

## Как сравнить многоазимутальную и широкоазимутальную сейсморазведку

How multi-azimuth and wide-azimuth seismic compare

**Andrew Long\*** из Petroleum Geo-Services (PGS) бегло рассматривает требования для много- и широкоазимутальных съемок и делат ряд неожиданных заключений.

На практике методы регистрации и обработки при слабом сейсмическом освещении начинаются с попытки компенсации за большие дыры в плотности освещения целевого объекта, используя традиционную узкоазимутальную съемку с сейсмокосами. Как только растет сложность проблемы, возникает необходимость в многоазимутальной съемке. Широкоазимутальная съемка становится популярной для наиболее затруднительных случаев отображения и может рассматриваться как «специальная» технология освещения среды. Соответственно, развернутые методики обработки и отображения должны также улучшиться в сложных случаях. Недавние и ведущиеся научно-исследовательские работы, дополняющие несколько больших инновационных проектов, демонстрируют, что каждая из концепций и проблем освещения целевых объектов, обсуждаемая здесь, может быть смоделирована, оценена, и обозначена в ясных и однозначных условиях.

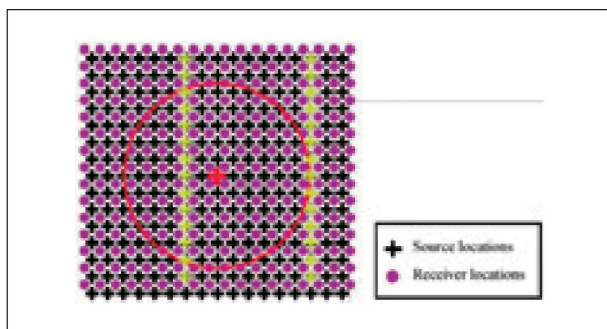
В простых условиях каждый элемент целевого объекта должен быть должным образом освещен в процессе трехмерной сейсмической съемки, и должен характеризоваться отраженной сейсмической энергией с равномерным распределением удалений источник-приемник, азимутов и углов падения лучей. Это определение будет конкретизировано позже. В простой аналогии трехмерная сейсмическая съемка подобна сеансу фотосъемки в студии. Обычно несколько источников света должны полностью освещать предмет фотосъемки так, чтобы можно было получить незапятнанное и равномерное изображение с высоким разрешением. Для специальных эффектов и выразительности могут использоваться одиночные источники света, однако специальные эффекты обычно нежелательны, когда необходимо получение высококачественного и высококачественного изображения предмета. Точно так же для успешной сейсмической съемки требуется полное освещение целевого объекта. В отличие от сеанса фотосъемки, где между камерой и предметом имеется свободное пространство, и только топография предмета оказывает влияние на качество отображения, Земля — непрерывно меняющаяся во всех направлениях среда. Несколько факторов влияют на качество (сейсмического) освещения целевых объектов на некоторых заданных целевых отражающих горизонтах:

- Топография поверхности (при наземной съемке) или морское дно (при морской съемке).
- Скорость в сложной трехмерной среде между поверхностью/морским дном и целевым объектом. В геологических условиях имеют место изменения скорости по вертикали и в латеральном направлении вследствие структурных, стратиграфических и литологических сложностей. Самое большое влияние на лучевую геометрию оказывает высокий контраст скоростей, особенно слои базальтовых интрузий, соли, мела и карбоната.

\* [andrew.long@pgs.com](mailto:andrew.long@pgs.com)

- Топография отражающего горизонта.

