

## Многодисциплинарная Геонаука

## Последний опыт проведения 4D сейсмических измерений на шельфе Recent experience with 4D marine seismic acquisition

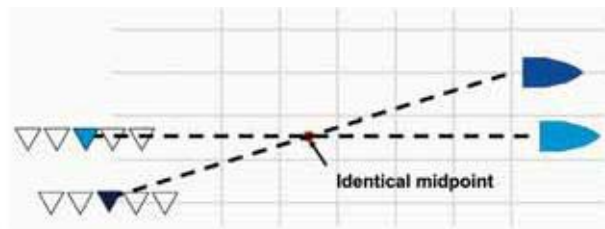
**Martin Widmaier, Andrew Long, Barbara Danielsen, и Stian Hegna (PGS Geophysical)** рассказывают о недавно проведенных 4D сейсмических морских съемках с использованием новой методологии, улучшающей базовую съемку и съемку мониторинга.

Два года назад стратегия оптимальной 4D морской съемки была описана в совместной технической публикации PGS и Shell (Widmaier et al., 2003). Представленная стратегия была направлена на улучшение повторяемости сейсмических измерений, которое достигалось соблюдением постоянного азимута между базовым профилем и повторными съемками. Производилось наблюдением за курсом судна, обеспечивающим повторение линий взрыва, и за направлением профилей совместно с использованием систем наложения. Такая методология 4D измерений получила широкое распространение в индустрии и была принята многими нефтяными компаниями для программ сейсмического мониторинга. В этой статье будет вновь разобран предложенный метод 4D измерений и представлен ряд нововведений, кроме того, будут сделаны выводы о базовых 4D измерениях и недавно проведенных съемках сейсмического мониторинга.

### Оптимальные морские 4D измерения

Цель 4D измерений и обработки заключается в поиске различий в сейсмических данных, которые были вызваны изменениями в свойствах резервуара. Сохранение азимутов источника-приемника является ключевым фактором для соблюдения повторяемости измерений мониторинга. Различие в азимутах приводит к различию в направлении профилей, в результате чего изменяются объекты наблюдения. Оптимальное сохранение азимутов источник-приемник при изменяющемся положении косы обеспечивается разработанной стратегией проведения 4D съемки, описанной Widmaier et al. (2003). Ключевыми моментами рекомендованного метода является:

- Повторение направлений профилей
- Повторение линий взрыва



**Рисунок 1** Демонстрация различия азимутов источника-приемника для заданной ОСТ, при несоблюдении повторяемости позиции взрыва. Эта проблема касается всех оффсетов любой длины.

- Использование перекрытий для косы (дополнительные внешние косы)
- Расстояние между косами

### Повторение линий взрыва

Повторение линий или точек взрыва является первоочередной задачей для обеспечения повторяемости азимутов источник-приемник для всех оффсетов. Этот принцип очевиден и интуитивно понятен. Морские измерения с косой дискретизируются реже по источникам, чем по приемникам. Таким образом, для получения приемлемого результата повторение азимута линий взрыва намного важнее, чем для приемников,

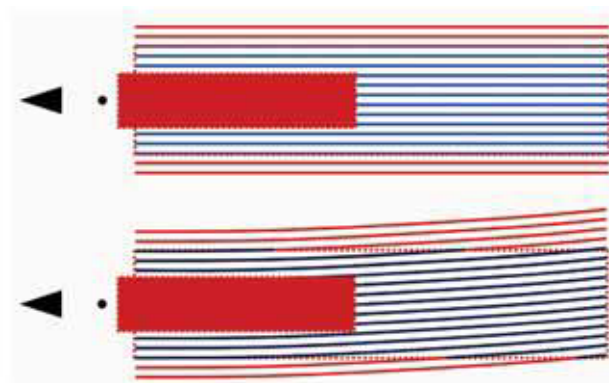
ОСТ (Общая срединная точка) бинированного грида, используемая при обработке 4D данных, является общей для базовой съемки и для съемки мониторинга. Позиция каждой ОСТ фиксирована в пространстве базовой съемкой. Она является равноудаленной от каждой пары источника и приемника, и ее положение зависит от геометрии приемников и поверхности источника. Если для данной ОСТ обеспечивается повторение точек взрыва (для любого оффсета), то при определении позиции приемника должно наблюдаться их полное совпадение, а азимут источник-приемник должен быть одинаков для базовой съемки и съемки мониторинга.

