

Необходимая интеграция: складываем из кусочков картину

резервуара

The integration imperative: piecing together the reservoir jigsaw

Stephen Pickering, Jalal Khazanehdari, и Irina Marin из WesternGeco, и Phil Hodgson и Scott Leaney из Schlumberger, предоставили несколько примеров использования интеграции от сбора данных до моделирования резервуара.

Идея интеграции была популярна в 80-е годы прошлого века, когда концепция объектной группы была впервые использована консультантами по вопросам управления в нефтяной промышленности как часть перестройки бизнес процесса. Объектные группы считались средством внесения конкретики в принятие бизнес решений и использования междисциплинарных знаний.

Сбор людей в объектную группу выглядел, тогда как панацея. Однако в настоящее время мы знаем, что некоторые группы превосходят по своей производительности труда другие группы, и мы должны поставить вопрос - «Что же определяет такое различие в производительности?». Интеграция означает полноту и объединение частей в единое целое, но для этого лишь формирования объектных групп ещё не достаточно. Высокопроизводительные группы в каждом секторе нефтяной промышленности также используют интегрирующие технологии и потоки для объединения научных данных, информации и знаний для уменьшения неопределенности и для принятия верных технических решений в каждой области их бизнеса. Образованные, высокопроизводительные группы для изучения того, что находится под поверхностью земли, обеспечивают сбор всех кусочков для воссоздания картины резервуара.

Всегда была необходимость интеграции данных сейсморазведки и скважинных измерений, чтобы заполнить пробел между измерениями по времени (сейсморазведка) и измерениями по глубине (каротаж) и тем самым лучше интерпретировать глубинное строение и свойства земных недр. Исторически, калибровка сейсмических отражений с использованием синтетических сейсмограмм была широко используемым методом для интерпретации горизонтов и простого глубинного построения границ слоев. Сегодня требуется более высокий уровень интеграции для получения точных статических и динамических моделей резервуара. Интеграция глубинных измерений предоставляет реальные выгоды в терминах понимания риска и неоднозначности, в то время как общая среда регистрации и вычислений способствует обмену данными, информацией и знаниями между людьми в пределах организации.

Интеграция технологий в процессе сбора, обработки и анализа данных обеспечивает значительную разницу в понимании глубинного строения земли; компания Schlumberger активно внедряет такие методы в производство. Ниже, мы рассмотрим несколько примеров интеграции от этапа сбора данных до динамического моделирования резервуара, где геофизика играет ключевую роль.

Интегрированные измерения и обработка

Недавние разработки в области систем скважинных и наземных сейсмических наблюдений положили начало новым методикам для интегрированной обработки и построения геологической модели залежи по данным сейсморазведки, призванными значительно улучшить наше понимание строения сложных залежей. Скважинные данные, такие как

данные каротажа и скважинные сейсмические данные, дают исключительно важные параметры для обработки данных наземной сейсморазведки, такие как вертикальные скорости, параметры анизотропии, коэффициенты неупругого затухания и данные о кратнообразующих границах. Было показано, что интеграция скважинных данных может обеспечить построение сейсмических разрезов с большим разрешением, которые увязываются со всеми имеющимися скважинами, а также с их помощью можно воссоздавать калиброванные амплитуды сейсмических отражений перед суммированием для построения количественной сейсмической модели резервуара.

Hassi Messaoud в северном Алжире - это гигантское месторождение площадью 2000 км². Резервуар состоит из тонких речных каналов, перекрытых вулканическими породами, с похожими значениями акустического импеданса, вместе с карбонатно-эвапоритовым комплексом отложений, который содержит кратнообразующие границы. До недавнего времени считалось, что наземная сейсморазведка не много может добавить к тому, что было известно об этой залежи ранее. В пределах месторождения Hassi Messaoud, компании Schlumberger и WesternGeco провели программу сбора, обработки и интегрированной



Рис. 1 Фотография, на которой показан вибратор, который служил источником, как для скважинных датчиков, так и для наземных кос геофонов, изображенных на переднем плане.

Междисциплинарная Геонаука

интерпретации данных каротажа и 3D наземной сейсморазведки для получения большего разрешения и увеличения качества сейсмического разреза в целях более точной инверсии сейсмических атрибутов в свойства резервуара.

