

## 3D ВСП проведенное в глубоководной части Мексиканского залива для освящения подсольевой зоны тени. 3D VSP in the deep water Gulf of Mexico fills in subsalt 'shadow zone'

Brian E. Hornby, John A. Sharp, John Farrelly, Stephen Hall, и Hans Sugianto\*

### Введение

Одной из самых больших проблем в сейсмическом отображении – подсольевые отложения. На месторождении Mad Dog, сложнопостроенное солевое тело трудно описать поверхностным сейсмическим отображением, так как существуют «теневые зоны», где сейсмическая запись «не видит» структурные зоны подсольевых отложений. На рисунке 1 представлено сейсмический разрез. Здесь красная линия указывает зону вокруг верха структуры, которая плохо отображается поверхностной сейсморазведкой. Для отображения подсольевых отложений – хорошо известно, что геометрия соли сильно влияет, независимо от того может ли сигнал пройти через соль дважды и потенциально быть зарегистрированным на поверхности и использоваться для отображения подсольевых отложений.

Погруженная подошва солевых отложений важна для нас – так как при понижении фундамента соли более критического угла, никакие лучи не проходят через кровлю солевого тела дважды и не могут быть получены поверхностными сейсмическими системами сбора данных (Muerdter и другие, 2001). В этом случае существует одна возможность восполнить информацию и она состоит в том, чтобы разместить приемники ниже соли, и использовать только один пробег луча через соль. В этой статье мы рассмотрим использование 3-мерного ВСП и использование геофонов, помещенных ниже солевых «невидимых» отложений, для получения изображения структуры на месторождении Mad Dog, где поверхностная сейсмика не работает.

### Получение данных 3D ВСП

Рисунок 2 представляет трехмерную съемку ВСП. Мы позиционируем приемники в скважинном стволе и

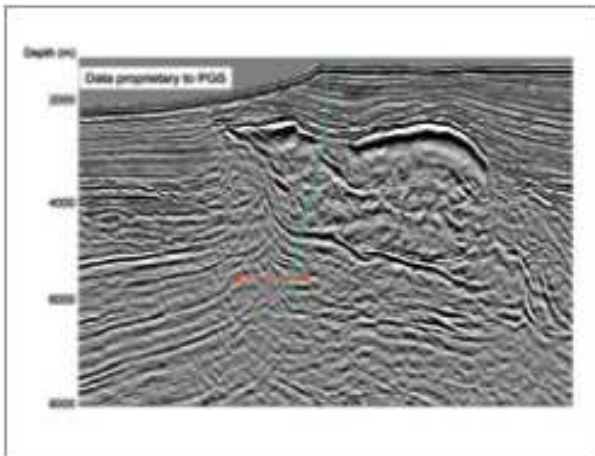


Рис 1: Сейсмический разрез после глубинной миграции до суммирования, демонстрирующий сложно построенное солевое тело и неосвещенную зону (красная линия).

