

## Построение изображения плотных газовых песчаников в бассейне восточного Техаса. Imaging tight gas sandstones in the East Texas Basin

Ron Harris<sup>1</sup> и John O'Brien<sup>1\*</sup>

Газовые пески с низкой пористостью (плотные) содержат важные коммерческие запасы, но к сожалению трудно получить их сейсмические изображения того качества, которое требуется для проектирования эффективной программы бурения. Эти коллекторы обычно имеют небольшой контраст акустического импеданса относительно вмещающих глин, что приводит к слабому сейсмическому сигналу. Этот сигнал становится еще труднее выделить в присутствии внутрипластовых кратных волн и других сейсмических помех. Поскольку этот ресурс преимущественно эксплуатируется в наземных условиях, построение сейсмических изображений также подвержено многим культурным и приповерхностным факторам, которые влияют на качество наземных сейсмических данных.

Эти проблемы ярко демонстрируются на примере песчаников Cotton Valley на месторождении Colony в Теннесси, в Восточно-Техасском бассейне, США, где корпорация Anadarko Petroleum ведет активную, постоянно действующую программу разработки. На основе сейсмической сетки 2D были пробурены скважины с крайне изменчивыми результатами. Хотя начальная скважина была открывательницей, последующие скважины не были успешными и существующие сейсмические данные 2D просто оказались непригодными для выделения коллектора и разработки месторождения.

Поставленная перед лицом данной ситуации, Anadarko провела расширенную программу работ в целях получения характеристик сейсмического отклика на месторождении и определения эффективных способов построения изображения газа в плотных песках, которое бы обладало качеством, необходимым для нужд разведки и разработки. Это заставило Anadarko разрабатывать месторождение более оптимальным способом и также, возможно, использовать этот способ в других газосодержащих плотных песках.

Полевая программа включала получение данных 3D Р-волн, многокомпонентную съемку 3C/3D в пределах области работ 3D, и данных ВСП в центре области исследования. В настоящей работе мы представляем результаты этих съемок и обсуждаем условия для построения изображения плотных газовых песков.

### Геология

Целью исследований на месторождении Colony в Теннесси является песчаник формации York, самый нижний песчаный комплекс Юрского возраста формации Cotton Valley (смотрите Рисунок 1). Это стратиграфический объект, целью в нем является система дельтовых песчаников, отложенных как часть проградирующего комплекса в малоглубинной морской обстановке. В этой области целевой объект встречается на глубине 4970-5150 м (16,300-16,900 футов).

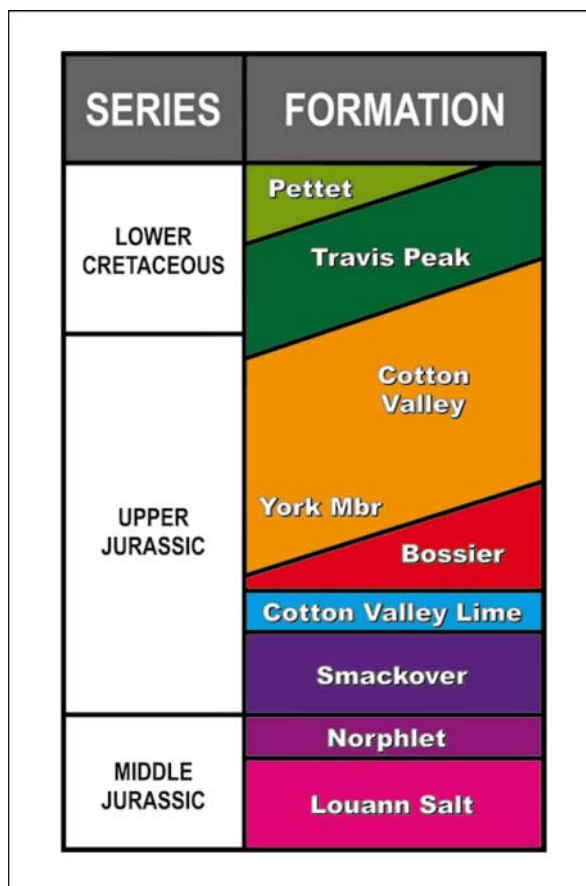


Рисунок 1 Стратиграфическая колонка для Восточно-Техасского бассейна.

