

Обработка данных

Комплексирование сейморазведки и каротажа: обработка данных 3D с использованием каротажных диаграмм с зондом и скважинных сейсмических данных

Well-driven seismic: 3D data processing solutions from wireline logs and borehole seismic data

Стив Морис (Steve Morice), управляющий выпуском (комплексирование сейморазведки с каротажом, WesternGeco), Жан-Клод Пуэх (Jean-Claude Puech), координатор по скважинной сейморазведке (Schlumberger, Европа, СНГ и Африка), и Скотт Линей (Scott Leaney) консультант по геофизике, (Schlumberger) демонстрируют как новая методика комплексирования сейсмических данных с данными скважинной геофизики дает возможность значительно оптимизировать предварительную обработку данных сейморазведки, производить преобразования до суммирования и осуществлять инверсию в упругие свойства.

Для удовлетворения требованиям о повышении разрешения, соотношении сигнал-помеха, точности позиционирования и верности передачи амплитуд сейсмических данных 3D, сейморазведке нужны новые алгоритмы и методики на протяжении всего цикла обработки данных.

Скважинные данные, в форме каротажных диаграмм и профилей вертикального сейсмического профилирования (ВСП), помогают накладывать ограничения на параметры обработки сейсмических данных, а также проводить калибровку при обработке 3D на основе привязки скважинных данных к данным сейморазведки.

Новые методы комплексного анализа каротажных диаграмм, данных ВСП и сейсмических данных до суммирования могут обеспечить нас ценной информацией о скоростях сейсмических волн (P и S), коэффициентах неупругого поглощения(Q), анизотропии скоростей (по различным осям симметрии) и кратных волнах. Кривые каротажа, данные ВСП и сейсмики должны обрабатываться и анализироваться совместно – учитывая различия между ними, диапазоны разрешающей способности, и различные источники ошибок и неоднозначностей – для получения единообразных и согласованных записей скважинных кривых и данных наземной сейморазведки.

В геофизической литературе можно найти подробное описание способов получения сейсмических параметров из каротажных кривых и ВСП (см. Рекомендации к дальнейшему чтению). Целью этой статьи является иллюстрация того, как эти свойства применяются при решении основных задач традиционной обработки сейсмических данных 3D.

Использование каротажа в предварительной обработке данных сейморазведки

В обычной процедуре обработки сейсмики 3D, этап предварительной обработки данных включает восстановление амплитуд и фаз, деконволюцию и подавление кратных (Рисунок 1).

Если мы из скважинных данных получим точную информацию о скоростях распространения сейсмических волн, объемной плотности, неупругом затухании (Q) и анизотропии, мы сможем рассчитать коэффициенты для восстановления амплитуд с учетом геометрического расхождения (для анизотропной среды), Q потери и потерю на передачу энергии – все они калибруются к потерям энергии в нисходящей волне поля волн ВСП. Эта калибровка особенно важна при исследованиях AVO (см. ниже).

Данные ВСП и каротажа могут быть использованы как опорные при подавлении кратных волн в данных наземной сейморазведки и для тестирования параметров обработки (Рисунок 2). Для вертикальной скважины и при совмещенном источнике-приемнике и горизонтально-слоистой толще, нисходящие кратные волны параллельны вступлению прямой волн и прекращают прослеживаться на вершине кратнообразующего слоя. Так же, восходящие кратные волны параллельны однократным и прекращают прослеживаться в основании кратнообразующего слоя. Путем построения операторов деконволюции с разной длиной окна используя поле нисходящих волн, можно исключить длинно- или короткопериодные кратные в поле восходящих волн. Результаты коридорного суммирования и синтетических сейсмограмм, содержащих или только однократно отраженные волны или поле однократных + кратных волн можно сравнить с результатами

