

Снижение риска бурения на месторождении Кулзеан при применении WAVI-VSP

Рейчел Джонс, TOTAL E & P North Sea UK Ltd¹

Антуан Паре, Бейкер Хьюз, компания GE²

Ник Рэндалл, Бейкер Хьюз, компания GE²

Говард Симпсон, Бейкер Хьюз, компания GE^{2,3}

Джон Бэнкс, TOTAL E & P North Sea UK Ltd¹

¹ Total E&P UK Limited, Тотал Хаус, Тарланд Роуд, Уэстхилл, AB32 6JZ

² Бейкер Хьюз, компания GE, Талгарт Роуд 201, Хаммерсмит, W6 8BJ

³ Автор-корреспондент

Тезисы

Решающим фактором успешного ввода эксплуатационных скважин сверхвысокого давления и высокой температуры (ultra-HPHT) на проекте разработки газа Кулзеан было размещение хвостовика эксплуатационной колонны. Для гарантии корректной глубины установки хвостовика эксплуатационной колонны была использована комбинация с применением оборудования GeoWave II® и перспективной технологии Walkalong Vertical Incidence VSP (WAVI-VSP). Основой данной комбинации стало детальное планирование и тесное сотрудничество между оператором и подрядчиком.

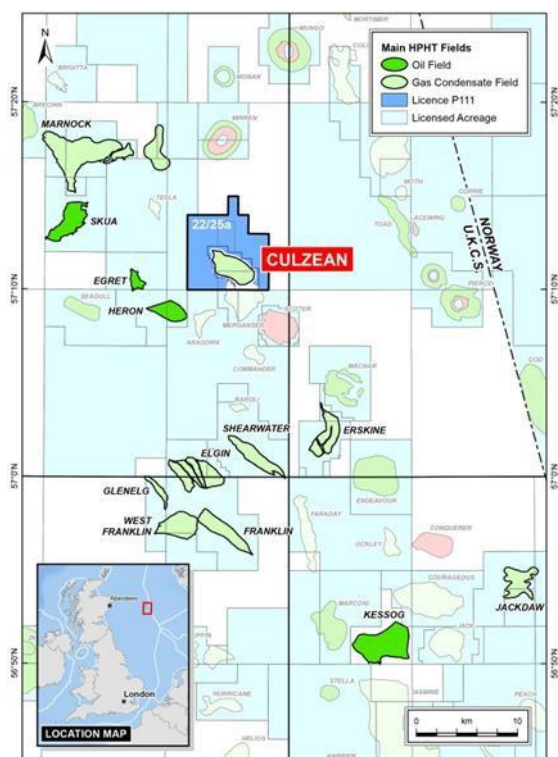


Рис. 1: Карта расположения

Введение

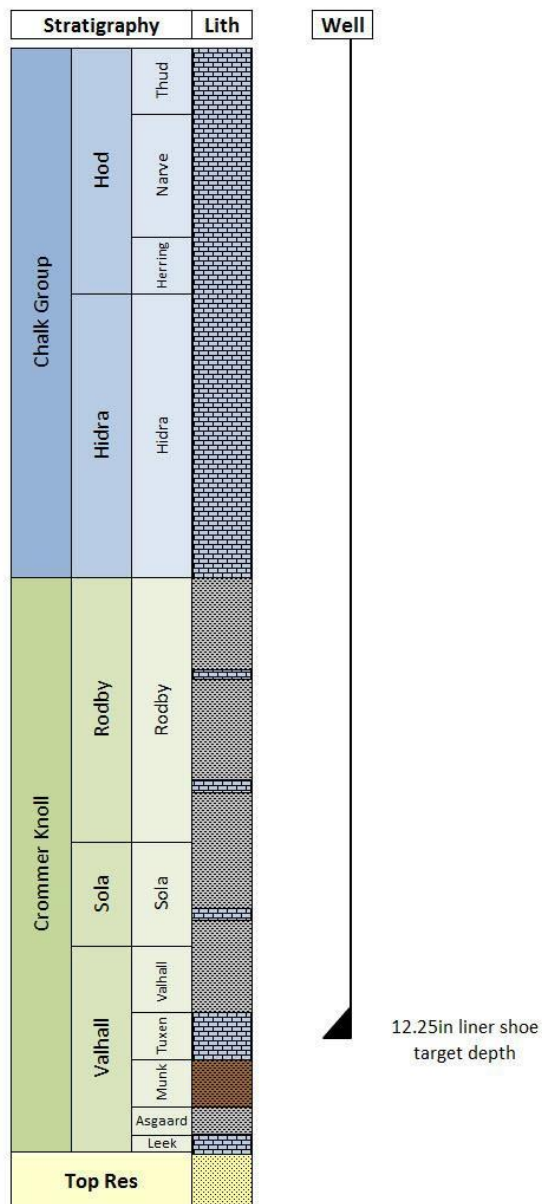
Кулзеан представляет собой газоконденсатное месторождение, характеризующееся сверхвысоким давлением и высокой температурой (uHPHT). Оно расположено в блоке 22/25a сектора Великобритании в центральной части Северного моря (Рис. 1). Основной резервуар в Триасе, объединен со вторичным резервуаром в Юре (Рис. 2). Общие извлекаемые ресурсы оцениваются в пределах 250-300 ММВОЕ.

