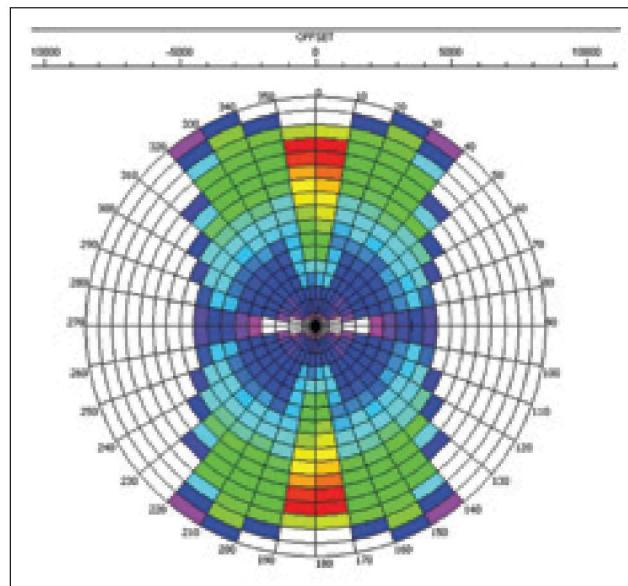


Рис 9 Круговая диаграмма для двух буксиров и двух судов источников.

# Морская сейсморазведка

Эффективность получения данных широко-азимутальных съемок может быть увеличена, если используются два сейсмических судна буксира и два судна источников. Такая конфигурация была предложена Sukup (2002) и представлена на рисунке 8. Если эта конфигурация используется вместо шести проходов трех судов, то только требуются два отстrela в противоположных направлениях. Круговая диаграмма показана на рисунке 9.

## Shenzi - пример много-азимутальных работ

Широко азимутальные сейсмические морские исследования буксируемыми косами это объединение широко азимутального получения данных с широко азимутальной геометрией. Этот тип получения данных был предложен Howard в 2004 году и применен в

Мексиканском заливе по площади Shenzi. Подсолевой резервуар Shenzi был обнаружен интерпретацией традиционных морских данных; новые сейсмические данные были обязаны улучшить выделение, отношение сигнал-помеха и разрешающую способность подсолевых особенностей. Были проведены детальная оценка съемки и анализ технического проекта, которые заставили прийти к заключению, что, для резервуара Shenzi, много-азимутальные решения были самыми подходящими сложному строению резервуара, тектоническим экранам, влиянию бурового оборудования в районе исследований, и сильных морских течениям (Говард и Moldoveanu, 2006). Съемка была проведена судном буксиром и двумя судами источника. Основные применяемые параметры перечислены в Таблице 3. Каждое судно, включая судно с косой, имело группу источников, и последовательность отработки профиля была последовательна.

Много-азимутальные исследования были проведены, в трех заданных направлениях,  $30^\circ$ ,  $90^\circ$ , и  $150^\circ$ , каждое направление, отстреливалось в двух проходах. Пункты взрыва были распределены по 115 м сетке на 300 м., и каждое размещение пункта взрыва было повторено три раза или девять раз. Регистрация в течение поворотов судна генерирует сейсмические данные с широко-азимутальным распределением и может также расширить площадь съемки. Это попосчитали полезным для съемки Shenzi, и сейсмические данные были получены во время смены профиля. Круговая диаграмма для широко -азимутальной съемки Shenzi показана на рисунке 10, и это иллюстрирует преимущества непрерывного получения много азимутальных данных

Число кос	10
Длина косы	7000 м
Расстояние между косами	120 м
Число источников	3
Основной шаг возбуждения	38.5
Шаг между источниками на профиле	300 м
Дискретизация источника	115.5 x 300 м
Максимальный inline вынос	8200 м
Максимальный crossline вынос	1800 м