В наиболее крайних случаях, целевые объекты не могут быть отображены из-за отсутствия освещения целевого объекта. Обработка данных не может породить данные, которые не были зарегистрированы, независимо от того, какие используются изощренные методики обработки и отображения. Кроме того, эффекты распространения волны могут быть настолько сложными, что конечные сейсмические изображения будут некогерентными и неоднозначными, даже если целевой объект освещен. Самым типичным примером будет попытки отображения подсолевых отложений в Мексиканском заливе. Так называемая широкоазимутальная съемка с использованием буксируемых кос все более и более используется в попытке преодолеть проблемы некогерентности отображения. Широкоазимутальная сейсморазведка базируется на очень простой концепции — для каждого положения приемника производится съемка для большого диапазона удалений источник-приемник по большому диапазону азимутов источник-приемник. При наземной или донной трехмерной съемке это реализуется использованием длинной поперечной расстановки, или сетки источников, которая намного больше, чем расстановка донных приемных узлов. В случае трехмерной съемки с использованием сейсмокос это реализуется использованием одного или более суден с источником колебаний, дополнительно к основному буксирующему судну — дополнительное судно (судна) создают линии возбуждения, параллельные основным линиям, но обычно в диапазоне от небольших до больших удалений в направлении, перпендикулярном профилю. Судно, буксирующее косы, может также буксировать или не буксировать группу сейсмоисточников. Однако широкоазимутальная сейсмическая съемка с использованием сейсмокос не гарантирует решения наиболее сложных проблем освещения целевых объектов — характер распространения волны может быть настолько сложным, что даже самые изощренные методы обработки и отображения все еще терпят неудачу. Кроме того, конфигурации расстановок обычно используемых при широкоазимутальных съемках не удовлетворяют условиям «регулярной геометрии», на которых базируются стандартные алгоритмы миграции — даже миграция Кирхгофа может не пройти, поэтому обычно требуется глубинная миграция до суммирования на основе волнового уравнения. Такая миграция дорога в вычислительном отношении, вначале необходимо обосновать пользу алгоритмов регуляризации трехмерных данных в процессе предварительной обработки, и соответственно получить точную трехмерную скоростную модель. Все вместе, широкоазимутальная съемка и присущая обработка и отображение, не тривиальное дело. Перед рассмотрением широкоазимутальной сейсмической съемки необходим соответствующий предварительный обзор съемки.



**Рис. 1.** «Идеальная» геометрия трехмерной съемки. Для каждого положения источника прием ведется плотной сетью приемников. Как показано двумя линиями желтых крестов, стандартная трехмерная съемка с несколькими косами подразумевает достаточно малые интервалы между источниками вдоль профиля, но очень большие в ортогональном направлении.

### Более строгое определение «освещения»

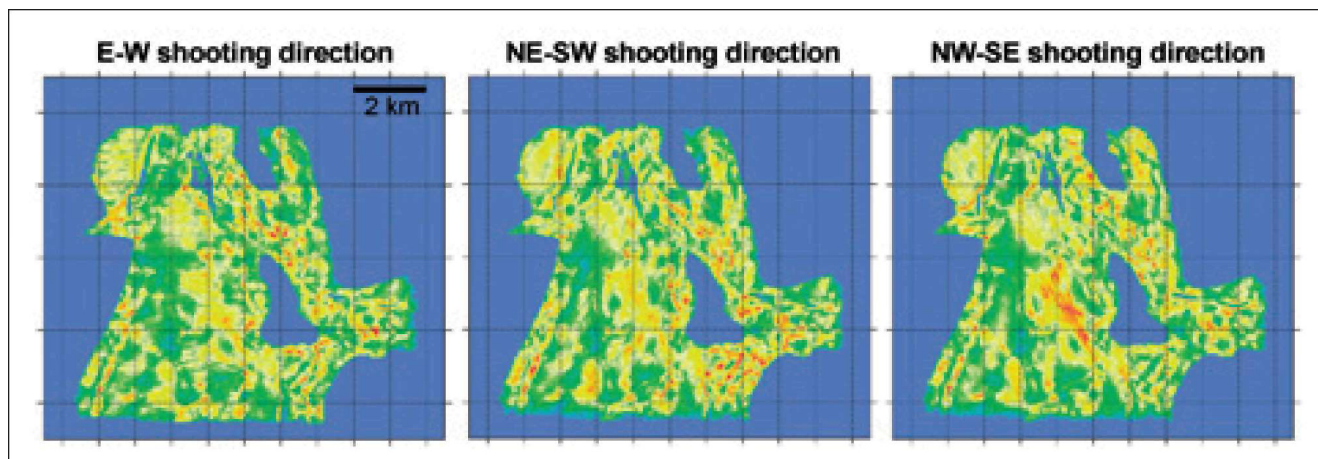
Ключевым моментом любого успешного примера отображения с высоким разрешением является отсутствие любых артефактов. При линейных условиях, систематические вариации в освещении целевого объекта создают известный эффект влияния системы наблюдений поперек профиля. В меньшем масштабе любая асимметрия в освещении целевого объекта породит некое размазывание или артефакты в отображении. Заметьте, что все эти рассуждения предполагают, что поля полезных волн, кратных волн и помех не смешаны. Любой тип наложения данных создаст неблагоприятные проблемы для обработки или отображения, которые здесь не обсуждаются. Удобной отправной точкой для более строгих рассуждений по поводу освещения является концепция минимальных наборов данных (Padhi и Holley, 1997). Это не так сложно, как может показаться.