Как на этапе разведки, так и на этапе оценки было показано, что размещение хвостовика на глубине ~4100 м в пределах формации нижнего мела Valhall (и, в идеале, элемента Tuxen Limestone) является критическим фактором успешности скважины и, следовательно, проекта разработки и ввода скважины в эксплуатацию. Неспособность определить корректно оптимальную глубину установки хвостовика привела бы к тому, что либо хвостовик был бы установлен недостаточно глубоко, либо бурение в теле резервуара производилось бы с недостаточным весом бурового раствора.

Оба сценария влекут значительные негативные последствия для проекта. Если глубина проектного забоя (TD) недостаточно глубока, то цементирование хвостовика эксплуатационной колонны могло бы скомпрометировать скважину. Кроме того, это привело бы к плохим результатам испытаний на герметичность зоны установки башмака обсадной колонны (LOT), что могло бы потребовать установки бурового хвостовика. Слишком же глубокое расположение эксплуатационной колонны также привело бы к ряду негативных последствий. Недостаточный вес бурового раствора по отношению к пластовому давлению может привести к потенциальному разрушению ствола скважины. Для восстановления контроля при бурении потребовалась бы установка бурового хвостовика.

Также завышенная глубина эксплуатационной колонны привела бы, в соответствии с требованиями к строительству скважины, к уменьшению размера отверстия в интервале пласта, что оказало бы значительное влияние на приток и, следовательно, на экономику проекта. Потенциальная возможность полной потери скважины uHPHT также была реальной, и, учитывая, что проект Кулзеан представляет собой многомиллиардную разработку месторождения с шестью скважинами, риск такой потери был бы значительным.

Задержанная или утраченная добыча углеводородов оказала бы существенное влияние на всю экономику разработки месторождения, поэтому были предприняты значительные усилия для обеспечения правильного размещения эксплуатационного хвостовика.



Граница между оптимальной нижнемеловой формацией проектной глубины скважины (далее TD) и кровлей резервуара составляла всего 80-150 футов TWD (25-45 м). Поэтому был использован междисциплинарный подход. Каротаж во время бурения (LWD) и биостратиграфия были полезны для корреляции положения бурового долота, но использование технологии Walkalong Vertical Incidence VSP (WAVI-VSP) было ключом к пониманию того, как глубоко надо пробурить, чтобы обеспечить оптимальное размещение эксплуатационного хвостовика.

Введение в строй сложных эксплуатационных скважин требовало особого подхода к бурению. Таким образом, в течение одного года были введены четыре секции 12,25 дюйма и три 8,5 дюйма. Это потребовало тщательного планирования всех работ до начала бурения. Центральным элементом этого планирования был выбор правильной методики ВСП для сбора исходных данных и ее последующее проектирование. Основная цель ВСП состояла в том, чтобы получить высококачественное сейсмическое изображение с более высокой частотой по сравнению с данными поверхностной сейсморазведки, которые использовались перед бурением. Это позволило бы лучше спрогнозировать глубину покрышки резервуара и уменьшить неопределенность в возможности его распространения на малых глубинах. В этой статье описывается, какая методика была выбрана и как ее применение обеспечило успех на этом критическом участке в непростой скважине uHPHT.

Рис. 2: Стратиграфия

Предварительное моделирование

Моделирование до съемки является важной частью планирования и проектирования любого значимого скважинного сейсмического проекта. Его цель - определить, будет ли проект успешным с точки зрения безопасности, геофизики и экономики. Для выбора правильного дизайна съемки ВСП оценивается вся необходимая информация: поверхностная сейсмика и ее интерпретация; данные о местных скважинах; архивные ВСП, полученные в районе; наличие оборудования, необходимого для получения данных.