В условиях колебания косы управление кораблем осуществляется таким образом, чтобы обеспечить повторяемость, вместо того, чтобы обеспечить равномерное покрытие, как это обычно делается при проведении 3D съемок. Это может привести к появлению дыр на поверхности покрытия, особенно при больших оффсетах. Следовательно, для их устранения необходимо использовать перекрытие для кос.

### Перекрытие кос

Перекрытие кос является грубым методом максимизации повторяемости азимутов на границах профилей, и вместе с тем помогает достичь требуемой поверхности покрытия.

## Многодисциплинарная Геонаука



**Рисунок 2** Показаны принципы проведения съемки с перекрытием кос. Рабочая область бинов ОСТ для данного взрыва выделена красным. При отсутствии колебания кос дополнительные внешние косы (нарисованы красным цветом) не будут учитываться при бинировании. В случае, когда происходит сильное колебание косы, приемники, принадлежащие дополнительным косам, будут давать дополнительные трассы, необходимые для проведения бинирования

При съемках с перекрытием задействуется больше буксируемых кос по сравнению тем, что требуется для номинального разделения съемки профилями. На рисунке 2 показано измерение с перекрытием с двумя добавочными косами на каждой стороне. Когда колебания косы отсутствуют, приемники, относящиеся к внешним косам (красный цвет) не будут вносить вклад в номинальную кратность «рабочей» площади данного взрыва (Рисунок 2, верх). При колебаниях косы, приемники, относящиеся к внешним косам, будут смещаться в рабочую область. Это позволит сохранить красность по ОСТ (Рисунок 2, нижняя часть) и азимут, отвечающий за фиксированное положение источника. Следовательно, необходимы менее жесткие условия на расстояния между профилями (часто вообще никаких) для поддержания необходимой кратности ОСТ.



Другими словами, использование перекрытия кос позволяет увеличить расстояние между профилями, необходимое для достижения заданной кратности, в том случае, если коса меняет свое положение между смежными профилями.

Использование перекрытия будет обеспечивать более чем достаточное, количество трасс ОСТ в широкой зоне для каждого профиля. Ширина зоны перекрытия пропорционально количеству используемых для этого кос. Избыточная кратность позволяет выбрать стратегию бинирования. Это обеспечивает постоянную кратность и оптимальную повторяемость выбранных (или невыбранных) трасс, что достигается сохранением основных геометрических параметров таких, как азимут источник-приемник и вынос. Более детально методы бинирования 4D обсуждается в статье Li et al. (2003).

Необходимо отметить, что отсутствие колебания косы не является основополагающим допущением для оптимальной 4D съемки. Если базовая съемка проводится в условиях колебания косы, тогда актуальны те же принципы сохранения кратности и азимута: соблюдение повторяемости точек взрыва и использование перекрытия кос.

### Расстояние между косами

Более плотное расположение кос позволяет лучше сохранять азимут. Если позиции взрывов точно повторяются, то изменения азимута источник-приемник зависит только от положения приемника. Лучшая дискретизация в перпендикулярном направлении будет уменьшать вероятность азимутальных ошибок, и способствовать более качественной записи волнового поля. Конструкция судна со сдвоенным источником и расстоянием между косами менее 100м наиболее часто используется при 4D съемках. Стоит упомянуть, что в морской высокоразрешающей сейсморазведке расстояние между косами 37.5 м становится все более и более привычным.