Песчаник York перекрывается комплексом мощностью 180 м (600 фут), в котором преобладают глины, который в свою очередь, перекрывается толщей мощностью почти 1500 м (5000 фут), богатой песками комплекса Cotton Valley Fm. В области месторождения песчаник York является газоносным с газонасыщением свыше 80%, тогда как перекрывающий песчаник Cotton Valley Fm является преимущественно насыщенным соленой водой. Песчаники Cotton Valley Fm имеют эквивалентную плотность бурового раствора 10.5 фунт/галлон, тогда как песчаники York имеют избыточное давление и плотность бурового раствора 15 фунт/галлон. Оба они имеют петрофизические свойства, которые типичны для присутствия газа в плотных песках и создают схожие проблемы при построении сейсмических изображений.

<sup>1</sup> Anadarko Petroleum Corporation, P.O. Box 1330, Houston, TX 77251-1330. 'Corresponding author, E-mail: John.O'Brien@Anadarko.com.

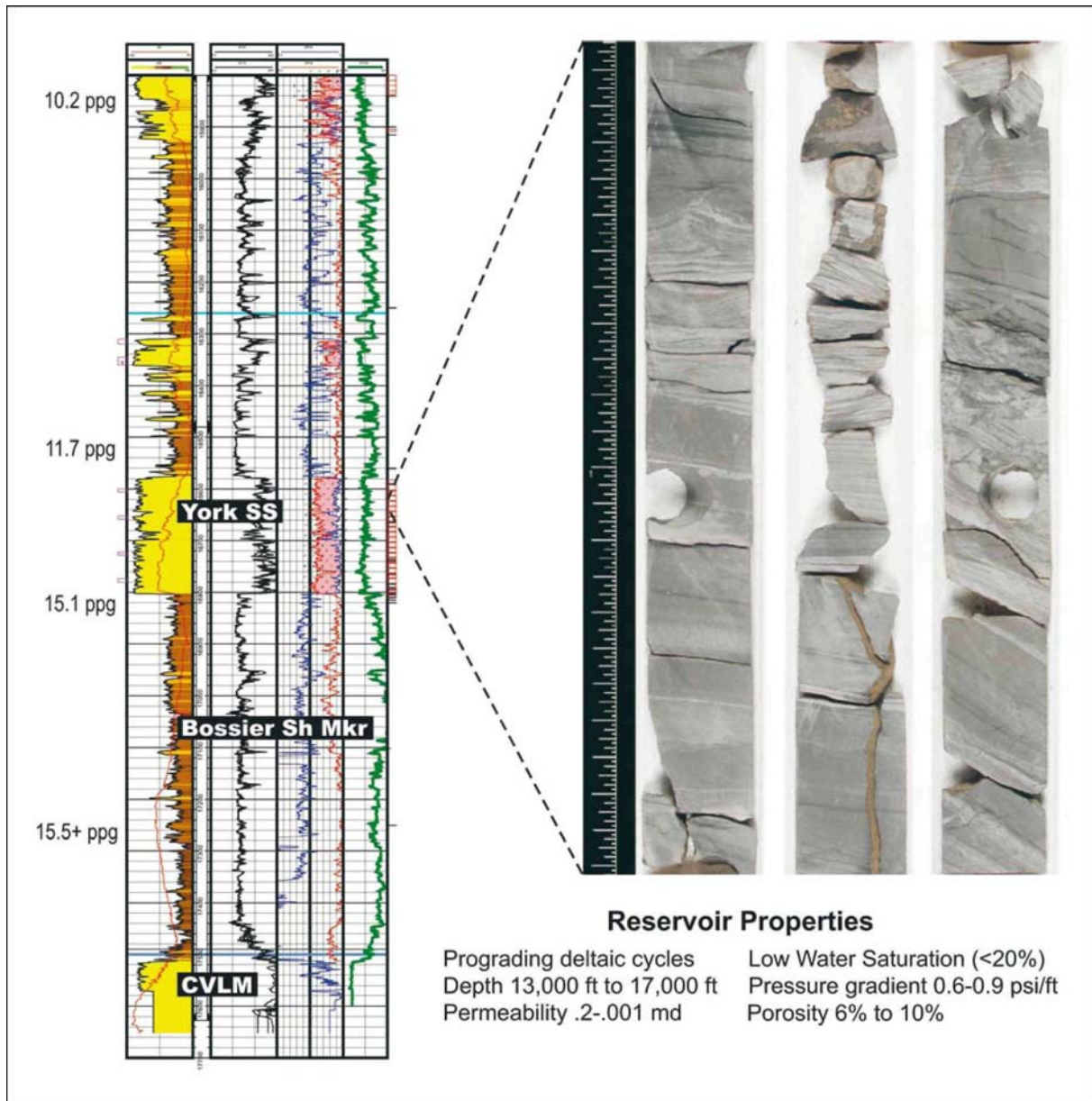


Рисунок 2 Данные каротажа на кабеле и фотографии керна со скважины Anadarko Gregory A-1. Первая дорожка каротажных данных демонстрирует кривую гамма каротажа с песками над Cotton Valley Lime (CVL), окрашенной желтым. Дорожки 2-4 демонстрируют кривую сопротивлений, кривую пористости по данным НК (синим), плотность кривую пористости по данным ГТК (красным), и кривую АК соответственно. Песчаники York, резервуар на месторождении Colony в Теннесси, имеет мощность 71 м (234 футов) в этой скважине. Секция керна 2 м из коллекторского интервала показана справа, на ней виден осадочный характер песчаника York.

В скважине-открывательнице, Anadarko Gregory A-1, песчаник York имеет мощность 71 м (234 футов), превосходный результат для данного объекта. Данные каротажа на кабеле и керн, полученные в этой скважине, представлены на Рисунке 3. Этот песчаник плотный, имеет среднюю пористость 7% и проницаемость ниже 1 mD. Однако оценка месторождения оказалась проблематичной. На основе сейсмических данных 2D было пробурено семь дополнительных скважин с переменным результатом. В пяти скважинах была встречена менее мощная газоносная свита

