

Первый газ спустя 40 лет: сюрпризы геофизики с месторождения Сатурн. First gas after 40 years: geophysical surprises from the Saturn field

Стив Элам (Steve Elam)*

Введение

Данная статья первоначально была представлена как устная презентация на ежегодной конференции EAGE в Вене-2006. К тому времени эксплуатационное бурение на комплексе Сатурн (Saturn) еще не было завершено. Бурение на месторождении Сатурн и его спутниках было закончено к началу ноября 2006 г., и по прошествии времени в статью были включены некоторые корректировки, которые не были представлены ранее. Как и в первоначальной презентации, здесь также делается акцент на тех приятных и неприятных сюрпризах, с которыми столкнулось эксплуатационное бурение. К счастью, в итоге положительные моменты превалировали над отрицательными, и добыча газа ведется с большей интенсивностью, чем изначально ожидалось.

На блок 48/10 в южной части Северного моря в начале имела права компания Phillips Petroleum в 1965 г. Они пробурили первую скважину 48/10-1 в этом блоке в 1967 г. Она не обнаружила залежь углеводородов и была закупорена и ликвидирована. Большую часть блока оставили в 1985 г. Затем в 1986 г. Conoco North Sea Inc. приобрела часть блока 48/10b, и к концу того года, была пробурена первая скважина, открывшая месторождение. Хотя скважина 48/10b-2 показала дебит в 14 млн. станд. куб. футов в сутки из песчаника Красного лежня (Rotliegende), только в последнее время поняли, что она не была расположена оптимально. Последняя параметрическая скважина была пробурена в 2003 г., эта скважина (48/10b-13) была успешной, но не испытанной. Также много событий произошло за этот промежуток времени.

В этой связи, часть блока 48/10, которые имела компания Phillips Petroleum (48/10a), поменяла владельцев несколько раз, и в настоящее время он полностью принадлежит компании Venture Production PLC. Там она открывает и сейчас разрабатывает месторождение Аннабель (Annabel).

Проект развития Сатурна был официально одобрен ConocoPhillips в мае 2004 г. К тому времени компании Conoco и Phillips объединились. Добыча первого газа произошла в сентябре 2005 г., спустя приблизительно 40 лет после того, как была выпущена первая лицензия. Последняя разведочная скважина (четвертая) в блоке 48/10b была завершена в сентябре 2006 г., и все четыре скважины в сентябре 2006 г. дали примерно 250 млн. станд. куб. футов в сутки. В недавнем времени еще на двух близлежащих месторождениях - Tethys в блоке 49/1 1b и Мимас (Mimas) в блоке 48/9a - также велось бурение. Добыча из этих областей, используя аппаратуру Сатурна, началась в феврале и июне 2007 г., соответственно.

Параметры района

Параметры района месторождения Сатурн показаны на рис. 1. Основные интересующие нас моменты - это расположенный с севера на юг соляной шток Одри (Audrey) в блоке 48/10b и инверсионная ось углубления фундамента.

* ConocoPhillips (Великобритания), Абердин.

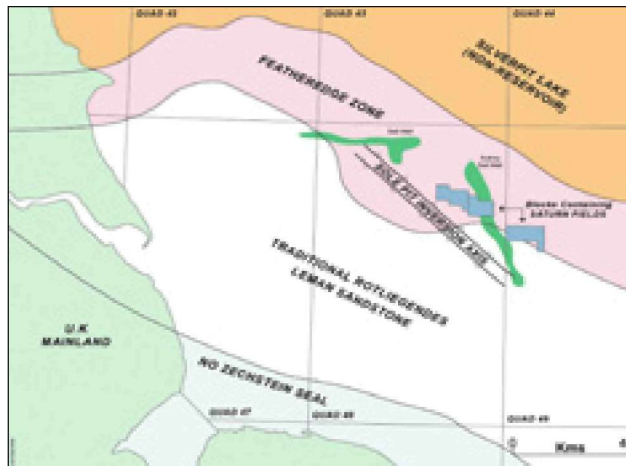


Рис. 1. Региональная карта расположения объектов с распределением фаций Красного лежня.

Кроме того, на этой карте показаны главные пояса распределения фаций Красного лежня. Месторождение расположено в узкой зоне между крупными дюнами к югу и озером Silverpit на севере. Литология, с которой столкнулась последняя параметрическая скважина 48/10b-13 на Сатурне, является типичной для этой области (см. рис. 5). Верхняя часть Красного лежня – это фации Silverpit, состоящие из сланца и алевролита, иногда с тонкими прослоями песков. Они лежат над песчаником Lower Lemna, состоящим преимущественно из песчаника с переслаивающимися сланцем и алевролитом. Самый продуктивный бассейн залегает в основании этой обратной последовательности, которая неудачно расположена на угленосном слое.

На рис. 2 показана карта структурных ловушек углеводородов кровли Красного лежня, полученная прямо из межрегионального глубинного преобразования. Эта карта выдвигает на первый план главные месторождения этой области с промыслами, включенными непосредственно в обозначенное развитие Сатурна. Это Атлас (Atlas), Гиперион (Hyperion), Рея (Rhea), Мимас (Mimas) и Тетис (Tethys). Любопытным астроном скажет, что эти месторождения названы в честь спутников газового гиганта Сатурна. К сожалению, это месторождение не может быть реалистически описано как газовый гигант, но это удобный способ присваивания имен соседним месторождениям. Кроме того, на рис. 2 также прокомментировано месторождение Аннабель компании Venture Production PLC.