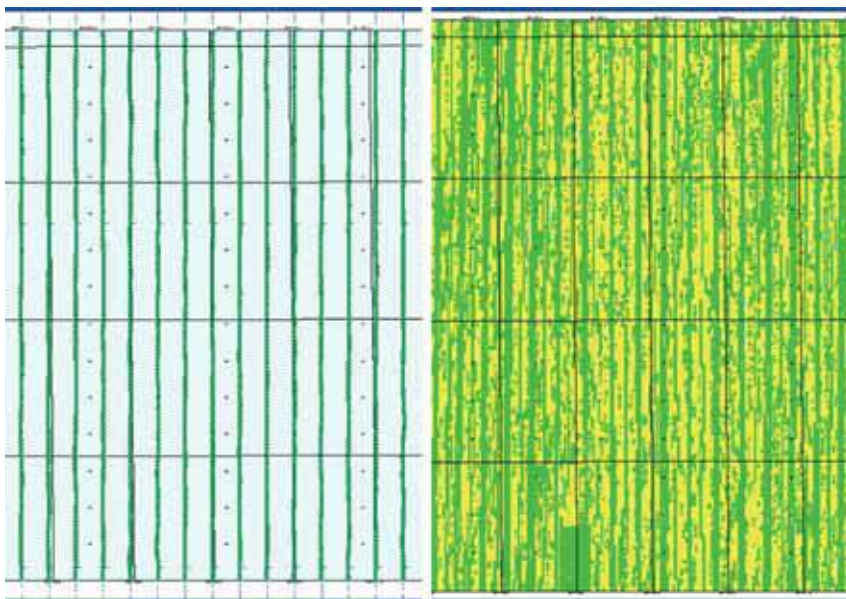
### Задача 1: проведение идеальной базовой съемки

Повторение базовой съемки, согласно вышеизложенной стратегии, является более простым в оперативном отношении и более дешевым в том случае, если была проведена правильная проектировка изначальной 4D съемки. На практике это означает, что линии взрывов, предназначенные для повторной съемки, должны быть идеально прямыми линиями, т.е. судно должно очень строго следовать первоначально заданному курсу, не допуская ни малейшего отклонения. Также желательно, чтобы количество первоначально запланированного покрытия для базовой съемки было ограничено. Сейсмическое судно *Ramform Victory* успешно используется для проведения 4D съемок таких, как первоначальная базовая съемка 4D для Statoil на месторождении Albatross/Snohvit шельфа Норвегии в 2003 году.

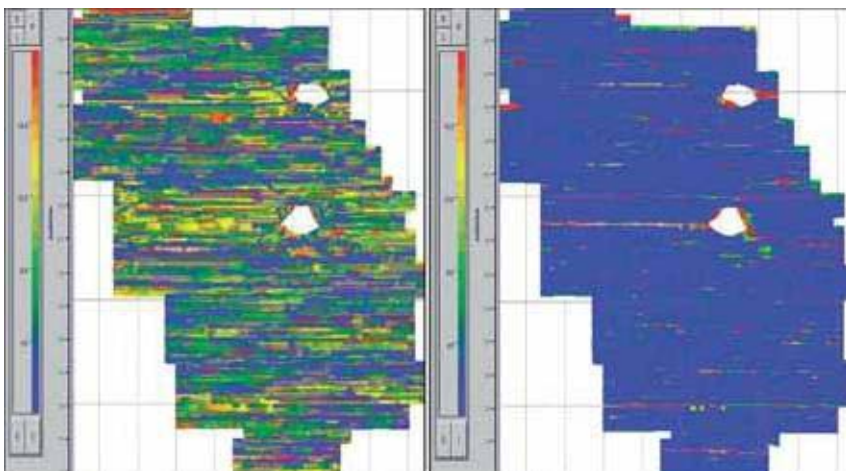
Для достижения запланированной схемы перекрытия на судне было развернуто 10 кос, восемь из которых центральные. Перекрытие позволило сохранить направление и положение профилей базовой съемки, по которым должны будут буксироваться косы, не принимая во внимания проблемы, связанные с нарушением площади и кратности покрытия. Построенные впоследствии линии взрывов (возбуждение геометрии flip flop) показывают, что они были почти идеально прямыми (Рисунок 3, слева). Соответствующая карта кратности демонстрирует схему перекрытия (Рисунок 3, справа).



## Многодисциплинарная Геонаука



**Рисунок 3** Положение источников (слева) и кратностью ОСТ для разработанной базовой съемки 4D (справа).



**Рисунок 4** Разностная 4D схема азимутов источник-приемник между съемкой 2001 и 1998 года (слева) и между съемкой 2001 и 2004 года. Съемка 1998 года была выполнена как 3D съемка, в 2001 году использовалась новая улучшенная базовая съемка с применением перекрытия. В 2004 году 4D съемка проводилась с плотным покрытием, соблюдением повторяемости линий взрыва 2001 года и с использованием перекрытия кос. Цветные карты отображают разницу в азимутах между 0 (синий) и 20 градусами (красный).

