

## Многодисциплинарный выпуск

## Инновации во времени. Innovations in time

Victor Aarre, Henrik Juhl Hansen, Jorg Herwanger, Julie Marshall, Jens Olav Paulsen, Stephen Pickering, и Michael Tang из WesternGeco представляют опыт компании в проведении мониторинговых сейсмических наблюдений (4D) с использованием патентованной технологии Q-Marine.

Технология мониторинга или 4D сейсмические наблюдения уже существуют некоторое время; первая съемка 4D была проведена в 1981г. На акватории Канады. Сегодня, 16% сейсмических съемок Q-Marine с одним датчиком приходится на мониторинг добычи из коллектора. Одной из причин роста программ сейсмического мониторинга резервуара, является то, что за последние пять лет, индустрия ответила на проблемы построения сейсмических изображений 4D несколькими существенными улучшениями повторяемости. Это, в сочетании с инновациями в анализе и интерпретации 4D, превратило сейсмическую методику мониторинга в составную часть хозяйственной деятельности многих нефтяных компаний.

## Проблемы мониторинга

Какие решенные проблемы помогли превратить 4D мониторинг из идеи в ключевую составляющую инструмента управления коллектором? Рост положительного отношения 4D сейсморазведки, к настоящему времени, обязан тем инновациям, которые в результате привели к улучшению:

- **Безопасности:** Управление расстановкой, которая обеспечивает то, что повторные сейсмические съемки можно проводить безопасно на «загруженных» месторождениях.
- **Качества:** Улучшение соотношения сигнал-шум 4D, это увеличивает возможность обнаружения слабых сигналов 4D и позволяет предсказывать изменения флюидонасыщения и давления.
- **Цикл работ:** обеспечение данными и интерпретацией почти в реальном времени в целях облегчения принятия решений в условиях добычи.
- **Ценность:** Увеличение эффективности получения данных, что обеспечивает то, что затраты не обгоняют ценность на зрелых месторождениях, разработка которых близится к завершению.

## Повторяемость против сложности

Управление расстановкой и способность повторить предыдущую регистрацию, а также минимизация артефактов, вызванных различием в регистрациях, являются наиболее критичными деталями успешной регистрации сейсмических данных 4D. Регистрация четырехмерных сейсмических данных (4D), таким образом, заключается в попытке воспроизвести точные условия основной съемки так, чтобы сравнение (разница) между двумя съемками отражало только различия 4D, которые вызваны добычей из коллектора или нагнетанием.

Регистрация сейсмических данных 4D на перегруженных месторождениях и в областях с сильно и быстро меняющимися течениями рискованна потому, что уменьшение неповторяемого шума в этих сложных условиях эксплуатации более трудно. Для успешного получения сейсмических данных 4D на месторождениях

с сильными океанскими течениями, многочисленными платформами, и другими препятствиями, мы разработали технологию, которая помогает работать безопасно и эффективно.

Далее мы представим некоторые новейшие технологии, разработанные в целях получения сейсмических данных 4D с высокой повторяемостью и качеством воспроизведения путем применения управляемых кос и источников. Наши разработки основывались на наблюдении, что основным вкладом в неповторяемый шум была неспособность точного восстановления прежнего положения источников и приемников (например, Smit et al., 2006). Эти наблюдения также подтверждаются Leendert and Paulsen (2005), они говорят о том, что даже в лучшем случае, традиционные системы без управляемых кос и высокоточной системы позиционирования косы обычно не достигают повторной установки в точности в несколько десятков метров. В самом худшем случае, ошибки позиционирования могут быть более 100 м. В этих обстоятельствах можно обнаружить только самые сильные эффекты 4D. Leendert и Paulsen далее упоминают о том, что другим ограничивающим фактором является неповторяющийся шум, происходящий из нецелевой зоны, вызванный различием положения источника и приемника между базовой и мониторинговой съемками. Это приводит к изменениям пути пробега сейсмической энергии в толще пород и водном слое для каждой из съемок, включенных в 4D эксперимент. В целях сокращения такого неповторяемого шума, требуется более высокая повторяемость.

Для того чтобы достичь требуемого уровня повторяемости, необходимо улучшение совместной работы между человеком и машиной. Путем решения этой задачи является автоматизация, поскольку человек не может точно предсказывать поведение буксируемой расстановки и судна в динамичной морской среде. Кроме кос с автоматическим репозиционированием также требуется интеллектуальное независимое управление косой. Тесты показали, что, в общем, невозможно достигнуть точных характеристик позиционирования источника только с помощью управления судном. Способность разумного независимого позиционирования источника означает, что судном можно управлять с помощью позиционирования с внешним интерфейсом, что существенно улучшает повторяемость приемника.