На месторождении Кулзеан ранее применялась скважинная сейсмическая технология для регистрации ВСП в четырех скважинах. Использовались два набора данных для прогнозирования глубины формации VCU. Ограничения в этих первоначальных исследованиях были ранее определены, и они заключались в ошибках выбора метода для прогнозирования, плохой коммуникации между вовлеченными сторонами, недооценке неопределенности полученного результата.

С целью улучшения предыдущих исследований, получения четкого прогноза неопределенностей и подробного протокола выполнения работы в ходе новой компании на месторождении Кулзеан было спроектировано и проведено новое предварительное моделирование. Наличие протокола выполнения работ было крайне необходимо, учитывая ограниченное время, имевшееся для обработки, интерпретации и общего контроля качества данных.

Прогноз интервалов ниже бурового инструмента при использовании данных ВСП является простым процессом, при котором кровли пластов непосредственно под промежуточным TD интерпретируются как функция времени на суммарном разрезе трасс ВСП, а затем преобразуются в глубину с использованием точной скоростной модели. Сложность рабочего процесса и большая часть неопределенности заключается в создании скоростной модели.

Прогноз ниже бурового инструмента по данным предыдущего ВСП на Кулзеане использовал алгоритм сейсмической инверсии редких импульсов (Sparse Spike Inversion), который преобразовывал сейсмические данные из суммарного разреза трасс ВСП в интервальные скорости ниже промежуточного TD. Этот метод наиболее эффективен в областях с небольшим априорным знанием геологии, где существует низкая достоверность скоростей миграции. К сожалению, он часто сопровождается существенной неопределенностью результатов и может быть описан как метод с отличным качественным, но плохим количественным решением. Учитывая ограниченный интервал глубины для установки эксплуатационного хвостовика, в этом проекте требовались высоконадежные количественные результаты.

После изучения доступных данных каротажа с перспективной площади Кулзеан было установлено, что интервальные скорости каждой формации в последовательности Rodby - Sola - Tuxen - VCU имели максимальные вариации только от 4% до 6% по четырем скважинам. Поэтому, если бы их верхние границы можно было уверенно идентифицировать по времени в модельной трассе коридорного суммирования ВСП, то их можно было бы точно прогнозировать по глубине, используя их известную среднюю интервальную скорость. Этот метод не может быть непосредственно применен к поверхностным сейсмическим данным, поскольку в них отсутствуют высокие частоты, а в формациях Tuxen и VCU часто проявляются частично-кратные волны, которые затрудняют их интерпретацию во времени, и делают ее неточной.

В качестве подтверждения концепции были переобработаны результаты выполненных четырех ВСП с использованием данных на 60 футов ниже в пределах формации Rodby, что соответствует глубине будущих ВСП. Эти новые трассы коридорного суммирования были интерпретированы во временной области; были спрогнозированы верхние границы пластов Sola, Tuxen и VCU, а затем сравнены с их известными истинными глубинами. Были рассчитаны средние абсолютные погрешности 4 фута, 6 футов и 12 футов соответственно для Sola, Tuxen и VCU, что подтверждает правильность и достаточную точность нового метода прогнозирования для достижения поставленных целей. Повторная обработка также подтвердила, что сейсмическая инверсия редких импульсов (Sparse Spike Inversion) не может обеспечить точные интервальные скорости, хотя их вариации правильно идентифицировали верхний Tuxen, подтверждая метод как хороший качественный инструмент, помогающий идентифицировать верхние границы образования как функцию времени.

Прогнозное ВСП в наклонной скважине может использоваться для прогнозирования целевой глубины по вертикали ниже траектории скважины, а не глубины, впоследствии пробуренной вдоль траектории скважины. Для расчета прогнозируемой глубины применяется геометрическая коррекция с использованием изменения угла локального падения целевых пластов. Для оценки угла падения целевых пластов можно использовать поверхностную сейсмическую интерпретацию, а также вертикальные и горизонтальные изображения с высоким разрешением, полученные по результатам прогнозного ВСП ниже отклонения скважины.

Таким образом, результаты ВСП должны удовлетворять следующим критериям:

- точная зависимость глубина-время для позиционирования скважины на результатах поверхностной сеймики;
- 2D-изображение с высоким горизонтальным и вертикальным разрешением под стволом скважины;
- данные, которые могут быть обработаны в кратчайшие сроки;
- группа скважинных приборов ВСП, которая может быть установлена в скважине с открытым стволом с приемлемыми рисками для задач, связанных с операциями спуска - подъема в условиях uHPHT (Owens 2012).