Полная съемка 3D сейсморазведки и многоуровневая съемка ВСП были сделаны с использованием систем сбора наземных и скважинных данных последнего поколения Q-Land и Q-Borehole (Рис. 1). Параметры наземной и скважинной сейсмических съемок (выносы, расстояния между приемниками, кратности, параметры источника Vibroseis и др.) были оптимизированы на этапах планирования съемки и полевое тестирования с применением интегрированного моделирования и анализа.

Программа скважинной сейсморазведки была разработана для получения информации, которая может помочь при обработке объемных данных наземной сейсморазведки в целях получения большего разрешения на 2D сейсмических разрезах и исследования AVO отклика от резервуара. Данные многоуровневого ВСП регистрировались одновременно при работе источников для наземной сейсмической съемки. Системы Q-Borehole и Q-Land полностью совместимы между собой и, таким образом, зарегистрированные данные Q-Borehole синхронизировались с данными системы Q-Land. Группы вибраторов повторяли профили возбуждения для наземных и скважинных установок, со скважинными приемниками расположенными таким образом, что в результате были получены данные 154 уровней ВСП в интервале от глубины скважины (по стволу) до поверхности, совместно с дипольными измерениями параметров продольных и поперечных волн и полным комплексом методов каротажа.

Признанные методы определения параметров анизотропии скоростей по данным каротажа, ВСП и уровня ВСП были расширены для увеличения их точности на основе повышенного качества данных, предоставляемых последними системами скважинных сейсмических измерений. Скважинные данные с месторождения Hassi Messaoud показали высокие скорости приповерхностных отложений и малый тренд градиента скоростей по мере приближения к цели. Однако перекрывающие породы включают в себя несколько кратнобразующих высокоскоростных зон, связанных с солями и карбонатами. Эффективные значения анизотропии лежат в пределах ± 0.05 для Δ и $0.1-0.4$ для η для перекрывающих отложений и являются функцией в большей мере тонкой слоистости, чем собственной анизотропии слагающих пород. Эффективное значение коэффициента неупругого затухания для перекрывающих пород составило 75 и было получено по данным уровня ВСП. Новые методы анализа кратных отражений по данным ВСП позволили лучше провести разделение однократных и многократных отражений и дать более уверенную интерпретацию главных кратнобразующих границ в перекрывающих отложениях.

Результаты анализа данных каротажа были применены при обработке набора данных наземной 3D сейсморазведки для восстановления истинных амплитуд и фаз, подавления кратных волн и построения разрезов анизотропии. Была обнаружена важность восстановления истинных значений амплитуд и фаз для оптимального построения сейсмического разреза на дальних выносах с увеличением отношения сигнал/шум суммированного куба данных и улучшенным подавлением кратных волн методом исключения приращений времен пробега волн. Процесс восстановления истинных амплитуд и фаз основан на коэффициентах неупругого затухания, поправках за геометрическое расхождение с учетом анизотропии и коэффициентах снижения шума, которые были промоделированы по данным уровня ВСП.

Введение поправок за анизотропию предшествовало скоростному анализу и временной миграции до суммирования, которая проводилась по скоростной функции, полученной по скважинным данным. Это позволило провести четкое разделение волнового поля на однократные и многократные отражения, многие из которых характеризовались такими же или более высокими скоростями. Далее были протестированы методики подавления кратных волн, включая метод $t-p$ и метод предсказания неполнократных отражений; их результаты были количественно оценены на стадии увязки между мигрированными данными, синтетической сейсмограммой и коридорной суммой ВСП.

Скважинные данные предоставили объективную оценку результатам тестирования графа обработки, путем исследования совпадения между мигрированными данными, синтетической сейсмограммой и коридорной суммой ВСП для обеспечения оптимальной увязки скважинных данных с итоговым сейсмическим кубом. Тесты деконволюции до суммирования, суммированных данные с процентными вариациями итоговых скоростей и вариации параметров мьютинга были сделаны до миграции и еще раз проверены по скважинам для обеспечения оптимальной параметризации модели.

Спектральное отбеливание после миграции было сделано для оптимизации амплитудного спектра в полосе частот сейсмических данных. Данная процедура показала, что сигнал с частотами вплоть до 80 Гц с отношением S/N до 10 дБ от резервуара можно извлечь с сохранением полного частотного спектра, таким образом, достигая установленное разрешение составных частей резервуара.

