

ПРЕДМЕТ МНОГОАЗИМУТАЛЬНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ

и захватывающей модернизации сейсморазведки методом отраженных волн.

FOCUS ON MULTI- AZIMUTH IMAGING

John Sunderland* представляет две статьи, написанные по специальному поручению, посвященные многоазимутальному отображению, предмету растущего интереса, поскольку сегодняшние сейсморазведочные исследования на нефть и газ ведутся на все более сложных геологических структурах.

Прошедшие 10 лет характеризуются ростом понимания того, что допущение об изотропном распространении традиционно делалось для случая, когда обработка как двумерных, так и трехмерных данных дает почти оптимальное отображение. Расхождения между скважинными данными и данными после глубинной миграции до суммирования стали первым проявлением того, что сейсмические скорости не равны вертикальным (скважинным) скоростям и что анизотропия скорости VTI (трансверсальная изотропия с вертикальной осью симметрии) может иметь большое значение при некоторых литологических условиях. При адекватном скважинном контроле можно оценить параметры VTI ϵ и δ и устранить расхождения.

Однако в случае отображения объектов, расположенных ниже области со сложной геологией, где PSDM важна для оптимального отображения существенна роль миграции до суммирования, освещение искомого объекта может строго зависеть от азимута регистрации. Одного хорошо определенного направления падения может не быть и в результате одного единственного азимута может быть не достаточно для отображения искомого объекта. Поскольку данные, зарегистрированные обычной сейсмической косой, представляют небольшой диапазон азимутов, то для оптимального отображения требуется либо использование очень дорогой донной косы, либо многоазимутальная съемка обычной косой.

Статьи Dewey и др. и Riou и др. описывают, как Wintershall Nordzee и Total соответственно успешно применили двух и трех азимутальное освещение для улучшения отображения на участках под зонами со сложной геологии под Северным морем. Карты освещения, полученные Dewey и др. демонстрируют как азимут может быть существенным в освещении. Ортогональные наблюдения породили значительно отличающиеся сейсмические скоростные модели, которые были подтверждены данными уровня ВСП. Представлена чисто азимутальная анизотропия, и в обеих статьях решается задача — как лучше всего обработать данные так, чтобы оптимальным образом объединить данные от различных азимутов. Обе статьи описывают наблюдения на большом удалении с точной регистрацией в поперечном направлении, что убедительно демонстрирует, что многоазимутальное наблюдение имеет большое значение для районов со сложной геологией. Данные статьи дают превосходное понимание этой новой

* John Sunderland работает в Imaging Department английского представительства геофизической компании TGS-NOPEC. Он является членом редакционных коллегий журналов First Break и Geophysical Prospecting.

¹Wintershall Noordzee BV, The Hague, The Netherlands.²WesternGeco, Schlumberger House, Gatwick, UK.

Применение двуазимутальных данных для отображения среды под соляными куполами

Using dual-azimuth data to image below salt domes

Fiona Dewey¹, Marco van der Meulen¹ и Philip Whitfield²

Введение

В районах со сложной геологией, освещение геологической среды в значительной степени определено параметрами системы наблюдений. Совсем недавно стали все чаще проводиться многоазимутальные и широкоазимутальные наблюдения для улучшения отображения геологической среды, однако такие наблюдения могут порождать новые проблемы; например, как объединить изображения от различных азимутов в одно мигрированное изображение для использования интерпретатором.

Традиционно, согласно обычной практике, следует игнорировать потенциальные азимутальные вариации скорости и строить одну вертикальную скоростную модель, в некоторых случаях включая анизотропию VTI. Миграция данных до суммирования от различных азимутов проводится отдельно, но с одной скоростной моделью, обычно получаемой для одного азимута, а затем данные объединяют в одно изображение после коррекции кинематических поправок. Мы представляем практический пример построения одной скоростной модели для миграции до суммирования двуазимутальных данных, полученных на юге Северного моря. Двуазимутальные данные дали нам расширенное освещение целевой области, однако к нашему небольшому удивлению, они также показали сильные азимутальные вариации скорости в покрывающих толщах. Мы разработали методику и построили одну скоростную модель, которая включала эти азимутальные вариации скорости, так что все отражения были промигрированы к их правильному положению. После объединения данных первые вступления были усилены, в то время как шум был подавлен, т.е. получается один оптимальный набор данных.