Оборудование и технология

Наиболее целесообразной геометрией ВСП, удовлетворяющей этим критериям, является ВСП с вертикальным положением лучей, где сейсмический источник расположен вертикально над каждым скважинным геофоном по очереди. Это давно устоявшаяся методика, и она хорошо работает для одного сейсмоприемника в скважине с одним источником, выполняя регистрацию сейсмических волн на последовательных глубинах. Однако, разработка многоуровневых скважинных приборов, обусловленная экономией времени на буровой при исследованиях, привела к одновременному использованию множества геофонов, размещенных в скважине. Для регистрации данных ВСП (VIVSP) в скважинах с отходом ствола с применением длинной группы скважинных приборов обычно используется один источник возбуждения, расположенный вертикально над серединой расстановки, вместо того, чтобы располагать источник над каждым отдельным геофоном. Это приводит к некорректной дискретизации (оцифровке) геологической среды, с отчетливыми футпринтами в данных, что ухудшает их качество (см. Рисунок 3).

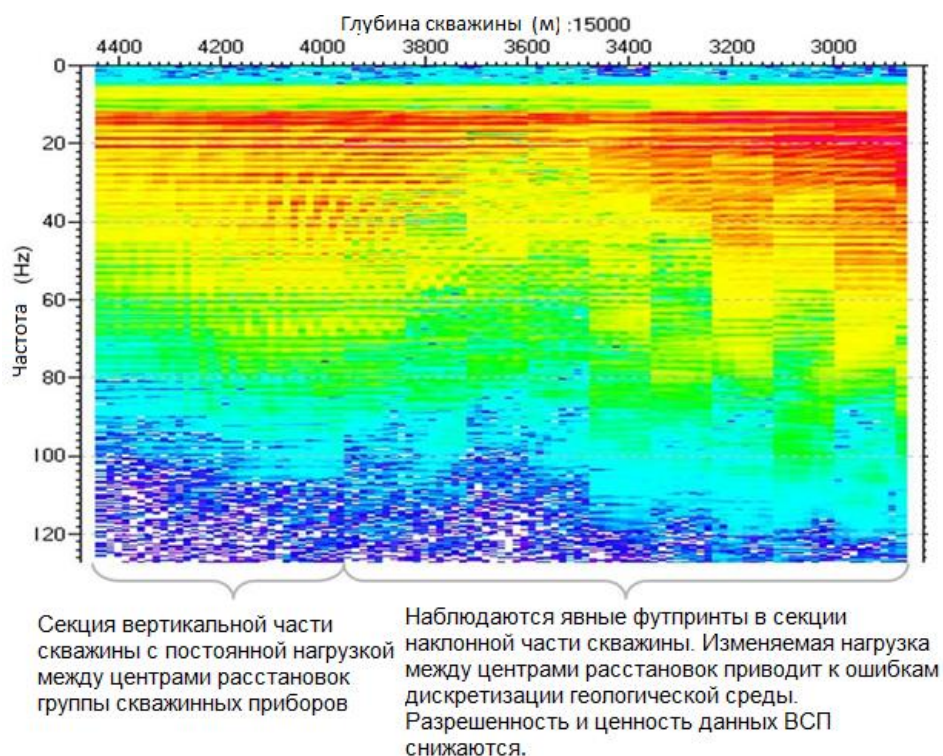


Рис. 3: Артефакты (искажения) при стандартном сборе полевых данных VIVSP (Домен частоты)

Чтобы избежать этого, была разработана новая методика сбора данных, Walkalong Vertical Incidence VSP (WAVI-VSP), в которой вместо регистрации из пунктов возбуждений, расположенных над серединой расстановки приемников, регистрируют короткие проходы волны над каждой позицией скважинного прибора (см. Рисунок 4). При таком подходе данные формируются в вертикальных парах источник-геофон, как и раньше, но также генерируются данные и во всех других геофонах в группе. В результате получается большой объем данных с плотной выборкой геологической среды, обеспечивающей более широкий охват точек отражения и улучшенные конечные изображения. Объем данных позволяет обработчику данных ВСП группировать данные в сейсмограммы равных удалений и позволяет создавать изображения с гораздо более тонким интервалом трассировки, чем обычно, раскрывая более подробную информацию о недрах (Рисунок 5).

