

## Проектирование ВСП для оценки сложных подсолевых и присолевых резервуаров

### Designing borehole seismic VSPs for complex subsalt or near-salt reservoir evaluation

**Allan Campbell, Les Nutt, Ric Smith и Hungyu Chang обсуждают преимущества самого последнего подхода Шлюмберге к вертикальному сейсмическому профилированию в перспективных подсолевых толщах, таких как в районе Мексиканского залива.**

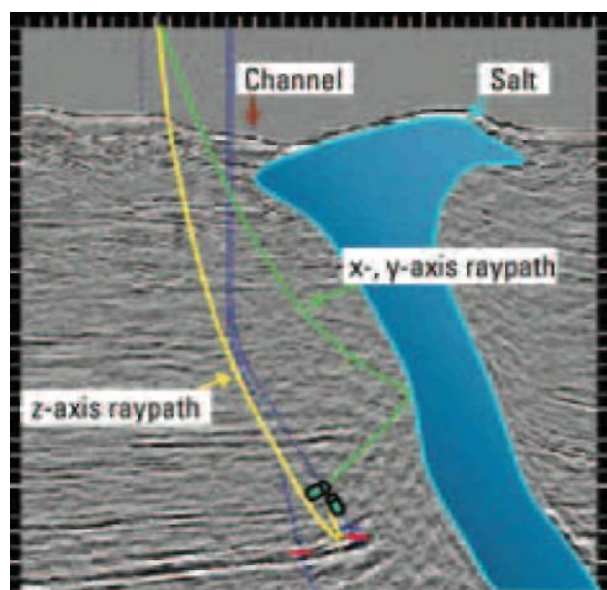
**С**кважинная сейсмическая методика (ВСП), используемая для получения вертикальных сейсмических профилей, доказала успешность при сборе информации и изучении сложных подсолевых или присолевых структур.

Однако, успешное выполнение ВСП любого типа, которое будет иметь серьезное значение при принятии решений, связанных с бурением и разработкой, в таких сложных условиях сильно зависит от корректного проектирования трехмерной съемки и моделирования, а также от эффективности методов регистрации сейсмических данных и методов обработки. Чтобы помочь компаниям-операторам достичь этого, в Шлюмберге была разработана специальная скважинная сейсмическая система, которая оптимизирует все аспекты скважинных сейсмических работ в процессе бурения, регистрации и обработки. На трех примерах ВСП обсуждается применение данной технологии, начиная с проектирования работ до сбора, передачи, обработки данных и интерпретации результатов.

#### Вертикальные сейсмические профили

По большей части побережья залива традиционные синтетические сейсмограммы часто не согласовывались с поверхностными сейсмическими данными. Даже после калибровки с акустическим каротажем корреляция конечной синтетической сейсмограммы с поверхностными сейсмическими данными может оказаться трудной задачей согласования - приведения к одному разрешению. Также в Мексиканском заливе солевые структуры часто могут вызывать нежелательные эффекты, которые ограничивают разрешение поверхностных сейсмических данных и возможности должного оконтуривания резервуаров (рис. 1). Как показано, точная локализация крыла соляного тела и выделение близких солевых отражающих горизонтов трудны при интерпретации данных поверхностной сейсмики, однако они могут быть выявлены с помощью ВСП.

ВСП дает высокоразрешенное сейсмическое изображение области, находящейся в непосредственной близости от скважины. Могут быть зарегистрированы нисходящие и восходящие волны, проходящие через приемники, размещенные в скважине, от возбужденных на поверхности сейсмических источников. Возможность регистрации нисходящих волн в каждом положении приемника в скважине — большое преимущество перед обычными методами наземной сейсморазведки, поскольку



**Рис. 1.** Интерпретация точного положения крыла солевого тела и неразрывности присолевых отражающих горизонтов будет трудной с помощью наземной сейсмики, но может быть выполнена с помощью ВСП.