## Планирование и оценка производительности

Подготовка – только половина победы. Нельзя не подчеркнуть, что успешные 4D проекты рождаются на стадии планирования. В помощь планированию и оценке сейсмической съемке 4D, были разработаны специальные программные продукты, которые на выходе выдают план навигации 4D съемки.

Концепция сбора данных с одним источником, которая дает отменную повторяемость и позиционированием источников и

## Многодисциплинарный выпуск

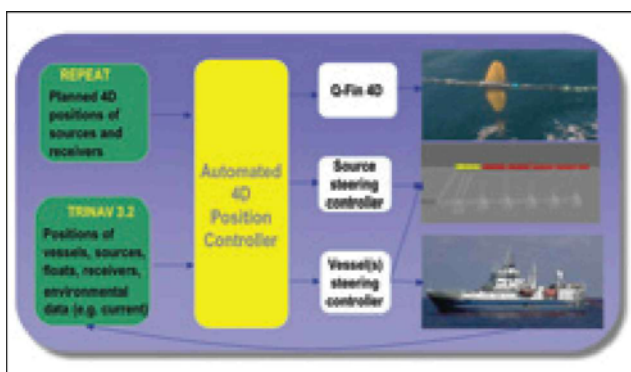


Рисунок 1 Концепции автоматического позиционирования источника и приемника и управления расстановкой.

приемников, суммируется на Рисунке 1. На первом этапе создается план навигации (вверху слева), основанный на характеристиках базовой съемки, характеристики мониторинговой съемки (возможно в расчете на то, что она послужит базовой съемкой в высококачественном 4D эксперименте), и введенных известных препятствиях на области съемки. На выходе получают желаемые позиции судна, источника и приемника для съемки, которые подаются на вход Q-Pilot, систему автоматизированного контроля, которая управляет положениями судна, источника и приемника. В процессе регистрации постоянно наблюдают за реальными позициями судна, источников и приемников

(нижний левый угол). Интеллектуальная система выбора курса получает как желаемое положение (из плана навигации) и реальное положение (из информации позиционирования в реальном времени) для судна, источников и приемников. Нестыковка между желаемым и реальным положением постоянно оценивается и соответствующие сигналы посылаются на устройства управления, расположенные вдоль косы, блок управления положением источника, и блок управления судном, в целях приведения координат косы, источника и судна к желаемым значениям. Таким способом, мы существенно улучшили повторяемость сейсмических съемок 4D.

Первый тест полностью интегрированной системы, включая управление источником, был проведен на судне Q-Marine, *Western Regent* на области Moray Firth на акватории Шотландии в 4 квартале 2006. Первоначальные результаты показали хорошее соответствие между реальным и желаемым положениями ПВ. Результаты этого теста проиллюстрированы на Рисунке 2.

Несмотря на автоматизированное точное позиционирование судна, кос и источников, желательна и необходима процедура контроля качества (QC) для оценки улучшений повторяемости и ее влияния на качество данных 4D. Если QC выполняется практически в реальном времени, это позволяет принимать быстрые решения, касающиеся того, соответствует ли качество данных цели проводимых работ.