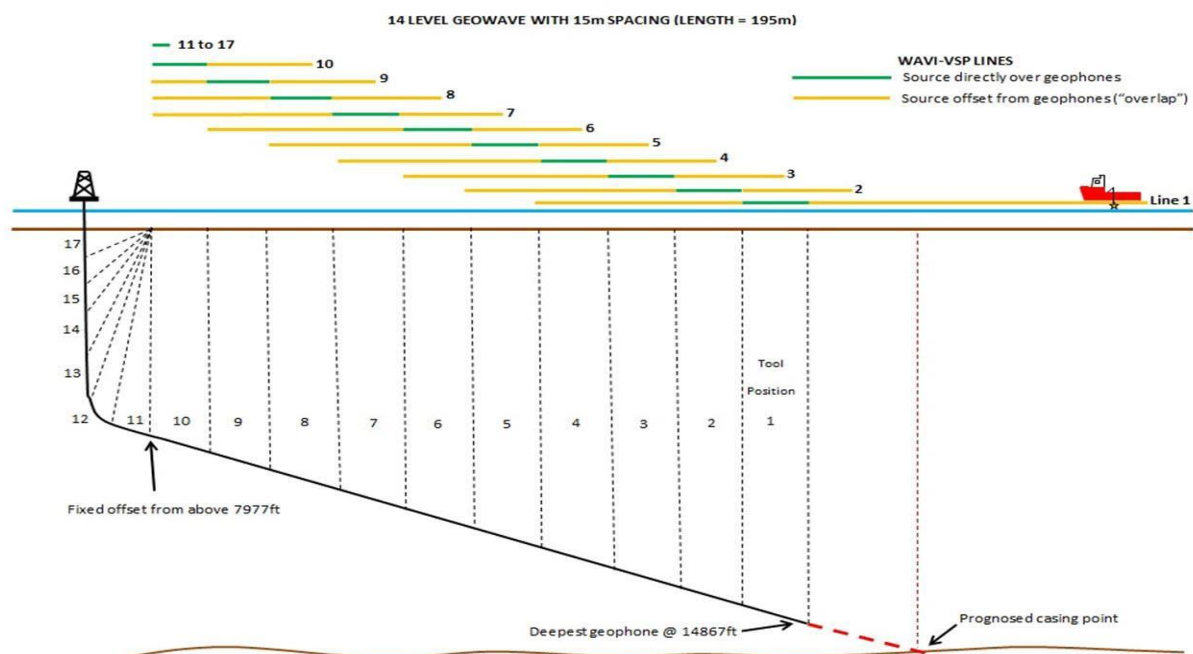


Рис. 4: WAVI-VSP Конфигурация съемки

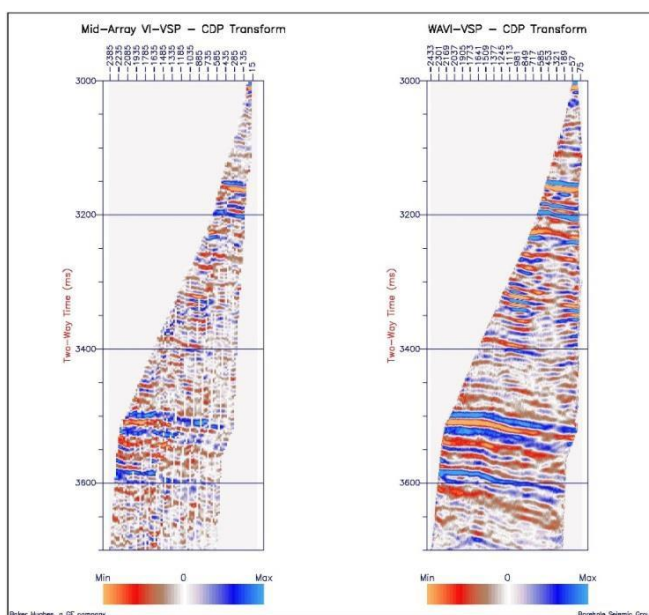


Рис. 5: Сравнение изображений обычного VIVSP и WAVI-VSP

Интуитивно можно было бы подумать, что проход судна по линии возбуждения вместо того, чтобы держать судно неподвижным для серии возбуждений над расстановкой приемников заняло бы значительно больше времени использования буровой скважины, но на практике это не так. Для судна может быть легче перемещаться по линии на малой скорости, чем оставаться в фиксированном месте.

Поэтому для месторождения Кулзеан была выбрана методика WAVI-VSP, так как только такая конфигурация съемки могла дать подлинные значения вертикального времени пробега сейсмической волны для каждой пары источник-приемник, и

изображения с высоким разрешением, поскольку такая геометрия наблюдений обеспечивает уникальную обработку данных равноудаленных трасс.