Концепция минимальных наборов данных заключается в следующем. В принципе, если отражающая граница равномерно и полностью освещена в области общей средней точки (ОСТ), то должно быть возможным извлечение нескольких наборов единичной кратности, так, чтобы каждой трассе в данном подмножестве («минимальный набор данных») соответствовали одинаковые удаления источник-приемник и азимут.

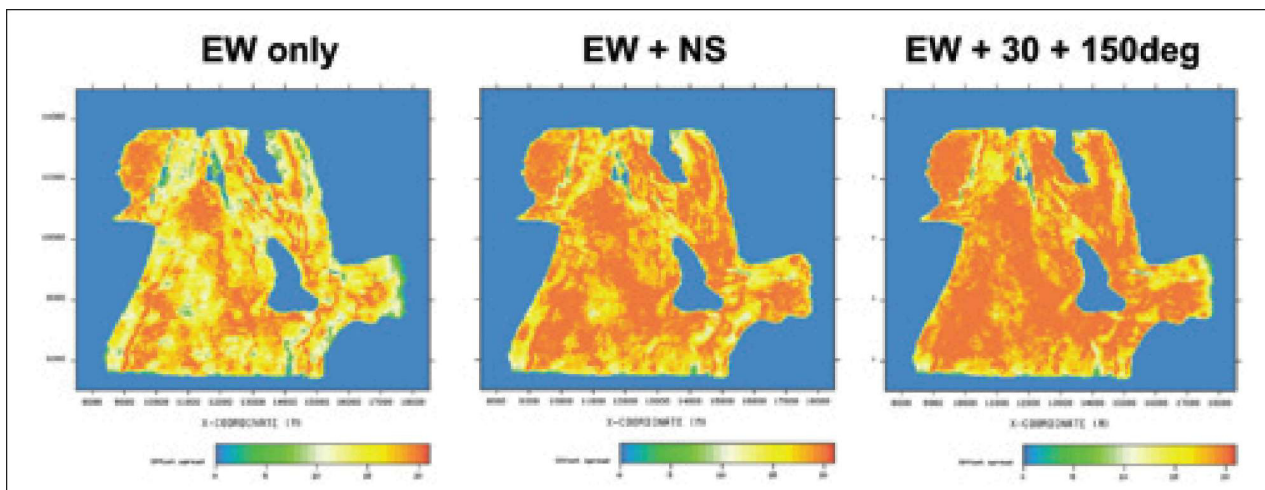
В отсутствии всех шумов или кратных волн должна быть возможна миграция каждого подмножества с получением результатов, не содержащих артефакты. Сумма всех таких мигрированных подмножеств соответственно также не содержит артефакты. Наоборот, если освещение в пределах некоторых подмножеств не однородно (есть дыры — пропущенные удаления или азимуты), то мигрированное подмножество будет содержать артефакты. Сумма всех подмножеств будет аналогично содержать артефакты, эффекты размазывания изображения, и будет характеризоваться снижением качества и разрешения.

Ключевой аспект, конечно, что включает понятие «равномерно и полностью освещенный». Рис. 1 поясняет, что «идеальная» геометрия трехмерной съемки включает плотную трехмерную сетку пунктов возбуждения и приема. Нет совпадающих положений источников или приемников, поэтому не образуются избыточные комбинации источник-приемник. Для каждого положения источника используется плотная сеть приемников, так что для каждого возбуждения производится регистрация по полному и непрерывному диапазону удалений источник-приемник и азимутов. Такой алгоритм удовлетворял бы критерию минимального набора данных.

Как в случае наземной, так и донной трехмерной съемки, источник и приемники полностью разделены. Поэтому они могут быть расположены независимо друг от друга. При условии, что нет ограничений на расстановку источников и приемников, в принципе возможна расстановка источников и приемников на большой области, таким образом, обеспечивающая (почти) полное освещение глубинного поискового объекта, одновременно обеспечивая очень плотную пространственную дискретизацию отраженного волнового поля. В случае сейсмодоски источник и приемники связаны, и, следовательно, здесь есть довольно большое снижение гибкости трехмерной регистрации данных. Это обычный случай, когда на малых удалениях источник-приемник производится регистрация по относительно большому диапазону азимутов источник-приемник — ограничен полусферой (косы соединены позади положения источника). На больших удалениях источник-приемник регистрация обычно ведется по более узкой дуге азимутов источник-приемник. Эти ограничения играют роль при реализации многоазимутальной (обсуждается ниже) и широкоазимутальной (уже обсуждалась) съемки.