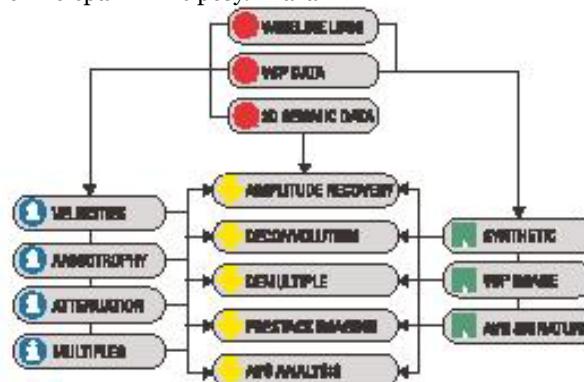


Рисунок 1 Схема комплексирования скважинной информации с данными сейморазведки 3D. Данные каротажа и сейсмики комплексируют для получения модели геофизических свойств, которая включает в себя скорости распространения сейсмических волн, параметры анизотропии, коэффициенты затухания (Q) и разные другие характеристики. Модель свойств используется на определенных стадиях обработки сейсмических данных, при восстановлении амплитуд и фаз, при деконволюции и подавлении кратных, а также при преобразованиях данных до суммирования и анализе AVO (или акустического импеданса). Скважинные данные также обеспечивают контроль качества данных сейморазведки на протяжении всего этапа обработки, путем сравнения данных сейморазведки, синтетических сейсмограмм, изображений ВСП и форм AVO-зависимостей по скважинным данным.