Соляной купол в голландской части Северного моря

Много открытых месторождений газа связано с соляными структурами, расположенными в пределах продуктивного пояса пермских известняков в районе голландской части Северного моря. В пределах нашей площади наблюдений располагается большой квадратный соляной купол, и отложения, располагающиеся под ним и на его крутопадающих торцах, характеризуются большой перспективностью. Первичная интерпретация была основана на сейсмических данных малой кратности, полученных в 1990 г. с использованием сейсмических кос длиной 3000 м. Несмотря на обработку, включающую миграцию до суммирования, выполненную в 1999 г., модель структуры является грубой, особенно в областях под соляным телом и рядом с его торцами. Как показано на рис. 1, от улучшенного отображения требовалось распознавание и обрисовка блоков, ограниченных разломами в пределах подсолевой области, оптимизация положения скважин и выявление новых перспективных участков (Dewey и др., 2004).

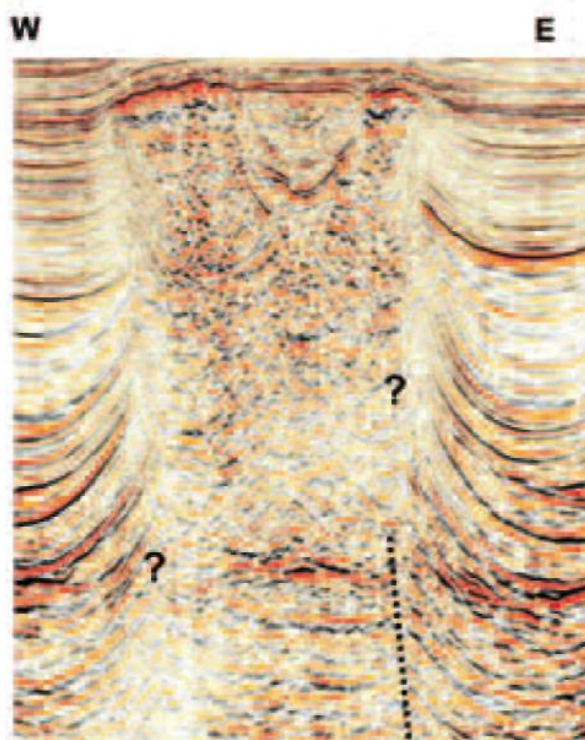


Рис. 1. Линия E-W (восток-запад) поперек центра большого квадратного соляного купола. Данные были получены в 1990 г. и откартированы в глубинном выражении, согласно исходной скоростной модели миграции до суммирования, полученной в 1999 г. Круто падающие границы рядом с торцами соляного тела не отображены. Для области, перекрытой соляным телом, неполное освещение делает интерпретацию разломов сомнительной.

Регистрация данных

Благодаря крутому падению торцов соляного тела и сильному контрасту скорости между солью и вмещающими отложениями, большая часть сейсмической энергии была рассеяна, что привело к неполному освещению граничащей с соляным телом области. Рис. 2 демонстрирует результаты трассирования лучей в области вокруг соляного диапира для отражения от целевого горизонта верхний Rotliegend (простая соль). Изображения представляют собой карты оцененного диапазона удалений для наблюдения в направлении восток-запад (слева) и в направлении север-юг (справа). Оттенки синего цвета показывают, что ограниченный диапазон удалений был успешно трассирован лучами от искомого горизонта, соответствующего области неполного освещения. Оттенки красного, с другой стороны, соответствуют широкому диапазону успешных удалений, показывая хорошо освещенные области.