**Рис. 2.** Смоделированные карты освещения геологической среды, показывающие «плотность облучения» среды для исследуемой области Varg в Северном море. Каждый результат отличен и ни один из них не идеален.



**Рис. 3.** Смоделированные карты освещения геологической среды, показывающие распределение удалений (то есть номер единственных удалений) для площади съемки Varg в Северном море. Плотность и равномерность покрытия удалений улучшаются с ростом количества направлений возбуждения (слева направо: один азимут, два азимута, три азимута).

Другой концепцией, удовлетворяющей критерию минимального набора данных, является критерий Vermeer симметричной выборки. Трехмерная симметричная выборка (Vermeer, 1998) реализуется, если трехмерная геометрия источников и приемников характеризуется равным шагом источников и приемников, а также равным размером (идеальный размер — точка) расстановки (или «группы») источников и приемников. Группы источников и приемников равного размера требуются для устранения вариаций направленности источник-приемник, связанных с направлением возбуждения. Как показано желтыми крестами на рис. 1, трехмерная симметричная выборка обычно невозможна для современных трехмерных съемок с использованием нескольких сейсмокос, поскольку шаг между пунктами возбуждения поперек профиля обычно очень крупный. Единственным вариантом трехмерной съемки с использованием сейсмокос, который бы мог частично удовлетворять критерию трехмерной симметричной выборки, является трехмерная съемка с использованием одной сейсмокосы, или нескольких сейсмокос, но с очень плотным разделением линии паруса и источником, размещенным в середине растяжки сейсмокос. Как описали Ramsden и др. (2005), вариант двумерной симметричной выборки (рассматриваются только интервалы и группы источников и приемников вдоль профиля), а также близкое расположение кос, может тем не менее произвести превосходное отображение с высоким разрешением без артефактов (полагается, что освещение целевых объектов весьма однородно).

Vermeer (1998) подтверждает, что выполнение критерия минимального набора данных почти никогда не достигается на практике (особенно в случае съемки с сейсмокосами), и описывает различные методы обработки, которые пытаются аппроксимировать минимальные наборы данных сложной сортировкой и интерполяцией трасс. Данный факт здесь не обсуждается.

В целом, очевидно, что «освещение» может относиться ко многим дополнительным, но явным проблемам:

- Плотность сейсмической энергии, отраженной от объекта поисков, и/или

- Равномерность удалений и азимутов источник-приемник, соответствующих каждой трассе ОСТ.

На практике предположение об ОСТ недействительно, поэтому «наиболее правильное» описание «идеального» освещения — «большая апертура зеркального отражения в каждой точке изображения среды (не положения ОСТ), а также полная пространственная выборка зарегистрированного волнового поля». Если может быть построена соответствующая точная трехмерная скоростная модель, то такой должным образом освещенный сейсмический объем должен характеризоваться оптимальной комбинацией отображения без артефактов и высокого разрешения.

### Многоазимутальная сейсморазведка

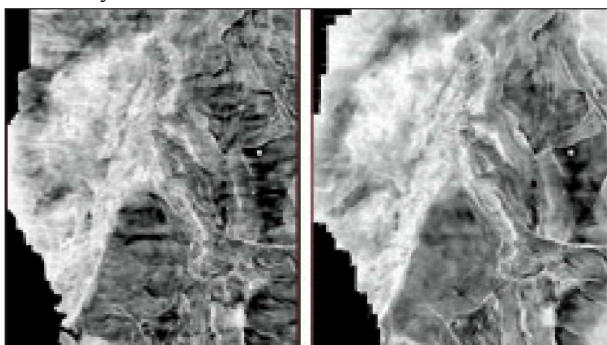
На рис. 2 приводятся результаты трехмерного моделирования траекторий лучей для области Varg в Северном море (Gaus и Hegna, 2003). Результаты различные. Это наблюдение связано с первым описанием «освещения» в предыдущем разделе — «фундаментальная плотность сейсмической энергии, отраженной от целевого отражающего горизонта». Уместно заметить, что освещение никогда не точно. Цветная шкала на рис. 3 соответствует распределению удалений источник-приемник, по которым произошли отражения от каждой точки целевого объекта (использование тех же результатов моделирования траектории луча). Ясно, что при перемещении слева направо равномерность освещения быстро растет при переходе от любого одного направления возбуждения к комбинации трех направлений. Это второе наблюдение соответствует второму варианту описания «освещения» в предыдущем разделе — «равномерность удалений и азимутов источник-приемник, соответствующих каждой трассе ОСТ». Отсюда ясно, что комбинация съемок, произведенных в различных направлениях, выражается в лучшем качестве освещения целевого объекта. Оптимальная комбинация направлений возбуждения зависит от конкретной области. Данная демонстрация является основой многоазимутальной сейсморазведки.