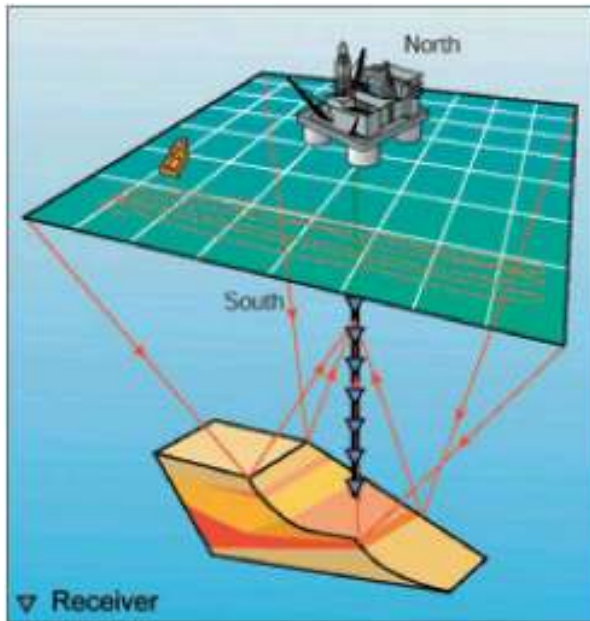


Рис 2: Представляет обзор съемки 3D ВСП

источники базировались на сейсмическом судне источнике, как показано на рисунке 5. Сигналы отражаются от поверхности горизонта, регистрируются скважиной системой и затем мигрируются с применением алгоритма глубинной миграции до суммирования для создания трехмерного объемного изображения вокруг ствола скважины. Главная новизна этого проекта - концепция и реализация в открытом море развернутой 'плавающей буровой платформы' или автономное ВСП, проведенное для единственной буровой платформы (Рис 3). Автономное получение было предварительно осуществлено на месторождении Thunder Horse с использованием двух буровых платформ (Ray и другие., 2003).

Из-за продолжительного времени, требуемого для 3D ВСП съемок (более двух недель) существенная экономия времени буровой платформы возможна, при проведении полностью автономного ВСП. На рис 3 мы видим развитие реализации автономной 'буровой-платформы' ВСП съемки. Левая картина показывает работы для первой скважины - здесь платформа для ложного поворотного стола помещена вне ограждения и для второй скважины, где монтаж был перемещен на другое судно, где мы могли поместить платформу в пределах ограждения. На рисунке 4 мы видим развертывание 'аппарата' в приустьевой зоне на глубине 1350 м. Левый рисунок показывает дистанционное крепление инструмента в приустьевой зоне, центральный показывает

\*BP America, 501 WestLake Park Boulevard, Houston, TX 77079.



Рис 3: Две реализации автономной съемки 3D ВСП, полученной для 'отдельной буровой платформы'. Ложный поворотный ствол позволяет размещение оборудования на стороне платформы в море

погружение геофона в скважину и правый рисунок демонстрирует специально разработанный приустьевого предохранитель. Проведение автономного исследования для отдельно взятой буровой платформы требовало успешного завершения большой технической работы и работы по безопасности для здоровья и среды (HSE) вовлечение в сотрудничество буровиков, специалистов по ВСП и привлечение технологий бурения, глубинных исследований и других факторов.

Дополнительная экономия средств была получена, посредством формирования многомерных сейсмических источников одновременно на кораблях и платформе для осуществления больших сейсмических съемок. Для первой съемки применялось судно с двойным источником, и для второй съемки применялось судно с тремя источниками (Рис 5). Спиральная геометрия была выбрана как самая эффективная геометрия возбуждения (Рис 5).

Для месторождения Mad Dog, моделирование, проводимое в 2002 пришло к выводу, что, для данного числа приемников, лучшие изображения получаются при возможно большем перекрытии (Van Gestel и другие, 2003). В настоящем исследовании лучшие результаты были получены с расстановкой приемников более чем 500 м в длину. При планировании этой съемки мы сосредоточились на наибольшей длине и могли фактически использовать установленное расстояние между уровнями 30.5 м. В первой скважине мы разворачивали полный профиль длиной 730 м, используя 25 уровней и на второй скважине мы использовали полную длину косы 580 м, используя 20 уровней.

#### Обработка скважинных и ВСП данных

Критические параметры для применения поверхностных источников - радиальная протяженность спиральной съемки и расстояния между спиральными траекториями. Оба этих параметра зависят от