Обработка данных

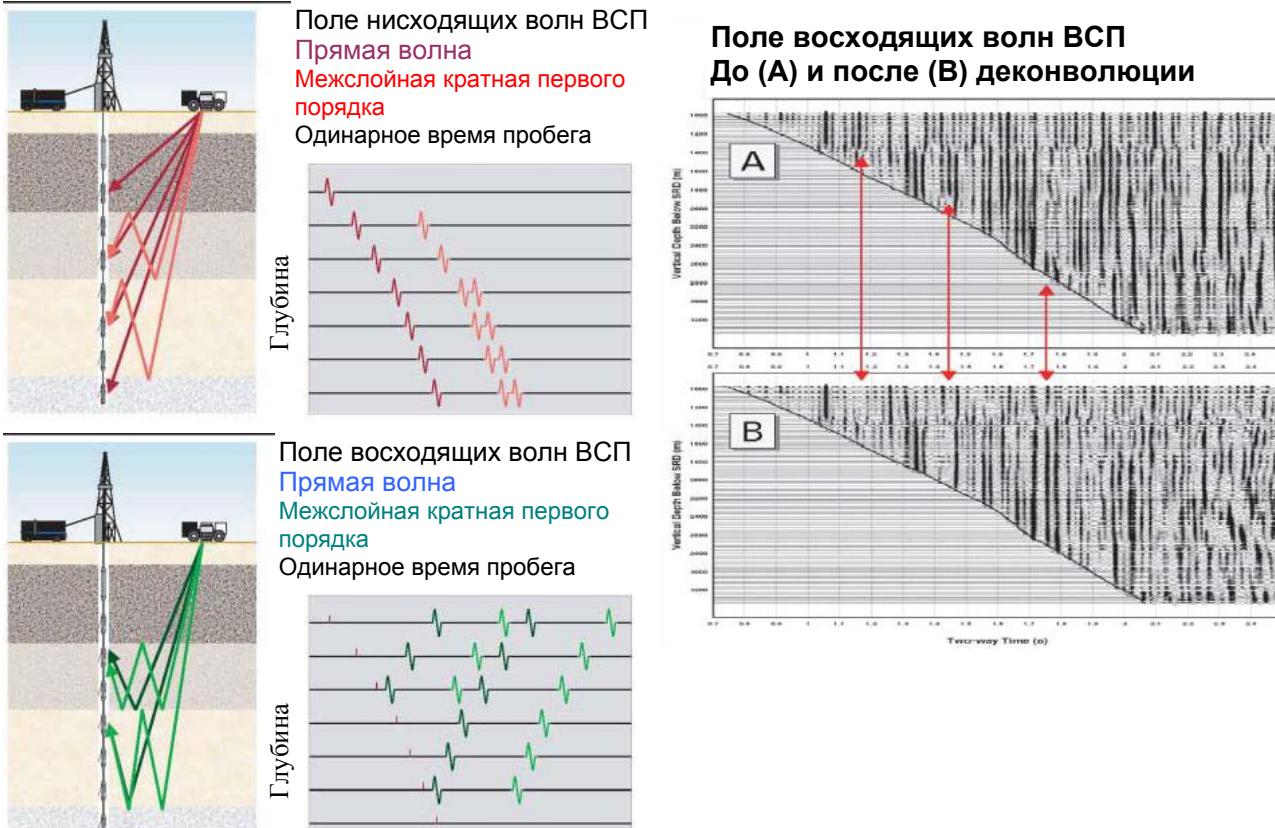


Рисунок 2 Характеристики межслойных кратных на данных ВСП. В левом верхнем углу показана схема образования поля нисходящих волн ВСП, включая прямую волну (темно красным) и нисходящие кратные (красным). Отметим, что вступления кратных в масштабе одного времени пробега параллельны вступлению прямой волны (для одномерной модели) и многократные волны перестают прослеживаться на глубине нисходящего отражения (поскольку над слоем, на котором она образовалась не может быть никакой нисходящей волны). Так же, на нижнем левом рисунке показаны восходящие однократные отражения (темно зеленым) и связанные с ними кратные волны (зеленые). И снова, оси синфазности кратных волн параллельны осям своих однократных, оси перестают прослеживаться на глубине второй восходящей отраженной волны (потому что ниже слоя, на котором она образовалась не может быть восходящей волны). Справа, мы привели пример записи восходящих волн ВСП после перевода в двойное время пробега (теперь оси синфазности отраженных волн выровнены вертикально). Кратные волны (три из которых помечены красными стрелками) видны на Рисунке (A) по прекращению прослеживания, а оси синфазности однократных волн, могут быть пропикированы по глубине окончания прослеживания. На рисунке (B) показана та же запись ВСП после деконволюции нисходящего импульса для подавления межслойных кратных. Данные ВСП дают необходимую информацию для подавления кратных волн в наземной сейсморазведке; поле восходящих и нисходящих волн ВСП помогает нам разделять однократные и многократные отражения при проведении тестов на подавление кратных волн в наземной сейсмике; мы можем определять траектории распространения межслойных кратных в переводе на восходящие и нисходящие отраженные волны, которые подаются на вход процедур подавления кратных, на основе заданной модели.

тестирования способа подавления кратных наземной сейсмикой для получения объективного метода оценки этих тестов. Более того, точная идентификация осей синфазности кратных волн в поле сейсмических волн может быть использована для разработки методик подавления межслойных кратных волн на основе адаптивного метода решения обратной задачи.

Целью деконволюции является стабилизация сейсмического импульса (обычно для получения определенного амплитудного и фазового спектра), которая способствует лучшей прослеживаемости сейсмических отражающих горизонтов и привязке коэффициентов отражения к стратиграфии. Для увеличения временной разрешающей способности, амплитудный спектр трассы должен быть расширен насколько можно (должна быть широкая полоса частот) и сглажен (все частоты имеют одинаковые амплитуды), но без избыточного усиления амплитуд на частотах с низким

Чтобы этого добиться, можно использовать скважинные данные для построения оператора деконволюции, который ограничен как уровнем сигнал-шум, так и наблюдаемыми коэффициентами отражения по скважинным данным. Процедура может быть переменной, как во времени, так и в пространстве; ее можно адаптировать к содержанию шума, частотному составу данных и положению скважин.

Роль каротажных данных в уточнении сейсмических построений

Точность ограничений, накладываемых на 3D модели анизотропного распределения скоростей жизненно важна при проведении миграции до суммирования (временной и глубинной), она важна для того, чтобы проводить корректную фокусировку осей синфазности и привязку изображения к каротажным диаграммам.

Обработка данных

Масштабированные кривые АК, записи контрольного каротажа или данные ВСП для вертикального падения могут снабдить нас самыми точными значениями вертикального распределения скоростей в точке положения скважин, эти данные можно привязать к полю скоростей 3D, полученному по данным сейморазведки до суммирования.

Данные уровенного ВСП уникальны, они дают возможность проводить точную оценку интервальных или эффективных параметров трансверсальной анизотропии с вертикальной осью симметрии (VTI) (с обобщением для анизотропии с наклонными осями (TTI)). Данные 3D ВСП также дают необходимую информацию по азимутальной анизотропии (HTI) - это важная информация при многоазимутальной обработке сейсмических данных и в особенности многокомпонентных данных 3D.