На рис. 3 показан сейсмический профиль вдоль линии A-A'. Западная часть этого профиля показывает край инверсионной оси углубления фундамента при увеличении мощности юрских отложений и срезании меловых отложений. В центральной части разреза показан соляной шток Одри, в то время как на восточном конце разреза изображена менее сложная часть бассейна. Необходимо заметить, что

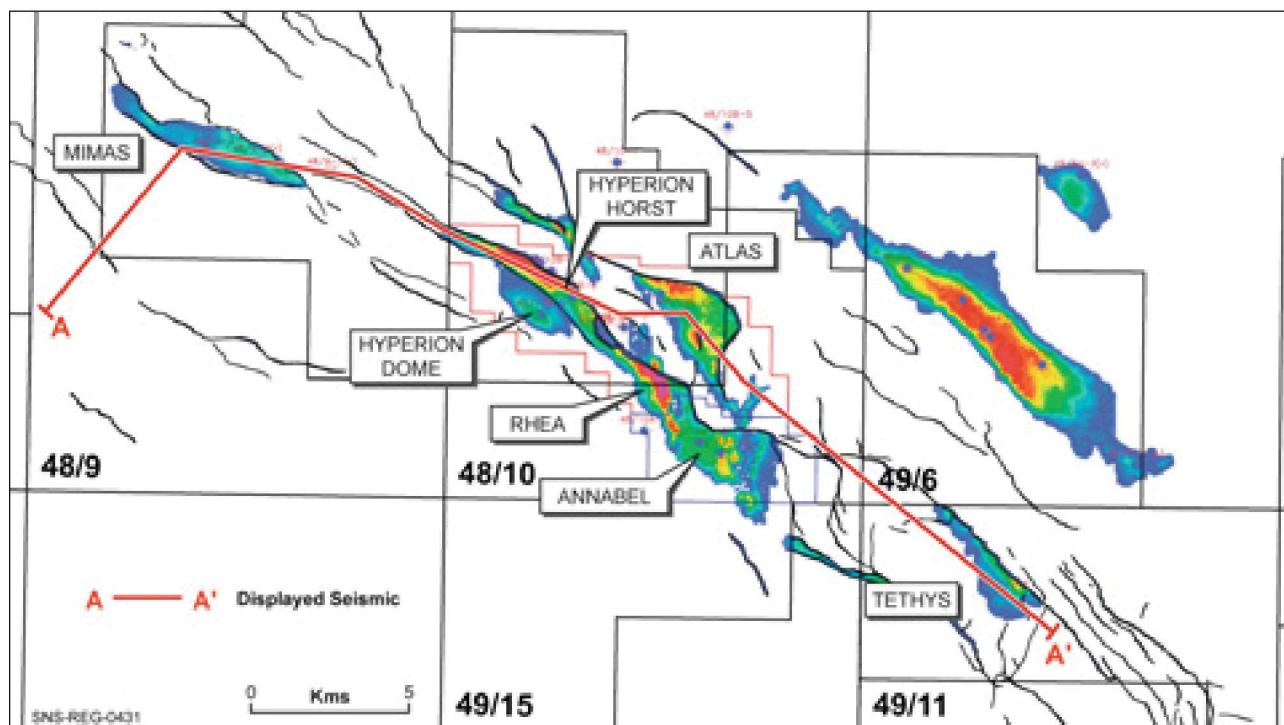


Рис. 2. Кровля Красного лежжня на карте структурной ловушки углеводородов.

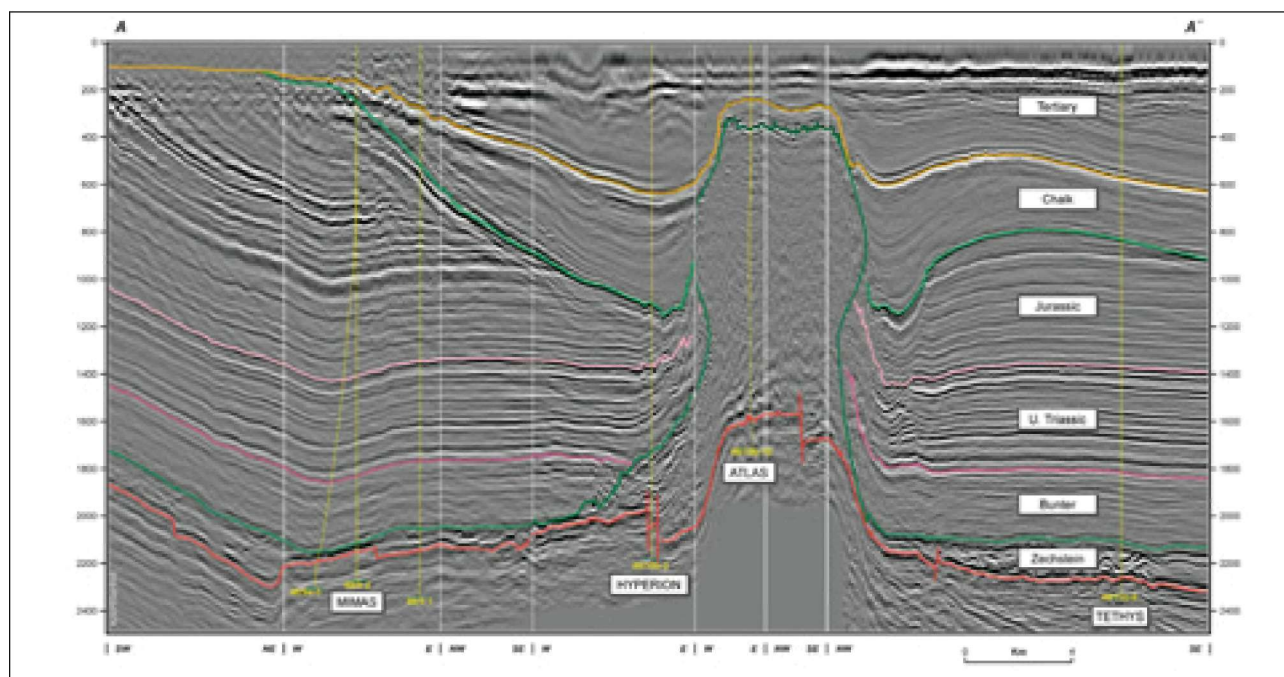


Рис. 3. Временной разрез после глубинной миграции до суммирования по линии A-A'.

хотя этот временной разрез содержит данные после глубинной миграции до суммирования, качество данных по соляному шток крайне плохое. На этом разрезе также указаны положения месторождений.

Разработка и геофизическая интерпретация

Поскольку лицензии на эту площадь впервые появились еще в 1965 г., интерпретация развивалась от 2D сейсмических разрезов

(для чего были пробурены 10 скважин в этом блоке), 3D исследований, получающих данные после временной миграции, и в настоящее время до 3D трёхмерного массива данных после глубинной миграции до суммирования. На рис. 4 показано, что интерпретация развивалась с появлением новых данных. К тому же, детальные гравиметрические и магнитометрические работы были выполнены в 1992 г. Однако методы потенциальных полей испытывают недостаток в обнаружении кровли структуры Красного лежжня под соляным штоком.