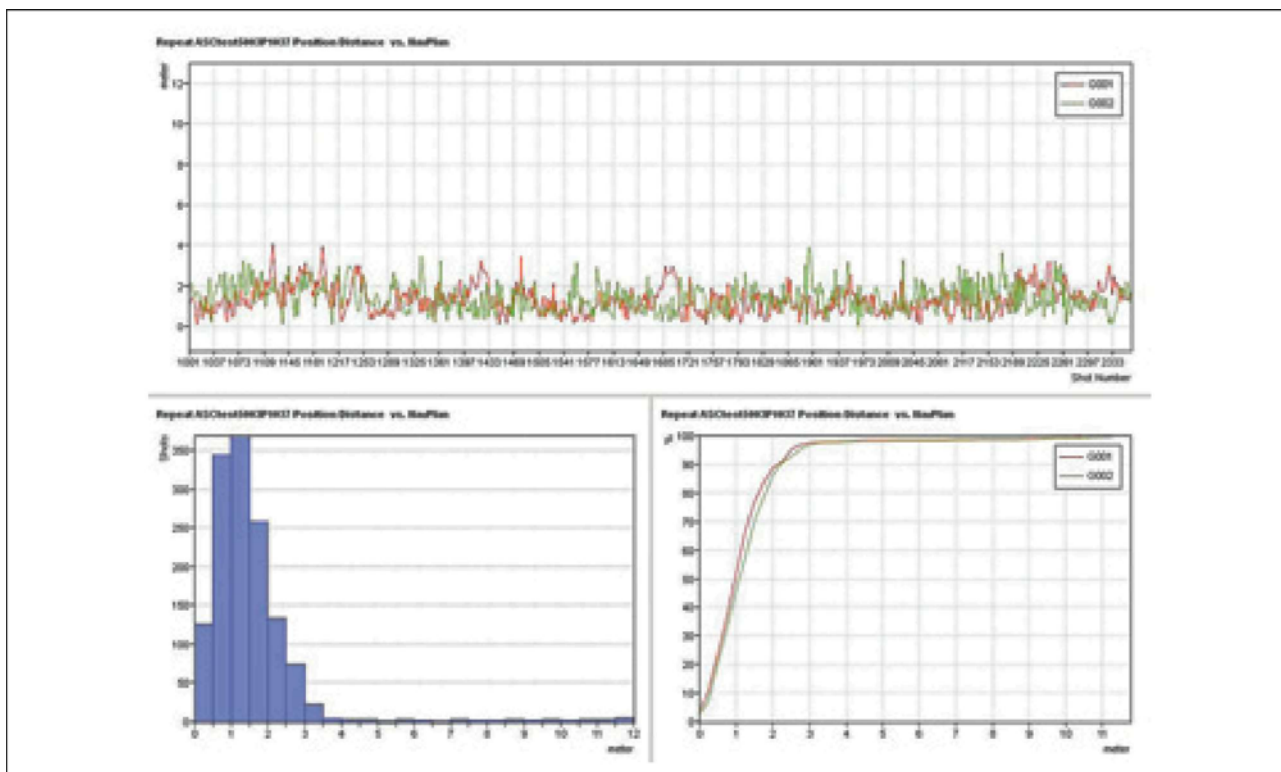


Рисунок 2 Результаты теста интегрированной системы, отражающие разницу в позиционировании между реальной и желаемой позицией ПВ. На графиках (сверху) показаны различия в позиционировании между планом навигации и реальными результатами. Гистограмма (нижний левый угол) и график накопленной частоты (нижний правый угол) показывают, что 90% позиционирования имеет точность 2 м.

## Многодисциплинарный выпуск

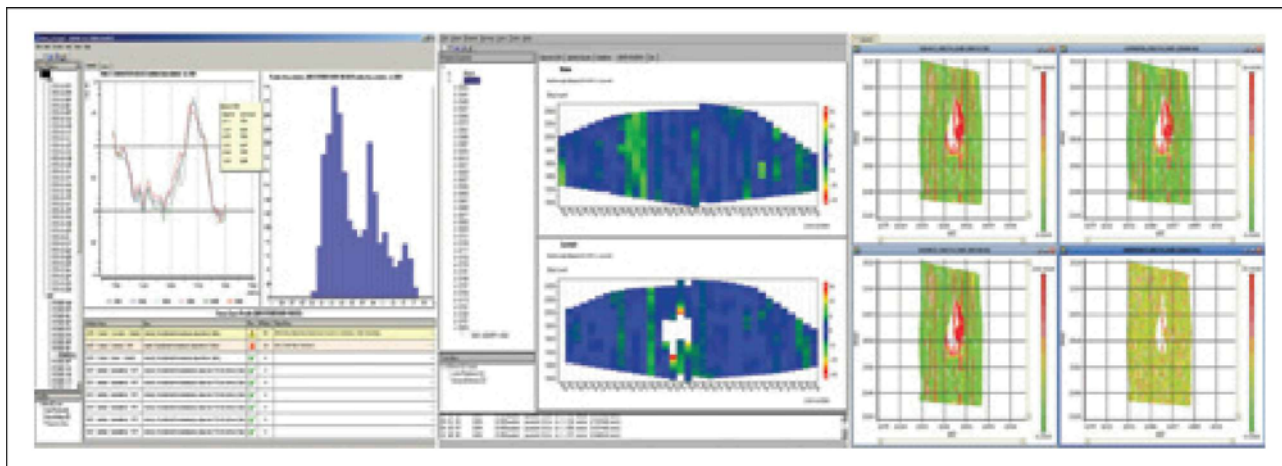


Рисунок 3 Изображения функций QC на основе ПВ и профилей наблюдения, включая статистический анализ, атрибутивный анализ, и визуализацию данных как текущей, так и предыдущей съемки, и разность между двумя съемками, это позволяет производить быстрые модификации в расстановке с целью максимизации повторяемости. Слева: Сложное изображение позиции источника и угол относительного отклонения косы. В центре: Изображение угла отклонения косы для базовой и повторяющихся съемок как функция схемы ПВ до начала работ. Справа: Разница положений источника, азимута и ОСТ между базовым профилем и повторным профилем.