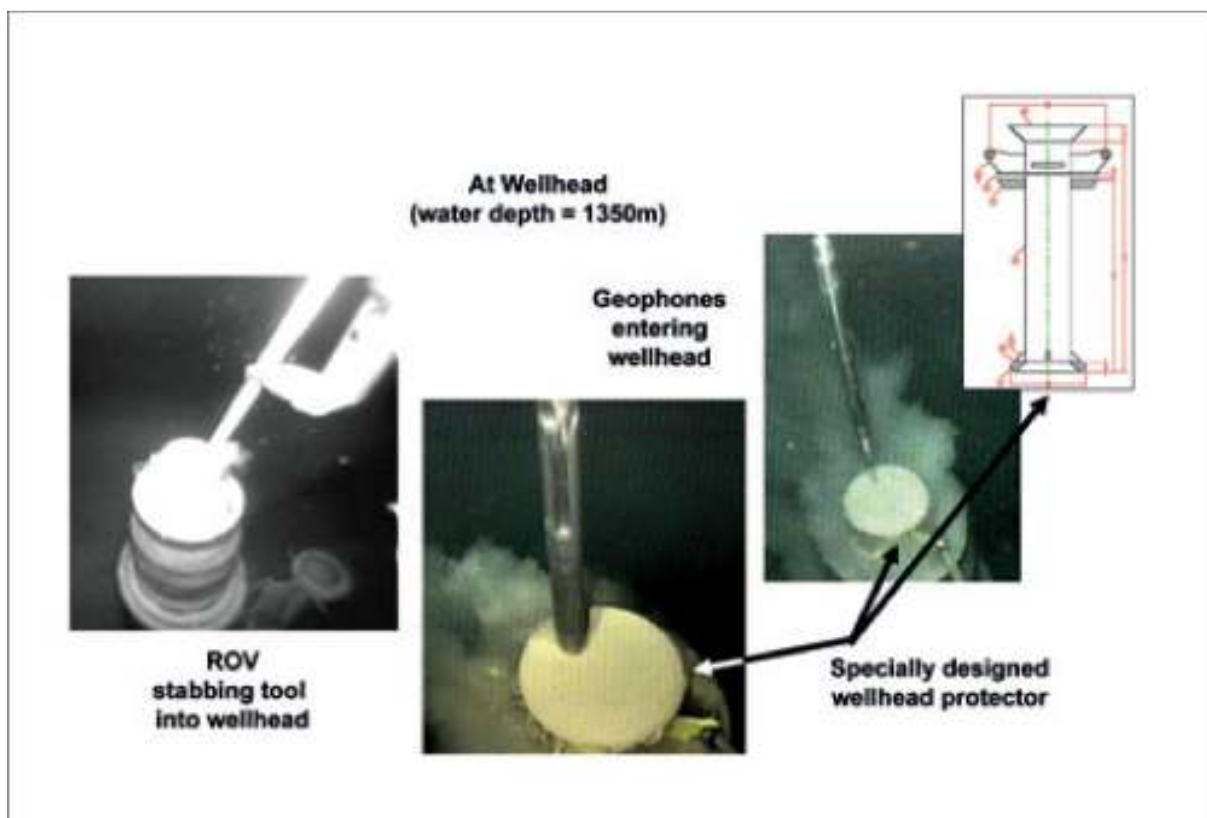


Рис 4: Развертывание 'Blue water' на глубине 1350м. Слева: показан ROV монтаж инструмента на устье. Центр: геофоны опускаемые в скважину. Справа: Специально разработанный приустьевого предохранитель