Таблица 3 Основные параметры съемки Shenzi

в

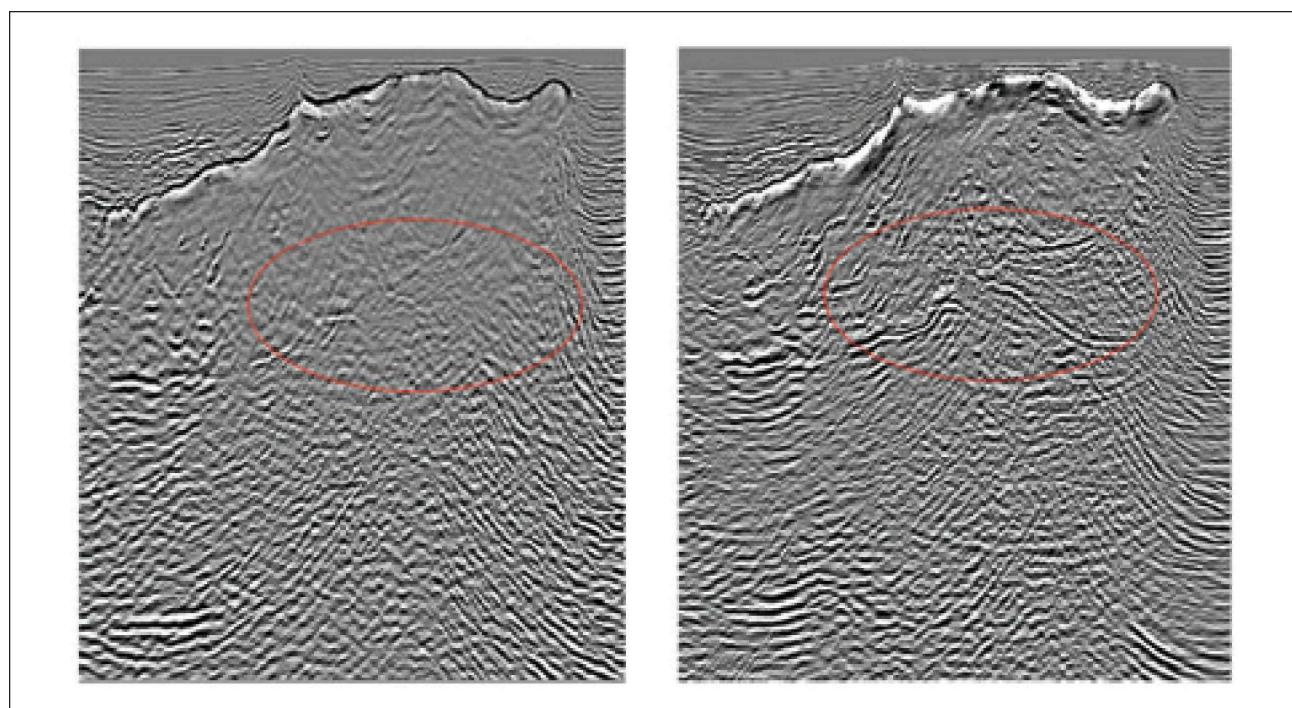


Рис 11 Сравнение между обработкой узко-азимутальных данных с подавлением кратных волн и миграцией (слева) и много азимутальной обработкой (справа) с миграцией, но без подавления кратных волн. Использовались одинаковые скорости.