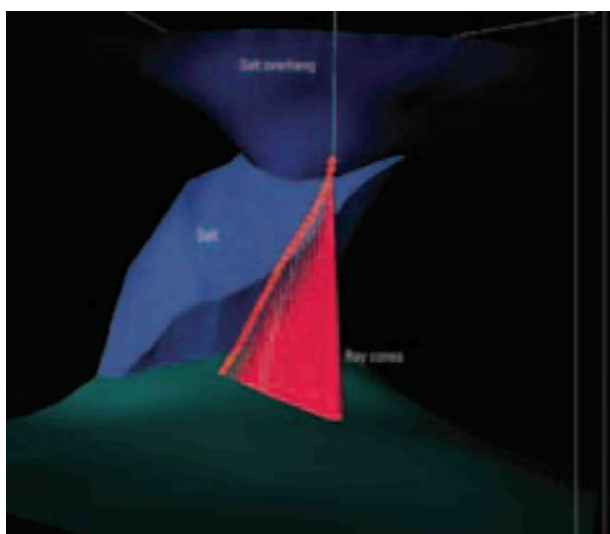
информация, извлеченная из падающих волн может использоваться при приведении к нулевой фазе и подавлении кратных волн в восходящем волновом поле ВСП. К тому же, положения приемника близки к интересующей области в скважине, поэтому конечные результаты ВСП могут дать довольно точную картину геологической среды.

При применении к оконтуриванию присолевых резервуаров геометрия ВСП может снабдить высоким разрешением, необходимым для улучшенного отображения отражающих горизонтов резервуара, находящихся в непосредственной близости с солью. Информация, полученная с помощью ВСП, может улучшить оценки целостности, подтвердить расчеты объема и оценить пределы резервуаров рядом или под солевым телом. Изображения ВСП также могут использоваться для просмотра области «под долотом» для выявления более глубоких потенциальных объектов и оценки латеральных изменений резервуара. Также они могут использоваться для отображения подсолевой области и крыла солевого тела, снабжая информацией

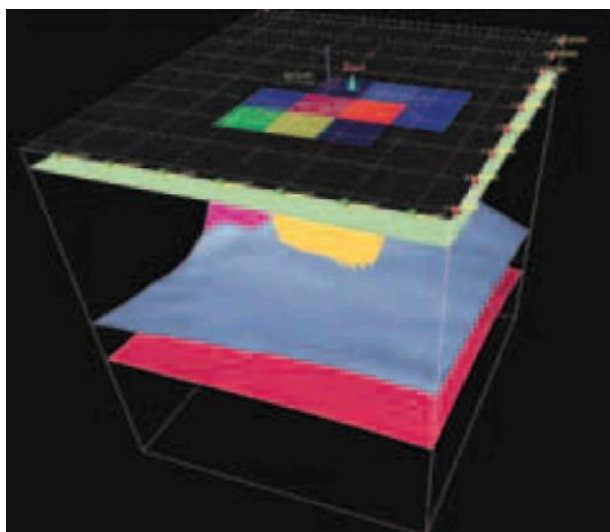
относительно конфигурации солевых тел и определяя солевые тела, которые нужно обходить при бурении. Для того чтобы ВСП справилось с этими задачами интерпретации, необходимо должным образом проектировать съемку и правильно обработать данные.

### Трехмерное проектирование съемки и моделирование

Поскольку солевые тела ограничивают разрешение данных наземной сеймики, отображение потенциальных резервуаров рядом или под такими телами может быть трудным или невозможным. Для того чтобы улучшить отображение в этих условиях, в Шлюмберге разработали инновационный трехмерный метод проектирования съемки. Приложения включают отображение крыла солевого тела и песка-коллектора, расположенного близко к соли. Этот трехмерный метод проектирования съемки



**Рис. 2.** Конусы, направленные вниз от приемников могут быть отрегулированы в интерактивном режиме так, чтобы их отдельные лучи падали на желаемую область отображения.



**Рис. 3.** Гистограмма лучей, пронизывающих верхнюю поверхность модели, показывает оптимальное положение источника для целевой области отображения.

вместе с трехмерным моделированием служит для того, чтобы точно определить идеальное положение источника ВСП для оптимального отображения интересующей области. Его использование также повышает разрешение и позволяет избежать влияния соляных тел на сейсмические данные. В результате улучшается отображение отражающих горизонтов резервуара, даже тех, которые находятся под или близко к солевым телам. После проведения ВСП данные могут быть быстро обработаны и использованы для оценки коллектора, выделения других более глубоких объектов и оценки расстояния до ближайших солевых тел.

Моделирование скважинной и наземной сеймики Gemini 3D идет в три этапа. Первый шаг — определение области геологической среды, которую необходимо отобразить. Это можно сделать несколькими способами, один из которых состоит в том, чтобы нацелить конусы лучей вниз от приемников на область, которая должна быть отображена. Конусы могут тогда быть отрегулированы в интерактивном режиме так, чтобы их лучи падали на требуемую область, как показано на рис. 2. Для дальнейшего ограничения положения точки отражения, на поверхности можно задать полигон.