Многоазимутальная сейсморазведка обычно обсуждается только в контексте первого определения освещения («фундаментальная плотность сейсмической энергии, отраженной от целевого отражающего горизонта»). Это подчеркивает мощь стратегии многоазимутальной съемки, которая фактически приближает конечный трехмерный сейсмический объем к идеалам критерия минимального набора данных, как показано на рис. 3. Удовлетворяя критерию минимального набора данных, многоазимутальная сейсморазведка неизбежно соответствует высококачественному сейсмическому отображению без артефактов. Рис. 4 демонстрирует значительное усовершенствование в ясности и разрешении данных по нижнемеловому целевому горизонту месторождения Varg, которое было достигнуто комбинированием при обработке всех трех доступных азимутов для получения конечного набора многоазимутальных данных.

### Широкоазимутальная сейсморазведка

Широкоазимутальная морская сейсморазведка обычно рассматривается в одном из двух вариантов — использование нескольких морских сейсмических судов, либо использование регулярной сетки (автономных) донных приемников и регулярной сетки источников на поверхности. Вариант с донными приемниками дорогой и может рассматриваться только в масштабах изысканий, тогда как широкоазимутальная съемка с использованием сейсмокос становится все более и более рентабельной с ростом площади съемки. До настоящего времени, все приложения широкоазимутальной съемки с использованием сейсмокос связаны с разведкой подсолевых залежей, где полностью трехмерная природа конфигураций солевых тел может сделать планирование оптимальных азимутов для многоазимутальной съемки весьма проблематичным (Mitchell и др., 2006). Большое разнообразие конфигураций судна для источников и буксировки сейсмокос для организации широкоазимутальной съемки уже издано в литературе, и каждая из них имеет свои достоинства. BP организовало широкоазимутальную съемку по месторождению Mad Dog в Мексиканском заливе, используя два дополнительных судна с источником колебаний, размещенные на равных боковых расстояниях от буксирующего косы судна (Threadgold и др., 2006). Каждый источник запускался после ослабления колебаний, возбужденных предыдущим источником, затем цикл снова переходил к первому источнику.



**Рис. 4.** Карты амплитуд по целевому горизонту Varg в Северном море, полученные в результате трехмерной съемки по одному направлению падения (слева) и многоазимутальному возбуждению (справа). Улучшенное освещение и глубинная выборка привели к значительному повышению качества данных, ясности и разрешения.

По каждой линии возбуждения при широкоазимутальной съемке в Mad Dog регистрация производилась четыре раза так, чтобы боковое удаление буксирующего судна увеличивалось на 1000 м при каждом простреле линии. Каждый такой проход съемки обозначается как «черепица». Количество черепиц и/или выбранных боковых удалений будет продиктовано стоимостью и геофизическими соображениями. Заметьте, что подход ВР также имеет преимущество из того, что съемка будет расширена последующими съемками — линии возбуждения могут быть повторены с новыми боковыми удалениями, и пополнившийся данные будут переобработаны для получения нового набора данных. Оптимальный шаг расстановки сейсмоприемников — основная задача при планировании съемки (Regone, 2006), с очевидным вкладом в стоимость. Геофизически, повторение линий возбуждения для каждой черепицы предпочтительно для адресации требований пространственной выборки для глубинного отображения до суммирования.

Рис. 5 поясняет подход к широкоазимутальной съемке с двумя черепицами, каждое из которых использует общую линию возбуждения, но с судна с источниками расположены на различных поперечных удалениях от буксирующего косы судна. Поэтому большинство приемников расстановки кос будет регистрировать довольно большой диапазон азимутов источник-приемник (0-180°), большой диапазон удалений источник-приемник вдоль профиля, и (грубо отображенный) диапазон поперечных удалений источник-приемник, как продиктовано стратегией прострела, используемой в широкоазимутальной съемке (см. также рис. 6).

Рис. 6 показывает поверхностное покрытие удалений и освещения для конфигурации широкоазимутальной съемки, приведенной на рис. 5, использующей поперечное разделение проходки судов в 1200 м (две черепицы), и разделение линии паруса 600 м. В то время как покрытие удалений сильно смещено в сторону направления возбуждения, очевидно, что покрытие удаление/азимут является гладко-переменным во всех направлениях. Как обсуждалось выше (второе определение «освещения»), это проявится в лучшей ясности отображения (см. также Regone, 2006). Кроме того, суммирование многих регулярных волн-помех (особенно преломленные кратные волны) по различным черепицам съемки ослабит такие волны вследствие различного приращения времени пробега на сейсмограммах с введенными кинематическими поправками.