## Морская сейсморазведка

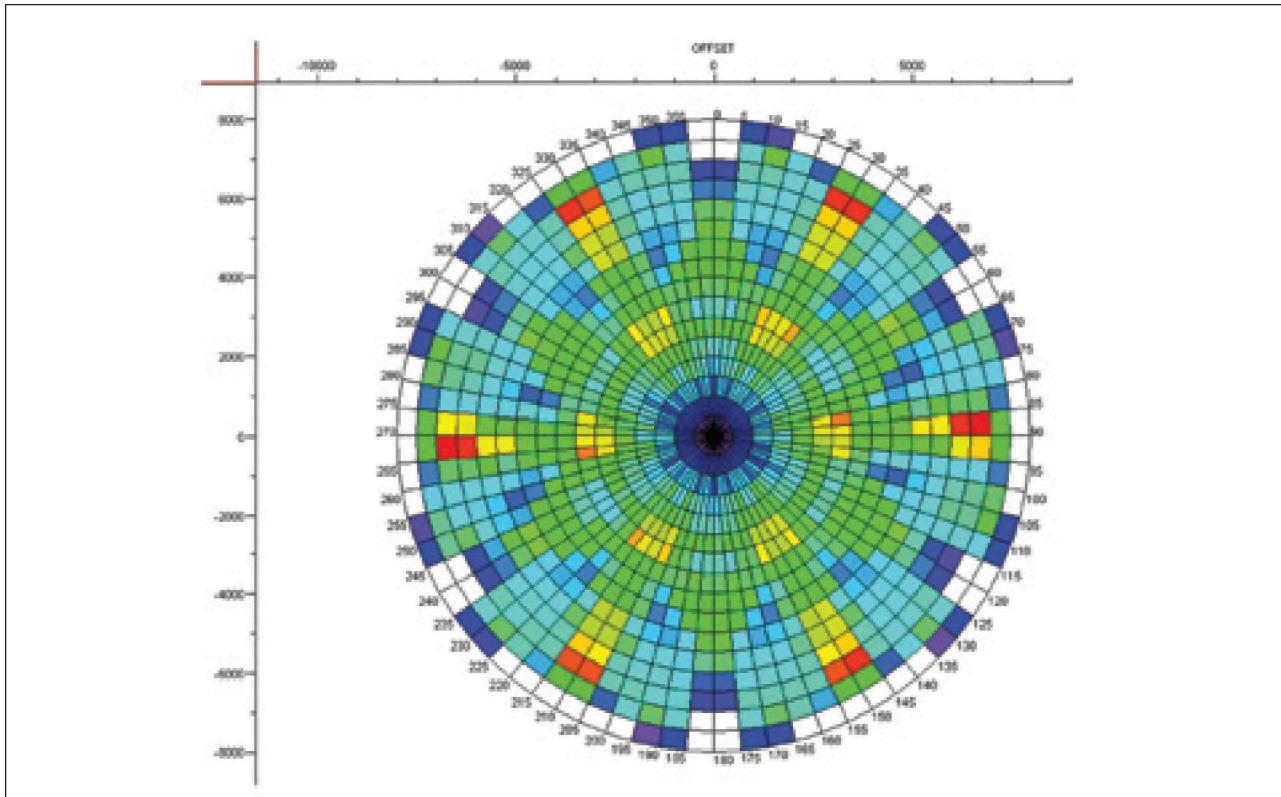


Рисунок 10 Круговая диаграмма для много-азимутальной морской съемки буксируемыми косами.

Доказанные преимущества	Почему?
Улучшение соотношения сигнал- помеха в подсолевых отложениях	Лучшее ослабление кратных волн и других регулярных помех из-за: - Изменчивости кратных (времен пробега) с азимутом - Изменчивости регулярных помех с азимутом - Непрерывности азимутов (не дискретные азимуты) - Очень высокой кратности миграции до суммирования - Улучшенного осуществления выборки источника для многократного ослабления – Улучшения регуляризации данных
Улучшение описания резервуара	Траектория лучей от различных азимутов
Эффективная миграция, базирующаяся на WEM	Повторяемость взрывов в том же месте расположении взрыва позволяет группировать взрывы в супер-взрывы
Возможные преимущества	Почему?
Улучшение скоростной модели для изображения	<ul style="list-style-type: none"> <li>Больше измерений свойств пород в различных направлениях (измерение избыточности)</li> <li>Это может применяться для измерения анизотропии и объединения со скоростной моделью</li> <li>Улучшение соотношения сигнал-помеха данных для оценки скоростей</li> </ul>
Р-волновая характеристика трещин для трещиноватого резервуара; геомеханическое изучение пород вокруг планируемого места под бурение	Широкий азимут позволяет применить эту технику для обработки и интерпретации

Таблица 4 Преимущества много - и широко азимутальных съемок.

# Морская сейсморазведка

азимутом от 0 ° до 360 ° и однородным широко азимутальным распределением от 400 м. до 8000 м.

Широко азимутальные работы, доказали свою эффективность для полевой съемки Shensi, осложненной некоторым количеством помех, технических особенностей, и сильных морских течений в районе исследования. Проведенная съемка в трех различных направлениях с широко-азимутальными геометрией свела неудачу к минимуму и минимизировала время работ.