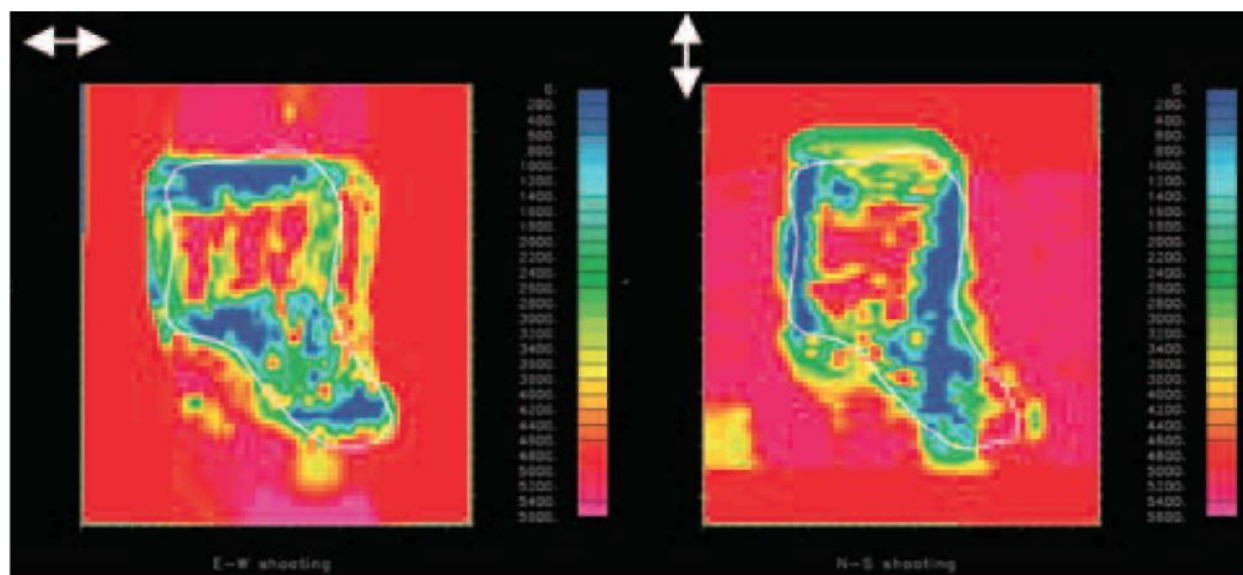


Рис. 2. Карты освещения, полученные после трассировки трасс для наблюдения в направлении В-З (слева) и С-Ю (справа).

В 2003 году была выполнена новая 3D съемка с большими удалениями (косы длиной 5100 м). В основном наблюдения проводились в направлении В-З в направлении преобладающего падения, а также проводились наблюдения на двух дополнительных профилях в направлении С-Ю, параллельно соляному куполу и линейному ребру соляного тела на восточной стороне, как показано на рис. 3. Оба набора данных были получены с использованием двух источников и шести кос, что обеспечило кратность 68 для данных, полученных с шагом по профилю 25 м. Группа взрывов выбиралась так, чтобы минимизировать ожидание приливов и максимизировать выравнивание отклоняющихся кос.

Временная обработка

Ортогональные наборы данных были обработаны одновременно, проводилась временная миграция до суммирования (PrSTM). Граф предварительной обработки включал в себя сильное подавление шума, подавление прямых волн и высокоразрешенное подавление кратных волн. Для оптимизации качества волновой картины, скоростные законы PrSTM для каждого набора данных были выбраны независимо. Интересно, что вертикальные скоростные законы существенно отличались, что привело к тому, что границы с крутым падением после миграции имели разное положение на двух разрезах.