Целью этого скважинно-интегрированного подхода к обработке данных сейсморазведки являлось построение сейсмических разрезов с большим разрешением и большей чувствительностью к сейсмическим атрибутам. Количественная интерпретация набора данных с месторождения Hassi Messaoud позволила построить модель для горизонтального бурения в маломощные зоны резервуара.

Запатентованная методика проведения сейсморазведочной съемки, включающая интеграцию скважинных методов (т.е. уровня ВСП и дипольного акустического каротажа) с данными наземной сейсморазведки позволяет построить более точные картину резервуара и оптимально подготовить данные для инверсии и последующему построению геологической модели залежи. Новые технологии анализа скважинных данных позволяют извлекать из них неупругую, анизотропную скоростную модель. Эта модель, в свою очередь, предоставляет детерминистические собственные (или эффективные) параметры для обработки данных наземной сейсморазведки для обеспечения высокой степени надежности данных на дальних выносах и амплитудного анализа. Было сделано количественное сравнение результатов тестирования графа обработки со скважинными данными (синтетическими сейсмограммами и/или коридорными суммами) для обеспечения оптимальной увязки итогового куба данных сейсморазведки со скважинными данными.

Интерпретационная обработка

Нигде так не востребована интеграция между обработкой данных сейсморазведки, геологической интерпретацией и моделированием как при построении глубинного разреза земных недр, вследствие сложности геологического строения нефтегазоносных комплексов пород, которые разведываются в настоящее время. При этом скоростная

Междисциплинарная Геонаука

модель является границей между временной и глубинной областями, между данными до и после суммирования - между интерпретацией и построением разреза.

Определенным препятствием для интеграции информации о глубинном строении земных недр в модели резервуаров являлось частичное развитие программных средств, каждое из которых, обычно, создавалось для удовлетворения конкретных нужд и для оптимизации лишь одной части рабочего потока. Это можно иллюстрировать тем фактом, что программы построения сейсмических разрезов по большей части строили свои модели без учета ранее созданных моделей приповерхностных изменений. В дальнейшем эта модель редко использовалась геологами, которые строили свои собственные модели резервуаров или планировали траектории скважин, даже если все они работали с идентичными моделями.

Эффективное построение глубинного разреза требует от сейсмической модели исключительного потенциала, включая возможность интерактивного и потокового трассирования лучей для освещения границ, моделирования скорости и структурной интерпретации. Пользователю должна быть предоставлена возможность контроля всех данных и каждого шага в потоке, начиная с единой среды визуализации, плавно переходя между временной и глубинной областями, между данными до и после суммирования, для построения правильной скоростной модели.

Во многих современных нефтегазоносных бассейнах, таких как Мексиканский залив, сложные солевые тела на разных стадиях внедрения и поднятия образовали такие структуры, которые ставят серьезные задачи и тем самым мотивируют исследователя. Высокий контраст сейсмических скоростей между солями и осадочными отложениями приводит к проблемам в процессе традиционной временной миграции. Глубинная миграция использует итерационный подход для построения модели земли, и компания WesternGeco разрабатывает рабочий поток i2i для интерпретации и построения глубинного разреза, в целях повышения качества и преобразования подробных скоростных моделей в глубинный разрез резервуара. Геофизик работает в интерактивной среде с ядром визуализации, общим для различных типов сейсмических данных (до и после суммирования) и скважинных данных (Рис. 2). Громоздкие процессы вычислений запускаются из потоковой системы обработки из этой среды.

Интегрированный поток i2i разрабатывался для

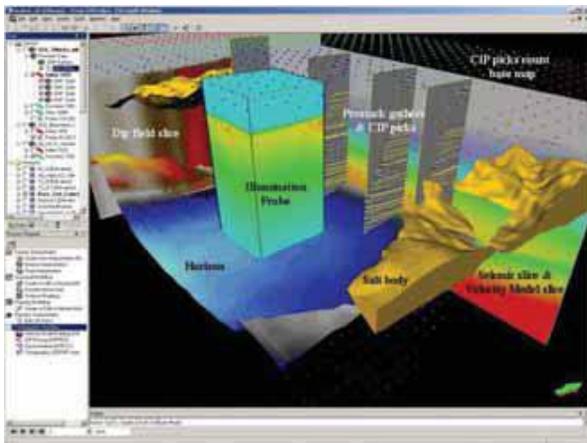


Рис. 2 Интерпретационная обработка: структурная интерпретация и моделирование, освещение, проводится анализ и проверка скоростных моделей до и после суммирования с использованием визуального интерфейса i2i.