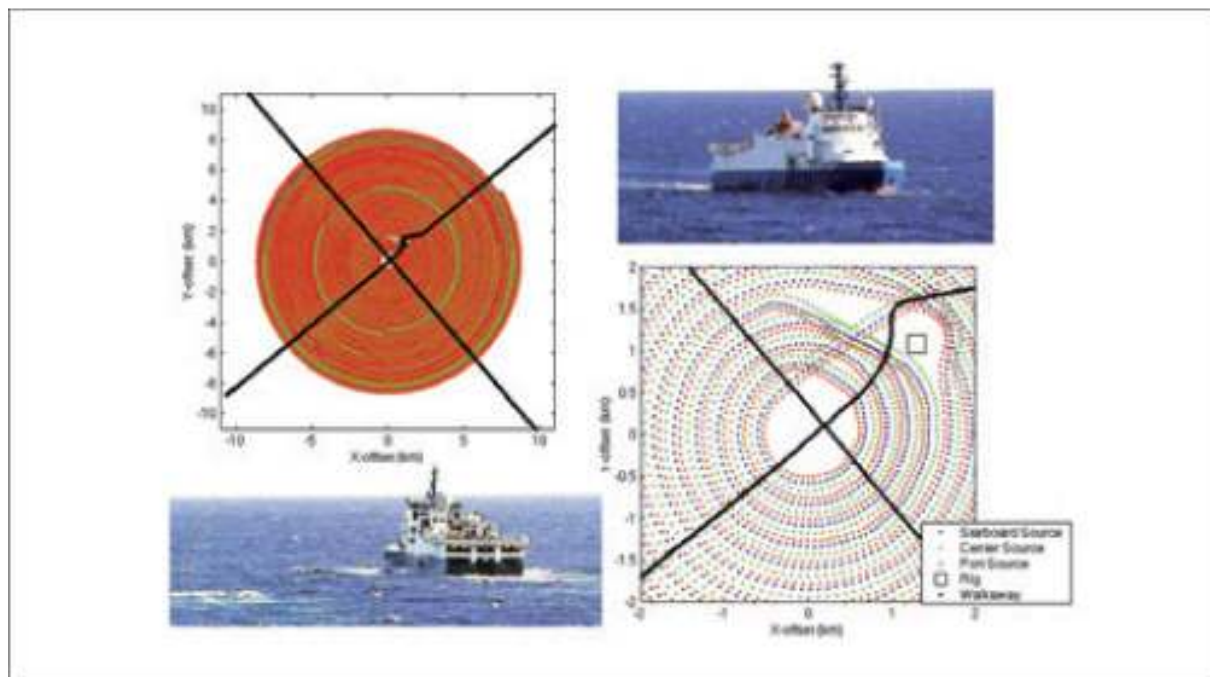


Рис 5: Актуальная спиральная геометрия отстрелов с корабля с тремя пунктами ПВ

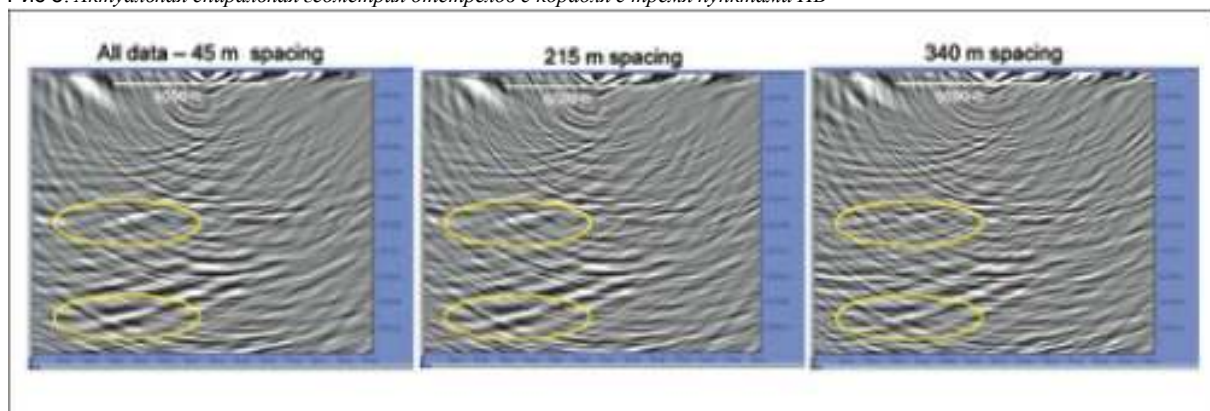


Рис 6: Данные ВСП, обработанные методом глубинной миграции до суммирования для 25 уровней