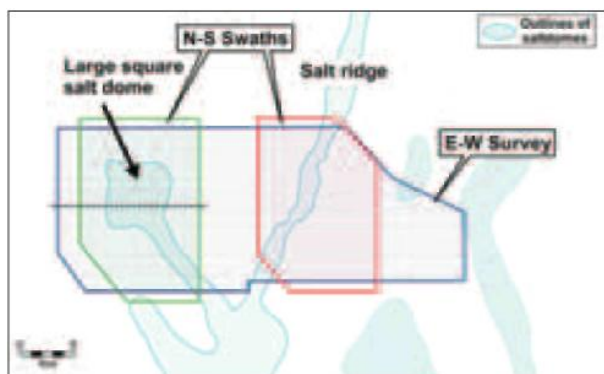


Рис. 3. Вид сверху: области наблюдений, покрывающих соляные структуры. Черной пунктирной линией показан интервал, к которому относятся сейсмические разрезы, приводимые на рисунках.

Поэтому простое сложение ортогональных наборов данных привело к «размыванию» крутопадающих отражений (рис. 4). Для целей интерпретации, были получены три конечных набора данных: один для наблюдений в направлении В-З, один для наблюдений в направлении С-Ю и один объединенный набор. В то время как временная миграция до суммирования хорошо работала для простой геологической модели, она не смогла справиться со сложными траекториями лучей для области, содержащей соляное тело. Чтобы правильно отобразить среду под соляным телом, требуется глубинная миграция, которая учит отражения от основных геологических толщ и будет работать для сложных траекторий лучей.

Вариации скорости в зависимости от азимута

Для оптимального глубинного отображения и правильного расположения отражений мы должны были построить точную глубинную скоростную модель, принимая во внимание вариации скорости в зависимости от азимута, различая азимутальные вариации и эффекты, вызванные просто локальной неоднородностью. Для данного процесса был очень важен выбор подходящего метода корректировки скорости. Мы использовали отражательную томографию (либо на основе слоев, либо пересчет на сетку) с остаточными кинематическими поправками, основанными на начальной модели. Мы отдельно подобрали остаточные кинематические поправки для обоих азимутов и подали все значения, для обоих азимутов, в одну томографическую инверсию, но с соответствующей траекторией луча, полученной для каждого азимута. На рис. 5, мы показали результаты трех корректировок скорости для средне-третичного горизонта, полученного из томографии с использованием значений, полученных для каждого азимута отдельно, а затем для обоих вместе.

Изображение слева было получено с использованием остаточных задержек только для наблюдений в направлении В-З, изображение в середине только для наблюдений в направлении С-Ю, а изображение справа было получено с использованием данных по обоим направлениям. К востоку и к западу от соляного купола, на разрезе В-З наблюдаются более высокие значения скорости чем, чем на разрезе С-Ю, но более низкие значения к северу и югу от соляного купола.

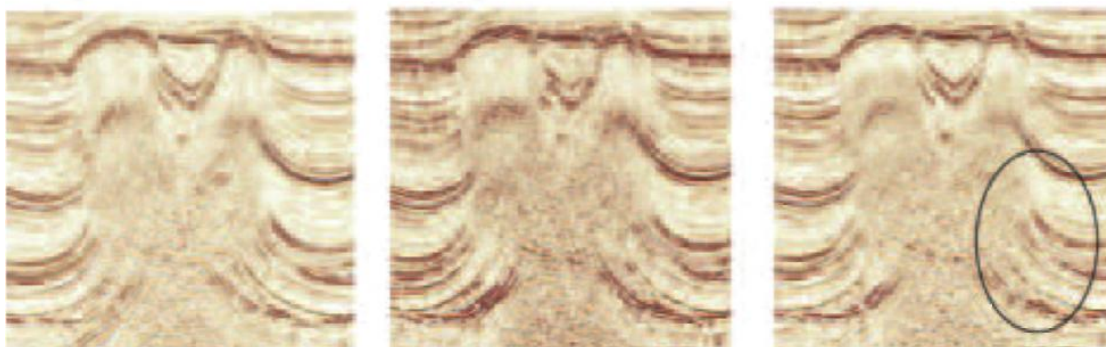


Рис. 4. Временная миграция Кирхгофа до суммирования. Разрез на левом рисунке соответствует наблюдениям в направлении В-З, средний рисунок относится к направлению С-Ю, правый — объединение двух разрезов. Заметьте «размазанность» отражений на объединенном наборе данных.