объединения двух миров: геофизика обработчика и интерпретатора в целях использования общей модели земных недр. Первично нацеленный на геофизиков, которые принимают активное участие при построении временных и глубинных разрезов, поток i2i также имеет в своем составе приложения для планирования и оценки 3D съемки, а также для предсказания кратных отражений, для интерпретации многокомпонентных данных, таких как кубы PP и PS, для временной адаптации модели по глубине. Его уникальная способность работать как с временными, так и с глубинными границами означает, что геофизик, который строит модель резервуара, может получать временные атрибуты резервуара и визуализировать их в глубинной области, в то время как инженеры по бурению могут использовать результаты предсказания порового давления по данным сейсморазведки при планировании сложных скважин.

От сейсморазведки до симуляции

Хотя мы делаем множество разнообразных измерений - начиная от сейсмике в макро масштабе кончая измерениями на образцах керна в микро масштабе - интеграция этих данных с разными разрешениями для создания непротиворечивой модели - процесс сложный и занимающий много времени. Вдобавок, геологические и геофизические данные, используемые для построения геологической модели резервуара, редко содержат в себе динамические характеристики резервуара. Поэтому экономические выгоды от интеграции новых типов данных и/или решений для сбора большего количества данных, могут быть восприняты не в полной мере.

Решением может являться доступность состоятельной модели, отражающей глубинное строение изучаемой области, для всех технических членов объектной группы, что позволяет специалистам по областям полностью осознавать, как данные взаимодействуют между собой и использовать другие наблюдения. Модель должна легко обновляться по мере поступления новых данных, а неоднозначность, присущая измерениям и интерпретации данных, должна учитываться вплоть до итогового прогноза добычи и полевой экономики. Это предоставляет мощный инструмент управления полевыми работами, путем точного предсказания эффектов принятия оперативных решений, а также в любое время обеспечивает понимание полевых работ, которое отражается на собираемых научных данных, уменьшая вероятность возникновения сюрпризов в будущем.

Инструменты, обеспечивающие повышение производительности рабочих потоков объектной группы, такие как программа Petrel, собирают воедино различные технические области и масштабы данных, позволяя экспертам объединять их взгляды на глубинное строение разреза в едином потоке, начиная от данных сейсморазведки и кончая симуляцией и подсчетом запасов. Это предоставляет объектной группе единственную модель глубинного строения, которая находится в согласии между всеми областями и отражает статические свойства и динамическое поведение резервуара (Рис. 3). Согласованность всех областей модели позволяет использовать её в качестве инструмента для предсказания оперативных решений и для прогноза добычи.

С течением времени, новые данные могут легко и автоматически добавляться к существующей модели резервуара. Традиционно, многие из этих задач выполнялись вручную, занимали много времени и были подвержены ошибкам в процессе выполнения. Автоматическое обновление данных геологической модели

Междисциплинарная Геонаука

резервуара позволяет не только сократить время выполнения на 60-90% для таких задач как, обновление модели и объемных данных, но оно также обеспечивает принятие оперативных решений на основании всех имеющихся в модели данных и знаний. Такой образ действий не был нормой в традиционных работах.

Компании, такие как Murphy Oil, испытывают существенное увеличение продуктивности при использовании интегрированных данных совместно с рабочими потоками программы Petrel. После окончания последней оценочной скважины на недавно разрабатываемом месторождении в юго-восточной Азии, план разработки месторождения был одобрен партнерами по бизнесу и правительством. Данные по этой скважине привели к неизбежным изменениям текущего плана разработки. Программа Petrel позволила полностью перестроить все модели и создать 3000 страничный план полевой разработки месторождения в течение всего лишь шести недель.

Успех со временем: замыкая круг

В виду значительных усовершенствований при сборе сейсмических данных и методик обработки за последние годы, данные высокоразрешающей 3D сейсморазведки и точной повторяемостью сейчас доступны для геофизиков для мониторинга изменений параметров резервуара как функции времени добычи. Временной сейсмический мониторинг резервуара основан на том факте, что процессы добычи/нагнетания существенно изменяют параметры насыщенности резервуара флюидами, давления и температуры, что впоследствии приводит к изменению акустического отклика от резервуара и может быть обнаружено по данным сейсморазведки. Интегрированные рабочие потоки, сочетающие в себе высокую повторяемость положений источников и приемников, детерминистические графу обработки, высокоразрешающую сейсмическую инверсию и петрофизическую калибровку параметров, в настоящее время предоставляют всю необходимую информацию для калибровки модели добычи и симуляции резервуара.