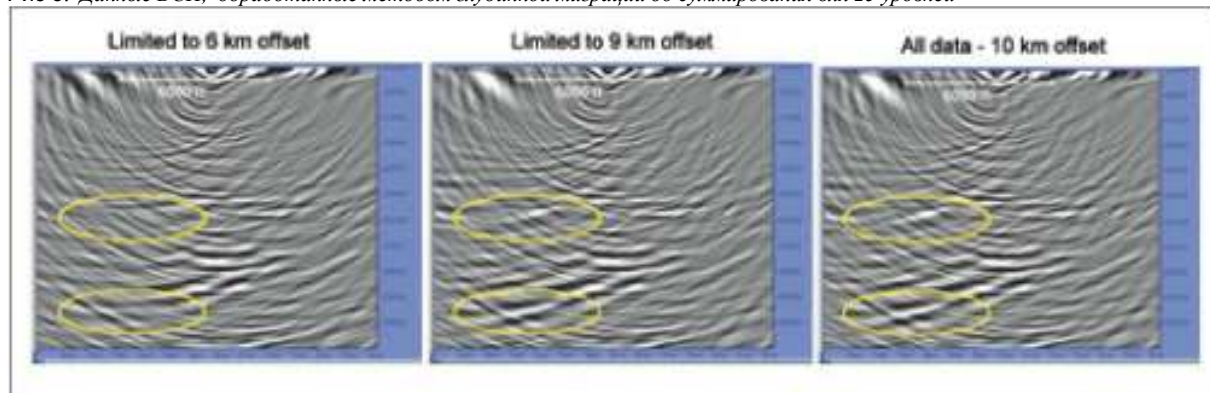
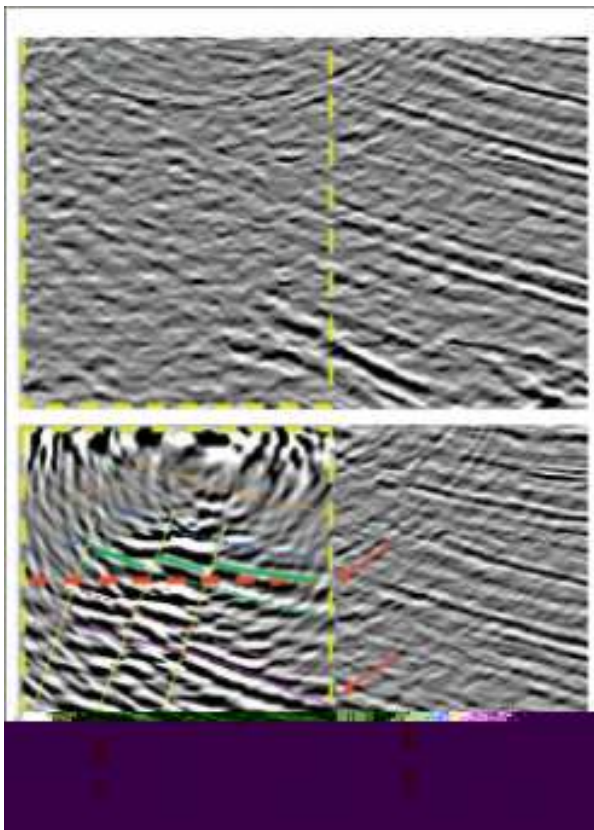


Рис 7: Обработка данных ВСП для определения максимального выноса источника





**Рис 8 :** *Сверху: Сейсмический разрез, отображающий подповерхностную скважину (Желтый квадрат). Внизу: наложение 3D ВСП профиля на глубинные структуры с обозначением разлома около 60м*

полного времени съемки и следовательно затрат. Начальные параметры съемки, сначала оценивались числовым моделированием и проверялись миграционными преобразованиями (Van Gestel и другие, 2003). На месте, сначала была проведена проверка съемок ВСП, и затем стартовало 3х мерное ВСП, с использованием определенных параметров. Параллельно, осуществлялась проверка, 2-х мерных данных ВСП 1), определялись конечные параметры для 3х мерного ВСП, и 2) получен первый взгляд на преимущества отображения.