Один важный действующий аспект для широко азимутальной съемки - повторяемость размещения источников. Если размещение источника точно повторяется в пределах предопределенного радиуса, пункты возбуждения могут быть сгруппированы в супер взрывы. Сейсмические взрывы, принадлежащие супервзрыву, могут мигрироваться алгоритмом единственного взрыва с экстраполяцией волнового уравнения общего взрыва (WEM), и существенная продолжительность обработки может быть сокращена. Число трасс на км<sup>2</sup>, требуемых на широко – много азимутальной съемки, может быть равно более, чем удвоенному числу трасс, требуемому для узкого азимутального обзора. Это усилие оправдано?

## Доказанные и потенциальные выгоды

На геофизических конференциях в этом году, были представлены предварительные результаты широко и много азимутальных съемок, и можно было оценить преимущества этой новой морской технологии получения данных. Преимущества и особенности проекта приведены в итоговой Таблице 4. Преимущества были разделены на доказанные и потенциальные категории, потенциальные – ожидаемые блага от новой технологии, которые еще должны быть продемонстрированы.

## Какой следующий шаг?

Мы предвидим четыре непосредственные проблемы в развитии получения много азимутальных данных

1. Доказано, что широко азимутальные морские данные, - полезны и экономически выполнимы для программ поисково-разведочных работ.

Возможная выгода широко-азимутальной технологии:

- Улучшенное качество сейсмических данных и результатов интерпретации
  - Уменьшенный риск неудачи первых скважин.
  - Постепенная инвестиция позволила последовательно пройти путь от исследования к разработке
  - Уменьшение длительности цикла от открытия до эксплуатации.
2. Повышение эффективности:
- Улучшение характеристик буксировки позволяет расширить протяженность исследований.
  - Используется два судна буксира и много судов источников с одновременными взрывами.
  - Регистрация сейсмических данных в процессе разворота судна.

3. Сейсмическая эффективность обработки сейсмических данных с возможными решениями, такими как:

- Построение скоростной модели полученных данных.
- Совершенствование программ, моделирующих скорость для анизотропии.
- Повышение эффективности многократного ослабления и алгоритмов представления результатов.

4. Расширить область применения к подбазальтовым случаям, глубокозалегающим резервуарам, подсолевым отложениям и трещиноватым коллекторам.

Особенности технологии получения Q-морских технологий, получение данных точечным приемником с хорошей выборкой, точное позиционирование, управление буксировкой и калибровка морских источников, адаптация хороших широко-азимутальных технологий и WesternGeco продолжает следовать этим новым требованиям.

Как конечное замечание мы полагаем, что получение широко азимутальных данных существенный шаг на пути развития морской технологии получения данных и может быть сопоставима с развитием 2D и 3D сейсморазведки.

## Литература

- Corcoran, C., Perkins, C., Lee, D., Cattemole, P., Cook, R., and Moldoveanu, N. [2006] Wide-azimuth streamer acquisition for Gulf of Mexico subsalt imaging. *76<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts*, 2910-2914.
- Keggin, J., Mannin, T., Rietveld, W., Page, C., Fromyr, E., and Borselan, V.R. [2006] Key aspects of multi-azimuth acquisition and processing. *76<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts*, 2896-2890
- Kapoorg, J. [2006] The challenge of Rich-Azimuth: A processing opportunity. *SEG Summer Research Workshop Abstracts*, Snowbird, USA
- Howard, M.S. [2004] Rich azimuth marine acquisition. *EAGE Research Workshop - Advances in seismic Acquisition Technology*.
- Howard, M.S. and Moldoveanu, N. [2006] Survey design for rich azimuth seismic in the marine using surface streamers. *76<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts*, 2915-2919.
- Paffenholz, J., Keliher, J., Ergas, R., and McLain, B. [2002] Surface marine all azimuth recording technique. *64<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibitions*.
- Regone, C. [2006] Using 3D finite-difference to design wide azimuth surveys for improved subsalt imaging. *76<sup>th</sup> SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts*, 2896-2900.
- Sukup, D.V. [2002] Wide-azimuth marine acquisition by the helix method. *The Leading Edge*, 21, 791. Vermeer, G. [2002] 3D Seismic survey design. *SEG Geophysical references*, 12
- Widmaier, M., Keggin, J., Hegna, S., and Kios, E. [2002] The use of multi-azimuth towed streamer acquisition for attenuation of diffracted multiples. *72<sup>nd</sup> SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts*, 89-93.