В качестве скважинного регистрирующего инструмента был выбран недавно появившийся комплекс GeoWave II®. Использовалась система, содержащая до 18 ортогональных 3-компонентных геофонов. Высокая температура в скважине обычно строго ограничивает количество геофонов, которые могут использоваться в такой среде, но температурные допуски этой системы (непрерывная эксплуатация возможна при 400°F, или 204°C) позволяют получить большее количество уровней при меньшем количестве остановок по сравнению с другими решениями uNPNT. Кроме того, эта система разработана таким образом, что в случае такого маловероятного события, как отказ геофона, она продолжит передачу сигналов от всех оставшихся геофонов - как выше, так и ниже любого неисправного компонента. Это ее преимущество по сравнению с другими доступными технологиями было весьма значимым для минимизации проектных рисков в ситуации, когда погодные условия могли привести к сужению окна возможностей, на дорогостоящих uNPNT скважинах, где тарифы на бурение значительно выше, чем на скважинах NPNT.

Применение многоуровневых сейсмических зондов требует тщательного планирования количества приемников, их установки и размещения в скважине. Несколько взаимосвязанных факторов должны быть сопоставлены друг с другом. Среди них:

- безопасность;
- время, затрачиваемое на сбор данных;
- время, затрачиваемое на установку и перемещение группы зондов
- влияние на данные размера многоуровневой расстановки
- риск и влияние потенциальных проблем с оборудованием

В целом, это проблема оптимизации. Многоуровневая расстановка с большим количеством приемников способна быстрее собирать данные в заданном диапазоне глубин, чем расстановка с меньшим количеством приемников, но, с другой стороны, потребуется больше времени для установки и перемещения группы зондов. Точно так же, с большим количеством приемников будет больше трасс, делящих полезные эффекты от идентичности форм импульса общего для них источника возбуждения, но в противовес этому будет и увеличение рисков из-за большей сложности многоуровневой расстановки в скважине. В ходе этой съемки использовалось патентованное программное обеспечение для точного моделирования перемещения многоуровневой расстановки на каротажном кабеле, с учетом особенностей uNPNT, таких как вес и прочность геля бурового раствора, температура. Решение использовать систему GeoWave II® с ее высокой надежностью и отказоустойчивой конструкцией означало, что при большой многоуровневой расстановке риск отказа в наклонной скважине мог быть снижен по сравнению с конструкциями других инструментов, до приемлемых значений.

Таким образом, окончательный выбор количества уровней приемников и расстановок основывался главным образом на максимизации количества приемников, а также на минимизации общего времени, которое потребовалось бы для завершения съемки в скважине. В этих рамках необходимо было оценить особенности буровой скважины и то, насколько данная скважина подходила для различных методов установки скважинных приборов. Был сделан вывод о том, что съемка может быть проведена наиболее эффективно и безопасно с 14-18 приемниками, при том, что вся многоуровневая расстановка собирается и разворачивается простой сборкой из 100-футовых секций.

Достижение наилучшего возможного качества и точности данных, безусловно, всегда является целью, но для этого проекта, где важные и критические решения с точки зрения безопасности должны быть приняты очень быстро после съемки (менее чем за 12 часов), требовалось еще больше внимания. В частности, необходимо было разработать процессы, которые в режиме реального времени демонстрировали бы, что данные являются хорошими, и тем самым подтверждали бы, что их результатам можно

доверять. Любые проблемы с качеством данных требуют ранней идентификации, чтобы решить, следует ли повторно отстрелять определенную расстановку или использовать резервную группу инструментов. Все процедуры контроля качества в полевых условиях были протестированы и проверены на соответствие поставленной цели. Принималось во внимание множество аспектов, но двумя решающими были точная глубина приемника и измерение положения источника.

Процесс, известный как первичный контроль глубины, использовался для обеспечения максимальной точности и надежности определения глубины приемника. Частью этого процесса является использование специализированного программного обеспечения для моделирования силовых напряжений при спуске каротажного кабеля, упомянутое выше, во время выполнения работ. Это было сделано для того, чтобы проанализировать реально наблюдаемые факторы растяжения и трения. Если они достоверно известны, то растяжение кабеля, а также то, когда и как это происходит, может быть точно учтено.

Были проверены несколько показателей качества замера глубины, и два из наиболее часто используемых в отрасли показали эффективность используемых процедур. Ошибка по глубине из-за растяжения, т. е. разница в позиции инструмента при нахождении его на поверхности по сравнению с позицией при спуске в скважину, составляла в среднем 3,75 фута, что мало по сравнению с целевой глубиной (TD) 16 000 футов. Было проведено многократное сравнение значений времен первых вступлений между возбуждениями, сделанными во время спуска и подъема, и было обнаружено, что различия в среднем составляют менее 0,3 мс.