Желтый цвет показывает площадь с номинальной кратностью, а зеленый – с избыточной вследствие дополнительных данных, полученных с внешних кос. Заполнение взрывами на этой съемке составляло 5%. Небольшое количество требуемых линий взрыва были отстреляны вдоль основной базовой линии взрыва.

### Задание 2: высокая плотность 4D измерений

Сейсмическое судно *Ramform Valiant* провело три запланированных 4D съемки мониторинга для Shell (Exploration and Production) шельфа Норвегии и Великобритании в 2004 году. Вся съемка осуществлялась с соблюдением повторяемости линий взрыва и использованием перекрытия кос.

Съемка на месторождении Драуген (Шелл) считается переломным моментом в высоко разрешающих 4D сейсмических измерениях. С судна *Ramform Valiant* было развернута система перекрытия с 10 косами, расстояние между которыми составляло 3 7.5 м в соответствии с предыдущей съемкой, проведенной в 2001 году *Atlantic Explorer*. В 2001 году *Atlantic Explorer* буксировал

6 кос с 4мя центральными на расстоянии 75 м друг от друга. Надо заметить, что номинальная буксируемая схема, необходимая для повторения съемки 2001 года (шесть кос на расстоянии 75 м друг от друга) с малым расстоянием между косами должна была состоять из 11 кос, буксируемых на расстоянии 35.7 м друг от друга. Даже количество кос было выбрано для упрощения операций.

В распоряжении имелись также результаты еще одной съемки, проведенной в 1998 году на месторождении Драуген. Это была традиционная 3D съемка, использующая четыре косы на расстоянии 75 м друг от друга. Во всех трех съемках использовался сдвоенный источник. В 2001 году не планировалось проводить точного повторения съемки 1998 году, но в результате она стала идеальной базовой 4D съемкой с профилированием с перекрытием и близким к нулю загущением. Более плотное расположение кос впоследствии была реализована на *Ramform Valiant* в сочетании с перекрытием линий взрыва и соблюдением повторяемости точек взрыва, результатом чего стало точное соответствие с азимутами 2001 года.

## Многодисциплинарная Геонаука Междисциплинарная Геонаука

На рисунке 4 показано различие рассчитанных 4D азимутов начальных оффсетов съемок 2001 и 1998 года (слева) с различием, полученным из съемок 2001 и 2004 года (справа). Очевиден положительный эффект сохранения азимутов источник-приемник, чего удалось достичь благодаря правильному планированию съемки. Профильные линии, на которых была проведена съемка для обхода препятствий на этой площади, не включались в сравнение. Кроме того, проводимая оптимальная, 4D съемка характеризовалась очень высокой плотностью расположения кросслайнов и трасс, что обеспечивало сохранение высокочастотный состав спектра и хорошее соотношение сигнал/шум.

*Ramform Valiant* также проводил съемку 4D мониторинга на месторождения Shell Шиирвотер и Ганнет на шельфе Великобритании. В обоих случаях судно располагало 10 косами на расстоянии 100 м друг от друга, 8 из которых являлись центральными. Базовая съемка, которая должна быть повторена на месторождении Шиирвотер, была проведена *Ramform Viking* с использованием схемы перекрытия несколькими годами ранее. При таких обстоятельствах судно курсировало вдоль линий взрыва существующей 3D сейсмической съемки.

### Выводы

Метод 4D измерений, позволяющий сохранить азимут источник-приемник, основан на повторении линии взрывов в сочетании с использованием перекрытия кос (добавочные внешние косы). Разработанный метод был принят к использованию многими нефтяными компаниями для проведения съемок мониторинга. В съемках было достигнуто точное совпадение азимутов источник-приемник и улучшена повторяемость.

### Благодарности

Авторы хотели бы выразить благодарность компаниям Shell, Statoil и PGS за разрешение публикации этой статьи. Мы также хотим поблагодарить Отдел Навигации и Стефена Харвуда из PGS за техническую поддержку и плодотворные дискуссии.

### Ссылки

Li, X.-P., Brittan, J., Harwood, S., and Widmaier, M. [2003] Azimuth preserved trace binning of 4D seismic data for improved repeatability. *65th Meeting EAGE*, A27.  
Widmaier, M., Hegna, S., Smit, F., and Tijdens, E. [2003] A strategy for optimal marine 4D acquisition, *73rd Annual International Meeting, SEG*, 1533-1536.