Поле анизотропного распределения скоростей для временного преобразования Кирхгофа до суммирования обычно задается как набор переменных во времени и пространстве скоростей NMO и параметра «эта» (Alkhalifah). Этим двум параметрам свойственна неопределенность при анализе приращения времени в сейсмических данных до суммирования, как показано на Рисунке 3. При вводе ошибочных параметров анизотропии скорости, которые могут даже удовлетворять критерию приращения времени, могут получиться плохие результаты 3D миграции и появиться ошибки в AVO анализе и при глубинном преобразовании сейсмических данных. Неоднозначность можно разрешить путем использования вертикальных скоростей и параметров анизотропии, полученных по скважинным данным.

Качество преобразования глубинной миграции и точность позиционирования в значительной мере увеличивается при использовании ограничений значений параметров по данным каротажа. Определение дельта параметра Томсена на основе анализа данных уровенного ВСП особенно важно при построении моделей 3D на основе скоростей NMO, которые привязаны к маркерным буям по глубине. Используя данные наземной сейморазведки на больших выносах и данные ВСП, можно определить эпсилон параметр Томсена, который дает возможность проводить более точные построения 3D для дальних каналов. Чтобы получить общую модель анизотропии скоростей для использования в глубинной миграции двух массивов данных, можно использовать данные кинематической томографии из наземной сейморазведки и томографии ВСП (Рисунок 4).

Скважинные данные, обычно кривые АК для продольных и поперечных волн, данные уровенного ВСП могут особенно помочь в обработке многокомпонентных данных по обменным волнам. Главный этап при построении 3D скоростной модели P и S-волн - корреляция осей синфазности (увязка соответствующих отражений на временных разрезах на PP и PS волнах). К сожалению, эта процедура часто неоднозначна, в то время как точные значения скоростей P- и S- волн по скважинным данным позволяют проводить прямой переход от временного разреза на PP волнах в двойном времени пробега и на волнах PS в двойном времени пробега к глубине. Привязка к скважинам подразумевает привязку отражающих границ к соответствующим маркерным буям. Современный уровень получаемых данных трехкомпонентного ВСП с использованием систем сбора скважинных данных последнего поколения, позволяет производить запись и разделение полей P и S волн, даже на близких каналах. Эти волновые поля можно проанализировать на предмет коэффициентов *зарядональя* P и S волн, которые