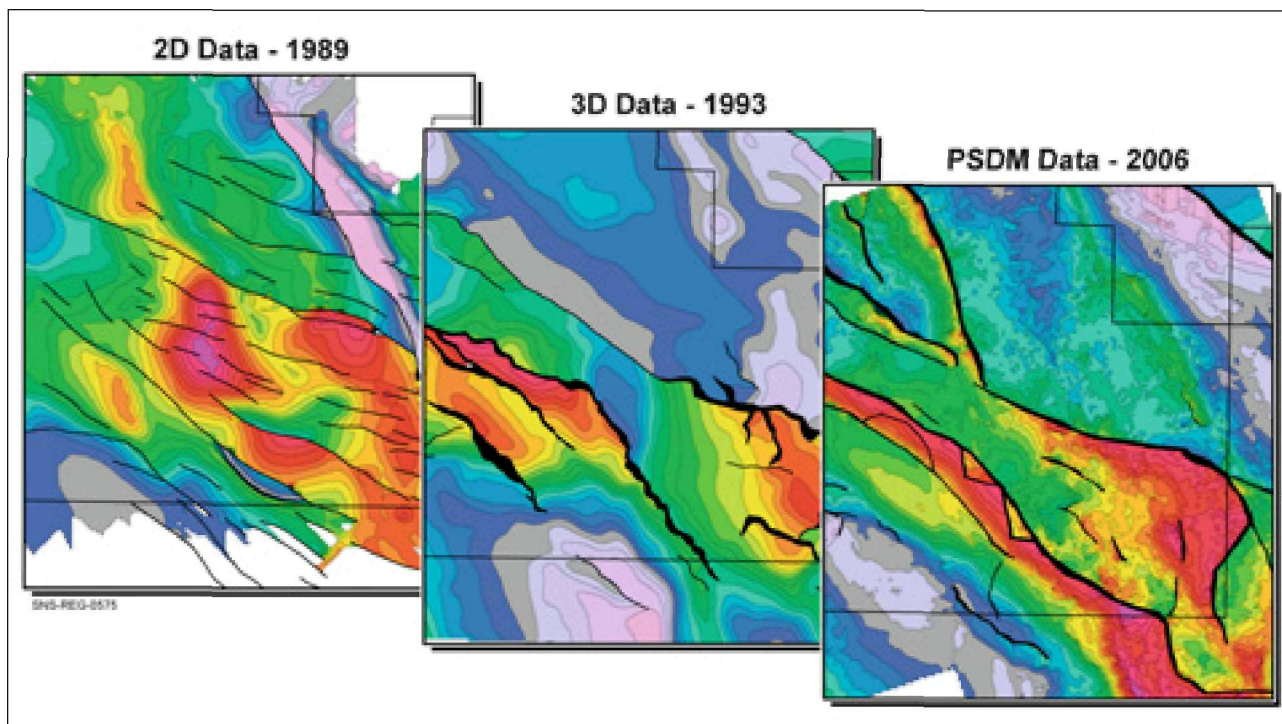


Рис. 4. Развитие интерпретации.

В течение каждой фазы сейсмической интерпретации чрезвычайно легко поверить в правильность истолкования структуры. Как будет показано позже, необходимо помнить, что у нас была лишь интерпретация изображения, которая, даже при глубинной миграции до суммирования, может ввести в заблуждение. Считается, что изображение после глубинной миграции до суммирования является приближенным к действительности. Оно расположено в сейсмических глубинах, и было проинтерпретировано в сейсмических глубинах. Затем сейсмические данные были преобразованы в двойное время пробега, используя скоростную модель, применяющуюся в миграции. Далее интерпретация снова проводилась по данным, пересчитанным в глубины, используя основные скоростные зависимости. Из-за сложностей с глубинным преобразованием через нависающие соляные купола, глубинное преобразование было сделано в линейном режиме, используя программное обеспечение, которое позволило рассчитать 2D модели через соляной шток. Каждая модель состояла из серий закрытых полигонов, которые могли быть описаны скоростными функциями.

Создание и проверка контроля качества этих моделей большей частью является автоматизированным и требует более тщательной проверки. Так как скоростные функции, используемые для каждого из пяти верхних слоев в глубинном преобразовании (см. рис. 3), позволяют изменения скорости только с глубиной, для шестого слоя (эвапориты пермского известняка) использовали функцию, связывающую интервальное время с мощностью. Когда преобразованные глубины горизонтов сравнивали со значениями по скважинам, были отмечены погрешности в определении глубины. Эти невязки были откорректированы только по уровню кровли пермского известняка, используя отдельное поднятие радиусом 2 км.

Даже с этой новой картой кровли пермского известняка признали, что из-за плохого качества данных под соляным штоком, для этой области оставалась большая неопределенность. Следовательно, прежде чем развивать это месторождение, было решено пробурить еще одну параметрическую скважину.

Скважину 48/10b-13 пробурили от предположительного местоположения платформы, так чтобы в случае успеха, она могла быть продолжена и использована в качестве эксплуатационной скважины. Она встретила кровлю Красного лежа примерно на 130 футов выше, чем прогнозировалось, и открыла, что бассейн имеет лучшие свойства, чем предполагалось, демонстрируя, что и глубинное преобразование, и геологическая модель все еще требуют некоторой доработки. Участок бассейна, который встретила эта скважина, показан на рис. 5. Было решено искать предполагаемое развитие утверждения с новой уверенностью. Однако оказалось, что месторождение Сатурна простиралось в блок 48/10a компании Venture Production PLC 48/10, в то время как ее месторождение Аннабель возможно простиралось в блок 48/10b компании ConocoPhillips. Следовательно, между этими двумя компаниями требовалось соглашение по централизованной эксплуатации. Было понятно, что значительная часть ресурсов могла уничтожаться при таком применении, так в этих переговорах был предпринят практический и неконфронтационный подход, и выгодное для всех соглашение было быстро достигнуто.