Измерения местоположения пункта возбуждения проводились с помощью системы позиционирования источника с использованием дифференциальных GPS-приемников. Система специально разработана для ВСП и автоматически отслеживает и записывает большое количество данных качества измерений позиции, выдавая пользователям соответствующие предупреждения, если хотя бы одно из них не соответствует заранее установленному порогу. Например, во время съемок проводилось непрерывное сравнение между измерениями положения с двух различных дифференциальных приемников GPS, каждый из которых использовал независимые источники дифференциальных поправок. Если бы они существенно расходились, то причина подлежала бы изучению в первоочередном порядке. В нашем случае совпадение между двумя измерениями было неизменно хорошим, со средней разницей существенно менее 0,5 м.

Обработка и результаты

Поскольку быстрое выполнение обработки данных имело решающее значение для успеха проекта, особое внимание было уделено максимизации пропускной способности канала связи между буровой и центром обработки данных. В конце каждой расстановки WAVI-VSP данные передавались в процессор ВСП для контроля качества и предварительной обработки. После того, как все расстановки были отработаны, можно было начать полную обработку ВСП.

Предварительная обработка была выполнена для полного 3-компонентного набора данных.

Во-первых, «реальный» набор данных VI-VSP был извлечен из полного пакета WAVI-VSP; была рассчитана зависимость глубины от времени, и данные были обработаны вплоть до получения корридорной трассы ВСП, затем отфильтрованы обратно до ширины полосы наземной сейсмоки (30 Гц) (Рисунок 6).

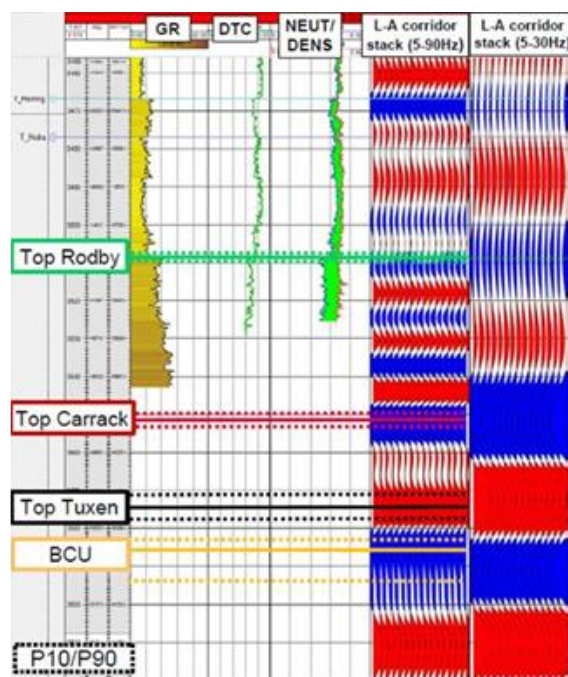


Рис. 6: Интерпретация корридорных трасс

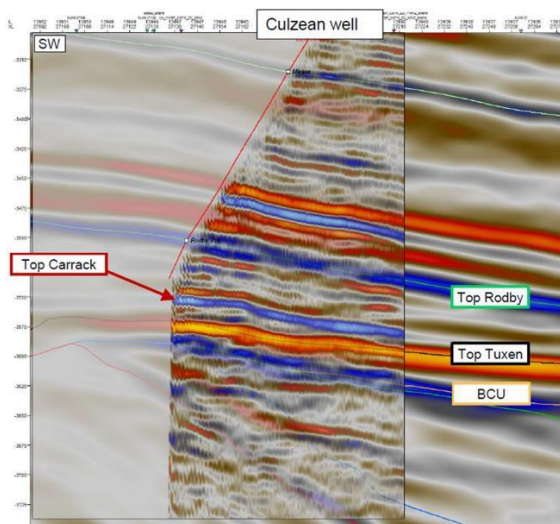


Рис. 7: VSP-CDP перекрытие наземной сейсмоки

Истинный VI - это набор данных, в котором для каждого скважинного прибора используется только ближайший к вертикали пункт возбуждения, что часто приводит к уникальным позициям источника для каждого зонда со смещением источника к приемнику менее 20 футов. Эта уникальная геометрия обеспечивает наиболее точные пары время-глубина и интервальные скорости.

Во-вторых, полный набор данных WAVI-VSP был отсортирован в сейсмограммы равноудаленных трасс (COG) и преобразован в 2D-изображение высокого разрешения ниже ствола скважины с использованием широко используемой методики преобразования VSP-CDP (Рисунок 7). Окончательное изображение было ограничено полосой 5-110 Гц, чтобы исключить любой шум за пределами сейсмической полосы частот, обработка велась с использованием частоты дискретизации 1 мс по времени, и с интервалом трасс в 6 футов.