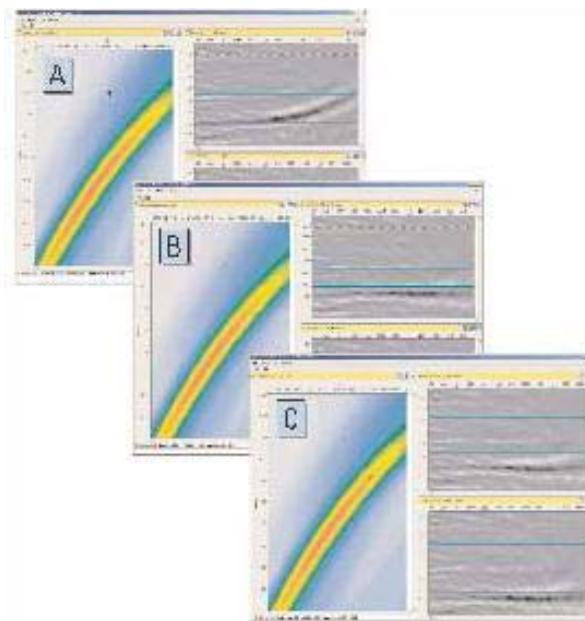


Рисунок 3 Неоднозначность анизотропии скорости в данных наземной сейморазведки. На рисунках продемонстрированы проблемы, которые встречаются при попытке точного определения скоростей и параметров трансверсальной анизотропии с вертикальной осью симметрии VTI на основе кинематических поправок. В левой части каждого рисунка показана кривая подобия интервальной скорости P-волны (по горизонтальной оси, возрастание значений слева направо) как функция параметра «эпсилон» Томсена (по вертикали, возрастание сверху вниз), и влияние различных комбинаций этих двух параметров на кинематическую поправку в окне данных до суммирования (справа, в двойном времени пробега и с осью глубин). На Рисунке (A) показана начальная анизотропная скорость ($\epsilon = 0$), мы наблюдаем большую остаточную кинематическую поправку на основном отражающем горизонте в двойном времени пробега. На кривой подобия виден широкий максимум, который начинается с низких значений интервальных скоростей (здесь, меньших чем 2000 м/с) и высоких значений эпсилон (больше чем 0.3), до высоких скоростей (выше 2400 м/с) и низких значений эпсилон (около 0.05). Рисунок (B): мы можем выбрать одну пару параметров на максимуме кривой подобия (здесь, для низких скоростей и высокого эпсилон), мы увидим, что кинематическая поправка введена правильно. Подобным образом, на Рисунке (C), мы можем выбрать высокую скорость и низкое значение эпсилон, и мы увидим, что кинематическая поправка также введена правильно. Решением этой неоднозначности было бы использование вертикальной скорости, взятой из скважинных данных (кривые АК или времена ВСП), в этом случае, 2240 м/с; затем надо использовать значения анизотропии, соответствующие максимуму подобия. Также, мы можем использовать параметры анизотропии, полученные при инверсии данных уровенного ВСП.

впоследствии используются при обратной Q-фильтрации данных 3D на PP и PS волнах. Модели анизотропии скорости, полученные по скважинным и сейсмическим данным, позволяют проводить такую же точную миграцию разрезов на обменных волнах до суммирования во временной и глубинной области, как для P-волн.