На рисунке 6 мы рассматриваем влияние расстояния между отстрелами на отображение. Здесь мы хотим использовать столь же большое расстояние, насколько возможно без заметного искажения изображения. На рисунке 6 мы видим изображения ВСП, обработанные методом миграции до суммирования, для всех 25 уровней. Сначала, для 'всех данных', очевидно, что мы достигаем нашей цели отображения важной структуры, погружающейся на Юго-восток (кружки). Двигаясь в направлении шага 21. 5 м., мы видим немного ухудшение изображения, но это все еще приемлемо. Однако, при шаге 340 м, очевидно, что расстояние является слишком большим - качество изображения ухудшилось значительно, и артефакты миграции гораздо более сильны. Для этой съемки расстояние между отстрелами, равное 100 м было наибольшим допустимым расстоянием. Это расстояние помещает наши скважины в лучшую зону отображения

Следующий параметр, который исследуется - максимальный радиус съемки. На рисунке 7 мы показываем результаты проверки, для трех разных выносов - 6 км, 9 км, и 10 км. Снова, важные структурные элементы обозначены кружками. Очевидно, что 6-километровый вынос не будет годным к употреблению для целевых характеристик, и более чем 9-километровый вынос обязан дать хорошее отображение этих характеристик. После дополнительных проверок отображения в более мелком масштабе было решено использовать максимальный вынос 9,5 км.

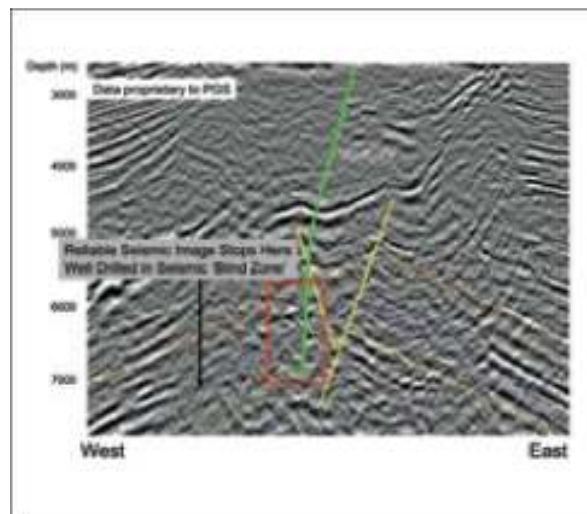
Фактически 3 мерные данные первой съемки имели 38 000 отстрелов на 25 уровнях, общее количество трасс составило 2.85 миллионов. Насколько мы знаем, это было самой крупной 3D ВСП съемкой в одной скважине. Другие достижения во время съемки: наиболее длинный развернутый зонд в скважине (750 м) и наиболее длинная развернутая линия геофонов в скважине (730 м).

### 3D обработка

Граф обработки для 3Д данных детально описан в Shoshitaishvili и другие. (2004) и Кларк и другие. (2004). Обработка состоит из семи главных шагов: загрузка данных и контроль качества, редактирование данных и фильтрация, коррекция векторной точности, разделение восходящих и нисходящих волн, приведение к нуль-фазовому виду, векторная миграция и обработка после миграции. Процессы векторной миграции включают миграцию каждого из трех компонентов данных отдельно, используя миграцию записей ОПВ и затем объединение сейсмических изображений, проецируя эти три компоненты каждого элемента изображения на вектор, направляющий от точки изображения до приемника (Shoshitaishvili и другие, 2004). Результат - отдельное изображение, использующее оптимальные данные R-волн.

### Результаты

На рисунке 8 приведено сравнение между данными 3х мерного ВСП и сейсмической поверхностью, для первой



**Рис 9:** *Вторая скважина. Реальный сейсмический разрез для скважины. Отображает простреленный продуктивный интервал вкост структуры.*

скважины.