После ориентировки конусов, переходят ко второму шагу, который представляет собой прослеживание лучей от обозначенной области до поверхности, где после анализа обозначают оптимальное положение источника. Изначально было выполнено трассирование лучей от области отображения до верхней поверхности модели. Затем была рассчитана гистограмма, где показаны точки пересечения лучей с верхней поверхностью модели. Инструмент проектировки съемки далее можно использовать для вычисления оптимального положения источника, располагая координаты X и Y максимального значения гистограммы, давая предпочтительную исходную локализацию для желаемой области прослеживания границ раздела, как показано красной площадкой на верхней поверхности модели (рис. 3). Для подтверждения того, что желаемая область будет надежно отображена, выполняется третий шаг — трассирование лучей от оптимального положения источника до интересующей области, а затем — трассировка до приемников.

### Регистрационная аппаратура скважинной сейсморазведки

Скважинный прибор, используемый для работы на вертикальных сейсмических профилях — VSI (Versatile Seismic Imager). Он был разработан для объединения регистрационных особенностей, которые вначале были представлены в старых вариантах инструментария скважинной сейсморазведки. Трехкомпонентный скважинный зонд регистрирует высококачественные, многоуровневые трехмерные сейсмические данные в открытых и обсаженных скважинах. Зонд может содержать до 40 сейсмических модулей, что сокращает время сбора информации и, таким образом, время бурения. Прибор построен таким образом, чтобы физически отделить приемные узлы от корпуса зонда в процессе регистрации. Малый размер и масса приемный модулей, а также надежная сила прижима зонда гарантируют оптимальную акустическую связь даже в мягких породах, что гарантирует высокое качество и точность зарегистрированных сейсмических данных.

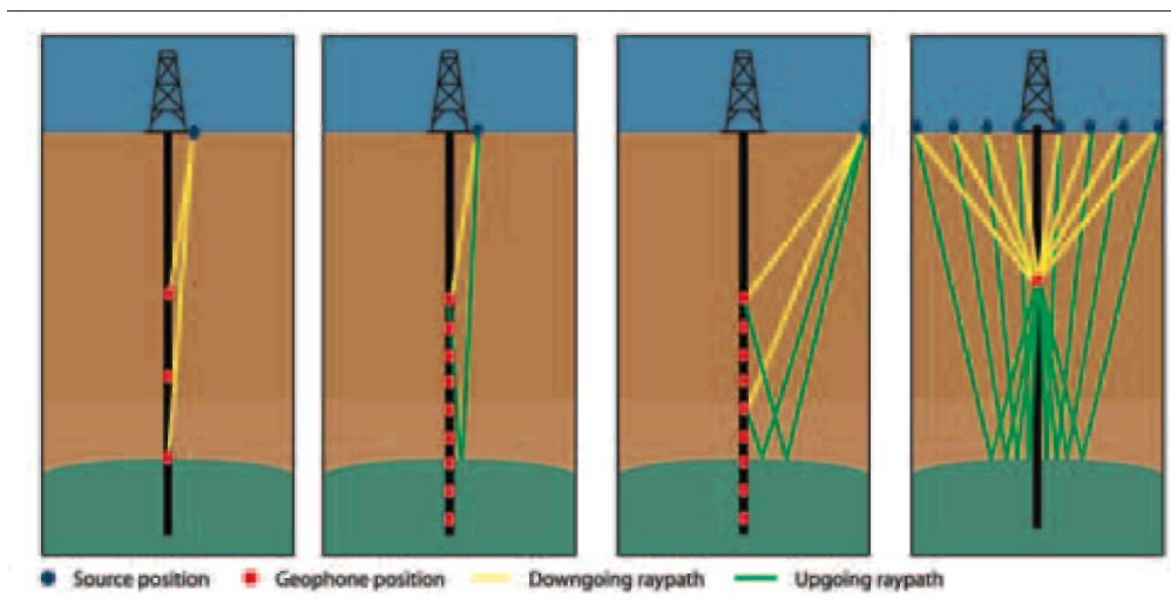


Рис. 4. Показаны проектные варианты проведения скважинной сейсмической съемки, слева направо: сейсмический картаж, ВСП без удаления источника, ВСП с удаленным источником и уровенное ВСП.