Эксплуатационное бурение

Цель состояла в том, чтобы пробурить на Сатурне все четыре разведочные скважины от платформы через соляной шток, затем отклонить их, чтобы субгоризонтально пройти через участок бассейна, и проникнуть на 2000 футов в верхнюю часть пермского песчаника Lower Leman, и дальше на 500 футов в самую нижнюю часть. Ожидается, что начальная ежемесячная добыча составит 70 млн. станд. куб. футов в сутки с каждой скважины. Эти скважины показаны на карте кровли Красного лежа (рис. 8). Первая разведочная скважина 48/10b-N1Z была пробурена от последней параметрической скважины 48/10b-13. Из-за геометрии залежи,

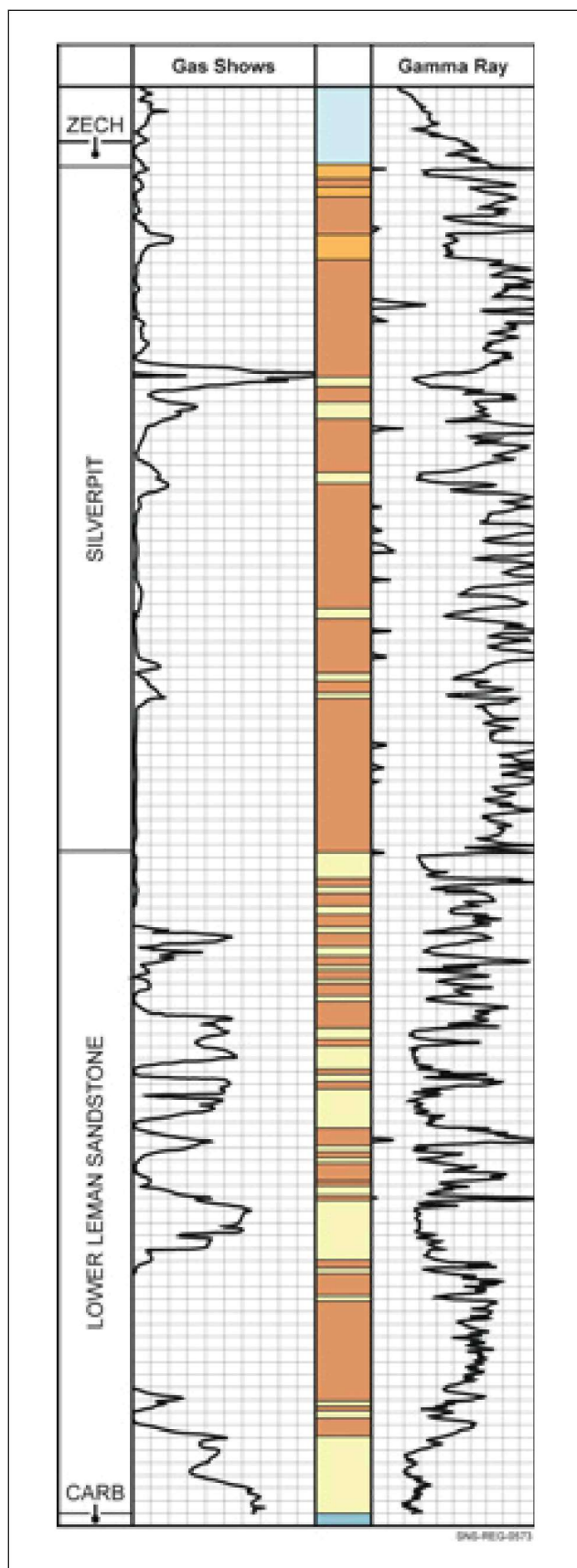


Рис. 5. Литология Красного лежня, как установлено скважиной 48/10b-13.

схема для данной скважины затрагивала проход через всю серию Красного лежня, кратко касаясь лежащих выше карбонатных пород, и далее снова пермских отложений (см. верхнюю часть на рис. 6).

Первая часть плана была успешно завершена. Скважина пробуривала всю серию Красного лежня и карбонатные отложения, когда встретилась с галитом цехштейна - полигалитом. Был обнаружен сброс. Это была «субсейсмическая» ошибка амплитудой 800 футов («субсейсмическая» - потому что сброс не был установлен по сейсмическим данным). Исправленный разрез показан в нижней части рис. 6. Это было удар, но не полная неожиданность. Как показано на рис. 6, чтобы уменьшить неопределенность верхней части бассейна в этой области и гарантировать наличие достаточного количества запасов для дальнейшего развития, была пробурена последняя параметрическая скважина 48/10b-13. Было понятно, что плохая сейсмическая интерпретация могла скрывать много проблем, и мы обнаружили проблему. К счастью, скважина 48/10b-N1Z встретила лучшие свойства пород, чем ожидалось. Она добывала 130 млн. станд. куб. футов в сутки, так что руководство было счастливым! Отдел бурения был также счастлив, поскольку сейчас более короткая, чем ожидалось, скважина стоит меньше, чем при первоначальной оценке. Единственным несчастным человеком был слегка растерянный геофизик, который приметил самую большую «субсейсмическую» ошибку в своей карьере.

Вторую разведочную скважину 48/10b-N2 подобрали с учетом прогноза до бурения и на ней подробно не останавливаются. Третья разведочная скважина 48/10b-N3 была разработана для перспектив на бурение. Она была запланирована как билатеральная скважина с длинами стволов по 200 футов каждый. Она должна была пробурить горст Гиперион и куполовидные залежи, открытые скважинами 48/10b-2 и 48/10b-3, соответственно (см. рис. 2 и 8). Особенность горста также была оценена скважинами 48/10b-6 и 48/10b-8. Эта особенность, очевидно простая на временных и глубинных разрезах глубинной миграции до суммирования, соответствующе не коррелировалась со скважиной 48/10b-2. Значения и времени, и глубины по этой скважине оказались слишком большими. Однако качество и характер сейсмических данных на уровне Красного лежня казался довольно хорошим, чтобы ему доверять больше, чем скважинным данным. Это вело к нерешенной проблеме интерпретации, для которой было применено глубинное преобразование. Из-за этой сложности, чтобы проникнуть в кровлю Красного лежня максимально близко к первоначальной скважине 48/10b-2, открывшей месторождение в 1986 г., была разработана разведочная скважина 48/10b-N3, при том же фактическом диаметре скважины. Чем ближе мы были бы к известной точке привязки, тем меньше возможность сюрпризов. Было решено установить башмак обсадной колонны Wettanhydrit примерно на 200 футов от скважины, открывшей месторождение, как показано в верхней части рис. 7.