Здесь

верхнее

изображение - сейсмическое изображение, показывающее отображение скважины, под солью (желтый квадрат) и нижний рисунок представляет собой наложение разреза 3х мерного ВСП на поверхностными сейсмическими отображения погружающейся структуры, совместно с сейсмическим отображением нарушений с амплитудой приблизительно 60 м. На Рисунке 9, мы видим разрез наземной сейсмики, там где была вторая скважина, и выполнялось 3х-мерное ВСП. Здесь надежные сейсмические изображения прекращаются на некотором расстоянии от запланированного месторасположения скважины. Цель состоит в том, чтобы проникнуть в целевой интервал на кровле структуры. Рисунок 10 показывает результат для красной зоны рисунка 9. Сейсмическая поверхность (слева – увеличенный масштаб рисунка 9) не дает нам никакой информации в этом виде.

На изображении трехмерного ВСП (правая часть) мы видим отображение резервуара (желтая линия), и коричневая линия - очевидное изображение разлома. Что происходит здесь, было причиной подвижки на приблизительно 500 м, и стало причиной того, что первая скважина полностью сухая. Вторая скважина проникла через маленькую часть продуктивного горизонта, но недостаточно. Третья скважина попадает в продуктивный пласт корректно.

Подтверждение местонахождения разлома и резервуара было выполнено, используя скважинную информацию, синие

линии указывают глубину, определенную по интерпретации месторасположения и направления разломов в этих трех скважинах и определении местонахождения резервуара, подтвержденного бурением второй и третьей скважины.

Каково значение ВСП теперь, когда ВСП проведено в третьей скважине? Если бы мы провели 3х мерное ВСП задолго до бурения первой скважины, мы, возможно, сэкономили две других, уводя в сторону траектории скважины. Так, потенциальная экономия и уменьшение риска были возможны в этом случае при использовании 3х мерного ВСП.

#### Закключение

3х-мерное ВСП показывает, что может быть мощным инструментом, для восполнения отсутствующей информации поверхностных сейсмических данных для подсолевых резервуаров. С помощью двух скважин, пробуренными на площади Mad Dog, мы могли видеть в первом случае структуру, не замеченную поверхностной сейсмикой, а во втором случае изображение резервуара и большого разлома, не замеченного на сейсмических данных. Во втором случае, было определено, что два ствола уходят