песчаников York с мощностью в диапазоне 1-52 м (3-169 футов) и дебитом на начальном этапе 3-10 млн.куб.футов в сутки, коммерчески значимая. В двух скважинах не было встречено песчаников York, они были определены как сухие скважины. Очевидно, мы бы предпочли разбуривать песчаник с большей мощностью и более высокой отдачей на начальном этапе, и избавиться от сухих скважин. Однако, не было возможным предсказать эту изменчивость и оконтурировать месторождение максимально эффективно, используя существующие сейсмические данные 2D.

## Газ в плотных породах

## Свойства пород

В предыдущей работе (O'Brien and Harris, 2006) мы обсуждали акустические и упругие свойства песчаников York и Cotton Valley и вмещающих глин. Вкратце, эти песчаники демонстрируют маленький импеданс контраст по сравнению с вмещающими глинами. На основе свойств этих пород и проведения сейсмического прямого моделирования предсказан небольшой, но ненулевой, коэффициент отражения Р-волн на границах пески/глины. Упругие свойства, однако, характеризуются большим контрастом между песками и глинами, как это можно видеть на кривой коэффициента Пуассона, полученной по данным дипольного акустического каротажа. В песчаниках York коэффициент Пуассона обычно имеет значение 0.15, тогда как в глинах его значение достигает 0.25 (смотрите Рисунок 3). Сейсмическое моделирование Seismic демонстрирует более сильный отклик моды Р-S по сравнению с Р-Р при ненулевых углах падения. Таким образом анализ свойств породы и прямое сейсмическое моделирование демонстрируют, что многокомпонентные данные будут более эффективными, чем данные по одной Р-волне при картировании песчаных тел.

## Программа сейсмических исследований

Главной целью данного проекта было разработка схемы наблюдения и регистрация сейсмических данных, используя современное оборудование и методики регистрации, которые бы имели достаточное качество для построения изображений Юрского газа в плотных песчаниках. Для этой цели мы разработали программу, состоящую из пяти граней:

## 1. Тестирование параметров сейсмического источника:

Размер заряда и глубина взрывной скважины были протестированы на трех участках, на каждом участке было пробурено 10 скважин.