Что случилось? Скважина пошла от Hauptdolomit прямо в песчаник Красного лежня Lower Leman (подтвержденный в это время хемотратиграфическим анализом) поперек того, что должно было быть другой «субсейсмической» ошибкой на этот раз с амплитудой 550 футов. К сожалению, из-за проблем с регулировкой давления в перекрывающей зоне пермского известняка, в бассейн проникло 16 фунтов на галлон шлама в створ скважины. После периода неудач со шламом и доходов от бурения, заново выполнили быструю

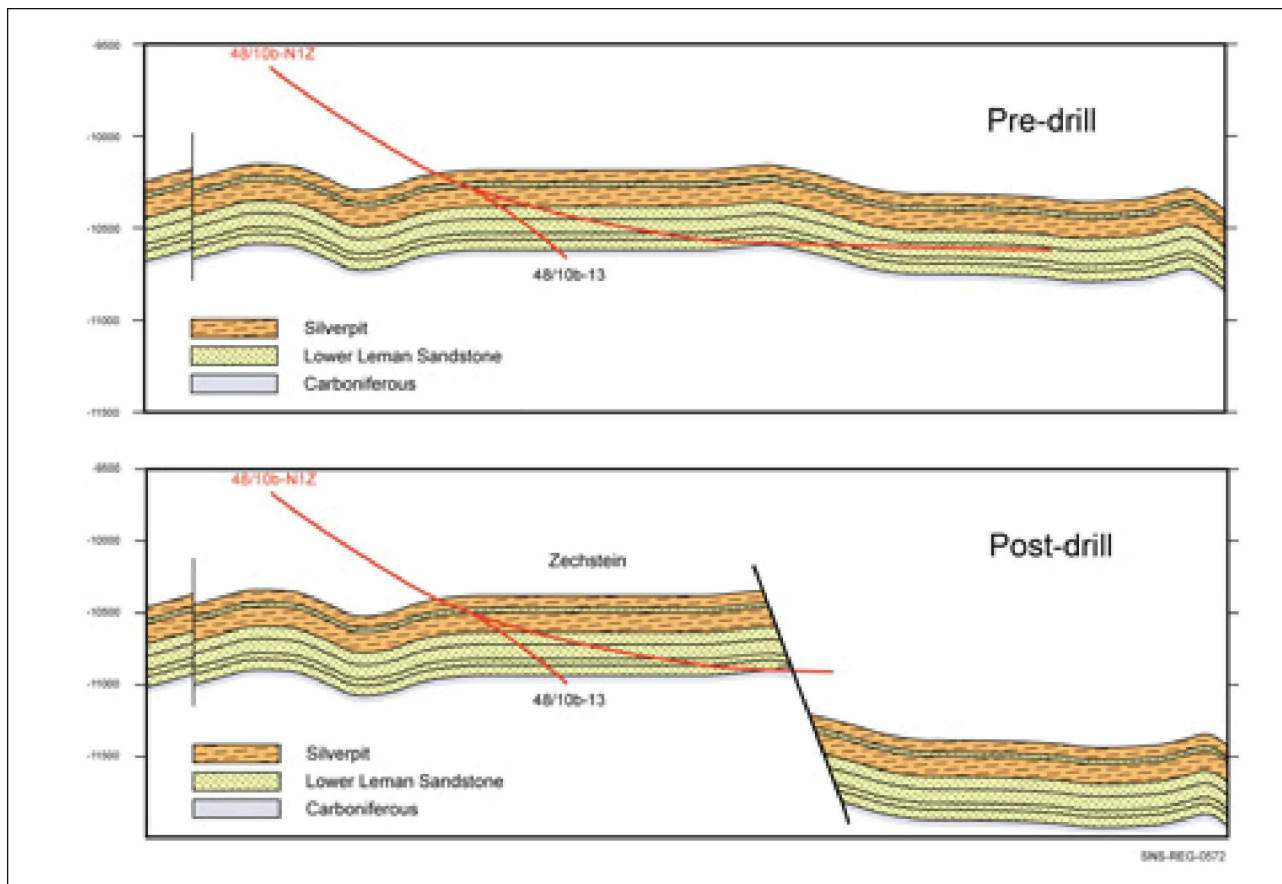


Рис. 6. Интерпретация вдоль скважины 48/10b-N1Z до и после бурения.

интерпретацию и проектирование, и скважина была снова затрамбована, а новый столб скважины забурен, как показано в нижней части рис. 7.

Новый столб скважины, в конечном счете, проник в кровлю Красного лежня на примерно 600 футов выше прежней планируемой глубины. Как только была установлена новая взаимосвязь между существующими скважинами и горстовой структурой Гиперион, была завершена оставшаяся часть билатеральной (сейчас трилатеральной) скважины с небольшим происшествием. На рис. 8 и 9 показана новая интерпретация определения сейсмической глубины. Должно быть отмечено, что при этой интерпретации ни одна из разведочных или параметрических скважин не пробурила горст Гиперион, фактически проникнув в свод структуры. И скважина 48/10b-2, открывшая месторождение, и параметрическая скважина 48/10b-8, как теперь считают, расположены в опущенном, но еще газоносном, крыле сброса, в то время как скважина 48/10b-6 полностью пропустила горст. К сожалению, хотя части горста Гиперион появились почти на 600 футов выше, чем прогнозировалось, билатеральный поток нефти только сейчас превысил 70 млн. станд. куб. футов в сутки, когда улучшилась добыча.

Четвертая и, вероятно, последняя разведочная скважина 48/10b-N4 из шести желобов платформы Сатурн предназначалась для структуры Реи. Это протяжение на юг горста Гиперион, расположенное ниже выступа соляного штока. Это означает, что являются сомнительными и сейсмические данные, и глубинное преобразование. В итоге были выполнены 10 разных глубинных преобразований, и наиболее геологически правдоподобный результат использовался в качестве

лучшей формальной карты - метод, описанный как нейрооптический отбор. К счастью, «приз» был достаточно большим, чтобы найти оправдание для разработки разведочной скважины. Она была спроектирована, опираясь на опыт скважины 48/10b-N и знания, что в этой области существовала большая неуверенность относительно глубины. Следовательно, она была просверлена с большим поворотом налево (см. рис. 8), так чтобы скважина была расположена на одной линии заблаговременно до ожидаемого положения своей цели. Бурение по большей части прошло без событий до того момента, как скважина пробурила кровлю Красного лежня на 300 футов раньше, чем прогнозировалось - слишком большая ошибка для геофизиков. Однако эта цифра находилась внутри нашей области уверенности (+/- 400 футов). Поскольку свойства пород снова были для нас благоприятны, скважина отдавала 140 млн. станд. куб. футов в сутки. При более прямом направлении бурения, вероятно, что скважина проникла бы через главный разлом в Красный лежень до спуска колонны до забоя, и нам бы пришлось забуривать новый ствол скважины, как в случае со скважиной 48/10b-N3.