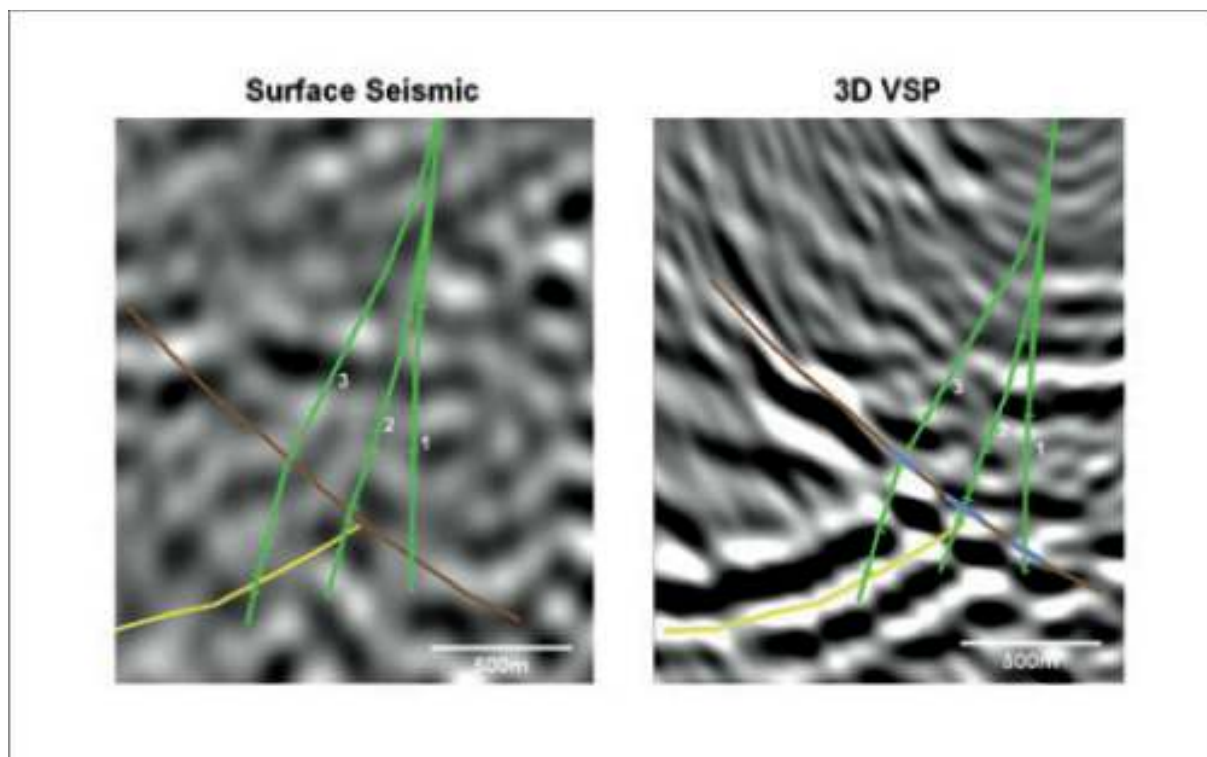


Рис 10: Результаты второй съемки ВСП. Поверхностная сейсмика (Слева – увеличенная картинка из рисунка 9) не дает нам информации. Справа 3D ВСП изображение резервуара (желтая линия), коричневая линия показывает разлом. Что происходит здесь, было причиной подвижки на приблизительно 500 м., и причиной того, что первая скважина - сухая. Вторая скважина проникла через небольшую часть продуктивного горизонта, но недостаточно. Третья скважина попадает в продуктивный пласт корректно.



в сторону и возможно, потенциально можно были бы сэкономить на них, если бы 3х-мерное ВСП было проведено перед бурением первой скважины. Успешная реализация автономного ВСП и испытания по построению изображений волнового поля помех было ключом в успехе этого проекта.

#### Благодарности

Авторы приносят благодарность ВР и партнерам Unocal и BHPB Billiton за их поддержку и разрешение на представление этой работы. В частности мы желаем поблагодарить членов команды бурения Mad Dog, Murry Sepulvado, Doug Hill, Rusty Cook, Perry Hill, и Harry Prewett. Компании Read Well Services и Schlumberger провели ВСП исследования. GX Technologies предоставило сейсмические услуги для первой съемки и Western-Geco обеспечило сейсмические услуги для второй съемки. Internav обеспечил навигационные услуги для первой съемки и Oceaneering обеспечил ROV технологии для обоих исследований. PGS Морская Геофизика обеспечила 3х мерные сейсмические данные, используемые для отображения сейсмических результатов. Вычисления были обеспечены командой Высокопроизводительного Вычислительного Центра ВР.

#### Литература

Clarke, R. A., Dellinger, J., Shoshitaishvili, E., Rothe, S., and Sugianto, H. [2004] Vector fidelity correction with VSP data. *66<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition*. Muerdter, D., Kelly, M., and Ratcliff, D. [2001] Understanding subsalt illumination through ray-trace modeling, part 2: Dipping salt bodies, salt peaks, and non-reciprocity of subsalt amplitude response. *The Leading Edge*, 20, 7, 688-697.

Ray, A., Hornby, B., and Gestel, J., 2003, Largest 3D VSP in the deep water of the gulf of mexico to provide improved imaging in the thunder horse south field. *73<sup>rd</sup> SEG Annual International Meeting*, 422-425.

Shoshitaishvili, E., Sugianto, H., Clarke, R. A., Nolte, B., and Hornby, B. [2004] Processing flow for 3D VSP imaging. *66<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition*. Van Gestel, J., Hornby, B., Ebrom, D., Sharp, J., and Regone, C. [2003] Effects of changing the receiver array settings on VSP images. *73<sup>rd</sup> SEG Annual International Meeting*, 2278-2281.