В отличие широкоазимутальной съемки с использованием сейсмокос, донная съемка с использованием либо (грубо отобранных) автономных узлов, либо «поперечного прострела» с донными кабелями, приводит к большему азимутально-симметричному покрытию удалений/азимут. На практике, обе методики донной широкоазимутальной съемки будут значительно дороже, чем широкоазимутальная съемка с использованием сейсмокос.

Рис. 7 отображает результаты освещения, смоделированные для табличной солевой модели с трехмерной траекторией луча как для многоазимутальной, так и для широкоазимутальной донной сейсмической съемки.

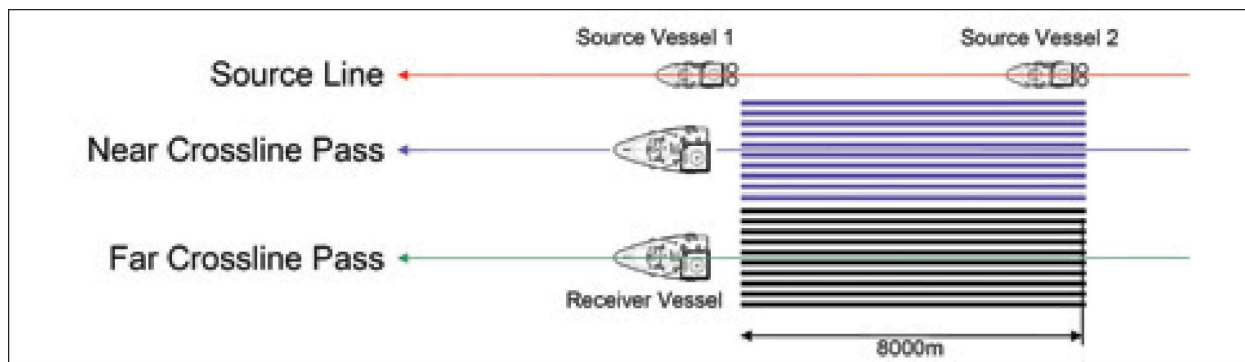


Рис. 5. Схематическая геометрия широкоазимутальной съемки с одним судном, буксирующем косы, и двумя (от носа до кормы) судами-источниками колебаний, рассчитанная для двух «черепац». В данном примере длина кос 8000 м.

Розы-диаграммы показывают поверхностное распределение азимутов источник-приемник (радиальные линии) и удалений (окружности) как для съемки с сейсмокосами, так и для трехмерной донной съемки. Для каждой розы-диаграммы максимальное значение удаления равно 8000 м. Донная съемка была смоделирована с несколькими донными кабелями и сеткой источников большой площади, где линии возбуждения были ортогональны донным приемным кабелям. Когда сложили два азимута сейсмокос, диапазон азимутов источник-приемник оказался все еще узким по сравнению с донной съемкой, использующей поперечные линии возбуждения. Выборка источников и приемников при донной съемке примерно сопоставима в этом случае с идеальным случаем, приведенном на рис. 1. В терминах освещения подсолевых целевых горизонтов, ортогональные съемки с использованием сейсмокос приводят к дополнительному неидеальному освещению, тогда как донная съемка порождает весьма равномерное освещение. При сложении многоазимутальное освещение с использованием сейсмокос сильно улучшается, и возникает разумное приближение к на много более дорогому результату донной съемки. Многоазимутальное освещение с использованием сейсмокос могло быть улучшено и далее, используя дополнительные азимуты.

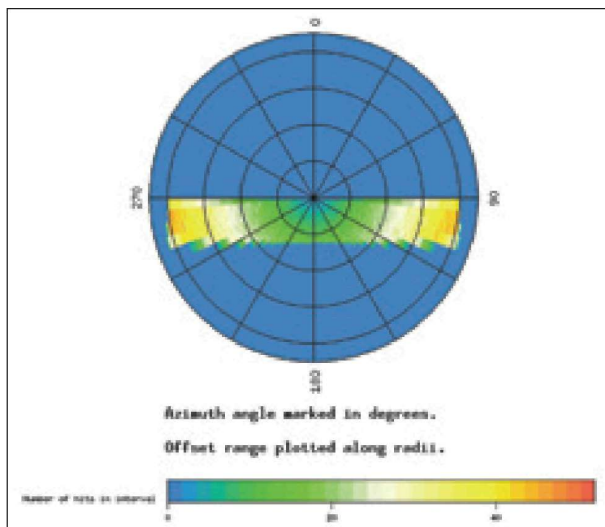


Рис. 6. Покрытие удалений/азимутов для геометрии широкоазимутальной съемки, приведенной на рис. 5. Используется поперечное разделение проходки судов в 1200 м и разделение линии паруса 600 м.