Подобные различия в скоростях были обнаружены как после временной миграции до суммирования, так и после глубинной миграции до суммирования на большом интервале глубин, от неглубокого горизонта Третичной системы на всю глубину до верхнего Цехштейна. Главными влияющими единицами, скорее всего, являются меловые и глинистые интервалы. Точная причина этих различий все еще не известна, но они, вероятно, связаны с разрывами радиального напряжения, вызванными внедрением соляного диапира. На рис. 6 показан временной срез куба когерентности через Третичную систему, на котором видны радиальные разломы вокруг соляного купола. Полученные скорости согласуются с данной моделью, низкие скорости — в ортогональных к разломам направлениях и высокие значения — в параллельных им направлениях.

Расчет скоростной модели для построения глубинного разреза

Данные ВСП с различным удалением (уровневое ВСП) по трем скважинам были проанализированы для внутренних и эффективных анизотропных параметров VTI. Анализ показал азимутальные вариации, а также подтвердил сильную анизотропию VTI для нижней Третичной системы и для Мелового периода. Это означало, что имела место комбинация VTI и азимутальной анизотропии, что, говоря корректно, требовало анализа анизотропии в трех направлениях. Однако невозможно было ввести такую параметризацию на основе данных только по двум азимутам.

Также была исключена модель горизонтальной поперечной изотропии (НТИ), из-за ограниченности азимута и сложности анизотропии. Наша модель построена на основе ограниченного интересующего диапазона азимутов и принятой практической схемы разработки модели; были использованы одна вертикальная скоростная модель и независимые анизотропные законы VTI для каждого азимута (Whitfield и др., 2005). Мы назвали этот подход «двойной анизотропией». Скоростная модель строилась в нисходящей форме на основе слоев, где каждый слой имеет свои независимые свойства, такие, как скорость, градиент и пространственно изменяющиеся анизотропные параметры, дельта и эпсилон, соответственно для каждого азимута.

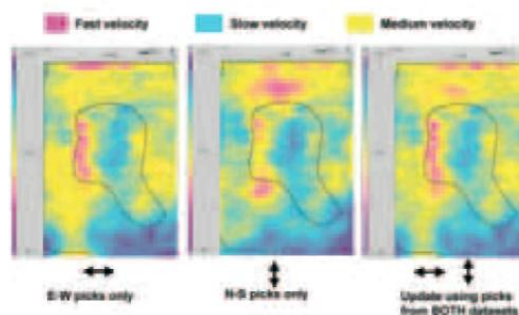


Рис. 5. Карты скоростей после томографии для средне-третичного горизонта вокруг соляного диапира.

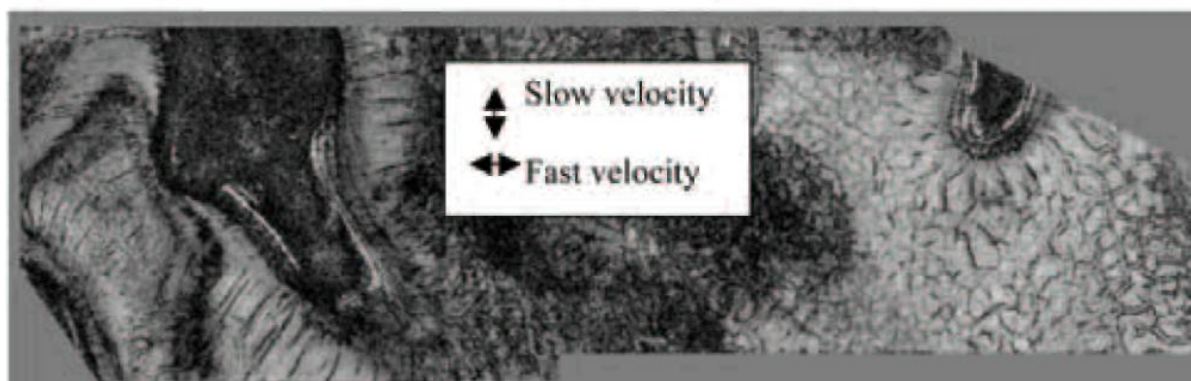


Рис. 6. Временной срез куба когерентности, демонстрирующий наличие радиальных разломов вокруг соляного тела.