Обработка данных

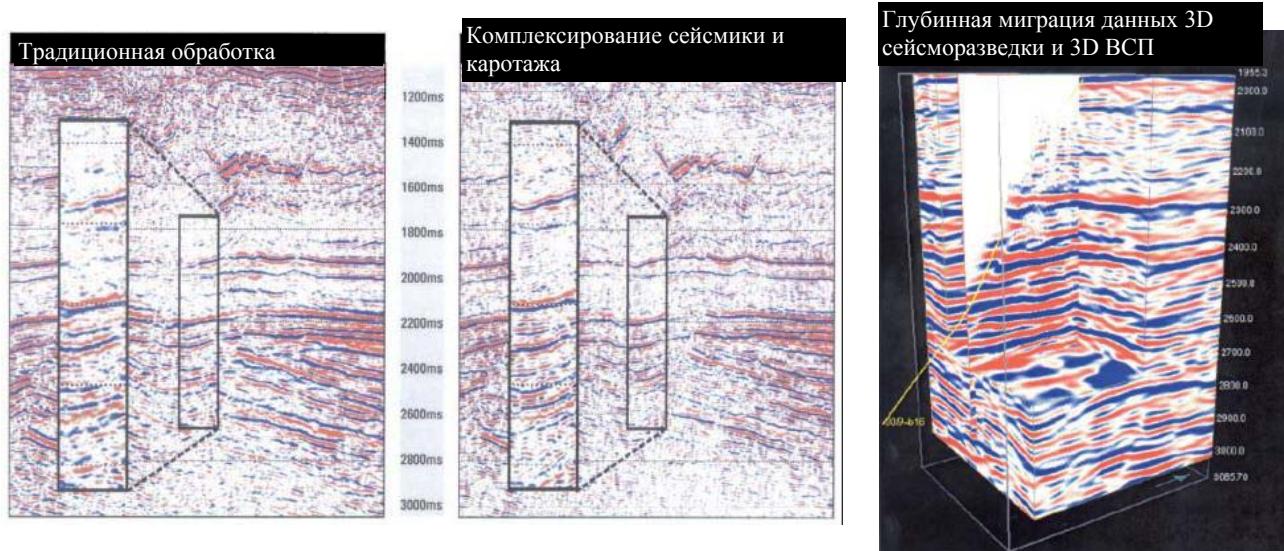


Рисунок 4 Сравнения результатов традиционной предварительной обработки и построений во временной области до суммирования (слева вверху), и нового графа обработки и построения изображения на основе использования скважинных данных (справа вверху). При использовании скважинной информации видно явное улучшение вертикального и горизонтального разрешения и прослеживаемости отражений. На рисунке показана часть мигрированного куба данных 3D ВСП, пересекающего куб данных наземной сейсморазведки 3D после проведения глубинной миграции до суммирования. Оба блока данных были мигрированы с использованием одной и той же модели анизотропии скорости. Как видно из рисунка, наблюдается превосходная связь сейсмических отражающих границ двух кубов данных. Детали можно найти в работе Petersen *et al.*, Высокоразрешенный подход к выявлению коллекторов с использованием комплексной обработки сейсмических данных на примере Северного моря, представленную на 66й конференции EAGE в Париже (2004). Данные предоставлены компанией Norsk Hydro.

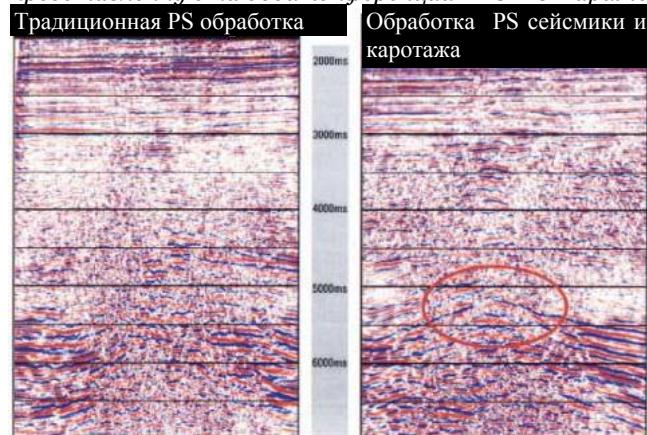


Рисунок 5 Сравнение традиционной обработки PS волн (слева), и обработки PS волн с использованием скважинных данных (справа), по данным многокомпонентных исследований в Северном море. Восстановление амплитуд и построение изображения до суммирования используя данные каротажа дало существенное улучшение изображения целевой антиклинальной структуры (красный овал). Более подробно этот пример разобран в работе Aar и Hot (Aarre and Knoth), Обработка профиля 2D/4C на месторождении Элдфиск на основе комплексирования с данными каротажа, работа представлена на 65й конференции EAGE в Ставангерге (2003). Данные любезно предоставлены ConocoPhillips.

Более того, подход на основе заданной модели позволяет нам строить изображения других мод, таких как PSS: обмен по нисходящей с P-волны на S волну на высокоскоростном слое (например, мел, соль или базальт), и строить изображения на поперечных волнах для более глубоких осей синфазности.

На рисунке 5 показан пример результата обработки многокомпонентных сейсмических данных из района Северного моря с использованием скважинных данных.

Использование скважинных данных при восстановлении амплитуд

На протяжении всего цикла обработки, для того, чтобы привязать сейсмический куб данных к данным скважин, можно перебирать параметры. Рядом с точками положения скважин создаются тестовые панели разреза для того, чтобы тестируировать параметры обработки. Из сейсмограсс извлекаются импульсы, используя коэффициент отражения по скважинным данным (соответствующий заданному диапазону удалений или углов падения), атрибуты рассчитываются на основе соответствия между синтетической сейсмограммой и сейсмическими данными, а также качества самих скважинных импульсов. Среди часто используемых атрибутов - коэффициент корреляции между синтетическими и сейсмическими трассами, соответствие частной когерентности, отношение сигнал-помеха, и мера распределения энергии вне центрального лепестка импульса (как индикатор разрешающей способности и уровня энергии кратных волн).