Большое преимущество при использовании калиброванных сейсмических систем с высокой точностью расположения источников и приемников совместно с управляемыми косами для 4D съемок состоит в том, что различия в условия съемок могут быть значительно уменьшены, а это в свою очередь, дает более четкую 4D картину для более детальной интерпретации. Более того, с увеличением отношения S/N при 4D съемках время между опорной и повторными съемками может быть сокращено, так что даже незначительные 4D эффекты будут видны на разрезах. Калиброванная

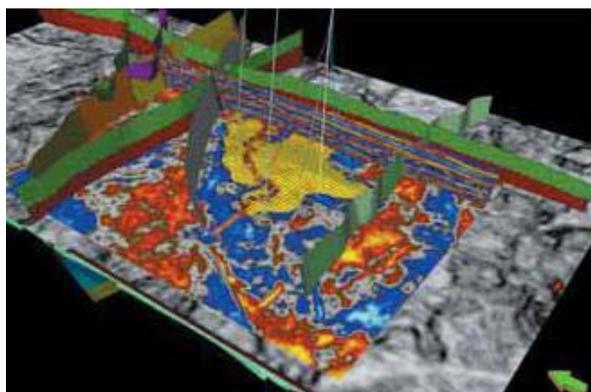


Рис. 3 Интеграция объектовых групп по всем областям и рассмотрение данных всех масштабов, предоставляют более полное понимание глубинного строения недр.

сейсмическая система также использует детерминистический граф обработки данных, который может быть автоматизирован для быстрого получения результатов к тому времени как данные понадобятся инженерам по резервуару и по добыче.

Интегрированный рабочий поток был применен для количественного анализа Юрских песчаников одного углеводородного резервуара в Северном море по данным режимных сейсмических наблюдений (Рис. 4). Две сейсмические съемки продемонстрировали высокое разрешение, широкую полосу частот записанного сигнала и отличную повторяемость, они были использованы для количественной оценки изменения насыщенности и давления резервуара за 22 месяца эксплуатации. Рабочий поток для количественного анализа по данным режимных наблюдений включал в себя AVO инверсию до суммирования, построение петроакустической модели и калибровку свойств резервуара.

Калибровка инвертированных значений акустического импеданса к значениям насыщенности и давления резервуара была выполнена по методике, состоящей из трех стадий. Первым шагом было построение геологической модели интересующей зоны и наполнение этой модели свойствами резервуара - литологией, пористостью и насыщенностью - с использованием всех имевшихся данных, т.е. каротажа, керна, результатов симуляции резервуара, горизонтов и разломов. Для этого была использована комбинация детерминистических, статистических и стохастических методов. Следующим шагом было прямое моделирование значений акустического и сдвигового импеданса по заданным свойствам резервуара с использованием подходящей петроакустической модели. В последнюю очередь, промоделированные свойства резервуара сопоставлялись с инвертированными значениями акустического импеданса с использованием процесса линейного последовательного сопоставления. Конечным результатом работы были высокоразрешенные сейсмические и геологические данные, содержащие в себе свойства резервуара (Рис. 5). Для обеспечения того, что полученные данные соответствуют данным по добыче, была сделана адаптация модели разработки и комбинированной сейсмической модели. Первое было сделано на небольшом участке резервуара, вследствие временных ограничений.

Выбранный участок состоял из добывающей скважины и нагнетающей скважины. По результатам адаптации модели было сделано предсказание о низком содержании воды в пластовой жидкости там, где в реальности, содержание воды в пластовой жидкости было достаточно высоким и достигало 60%. Интеграция данных сейсморазведки с результатами адаптации модели была проведена для более

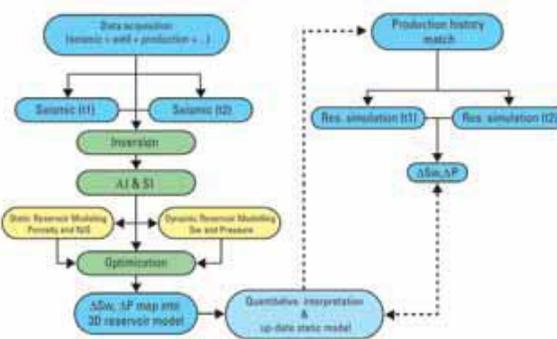


Рис. 4 Замыкая круг: рабочий поток для интеграции данных режимных сейсмических наблюдений в модель резервуара.