Например, если положения источника и приемника недостаточно точно соответствуют указанной линии навигации, эта линия может быть безотлагательно отстрелена заново. Процедуры QC включают оценку качества 4D как в области ПВ, так и в области ОСТ. Кроме того, мы можем рассчитать статистику повторяемости положений источника и приемника, качества сигнала и других атрибутов, относящихся к 4D. Примеры некоторых скриншотов QC приведены на Рисунке 3.

Комплексные отсчеты могут быть автоматически выведены во внутреннее программное приложение для мониторинга, основанное на интернет-технологиях. В сотрудничестве с командами наземной сейсмики клиентов E&P, это программное приложение позволяет производить быстрое принятие решений из отдаленных точек, в любое время, и таким образом, это позволяет управлять ценой и качеством 4D проекта путем получения своевременной информации.

Имея активное управление косой, мы также можем осуществлять больший контроль над расстановкой, что таким образом, позволит производить более надежные операции на «перегруженных» месторождениях. Например, в 2005, WesternGeco получила данные 1500 км<sup>2</sup> 4D сейсмической съемки на месторождении Marlim в бассейне Campos для компании Petrobras. В пределах области съемки имелось 10 платформ, 13 других крупных препятствий, 40 временных препятствий, 89 плавучих буйев и танкеров, и также грузовые суда. В общем, было выполнено девять подстрелов с двумя проходами с использованием коротких кос и четыре подстрела с длинными косами. Съемка производилась без учета качества, здоровья, безопасности или условий окружающей среды, несмотря на экстремальные погодные условия. Успех этой операции в большей мере относится к тщательному планированию съемки и увеличенному контролю над расстановкой, достигаемому с помощью управления косой.

Помимо улучшения качества и безопасности, автоматическое управление судном и контроль над расстановкой в результате привели к более экономичному получению данных благодаря меньшей необходимости в дополнительных профилях. При обработке использование калиброванных сейсмических источников и приемников дало еще большую экономию

средств, поскольку сократилась необходимость в амплитудных фильтрах и фильтрах согласования фазы.

### Инновации в обработке и интерпретации

Калиброванные источники и приемники с одним датчиком с высоким уровнем повторяемости также ускоряют доставку разности мониторинговых наблюдений. Набортная обработка данных на месторождении Norne съемки 4D дала на выходе куб разности 4D с DMO за три дня после окончания сбора данных. Эти данные, а также кубы относительных акустических импедансов, были доставлены в Statoil в течение последующих 2.5 дней.

Во многих случаях, одна интерпретация суммарных разностей сейсмических амплитуд и изменения в относительном акустическом импедансе упрощают качественное понимание динамических изменений в коллекторе. Изменения в сейсмических амплитудах и относительном акустическом импедансе - хорошо известные индикаторы динамических изменений фронта заводнения и приводят к картированию пропущенных коллекторах. Также, изменения в амплитудах могут указывать на наличие газа, выделяющегося из раствора, вызванного уменьшением давления, что говорит о фрагментации коллектора. Результаты после финальной обработки данных мониторинга можно интегрировать с данными моделирования, которые выводятся для визуализации и выборочной интерпретации разностей наблюдений 4D (Рисунок 4).

Добыча углеводорода и программы нагнетания вызывают изменения упругих свойств коллектора. Эти упругие изменения можно наблюдать с течением времени с помощью методики сейсморазведки 4D. Изменения в насыщении и поровом давлении в пределах коллектора – представляет собой особый интерес, из-за того, что эти свойства имеют огромное влияние на величину нефтеотдачи. То, как резервуар отвечает на эти изменения со временем, можно также использовать для лучшего понимания проницаемости в пределах коллектора.

При сравнении разностей амплитуд для съемок с одним датчиков в 2001, 2003, 2004, и 2006 годах на месторождении Norne, оператором которого является Statoil, мы заметили существенные изменения



## Многодисциплинарный выпуск

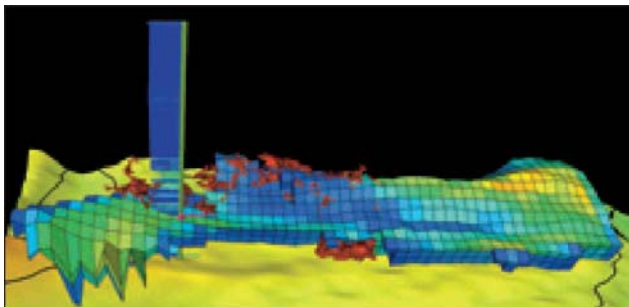


Рисунок 4 Интеграция предсказанных изменений насыщения в коллекторе при моделировании (ячейки сетки) совместно с визуализацией 4D сейсмических эффектов (коричневым).