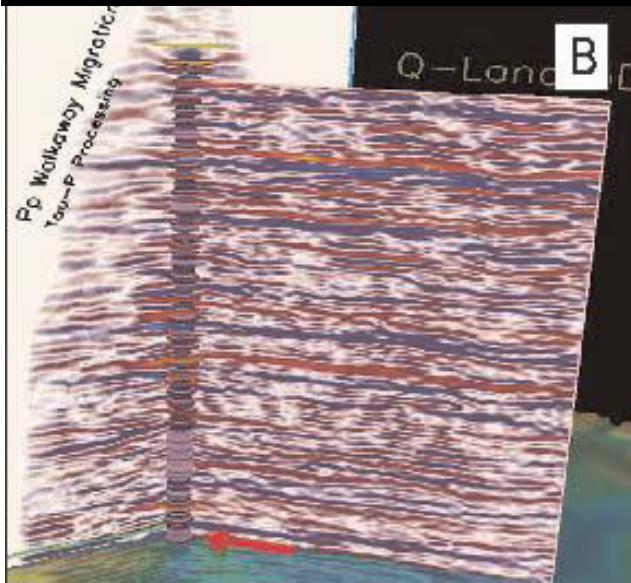
Данные уровенного ВСП и каротажа с зондом дают ценную информацию для обработки данных дальних каналов с восстановлением истинной амплитуды в наземной сейсморазведке. Успешная обработка AVO требует точного контроля амплитуд и фаз до суммирования. Компенсация влияния Q как функции удаления и анизотропии существенна при обработке данных для удаленных каналов, на которых при наличии коллектора видны самые сильные AVO эффекты. Точное геометрическое построение сейсмического луча в модели анизотропии скорости, получаемой по скважинным данным, гарантирует точное соответствие между удалением и углом падения для обращения AVO 2004 EAGE

Обработка данных

Синхронное получение данных



Интегрированная обработка



Кривую поведения AVO для целевого коллектора можно узнать либо путем моделирования с использованием данных каротажа (АК на продольных и поперечных волнах и плотностной каротаж), или с помощью прямых наблюдений уровенного ВСП. Граф обработки 3D сейсморазведки можно оценить на основе привязки сейсмических данных до суммирования и кривых AVO по скважинным данным.

Определение характеристик коллектора по данным сейсморазведки

При наличии сейсмических данных, совместимых со скважинными данными (при условии калибровки амплитуд с использованием ряда коэффициентов отражения до- или после суммирования или зависимости амплитуды от удаления, полученной по скважинным данным), сейсмические данные 3D оптимально подготовлены для проведения инверсии в упругие свойства (импеданс Р и S-волны, плотность) до или после суммирования. Неявная калибровка при привязке данных сейсмики к скважине позволяет нам быть более уверенными в получаемых свойствах коллекторов, таких как пористость, литология и флюидонасыщение 3D. На