В скором времени после завершения четвертой разведочной скважины на Сатурне, в течение сентября 2006 г. все четыре скважины осуществляли добычу при установившемся дебите 250 млн. станд. куб. футов в сутки. Совокупная добыча месторождения была уменьшена из-за обратных эффектов.

Спутники Мимас и Титан

Как только одобрили развитие месторождения Сатурн, еще два предварительно прибрежных газовых месторождения стали жизнеспособными. Были открыты месторождения Титан (49/11b) и Мимас (48/9a)

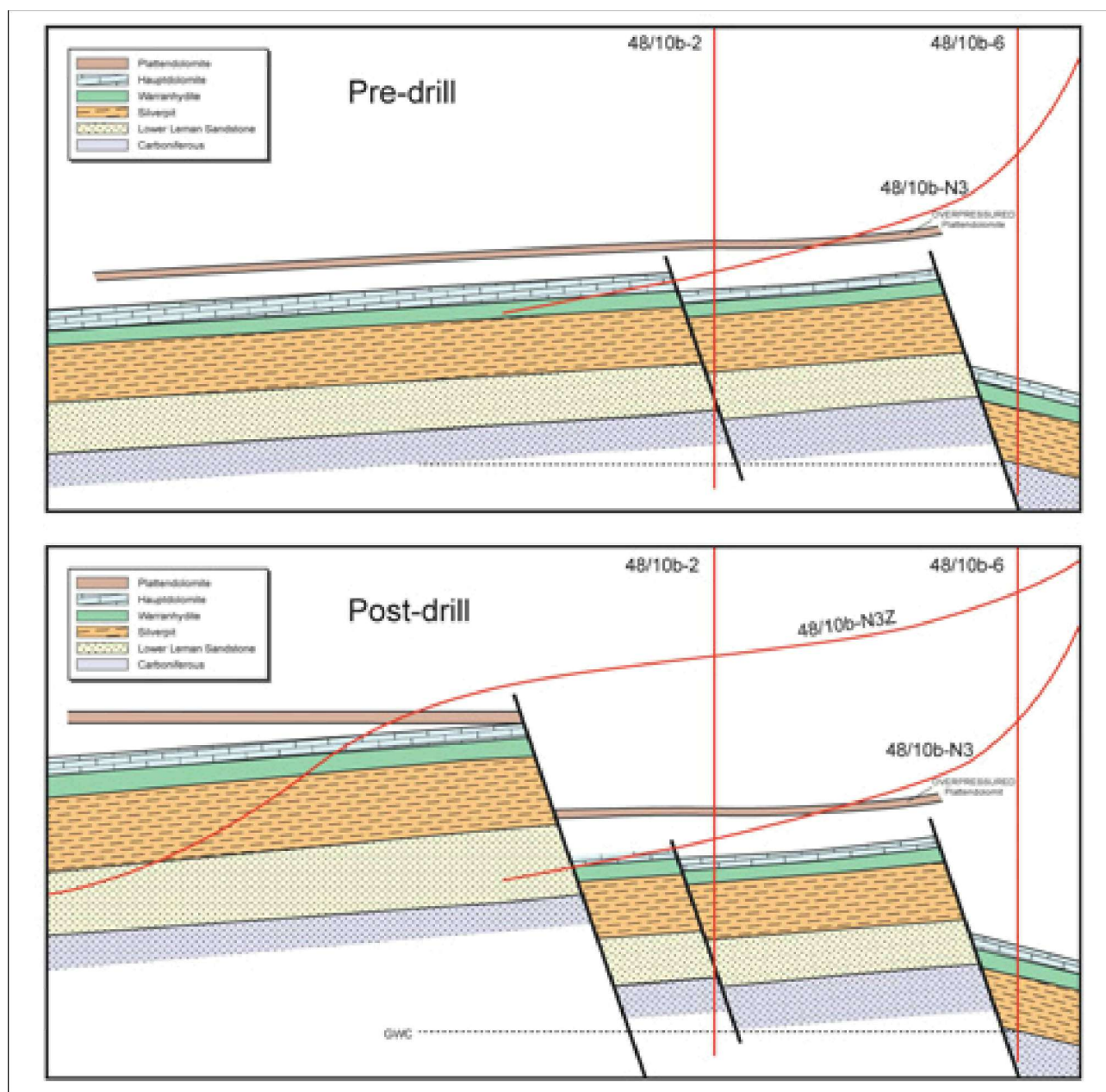


Рис. 7. Интерпретация вдоль скважины 48/10b-N3(Z) до и после бурения.

в начале 90-ых годов, но оба были слишком малы для развития. После того, как была установлена платформа на Сатурне, для Мимаса требовался только 15-ти км трубопровод, чтобы опять соединиться с платформой Сатурна, и поскольку трубопровод Сатурна включал Т-образную врезку, для месторождения Титан был нужен только 3-ех км отвод, чтобы к ней присоединиться (см. рис. 2).

Оба месторождения Титан и Мимас подготавливали к эксплуатации с минимальным количеством оборудования, обычно управляемым автоматически двумя буровыми окнами платформы. Оба расположены на некотором расстоянии от соляного штока Одри и, следовательно, не имеют проблем из-за плохих данных и глубинного преобразования, которые имеют место в развитии центральной части Сатурна.

Скважина, открывшая Титан, была пробурена в 1991 г. и давала 41 млн. станд. куб. футов в сутки из относительно тонкого пласта песчаника верхнего Leman.