амплитуд в коллекторе. Остаточная энергия в покрывающих породах на трех графиках разности очень низкая, отсутствуют когерентные признаки «просачивающихся» отражений, что указывает на хорошую повторяемость съемок.

Традиционно, одной из основных целей обработки 4D была оптимизация амплитудных эффектов 4D съемок. За последние несколько лет мы доросли до понимания того, что большая часть сигнала 4D также улавливается путем рассмотрения кинематических изменений в породах над, внутри и под коллектором. Наблюдаемое время пробега 4D между любыми двумя отражающими границами является откликом на изменение положения контакта 4D и изменение скорости между этими двумя отражающими границами. Stammeijer и Landro (2003) описали следующую аппроксимацию первого порядка:

$$\Delta T/T_0 = \Delta Z/Z_0 - \Delta V/V_0$$

Где  $\Delta T$  временной эффект 4D между любыми двумя отражающими границами,  $T_0$  начальное двойное время пробега между ними,  $\Delta Z$  изменение мощности,  $Z_0$  – начальная мощность,  $\Delta V$  – изменения 4D в скорости продольных волн,  $V_0$  – первоначальная скорость в слое между двумя отражающими границами. Мы должны отметить, что  $\Delta T$  – точная временная разница между двумя отражениями, измеренная с точностью до отсчета.

Это новое понимание заставило индустрию переосмыслить то, как обрабатываются данные съемок 4D, поскольку многие этапы обработки, которые кажутся невинными (такие как остаточные статические поправки) в реальности могут иметь разрушительное воздействие на кинематические эффекты 4D. Эти кинематические эффекты очень важно сохранить, и во многих коллекторах, можно продемонстрировать, что имеется явное соответствие между петрофизикой и изменениями скорости продольных волн и изменениями в поровом давлении.

Внутри коллектора, верхний коллекторский горизонт которого выделен зеленым цветом (Рисунок 6), а коллекторский горизонт в основании которого выделен фиолетовым, вы можете увидеть небольшое вертикальное перемещение времени пробега (красным), которое интерпретируется как движение контакта. Ниже резервуара мы видим синюю колонну, которая протягивается вниз и указывает на опускание осей синфазности под самой мощной частью коллектора. Кажущееся перемещение отражающей границы вниз находится в диапазоне 2.5-3.0 мс.

В геохимически активных коллекторах, таких как резервуары с режимом уплотнения пласта, мы можем обнаружить кинематические изменения не только в

коллекторе, но также в перекрывающих породах. В подобных коллекторах, добыча вызывает подземные деформации и изменения в скорости сейсмических волн. Такие деформации и изменения скоростей в перекрывающих породах можно наблюдать с помощью данных периодических сейсмических наблюдений. Несколько авторов (Hatchell and Bourne, 2005; Janssen et al., 2006; Staples et al., 2006) опубликовали результаты применения линейной зависимости между растяжением покрывающей толщи, изменениями скорости, и получаемыми кинематическими изменениями, что оказалось применимым в широком диапазоне геологических обстановок.

Фундаментальной задачей интерпретации временных сдвигов, наблюдаемых в данных периодических наблюдений, является разложение временных задержек на компоненту пространственного сжатия и компоненту изменения скорости. Одним из способов решения этой задачи является предсказание изменений скорости и деформации пластов путем парного моделирования коллектора и геомеханического моделирования напряженного состояния толщи и последующего применения петрофизической модели, которая соотносит изменения напряженно-деформированного состояния с измерениями скорости. Наш опыт на данном месторождении включает исследование трех-осевого напряжения и его влияния на анизотропное изменение скоростей, и соотнесение полевых наблюдений двойного преломления поперечных волн с предсказанными анизотропными изменениями скорости (Hergwanger and Horne, 2005) и соотнесения эффектов 4D, зависящих от удалений, с анизотропными изменениями скорости р-волны.

Моделирование изменений скоростей, связанных с добычей показывает, что в перекрывающей толще, вертикальные сейсмические скорости уменьшаются со временем, что вызывает увеличение времени пробега в мониторинговой съемке по сравнению с временами пробега в базовой съемке. Горизонтальные скорости сейсмических волн в глубокой части разреза увеличиваются, а распространение сейсмических волн при средних значениях углов (порядка 20°-30°) говорит о минимальных изменениях скорости. Одним из методов наблюдения анизотропных изменений скорости является измерение измерений во временах пробега в различных направлениях распространения.