В контексте «расширяемости съемки», многоазимутальная съемка с использованием сейсмокос предлагает относительно дешевое геофизическое поощрение. Интерпретация трехмерных данных, полученных по единственному азимуту, используя традиционную конфигурацию судна, обычно характеризуется недостатками в отображении целевых объектов. Моделирование после съемки с использованием интерпретированной трехмерной модели и трехмерного моделирования траекторий лучей часто демонстрирует, что дополнительные азимуты возбуждения приведут к дополнительному (другому) освещению целевых объектов, и что комбинация различных азимутов неизбежно приведет к улучшению освещения, качества изображения и разрешения. При условии, что имеющиеся трехмерные данные были получены с достаточно хорошей пространственной выборкой и покрытием дальних удалений, разумно ожидать, что новая трехмерная съемка в ортогональном направлении может использоваться для обработки нового набора многоазимутальных данных. Если первоначальный набор данных был плохо зарегистрирован, то соответственно данные новой съемки будут поставлены под угрозу в процессе многоазимутальной обработки. Существует несколько алгоритмов многоазимутальной обработки, и может быть вычислено разнообразие временных и глубинных разрезов до суммирования, характеризующееся разными финансовыми затратами и усилиями. Эта гибкость является очень заманчивой, поскольку наборы многоазимутальных данных могут быть созданы, используя одно буксирующее косые судно, без больших затрат на дополнительные суда с источниками колебаний и многопроходной ('черепац') прострел, используемый для широкоазимутальных съемок.

#### Приложения к «несолевым» случаям

Несколько давнишних проблем очистки сейсмического изображения являются общими для ряда местностей, вот некоторые из них:

- Отображение турбидитовых конусов выноса, близких к крутым падениям
- Отображение среды под базальтами
- Отображение среды под карбонатами
- Отображение среды под эрозионными образованиями, такими как края шельфа, шероховатое морское дно и каньоны морского дна
- Отображение в областях сложного сбросообразования и/или трещинообразования

Каждая такая сейсмическая проблема может также рассматриваться как проблема освещения — потенциально затронутая многоазимутальной или широкоазимутальной сейсморазведкой. Везде, где имеется плотный двумерный или трехмерный набор данных, будет возможно построение представительной трехмерной модели и использование трехмерного моделирования траекторий лучей для выполнения анализа освещения с целью сравнения и сопоставления относительных достоинств узкоазимутальной, многоазимутальной и широкоазимутальной сейсморазведки. Также могут использоваться упругое моделирование траекторий лучей или конечно-разностное моделирование и обработка для расчета синтетических сейсмических объемов данных, таким образом расширяя планирование съемки для включения соображений относительно отображения. Regone (2006) описывает пример полного трехмерного конечно-разностного моделирования, используемого для планирования широкоазимутальной съемки, и количественно оценивает выгоду от различных сценариев съемки для качества результата глубинной миграции до суммирования на основе волнового уравнения.

### Заключение

Если в процессе обработки данных может быть построена достаточно точная трехмерная скоростная модель, то соответствующий освещенный сейсмический объем должен породить оптимальную комбинацию отображения без артефактов и высокого разрешения.

Практически, методы съемки и обработки в случае «неполного освещения» начинаются с самого простого понимания освещения и усилий для компенсации за большие «дыры» в плотности освещения целевого объекта. Как только нарастает сложность проблем, необходимо перейти к более сложным определениям освещения и случаю многоазимутальной съемки, или в наиболее сложных случаях сейсмического отображения — к случаю широкоазимутальной съемки с сейсмокосами. Соответственно, используемые методики обработки и отображения должны также становиться изощреннее и вовлекать больше усилий. Первоначально, обработка во временной области может устраивать (особенно временная миграция до суммирования), но как только предположение ОСТ терпит неудачу, становится необходимым перейти к самому сложному определению освещения точки целевого объекта (см. выше). Глубинная миграция до суммирования будет необходима, но будет успешна, только если построены достаточно точные скоростные модели. В случае широкоазимутальной сейсморазведки обычно необходимо выполнять глубинную миграцию до суммирования на основе волнового уравнения.