Встроенный в приемный блок вибрационный модуль позволяет создать контакт зонда со стенкой скважины для того, чтобы на месте убедиться в надежной записи продольных и поперечных волн в процессе трехмерной записи. Зонд может быть откалиброван, качество контакта может быть проверено, а также записанные в нем данные могут быть оцифрованы на месте, чтобы избежать наведения помех кабелем — все это внутри скважины. Конфигурация сейсмоприемников позволяет их использовать в скважинах, отклоняющихся на  $90^\circ$ , а локатор муфтовых соединений обсадной колонны дает контроль глубины и корреляцию с каротажом в необсаженной скважине.

Эффективность зонда увеличена механической установкой, что уменьшает время перехода на новый пункт и период прострелочных циклов при работе с удаленными источниками. Скважинный сейсмический приемный модуль измеряет смещение частиц среды, а оцифровка помогает уменьшить помехи для ясности при интерпретации. Методика минимизирует гармонические помехи зонда и трубные волны в пределах полосы скважинной сейсмики. Для привязки и корреляции измерений зонд можно комбинировать с зондом гамма-каротажа для точного контроля глубины и с инклинометром для пространственной ориентации. Чтобы снизить время и затраты зонд VSI также можно комбинировать и использовать с другими зондами и приборами оцифровки и контроля.

### Применение

Планирование скважинной сейсмической съемки включает сейсмический картаж, ВСП без удаления источника, ВСП с удаленным источником и уровенное ВСП (рис. 4). После регистрации, сейсмические данные могут быть обработаны в режиме реального времени или переданы посредством мониторинга в реальном времени и систему доставки данных. Техника обработки данных скважинной сейсмики Q-BorSeis разработана для получения высококачественных результатов за короткий производственный цикл. Данная техника равномерно

интегрирует ВСП, картаж и данные наземной сейсмики с набором характеристик резервуара и калибровочными средствами. Возможна полная обработка 3D ВСП, которая включает интерактивные процессы контроля качества, 3C разделение волновых полей, трехмерное моделирование геологической среды и трехмерную миграцию. При запуске на масштабируемом кластере с Linux, позволяющую вести параллельную обработку, Q-BorSeis позволяет эффективно обрабатывать большие объемы данных скважинной сейсморазведки.

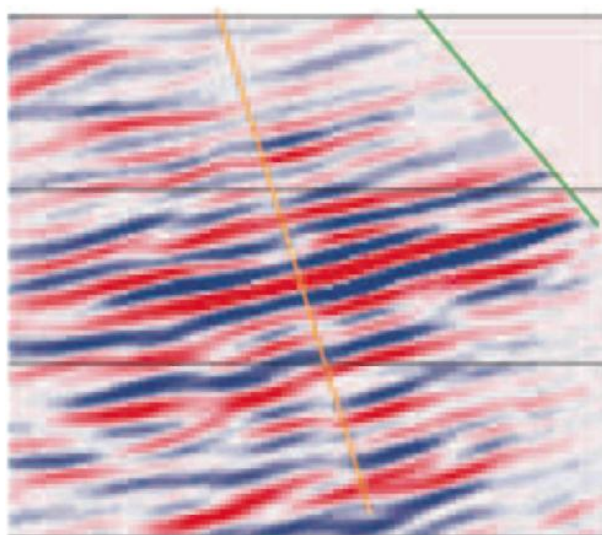


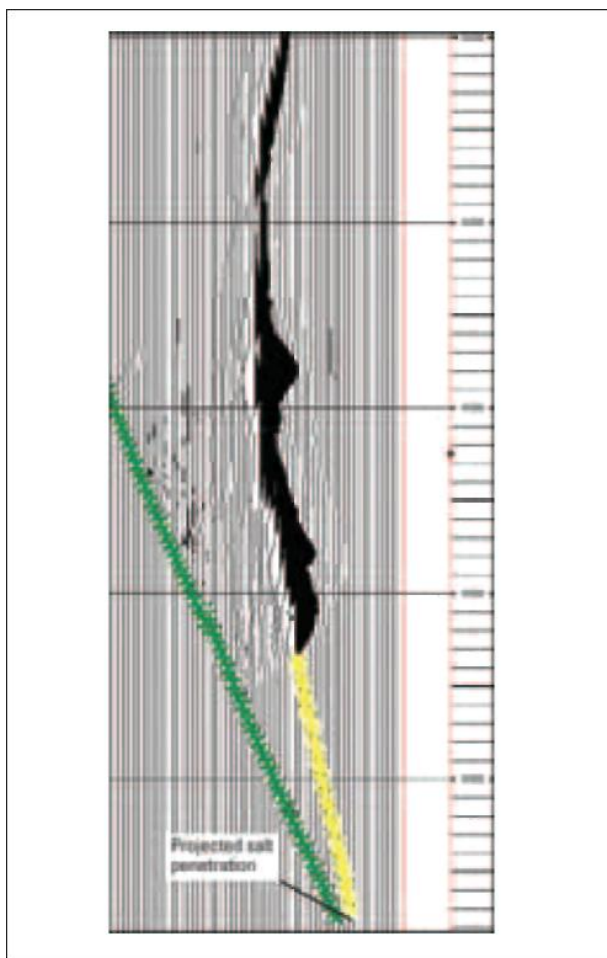
Рис. 5. Фрагмент сейсмограммы ВСП с удаленным источником, показывающий целостность основного коллекторского песка и взаимосвязь всех трех типов песков между скважинами.