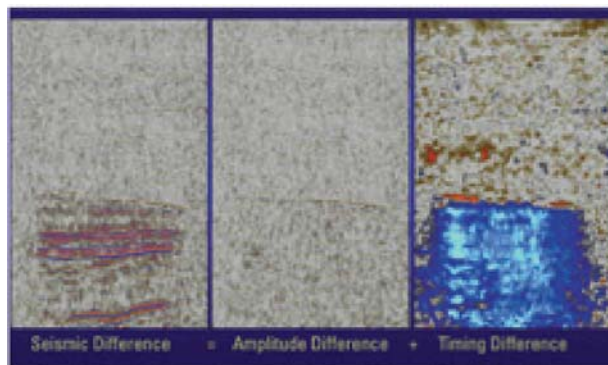


Рисунок 5 4D сейсмический отклик можно разложить на отклик амплитуды акустической волны 4D и 4D кинематический отклик. Кинематический отклик напрямую относится к изменениям 4D скоростей сверху, внутри и под коллектором.

## Многодисциплинарный выпуск

Для измерений в наземной сейсморазведке, это можно сделать путем наблюдения за изменениями во временах пробега как функции удаления или угла ориентации луча. На рисунке 7, мы сравниваем временной сдвиг на периодических наблюдениях для суммарных разрезов интервале углов для малых углов падения ( $5^{\circ}$ - $15^{\circ}$ , слева) и больших углов падения ( $25^{\circ}$ - $35^{\circ}$ , в центре). Наши предсказания говорят о том, что эти временные сдвиги между базовой и мониторинговой съемками самые большие для данных с вертикальным углом падения и постепенно уменьшаются как функция удаления или угла падения. Полевые наблюдения на уплотняющемся коллекторе в Северном море показывают максимальное увеличение времени пробега для данных нулевых удалений на 6 мс (Рисунок 7а). Временные сдвиги как функция угла наблюдения характеризуются предсказанным уменьшением, при этом временные сдвиги для больших удалений в покрывающей толще на 50% меньше, чем временные сдвиги для ближних удалений (рисунок 7b и c).

И в конце концов, изменения насыщения и давления в коллекторе можно определить с помощью методов инверсии AVO; в частности, инверсия дает дополнительную количественную информацию об условиях в коллекторе. На месторождении Gullfaks, методика 4Д сейсморазведки играет важную роль в управлении коллектором. Благодаря росту задач, связанных с добычей на месторождениях, приближающихся к истощению, был принят количественный подход к интерпретации данных мониторинга. Он состоит в 4D упругой инверсии, вслед за которой идет стохастическое петрофизическое обращение и получают изменение порового давления и нефтенасыщения (El Ouair and Stronen, 2006).

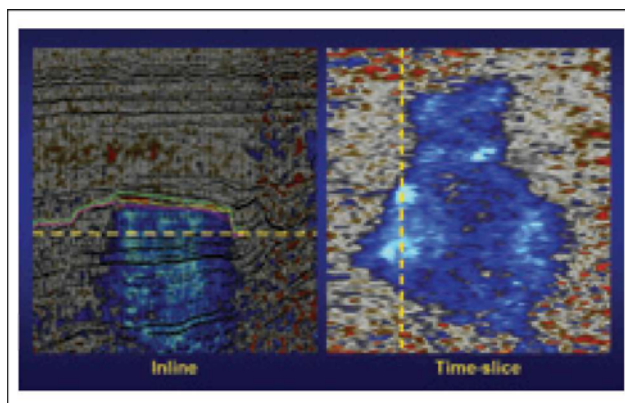


Рисунок 6 Существенные изменения во времени, между съемками 2006 и 2001 годов. Зона опускания осей синфазности покрывает весь участок коллектора по инлайну. Проинтерпретированное смещение контакта показано красными линиями внутри коллектора, при этом вызванные давлением изменения скоростей вызывают среднее опускание оси на 3.5 мс под коллектором.