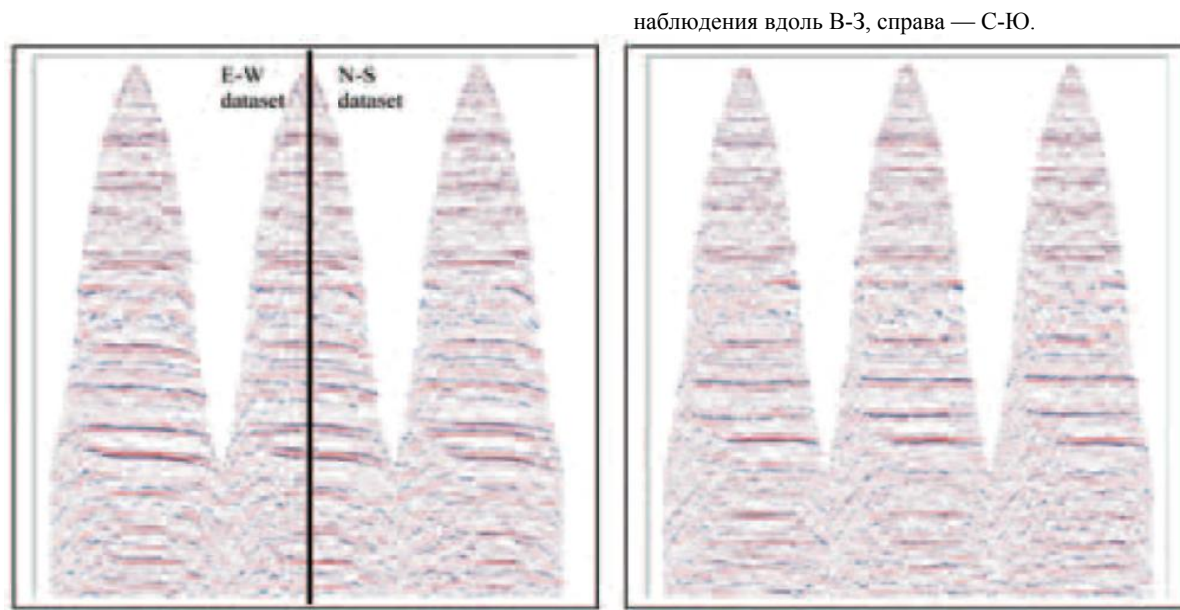


Рис. 7. Двухстворчатые сейсмограммы по начальной модели (слева) и по уточненной модели (справа).

Для анализа данных по двум съемкам мы сравнили сейсмограммы из обоих наборов данных для одних и тех же точек разреза. Был отобран набор сейсмограмм для псевдо-центральной расстановки, который мы назвали «двухстворчатые сейсмограммы». На рис. 7 приведены примеры двухстворчатых сейсмограмм — сейсмограммы слева были промигрированы с использованием начальной скоростной модели без азимутальной коррекции; сейсмограммы справа мигрировались с использованием нашей конечной модели с двойной анизотропией. На каждой двухстворчатой сейсмограмме левая часть соответствует направлению наблюдения В-З с отрицательными удалениями и правая часть направлению С-Ю. Для данного примера и для данных слева, промигрированных с использованием начальной скоростной модели, отражения на наборе данных для направления В-З являются почти плоскими, в то время, как набор данных для направления С-Ю оказался недоспряженным, это означает, что значения скорости слишком большие. Начальная скоростная модель была получена по старому набору данных, который был также получен в направлении В-З, поэтому, скорее всего, мы выбрали правильную скоростную модель для данного азимута, как для старых, так и для новых наборов данных, однако мы даже не подозревали, что скорости меняются в зависимости от азимута. Эти сейсмограммы относятся к западному торцу соляного купола, таким образом, наблюдаемые вариации скорости согласуются с нашей идеей относительно радиального расположения разломов, которое и является причиной этих вариаций. Как только была получена корректная вертикальная скоростная модель и для каждого набора были введены корректные параметры анизотропии, отражения на сейсмограммах стали плоскими, как показано на правой панели.