Комплексное описание свойств коллектора

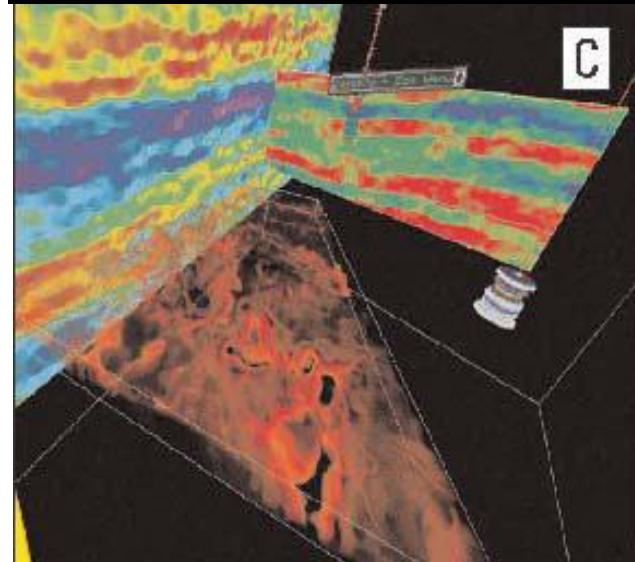


Рисунок 6 Пример комплексирования скважинных данных с данными наземной сейсморазведки для проекта в Алжире: получение данных, обработка, определение свойств коллектора. Фотография на рисунке (A) была сделана во время одновременного проведения одноканальной наземной съемки Q-Land (показано управление со станции WesternGeco) и многоуровневой ВСП Q-Borehole (при использовании самоходной каротажной станции Schlumberger, подчиненной наземной системе Q-Land). На рисунке (B) показаны результаты комплексной обработки данных наземной сейсмики и скважинных данных, продемонстрировано отличное соответствие между наземными сейсмическими данными, мигрированными данными уровенного ВСП и синтетической сейсмограммой (на пересечении). Кровля коллектора помечена красной стрелкой. На Рисунке (C) проиллюстрирован анализ инверсии с помощью волнового уравнения акустических волн данных сейсмики 3D и определена кажущаяся пористость участка коллектора (полупрозрачные красные точки), с целью идентификации новых объектов бурения. Более подробная информация по этой работе приведена в статье Мориса и др. (Morice et al.), Обнаружение сложного коллектора с использованием комплексирования данных сейсморазведки 3D и ВСП (на этапе сбора данных и обработки), работа представлена на 66-ой конференции EAGE в Париже (2004). Пример данных предоставлен благодаря любезности компании Sonatrach.

Рисунок 6 приведен один такой пример.

Применение предельных значений, получаемых по данным скважин, делает процедуру обработки 3D практически детерминистской. Помимо того, что в результате обработки увеличивается разрешающая способность и практически отсутствует искажение амплитуд после обработки, методы комплексирования данных скважин являются идеальными при обработке данных сейсморазведки 4D.

Заключение

Развитие новых методов комплексной обработки данных сейсморазведки, в сочетании со скважинной геофизикой,

Обработка данных

(включая данные АК и плотностного каротажа, продольное и уровненное ВСП) дают новые возможности для существенного улучшения качества предварительной обработки сейсмических данных 3D, преобразования до суммирования и инверсии в упругие свойства.

Новые методики комплексного анализа данных каротажа, скважинных сейсмических данных и данных наземной сейсморазведки вызывают нам более точно определять ключевые геофизические свойства покрывающей толщи и коллектора, такие как скорости распространения сейсмических волн, анизотропия, коэффициент затухания (Q) и характеристики поля кратных волн. Эти свойства интерполируются между точками положения скважин и экстраполируются по всей площади исследования одним из тех способов, который наилучшим образом соответствует сейсмическим данным 3D. Затем эти свойства используются в граfe обработки сейсмических данных 3D, при этом проводятся: восстановление амплитуд, деконволюция, подавление кратных, преобразования до суммирования (временные или глубинные, включая многокомпонентные данные) и амплитудный анализ. Такие данные как синтетические сейсмограммы или данные скважинных сейсмических наблюдений также используются при последующем контроле качества на протяжении всей обработки, это обеспечивает оптимальную привязку к скважинам получаемого куба сейсмических данных и оптимальную обработку для предстоящей инверсии, описания свойств коллектора и 4D анализа.

Компания *WesternGeco* готова предоставить свои технологии Комплексирования сейсмики с каротажем (WDS) на коммерческой основе.

Рекомендации для дальнейшего чтения

- Gaiser, J. E. [1991] Multicomponent VSP Radon transform for transversely isotropic media. *53rd EAGE Annual Meeting*, 114-115.
- Kostov, C., Kelamis, P., Filbrandt, M., Gunaratnam, K., Ireson, D. and Khusheim, A. N. [1999] Integrated surface and borehole seismic applied to deep target exploration in Saudi Arabia. *69th SEG International Meeting*, 108-111.
- Leaney, W. S. [1999] Walkaway Q inversion. *69th SEG International Meeting*, 1311-1314.
- Leaney, W. S. and Hope, R. H. [1998] Borehole-guided long offset AVO processing for improved lithology classification. *68th SEG International Meeting*, 230-233.
- Leaney, W. S. [1994] Anisotropy and AVO from walkaways. *64th SEG International Meeting*, 105-109.
- Leaney, S., Cao, D. and Tcherkashnev, S. [1999] Calibrating anisotropic, anelastic models for converted wave simulation. *61st EAGE Annual Meeting*, Session 6052.
- Miller, D. E., Leaney, S. and Borland, B. [1993] An in-situ estimation of anisotropic elastic moduli for a submarine shale. *55th EAGE Annual Meeting*, Session Co29.
- Whitfield, P.J., Bloor, R.I. and Lange, C. [2002] Derivation of Anisotropic Parameters for Prestack Depth Migration Using a Walkaway VSP. *64th EAGE Annual Meeting* Session Bo32.