В Мексиканском заливе, ВСП с удаленным источником обеспечило высоким разрешением, что подтвердило неразрывность основной зоны резервуара и позволило уверенно интерпретировать стратиграфическую зависимость между двумя скважинами, и это помогло при



выборе оптимальной схемы разработки этого резервуара, который располагался около соляного тела. Отображение фронта соли и последовательное подтверждение положения соляного тела обеспечили достоверную интерпретацию верхней границы резервуара, что привело к лучшему пониманию разрабатываемых запасов. Основная цель ВСП состояла в том, чтобы подтвердить протяженность в плане и неразрывность основной зоны резервуара на целевой глубине. Вторичная цель заключалась в обзоре «под долотом» для оценки возможно более глубоких перспективных объектов, в то время как третья цель состояла в том, чтобы вычислить расстояние до крыла солевого тела по горизонтальной составляющей ВСП с удаленным источником.

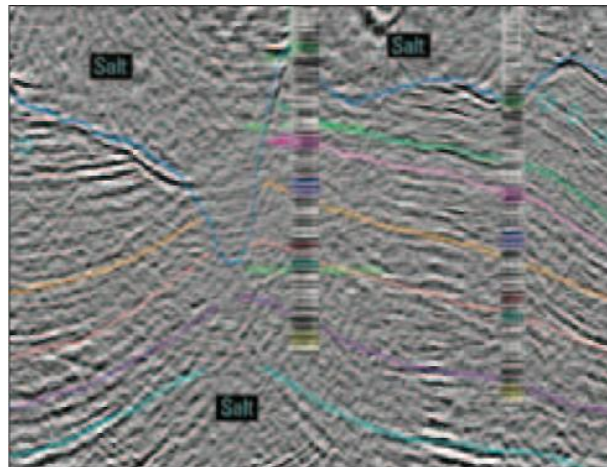
Слоистая и сложная структура резервуара вблизи солевого тела требовала применения обсужденного выше трехмерного проектирования и моделирования съемки. Это гарантировало правильное размещение изображения ВСП с высоким разрешением, выбирая идеальную позицию источника для оптимального профилирования зоны резервуара. После регистрации была быстро выполнена обработка данных ВСП. Поскольку бурение происходило непрерывно, потенциальный целевой отражающий горизонт был выделен на сейсмограмме ВСП перед приходом долота. Прошли всего 12 часов после проведения съемки и рекомендацией продолжить бурение.



**Рис. 6.** Пересечение экстраполированного края соляного тела и ствола скважины с конечной целевой глубиной, находящейся от соли на расстоянии менее чем 40 футов из прогноза.

Чтобы быстро обработать данные ВСП для отображения резервуара, были сделаны амплитудная коррекция, разделение волнового поля, деконволюция по форме волны и миграция с использованием алгоритма обобщенного преобразования Радона (GRT). Конечная картина ВСП доказывала неразрывность главного песка резервуара в дополнение к стратиграфической связи всех трех песков между двумя скважинами (рис. 5). ВСП ясно подтвердило модель, по которому все пески были непрерывны, два слоя песков становятся немного тоньше в верхней наклонной скважине. В то время как ВСП показало неотчетливое вступление, связанное с более глубоким влажным песком в одной скважине, для которой амплитуда немного увеличивается по восстанию скважины, геометрия ВСП не позволила отобразить среду вплоть до целевой локализации. Однако, основываясь на другой информации, было принято решение добуривать.