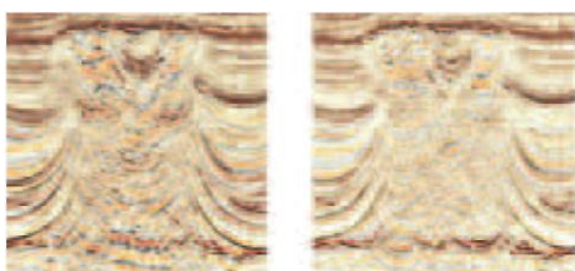


Рис. 8. Глубинная миграция Кирхгофа. Слева для

наблюдения вдоль В-З, справа — С-Ю.

Заметьте, что на двухстворчатых сейсмограммах есть отражения на близких к нулю удалениях, что обосновано обращением в ноль азимутальной компоненты вариации скорости. Данный факт использовался как дополнительный критерий при контроле качества скоростной модели и гарантировал получение четкого изображения после комбинации данных.

Глубинная миграция Кирхгофа до суммирования

Глубинная миграция Кирхгофа до суммирования после трассировки лучей в скоростной модели и учета быстрых изменений скорости дает лучшее освещение подсолевой области, чем простая лучевая временная миграция. Однако алгоритм Кирхгофа имеет ограничения при отображении области ниже сложных соляных тел и под высокими крутопадающими торцами соляного тела. Для данного района вследствие этого появился шум миграции, который не удалось подавить даже после сложения двух ортогональных наборов данных, что осложнило действительное изображение (рис. 8).

Миграция Кирхгофа была адекватна для большинства этапов построения модели, поскольку она обеспечила быстрое выделение целевых горизонтов, которые удовлетворяли требуемому качеству и структурным обновлениям модели.

Миграция на основе волнового уравнения

Миграция на основе волнового уравнения лучше всего подходит для отображения среды под- и на границе со сложными солевыми телами, не только потому, что она может работать для сложных лучей, но также потому, что она дает по существу более устойчивое изображение при наличии резких скоростных вариаций, чем миграция Кирхгофа на основе лучей. Оба набора данных были промигрированы на основе скоростной модели, полученной по алгоритму Кирхгофа, в режиме VTI, используя алгоритм волнового уравнения для линии прострела. Улучшенное качество изображения обеспечивает более точную интерпретацию поверхности раздела соли и вмещающих осадков. При завершении построения скоростной модели для основного соляного тела, проводилась миграция на основе волнового уравнения, чтобы улучшить интерпретацию кровли соли. Также использовалась гравитационная модель для

определения и уточнения формы соляных тел.