Равноудаленные трассы были сгруппированы с интервалами в 25 футов с выносами от -500 футов до +1000 футов от каждого скважинного прибора. В каждом наборе данных присутствовали все записанные уровни, и все пары источник-приемник имели примерно одинаковое удаление. Обработка набора данных WAVI-VSP в COG, а не в наборах трасс с общим пунктом возбуждения (CSG), значительно улучшает прослеживаемость событий в конечном изображении. Краевые эффекты разделения волнового поля ограничиваются только самыми мелкими и самыми глубокими трассами во всей съемке, а не верхним и нижним инструментами каждого отдельного пункта возбуждения, как это происходит при обработке данных с общим пунктом возбуждения. Обработка CSG имеет тенденцию создавать сильные искажения (артефакты, футпринты) на изображении.

В-третьих, была проведена сейсмическая инверсия по алгоритму sparse spike, чтобы помочь интерпретировать волновое поле восходящих волн ВСП и коридорную трассу ВСП ниже проектной глубины скважины, и идентифицировать кровли формаций Sola, Tuxen и BCU как функцию времени.

Спрогнозированные отбивки во времени были преобразованы в глубины по вертикали ниже проектной глубины скважины, а затем геометрически преобразованы в измеренные глубины вдоль траектории скважины.

Для каждой скважины операции ВСП, от установки и работы в скважине до расчета прогнозируемой глубины Sola или Carrack, Tuxen и BCU, были завершены менее чем за 36 часов. В течение этого времени полная обработка и анализ ВСП были завершены в течение 6 часов после получения полного набора данных. Этого можно было достичь только путем тщательного планирования каждой операции ВСП и нахождения геофизика-обработчика в офисах заказчика.

Три прогнозных ВСП в новом проекте Кулзеан дали чрезвычайно точный прогноз глубин целевых границ. Верхний Carrack был предсказан в пределах 14 футов от истинной глубины, Верхний Tuxen - в пределах 8 футов от истинной глубины, и BCU в пределах 13 футов.

Тесное взаимодействие подрядчика, клиента и местной группы специалистов и их зарубежными коллегами в процессе обработки и интерпретации данных стало ключевым фактором успеха реализации проекта ВСП Кулзеан. Это позволило геофизикам и геологам заказчика и подрядчика обсудить идеи по интерпретации

данных ВСП и обеспечить надлежащую экспертную оценку каждого последующего шага рабочего процесса. После каждого прогнозного ВСП успехи и ошибки анализировались, извлеченные уроки документировались, а рабочий процесс адаптировался, что привело к тому, что к третьей скважине ВСУ был спрогнозирован на 13 футов выше истинной границы в то время как прогноз наземной сейсмики давал границу на 75 футов глубже. Без перспективного прогноза ВСП скважина могла бы быть пробурена в ВСУ до установки обсадной колонны. Если бы прогноз глубин делался изолированно, это привело бы к потенциальной потере скважины.

Выводы

Ключом к безопасной и успешной реализации проекта разработки газового месторождения Кулзеан стало правильное размещение эксплуатационного хвостовика в каждой эксплуатационной скважине. За этим успехом стояла фаза совместного использования критериев успешности проекта, детального планирования, определения и согласования протоколов при тесном сотрудничестве между оператором и подрядчиком на всем его протяжении.

Разумный выбор подходящей скважинной технологии и использование метода WAVI-VSP, определенного на этапе планирования, были подтверждены на этапе выполнения проекта.

Сочетание скважинной технологии и технологии обработки данных привело к значительному улучшению визуализации геологической среды. Это повышает уверенность в правильном принятии решений в последующих этапах программы бурения. С точки зрения времени бурения мы консервативно оцениваем экономию времени буровой установки от 0,5 до 0,75 дня на одну скважину. Принимая во внимание объемы работ, указанные выше, это весьма значительно при бурении uHPHT скважин.

GeoWave II® является зарегистрированной маркой компании Sercel.

Список литературы

Owens, J., Parry, G., & Taylor, B. [2012] Extreme HPHT Wireline Data Acquisition: Planning for Success. Presented at *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA*, 8-10 October. SPE-159127-MS

<http://dx.doi.org/10.2118/159127-MS>

Благодарности

Авторы выражают благодарность BP Exploration Operating Company Ltd, JX Nippon Exploration & Production (Великобритания) Ltd, TOTAL North Sea (Великобритания) Ltd и компании Baker Hughes, GE company за разрешение на публикацию этой работы.