Отражения от крыла солевого тела могли быть ясно замечены на горизонтальных каналах. Эти отражения были мигрированы для получения изображения крыла солевого тела. Пересечение экстраполированного крыла солевого тела после анализа горизонтальных каналов и экстраполированного ствола скважины показано на рис. 6. Конечная целевая глубина, где скважина попадает в соль, была менее 40 футов из прогноза, основанного на экстраполяции крыла солевого тела. Это проникновение, вместе с геометрией соляного тела, полученной из ВСП и интерпретации наземной сеймики, предоставило важную информацию о пределе песков по восстанию резервуара, что помогло при планировании разработки.



**Рис. 7.** Корреляция ВСП и наземной сеймики после глубинной миграции до суммирования показывает, что непосредственно под солевым телом располагается отражающая толща.

На другом месторождении, прогнозные ВСП без удаления источника обеспечили важной информацией для оценки положения подошвы соляного тела, интерпретации подсолевой литологии и обеспечения оптимального положения бокового ствола скважины — до достижения подошвы соли. Когда скважина, пробуренная через соль, столкнулась с приливом и проблемами потери циркуляции, было принято решение вытащить долото и запустить ВСП для определения положения бурового долота относительно подошвы соли и других возможных положений бокового ствола скважины. Вспомогательный или прогнозный ВСП мог быть использован для обновления сейсмической скоростной модели,

определения глубины подошвы соли и получения сейсмической трассы с высоким разрешением в стволе скважины для корреляционных целей ниже соли. Данные ВСП также могут использоваться для оценки наклона кровли соли и отношения  $V_p/V_s$  в отложениях ниже целевой глубины - это необходимо для характеристики резервуара и для оптимизации плотности бурового раствора до бурения ниже подошвы соли.

Оптимизация параметров съемки посредством трехмерного проектирования и моделирования с целью минимизации стоимости съемки и максимизации качества сейсмических данных. Этот процесс трехмерного проектирования, включая трехмерное моделирование и близкое сотрудничество с командой интерпретаторов, показал, что место буровой установки является идеальным положением источника, которое позволяет достичь цели для данной конфигурации приемника и целевой области освещения. Для прогнозного ВСП без удаления источника (источник на месте буровой установки) приемники были установлены на указанных глубинах с шагом 100 футов.

Данные, которые были получены и синтетические данные, которые были созданы в процессе обработки, сравнивались для гарантии хорошего согласования. Калибровка и интерпретация различных форм продольных и поперечных волн производилась должным образом так, чтобы они были точно идентифицированы в зарегистрированном наборе данных. Были построены модели глубинной миграции до суммирования (PSDM) для привязки мигрированных данных ВСП с данными наземной сейсмики. Рис. 7 иллюстрирует, что комплекс проявляется как на PSDM, так и на данных ВСП прямо под солью, является высокоамплитудным, сменяется зоной с более слабым коэффициентом отражения, и далее снова сменяется на высокоамплитудный комплекс отражающих горизонтов, последние которых, как полагали, были поверхностями раздела сланца и песка.

Эти высокоамплитудные подсолевые отражающие горизонты, выделенные с помощью ВСП без удаления источника, уточнили интерпретацию литологии по данным наземной сейсмики на существенном расстоянии ниже и около скважины. На тех глубинах, где приемники ВСП были расположены в соли, через них проходили волны только по одному пути, поэтому ниже соли можно заметить существенное повышение разрешения данных. Это повышение коэффициента отражения ниже соли обеспечило появление множества волн, которые могли быть коррелированы с кривыми каротажа в процессе бурения, что требуется для предсказания литологии до бурения. Наличие большого количества информации о положении целевых горизонтов позволило выбрать новое положение бокового ствола скважины.

Данные ВСП без удаления источника также использовались для оценки отношений  $V_p/V_s$  области под нижними приемниками, или ниже соли, что могло быть полезно для более точного выбора плотности бурового раствора для бурения через основную соль, и выявления характеристик резервуара.