Эта скважина была пробурена в направлении, как сейчас видно, на ЮВ конец структуры. Данная структура является крупной спокойной частью рельефа и чувствительна к глубинному преобразованию. Это, к тому же, самое крупное вскрытие Красного лежня, которое компания ConocoPhillips выполнила до настоящего времени, в -11,000 футов по абсолютной вертикальной отметке. Разведочная скважина 49/11b-T1 была пробурена, как идентичная эксплуатационной скважине. Однако положение платформы было определено в центральной части месторождения, так что, если требуется, северную часть месторождения можно было достичь с помощью дополнительной скважины. Эксплуатационная скважина проникла в бассейн под углом примерно 60 градусов, почти увеличивая вдвое вскрытую длину резервуара. Она вошла в пласт Красного лежня 25 футов выше, чем прогнозировалось, и отвечала уровню 65 млн. станд. куб. футов в сутки.

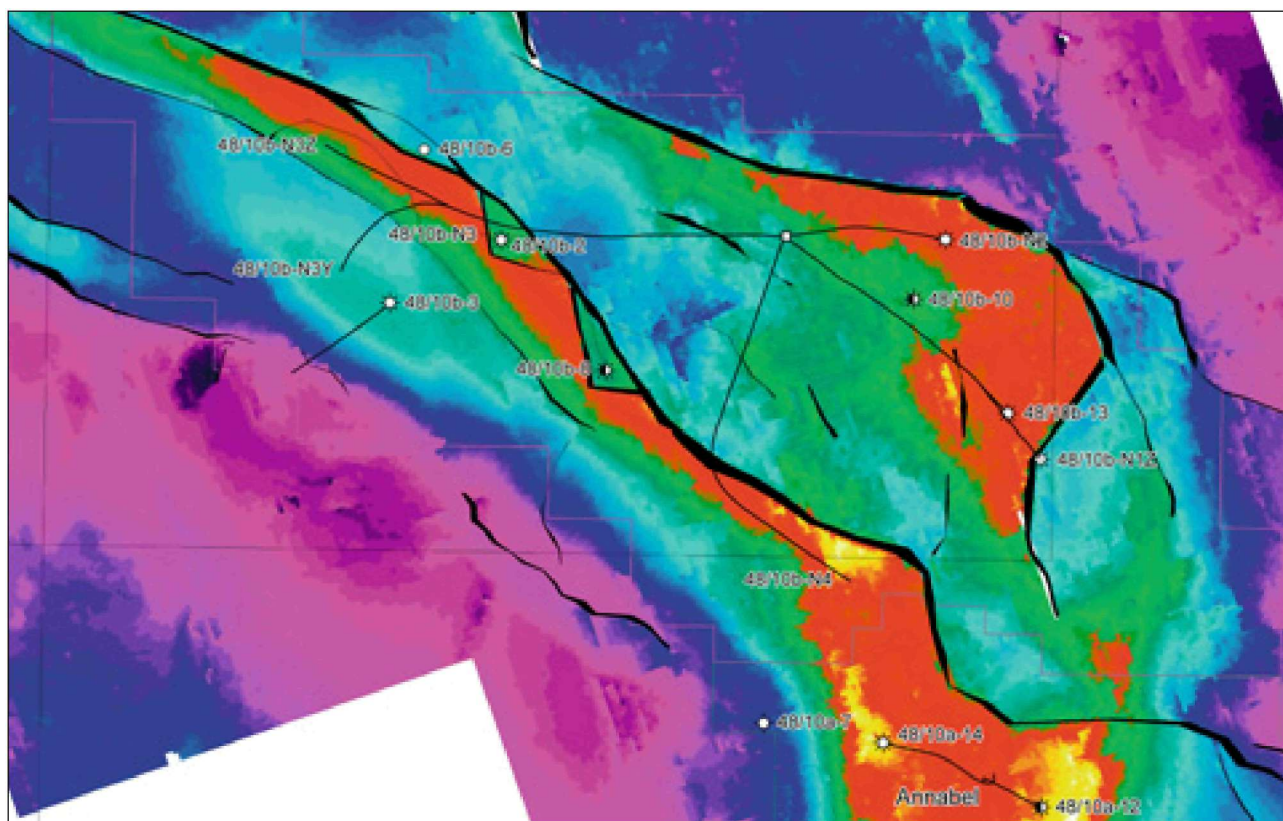


Рис. 8. Определение по сейсмическим данным глубины кровли Красного лежня, и разведочные и параметрические скважины Гиперион.