Метод одновременной AVO инверсии 4D уникален и отличается следующими особенностями от более традиционных алгоритмов и графов 4D инверсии :

- Независимая оценка импульса для каждого частичного суммарного разреза и каждой съемки. Поскольку оценки импульса для каждого различного сейсмического куба независимы

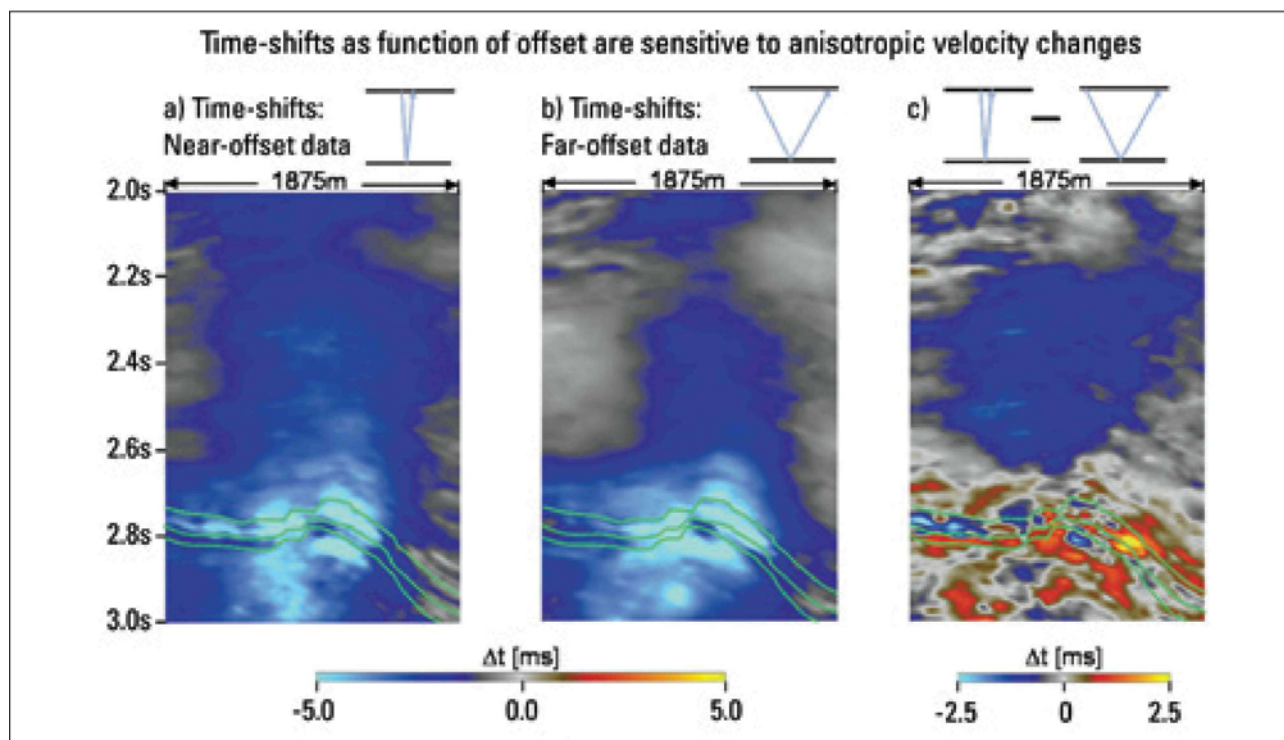


Рисунок 7 Слева: Временные сдвиги между базовой и мониторинговой съемкой для данных ближних удалений. В центре: Временные сдвиги для данных дальних удалений. Справа: Разница между временными сдвигами ближних и дальних удалений. Тот факт, что временные сдвиги для дальних удалений меньше, чем для ближних удалений (в покрывающем разрезе) говорит об анизотропном изменении скорости. Детали смотрите в тексте.