выросшая на сегодняшний день производительность

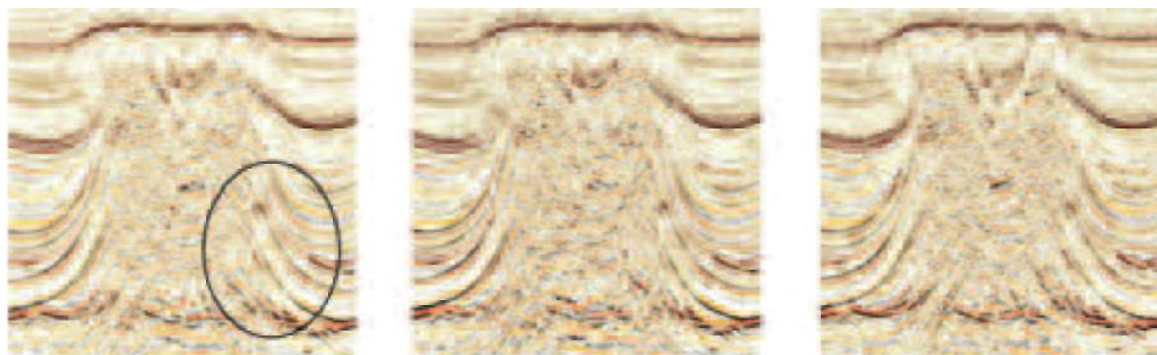


Рис. 9. Конечные сейсмограммы после миграции на основе волнового уравнения: для наблюдения в направлении В-З (слева), С-Ю (посередине) и сумма обеих сейсмограмм (справа).

Из-за субвертикальных торцов соляного тела небольшое изменение в интерпретации имело значимый эффект для конечного разреза.

Мы обнаружили, что несколько итераций уточнения модели, включая усовершенствование интерпретации, были важны для получения хорошего изображения. С увеличенной производительностью компьютера и соответствующим уменьшением стоимости, использование миграции по волновому уравнению в процессе построения модели, стало неотъемлемым этапом.

Ортогональные наборы данных мигрировались отдельно на основе волнового уравнения, а затем были просуммированы (рис. 9). Результаты показали разницу в отображении вследствие вариации освещения, являющегося результатом разного направления наблюдений. Суммирование сейсмограмм после миграции по волновому уравнению дало лучшее отображения для обоих направлений наблюдения и увеличило соотношение сигнал-шум.

Заключение

Для районов со сложной геологией многоазимутальные наборы данных улучшают качество отображения геологической среды. Однако для оптимального комбинирования таких наборов данных любые азимутальные скоростные вариации должны быть приняты во внимание. Для данного набора данных по южной части Северного моря мы обнаружили сильные азимутальные скоростные вариации, как в крутопадающих толщах сланца, так и в толще трещиноватого мела, что было подтверждено данными ВСП.

Мы разработали практическую методику для учета азимутальных вариаций анизотропии в скоростной модели, для ограниченного числа азимутов. Данная методика позволяет мигрировать данные по разным азимутам так, чтобы они могли быть просуммированы для получения одного конечного разреза для интерпретации.

Для юга Северного моря быстро изменяющаяся литология (от сланцев к глине, а затем к песчанику с фрагментарными соляными телами) требует построения детальной скоростной модели, состоящей обычно из восьми или большего числа единиц. Несмотря на наличие инструментов автоматической пикировки и коррекции томографических скоростей, расчет и коррекция скоростной модели с учетом анизотропии, совместимой со скважинными данными, до сих пор является времяемким процессом, обычно занимающим год. В то время как

компьютеров обеспечивает проведение таких вычислительных процессов, как миграция на основе волнового уравнения, которая становится частью процесса разработки модели, необходимы новые продвижения для ускорения создания и корректировки скоростных моделей. В случае роста числа азимутов наблюдений необходимы автоматизированные процессы, которые смогут различить вертикальные и азимутальные компоненты скорости для построения детализированных анизотропных моделей. Конечной целью является получение скоростных моделей, включающих неоднородную анизотропию без увеличения длительности производственного цикла.

Благодарность

Авторы хотели бы поблагодарить Malcolm King из MTS и Chris Soufleris из WesternGeco за их инновационные идеи и непрерывную поддержку в процессе всего проекта. Они также хотели бы поблагодарить Wintershall Noordzee, Energie Beheer Nederland и Petro-Canada Netherlands за разрешение опубликовать данные.

Ссылки на литературу

Dewey, F., and Bernhard, J. [2004] Using Dual Azimuth Acquisition to Illuminate Below Salt Domes. *Petex*, Abstracts.
Whitfield, P., Dewey, F., and King, M. [2005] Prestack Depth Migration of Dual Azimuth Surveys incorporating Azimuthal P-wave Anisotropy. *67th EAGE Meeting*, Extended Abstracts.