К счастью, планирование съемки весьма изощренно и достоверно (Long, 2004). Каждая из концепций освещения целевых объектов и проблем, обсужденных здесь, может быть оценена и выполнена в разумных временных рамках. Доступный диапазон алгоритмов съемки и обработки достаточен для решения проблем сейсмического отображения, с которыми сталкиваются во всем мире. Особенный интерес вызывает возможность организации новых трехмерных съемок по азимутам, ортогональным или поперечным имеющимся трехмерным съемкам, таким образом, недорого формируя новый набор многоазимутальных данных. Глобальный опыт демонстрирует, что два или три дополнительных азимута

быстро вызывают равномерное распределение удалений и азимутов, что требуется для оптимального отображения и разрешения целевого объекта в большинстве геологических условий. Аналогично, новые черепицы широкоазимутальной съемки с большими поперечными удалениями источник-приемник могут быть получены по имеющимся широкоазимутальным съемкам, дальше улучшая освещение целевого объекта.

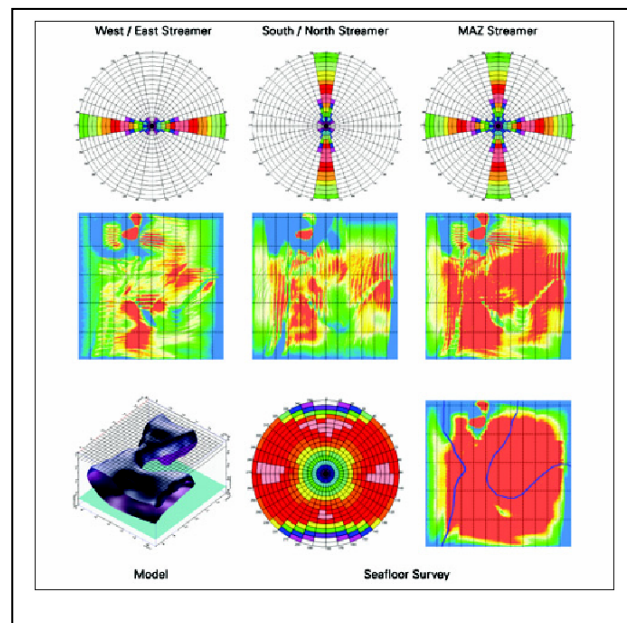


Рис. 7 Сравнение поверхностного распределения удалений/азимутов источник-приемник и глубинного освещения целевого объекта для съемки с использованием сейсмокос и донной съемки с поперечным возбуждением. Область освещения целевого объекта имеет размеры 12x12 км, и максимальное удаление, показанное на розах-диаграммах, составляет 8 км. Верхние два ряда соответствуют съемке с одним азимутом и многоазимутальной съемке с использованием сейсмокос, в то время как в нижнем ряду приведены результаты донной съемки с поперечным возбуждением.

### Благодарности

Мы благодарим Bill Pramik, Steve Campbell, Alope Mathur и Eivind Fromyг за помощь в получении различных иллюстраций. Благодарим PGS за разрешение на публикацию данной дискуссии.

### Ссылки на литературу

- Gaus, D. and Hegna, S. [2003] Improved imaging by pre-stack depth migration of multi-azimuth towed streamer seismic data. *EAGE Expanded Abstracts*, C02.
- Long, A. [2004] Postsurvey calibration of 3D seismic results to presurvey modeling predictions. *The Leading Edge*, 23, 10, 1033-1036.
- Mitchell, 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? *SEG Expanded Abstracts*, SS2.5.
- Padhi, T., and Holley, T.K. [1997] Wide azimuths - why not? *The Leading Edge*, 16, 02, 175-177.
- Ramsden, C., Bennett, G., and Long, A. [2005] High resolution, high quality 3D seismic images from symmetric sampling in practice. *SEG Expanded Abstracts*, ACQ1, 17-20.
- Regone, C. [2006] Using 3D finite-difference modelling to

design wide azimuth surveys for improved subsalt imaging. *SEG Expanded Abstracts*, SS2.3.

Threadgold, I.M., Zembeck-England, K., Aas, P.G., Fontana, P.M., and Boone, W.E. [2006] Implementing a wide azimuth towed streamer field trial: The what, why and mostly how of WATS in Southern Green Canyon. *SEG Expanded Abstracts*, SS2.4.

Vermeer, G.J.O. [1998] 3-D symmetric sampling. *Geophysics*, 63, 1629-1647.