Междисциплинарная Геонаука

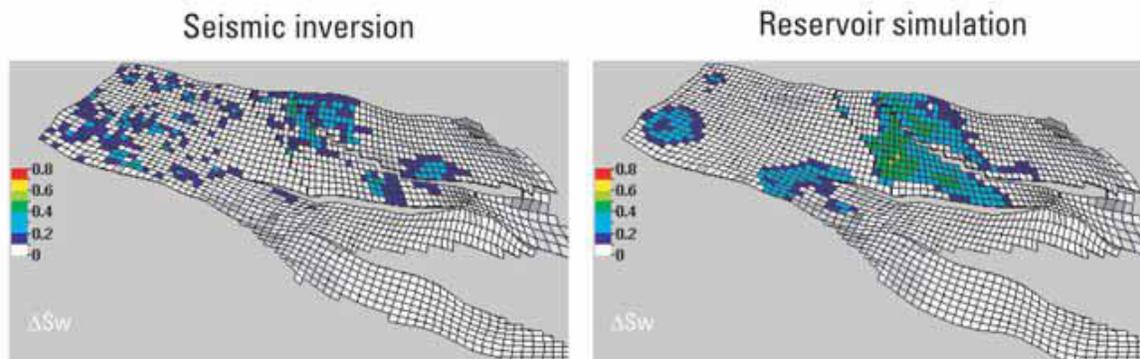


Рис. 5 Иллюстрации программы Petrel, на которых показано изменение водонасыщенности. Водонасыщенность по данным сейсморазведки нанесенная на модель резервуара (слева) и прогноз значения водонасыщенности по результатам симуляции резервуара (справа).

уверенного предсказания и более быстрой сходимости к решению, в котором сопоставлялись калиброванные сейсмические данные с данными о добыче.

Комбинация высокоразрешающих сейсмических съемок с отличной повторяемостью, высококачественной инверсии и калибровок на основе петрофизических зависимостей позволила провести детальный количественный 4D анализ углеводородного резервуара. Результаты показали, что значения акустического и сдвигового импедансов изменились на 2% и это точно связано с изменением насыщения и/или давления резервуара. Эти результаты могут быть использованы для обновления модели резервуара и значительно помогли в понимании динамических свойств данного месторождения.

Последний фрагмент мозаики: рассмотрение полной картины

Помещение дисциплин и данных на единое полотно также позволяет разрабатывать новые рабочие потоки. Хотя скважинные данные традиционно считаются ключевыми в понимании перемещения флюида в резервуаре, большое количество информации содержится в сейсмическом сигнале; эту информацию можно получить через геологическое моделирование и симуляцию. Границы между дисциплинами и множество программных платформ предотвратило полное использование этой информации, ограничивая её построением грубой модели резервуара лишь по сейсмическим данным (главные разломы и горизонты). Современные технологии позволяют данным 3D/4D сейсмических съемок управлять процессом моделирования и через него служить входными данными для симуляции. Чем больше данных собрано и чем больше поставлено сейсмических экспериментов, тем больше возникает потребность в знаниях экспертов в разных областях.

Способность быстро обновлять глубинные модели - первостепенная задача при максимизации значения новых данных и предоставления своевременной информации. Дисциплины, рабочие потоки, инструменты и программное обеспечение слагают фрагменты мозаики. Объединение их в единое целое продолжает увеличивать движущую силу в индустрии, а высокопроизводительные группы исследователей глубинного строения земных недр обеспечивают сбор всех фрагментов и вместе работают над составлением полной картины.

Благодарности

Авторы благодарят Sonatrach PED и Sonatrach Production Hassi Messaoud за разрешение опубликовать данные исследований Q-Land/Q- Borehole Hassi Messaoud, и всех наших коллег в Schlumberger и WesternGeco кто оказал содействие при написании этой статьи.