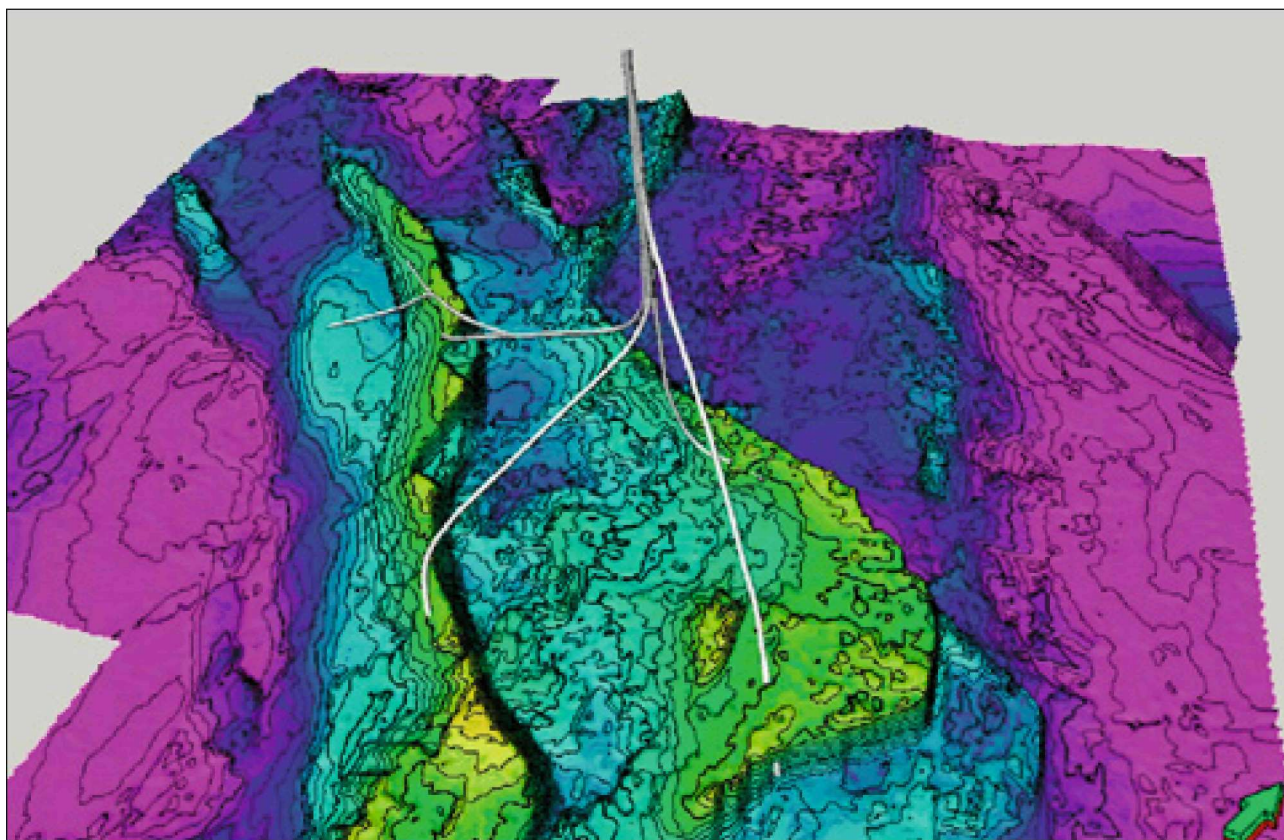


Рис. 9. 3D изображение, показывающее разведочные скважины только на поверхности коллектора, определенной по сейсмическим данным.

Первоначальная добыча была отложена из-за непредвиденных проблем, связанных с прокладкой трубопровода и подсоединения к оборудованию Сатурна. Производство началось в течение февраля 2007 г. на уровне 45 млн. станд. куб. футов в сутки. Однако это вызвало уменьшение добычи от других скважин Сатурна из-за обратного эффекта.

Напротив, структура Мимаса является относительно небольшой тектонически экранируемой структурой, которая была открыта в 1989 г. скважиной 48/9a-2, и была оценена позже в этом году скважиной 48/9a-3, давая 38 млн. станд. куб. футов в сутки. Скважина 48/9-1 предварительно опробовала смежный блок, ограниченный сбросами и, вероятно, вскрыла песчаник Красного лежания в газоводяном контакте. Следовательно, была высокая степень уверенности в результатах этой скважины, поскольку три существующих скважины близко расположены к разведочной скважине 48/9a-N1, и, тем более, она была запланирована на небольшом расстоянии от скважины 48/9a-2. На этот раз степень достоверности была высокой, и скважина вскрыла кровлю Красного лежания в пределах прогнозируемых 20 футов. Она вошла в бассейн почти под 60 град., снова почти увеличивая вдвое вскрытую длину резервуара. С геофизической точки зрения, глубинное преобразование было осложнено близостью инверсионной оси углубления фундамента, которое привело к увеличению мощности юрских отложений и эрозии меловых отложений над месторождением (см. рис. 3). Эта конфигурация отражающих границ является уникальной для области Мимас, и, следовательно, пытается использовать более отдаленные скважины, чтобы посчитать скоростные функции для глубинного преобразования, которые вели к обратным результатам. Последнее глубинное преобразование было основано только на разведочных скважинах Мимаса. Они показали немного разочаровывающие результаты – 43 млн. станд. куб. футов в сутки, по сравнению с прогнозируемыми 50 млн. станд. куб. футов в сутки.

Начальная добыча с месторождения Мимас была задержана также благодаря непредвиденным обстоятельствам в монтаже трубопроводов, соединяющих платформу Мимас с трубопроводом Сатурна. Производство, наконец, началось в июне 2007 г. в размере 45 млн. станд. куб. футов в сутки.

Выводы

Главным выводом этого проекта является то, что в областях со сложными структурами и плохими данными, ожидают что-то непредсказуемое и пытаются сохранить максимальную гибкость плана строительства скважин. Это заключение поднимает вопросы, действительно за границами этого примера полевых работ, включая построение верхних (P90) и нижних (P10) частей карт (дело в том, что диапазон от P90 до P10 включает только 80% возможного исхода), и разницу между объемным методом и

бурением. Вкратце в ходе работ в этом случае использовали гауссово моделирование, чтобы создать большие серии равно вероятных карт глубин, из которых выбрали те, которые содержат P10 и P90. Эти карты являются пригодными для экономического анализа, но не для оценки неопределенности глубины скважины. Неопределенность глубины скважины, вероятно, много больше, чем просто различие между глубинами объемных карт P10 и P90.

В общем, неопределенность глубины скважины должна быть довольно большой во время планирования скважин. Например, неопределенность в +/- 400 футов (P10 - P90) была разработана для структуры Рея, таким образом, скважина была спроектирована, чтобы отвечать этой цели, даже если бы структура была на 500 футов выше или ниже (предположим предельные случаи). Как в случае с Реей скважина вскрыла кровлю Красного лежания на 300 футов выше, чем ожидалось, и была успешно закончена. Однако если бы предельные случаи не были рассмотрены во время конструирования траектории ствола скважины, скважину пробурили в более прямом направлении к Рее без длинной и относительно низкой дуги наклона для присоединения к площади (см. рис. 8). Поскольку структура была примерно на 300 футов выше, чем прогнозировалось, прямая скважина (как первоначально предполагалось) снова пропустит Werraanhydrit и натолкнется на Красный лежень через разлом – это будет повторением нашего дорогостоящего эксперимента со скважиной 48/10b-N3.

Хотя большая часть этой статьи концентрируется на применении различных геофизических методов и случайных структурных сюрпризах, должно быть замечено, что этот проект не продолжился бы без тесного сотрудничества между геофизикой и геологией, буровыми работами и технологиями исследования и разработки коллекторов.

Благодарности

Хотелось бы поблагодарить компанию ConocoPhillips и совместно работающих участников Venture Production PLC и RWE DEA за разрешение представить этот материал. Я также ценю вклад многих моих бывших и нынешних коллег, которые годами работали над этой областью. Отдельно ссылаюсь на недавнюю геологическую работу Дэвида Оливера (David Oliver), последнее инженерное обеспечение разработки коллектора Кевина Эштона (Kevin Ashton), геофизическую работу Чарльза Вуда (Charles Wood) и Джо Прайгмора (Jo Prigmore) по уравновешенному состоянию в течение 2002-2003 г.г. и последнюю геофизическую работу Мата Камма (Matt Camm) по Мимасу.