В области глубина-время восходящего волнового поля ВСП высокоамплитудная волна синего цвета — кровля соли (рис. 8). Показанное временное приращение иллюстрирует значительный наклон. Извлекая эту волну и

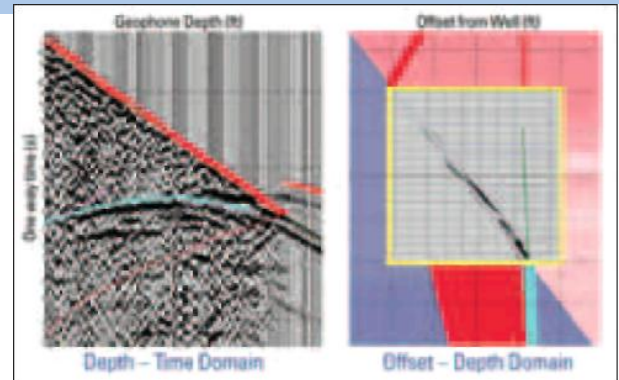


Рис. 8. Анализ дает точную оценку наклона кровли соли, что подтверждает оценку наклона до бурения.

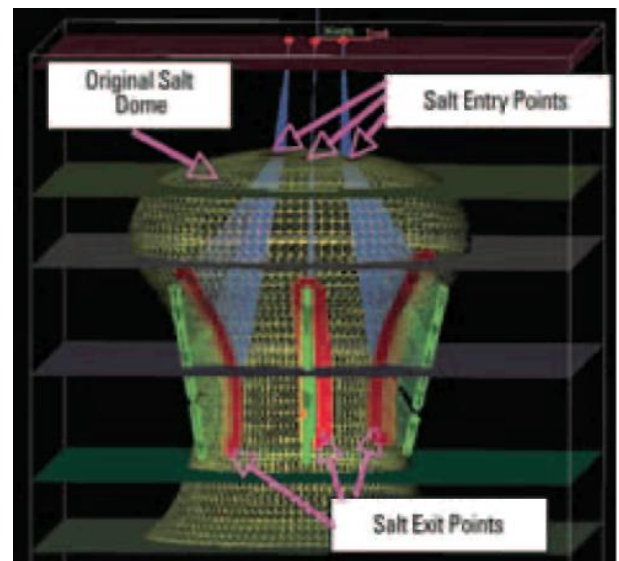
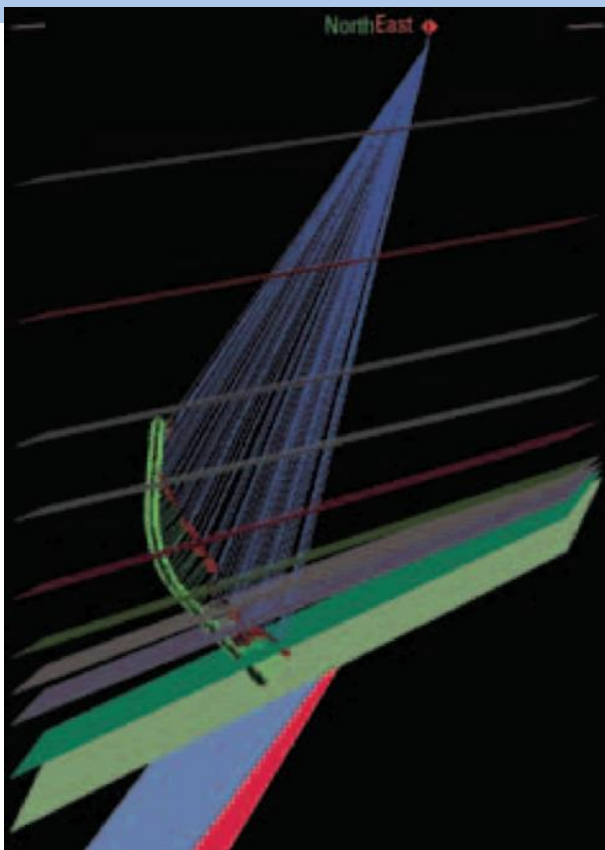


Рис. 9. Результаты вычисления расстояния до солевого тела сравниваются с синтетической моделью соляного купола, показывая, что выходы соли согласовывают скважину с первоначальным строением соляного купола.

мигрируя ее, используя скоростную модель только для осадков, полученную из мелких приемников ВСП, возможно должным образом разместить верхнюю границу соли в области удаление-глубина. Эта волна (желтый квадрат) коррелируется с данными наземной сейсмики и позволяет оценить наклон кровли соли до бурения — важно, поскольку предыдущая интерпретационная работа полагается в большой степени на точную оценку наклона кровли соли. Форма кровли соли около места проникновения скважины была подтверждена единственным изображением, которое подтвердило предположения, сделанные до бурения и утвердило интерпретацию, основанную на форме кровли соли.