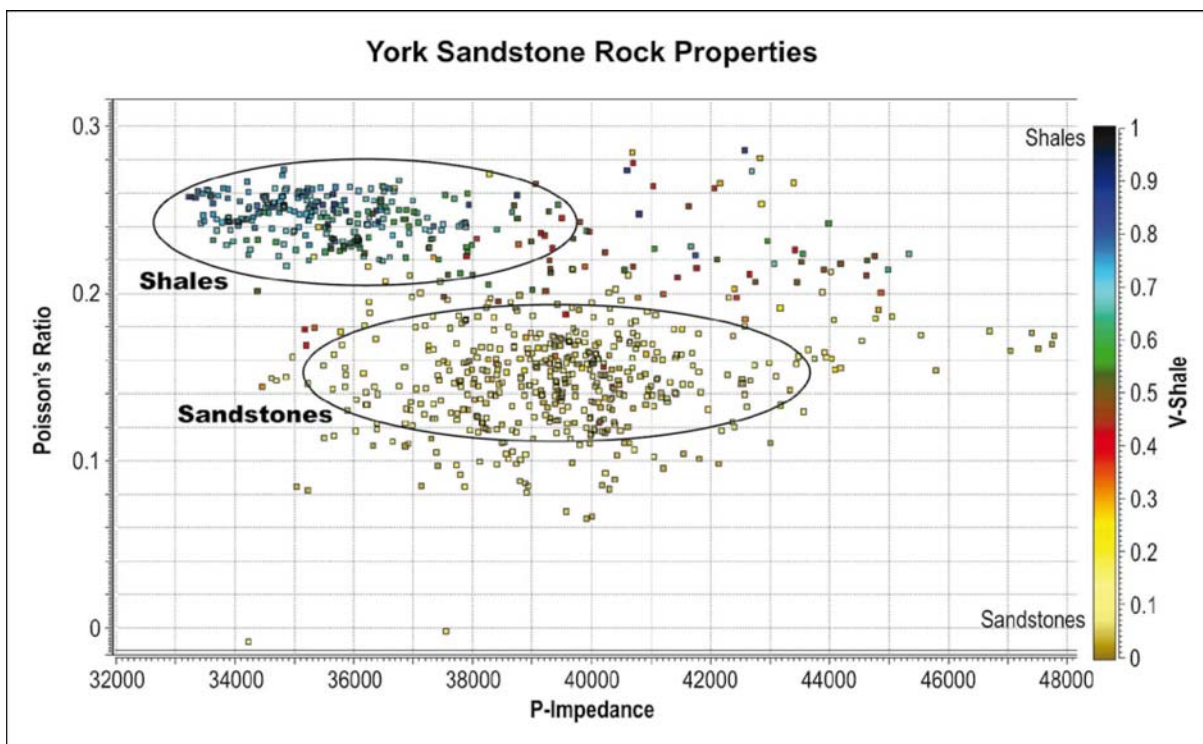
## 4. Многокомпонентная ВСП для многих удалений:

Обширная съемка ВСП была проведена для получения прямых измерений

Участки были выбраны в целях наилучшего представления области проекта, один участок расположен в пойме реки Trinity River, а два других вне этой зоны. Также для определения безопасного удаления от жилья, водных и газовых скважин измерялись пиковые смещения частиц.

**Построение сейсмических отображений 3D:** Данные традиционных 3D сейсмических работ на Р-волнах были записаны на площади 186 км<sup>2</sup> (72 кв. мили) со 100-кратным перекрытием используя однокомпонентные аналоговые сейсмоприемники. Сейсмический источник представлял собой погружной взрывной источник, также при необходимости для загущения использовались источники типа вибросейс. Это было сделано для тестирования того, будет ли качество хорошо дискретизированных сейсмических данных 3D, полученных путем традиционной съемки, достаточным для оконтуривания месторождения.