## Многодисциплинарный выпуск

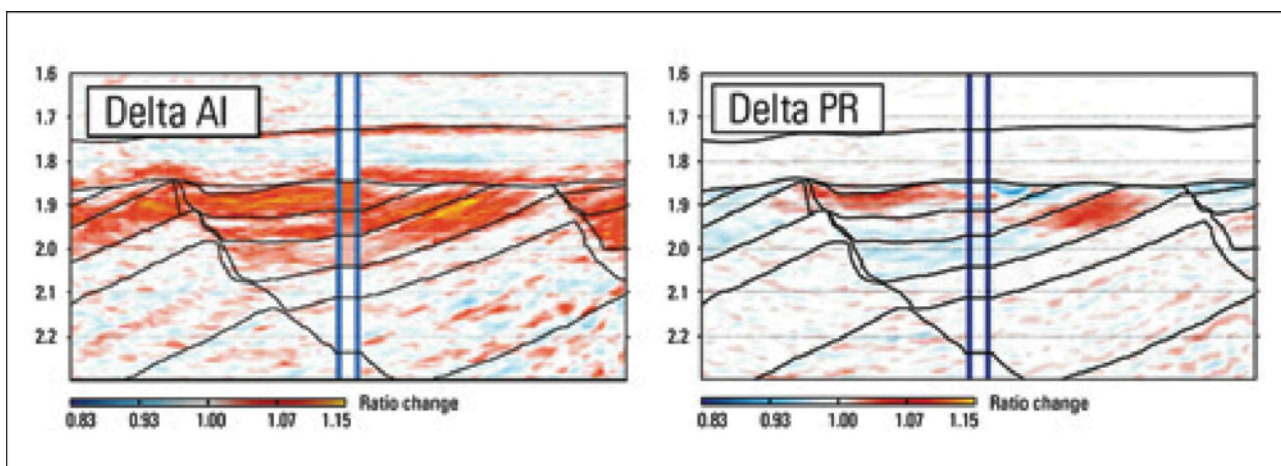


Рисунок 8 4D одновременная инверсия. Красный и желтый цвет означают увеличение акустического импеданса благодаря уменьшению порового давления и увеличению водонасыщения (слева) и увеличение коэффициента Пуассона благодаря увеличению водонасыщения (справа). Увеличение коэффициента Пуассона приурочено к изначально нефтенасыщенной зоне.

любые вариации амплитуд и фаз для различных сейсмических кубов будут улавливаться импульсами.

- Инверсия напрямую в желаемые свойства породы, такие как акустический импеданс, сдвиговый импеданс, коэффициент Пуассона,  $V_p/V_s$  и плотность, и соответствующие изменения в свойствах пород. Т.к. оптимизированная для 4D одновременная инверсия дает напрямую изменения свойств пород, она учитывает априорные модели изменений свойств пород.
- Технология глобальной оптимизации, для которой используются все частичные суммы для съемок всех лет и все отсчеты в пределах всех частичных сумм используются одновременно во всем алгоритме инверсии. Поскольку все сейсмические кубы инвертируются одновременно, алгоритм оптимизированной одновременной инверсии 4D определит модель разреза со свойствами пород и соответствующие изменения, которые оптимально соответствуют всем частичным суммарным разрезам для съемок всех лет.

### Заключение

Мы хотели дать обзор и продемонстрировать некоторые ключевые инновации, которые имели место за последние годы в области технологии сейсмического мониторинга с целью добычи и управления коллектором. Эти инновации относятся как к разработке плана съемки 4D, сбору данных, обработке, инверсии, комплексированию с моделью коллектора и визуализации.

Положение источника можно повторить с большой точностью посредством использования автоматизированного управления судном, источником и косой. Совместно с аппаратом разумного планирования и QC, задачи 4D сейсморазведки можно решать вне рамок сегодняшнего дня. Кроме того, точная качественная запись 4D облегчает реализацию как качественных, так и количественных методов прямого измерения изменений в насыщении коллектора, давления, и напряжений покрывающего разреза.

### Благодарности

Спасибо Statoil и их партнерам за разрешение на демонстрацию примеров данных, включенных в данную статью.

### Литература

- Combee, L. and Paulsen, J.O. [2005] Time-lapse Seismic and Related Marine Technology. *Internal Presentation*, Western Geco.
- El Ouair Y. and Stronen L.K. [2006] Value Creation from 4D Seismic at the Gullfaks Field: Achievements and new challenges. *76<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, New Orleans*, Extended abstract.
- Hatchell, P. and Bourne, S. [2005] Rocks under strain: Strain-induced time-lapse time-shifts are observed for depleting reservoirs. *The Leading Edge*, 12, 1222-1225.
- Herwanger, J.V. and Horne, S.A. [2005] Predicting Time-Lapse Stress-Effects in Seismic Data. *The Leading Edge*, 12, 1234-1242.
- Janssen, A.L., Smith, B.A., and Byerley, G.W. [2006] Measuring velocity sensitivity to production-induced strain at the Ekofisk Field using time-lapse time-shifts and compaction logs. *76<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, New Orleans*, Extended abstract.
- Stammeijer, J. and Landro, M. [2003] Quantitative estimation of compaction and velocity changes using 4D impedance and travel time changes. *65<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition*, Expanded Abstracts, A10.
- Smit et al. [2006] Towards Affordable Permanent Seismic Reservoir Monitoring. Exploration & Production. *The Oil & Gas Review 2006*.
- Staples, R., Nash, R., Hague, P., Ita, J., and Burrell, R. [2006] Using 4D seismic data and geomechanical modelling to understand pressure depletion in HPHT fields of the Central North Sea. *PETEX 2006, London*.