В другом месторождении побережья залива трехмерный обзор, основанный на лучевой теории, значительно улучшил первоначальную интерпретацию данных наземной сейсмики резервуара, расположенного около соляного диапира. Была разработана быстрая и надежная методика расчета расстояния до солевого тела на основе трехмерной теории параксиального луча, соответствующей сложным трехмерным скоростным полям вблизи соляных тел. Эта методика при применении с трехкомпонентной скважинной сейсморазведкой эффективно

## Скважинная сейсморазведка



**Рис. 10.** Результаты вычисления близости соли показаны с моделью отложений, обнаружено, что фронт соли на 500 футов дальше ствола скважины, чем оценивалось поверхностной сейсмикой.

выделила крыло/стенки соляного купола в виде выходов соли.

Подобно другим методам отображения или процедурам инверсии, главное правило надежной методологии, заключается в точном обозначении границы крыла соляного тела, начинается с макромоделей, которая в данном случае состоит из скоростной модели соли, содержащей соляной купол и его кровлю, и скоростной модели отложений, которая содержит окружающие слои осадков. Метод затем итеративно снижает несоответствие между наблюдаемыми и расчетными данными, полученными от трехмерных лучей, трассированных в двух независимых направлениях. При решении для границы крыла соляного тела теория параксиального луча приводит к быстрому выполнению процесса минимизации.

Для проверки методологии была создана синтетическая трехмерная модель соляного купола. Было сгенерировано синтетическое волновое поле, которое использовалось для вычисления близости соли. Рис. 9 иллюстрирует результаты синтетического модельного испытания, с выходами соли, показанными в виде дисков, их нормальные векторы настроены так, чтобы удовлетворить закону Снеллиуса в отдельных выходах на поверхности раздела осадков и соли. Иллюстрация ясно показывает, что выходы соли прекрасно согласуются с первоначальным строением соляного купола.

Методология затем была проверена на месторождении побережья залива, продуктивный коллектор которой граничил с соляным диапиром. Вычисление близости соли показало, что фронт соли фактически был примерно на 500 футов дальше ствола скважины чем, было первоначально оценено интерпретацией данных наземной сейсмике (рис. 10). Этот результат не противоречит информации, полученной для соседних скважин, что повысило доверие к новой интерпретации и ее результатам, согласно которым резервуар имеет больший размер, чем полагалось ранее. Это было позже подтверждено методом кривых давления.

Дополнительно, применяя эту методологию для вычисления близости соли к многоскважинной съемке, интерпретация строения соляного купола и его поверхности может быть сделана намного точнее. Комбинируя трехмерное сейсмическое отображение/миграцию с методологией инверсии мы сильно повышаем качество и достоверность обрисовки поверхности раздела осадков и соли для принятия решения о бурении и разработки, что приводит к значительному увеличению нефтеотдачи.

Данная работа включает такие методы, как сейсморазведка в процессе бурения и уровенное ВСП, для обнаружения подошвы соли, в то время как скважина бурится через мощную соль. Разрабатывается методика AVO для уровенного ВСП, чтобы помочь предсказывать давления в отложениях, находящихся непосредственно под соляным телом. В итоге, интеграция результатов ВСП с интерпретацией геологической среды считалась важным этапом полной оценки этих месторождений. Съемка ВСП по методике скважинной сейсморазведки доказала успешность при всесторонней оценке сложных подсольевых или присольевых структурных сред при условии внимательного трехмерного проектирования и моделирования в дополнение к эффективной сейсмической регистрации и обработке данных.

## Ссылки на литературу

- Campbell, A., Gross, J., Walker, B., and Pressler, R. [2005] Evaluation of a Near-Salt Reservoir with an Offset VSP. *75<sup>th</sup> Annual SEG Meeting*, Houston, USA.
- Campbell, A., Fryer, A., Isaacson, L., and Wendt, B. [2005] Successful imaging in a structurally complex environment, using a Look-Ahead VSP. *75<sup>th</sup> Annual SEG Meeting*, Houston, USA.
- Campbell, A., Fryer, A., and Wakeman, S. [2005] Vertical seismic profiles - more than just a corridor stack. *The Leading Edge*, July.
- Hara, K., Cao, D., and Mann, R. [2000] Ray Theory based 3D Salt Proximity Survey. JSEG expanded abstract, *SEG Meeting and Conference*, Japan.