**Построение сейсмических изображений на основе многокомпонентных данных:** Трехкомпонентная 3D съемка выполнялась на площади 23 км<sup>2</sup> (9 кв. миль) со статической расстановкой акселерометров VectorSeis, встроенных в более обширную съемку традиционным методом 3D. Все ПВ традиционной съемки на Р-волнах записывались попеременно с расстановкой VectorSeis. Целью было определить то, можем ли мы производить построения изображений и картирование газа в плотных песках используя обменные волны Р-S. Хотя прямое моделирование было ободряющим, глубины целевого объекта были причиной беспокойства. Второй целью было сравнение качества изображений, получаемых сейсмоприемниками Р-волн и системой регистрации VectorSeis.



**Рисунок 3** Кроссплот коэффициента Пуассона и акустического импеданса на основе данных каротажей на кабеле по скважине Anadarko Gregory A-1, графство Anderson, Техас. Значения взяты по песчаникам York и перекрывающему глинистому разрезу Cotton Valley Fm. Данные раскрашены в соответствии с содержанием глин.



## Газ в плотных породах

коэффициентов отражения и обмена для разреза, состоящего из плотного песчаника, используя скважинную технологию и для обеспечения возможностей калибровки съемки 3D. Данные ВСП были получены на скважине Anadarko Gregory A-3, которая расположена в центре областей 3D и многокомпонентной съемок. Они включали данные ВСП ближних удалений и дальних удалений на Р-волнах, данные ВСП обменных волн для больших удалений (P-S), и данные по поперечной волне для ближних удалений (S-S). Мы сообщали о результатах программы ВСП ранее (O'Brien and Harris, 2006) и включим их в результаты обработки 3D настоящей работы.

5. *Построение изображений 9C*: Первоначальный план работ включал получение девяти компонентного 2D профиля используя виброисточник Р-волн и поперечных волн, а также регистрацию сигналов Р-волн и поперечных волн. Это бы позволило сравнить эффективность построения изображения на Р-Р, Р-Р, и S-S волнах вдоль одного профиля и осуществить их привязку к данным ВСП. Однако тестирование источника и результаты ВСП показали, что поперечные волны плохо распространяются вблизи поверхности. Профиль 9C оказался неосуществим и его решили не делать.

Область исследований, показанная на Рисунке 4, лежит в графствах Anderson и Freestone, Техас. Общая топография области характеризуется наличием холмами, покрытыми сосновыми лесами, которые простираются по направлению поймы реки Trinity. Порядка 60-70% области работ является открытыми пастбищами для коров и сенокосными лугами. Остальная часть – лесистая и требует обширной вырубki кустарника. Пять тюрем строгого режима расположены в пределах границ области съемки и занимают порядка одной третьей площади. Во время полевых сейсмических работ,

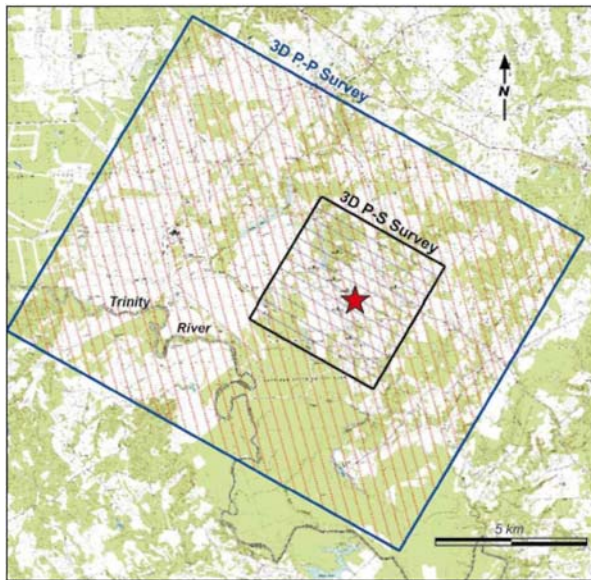


Рисунок 4 Топографическая карта области съемки, на которой показаны очертания схемы расположения сейсмоприемников 3D съемки на Р-волнах (синяя рамка) и статической расстановки VectorSeis (серая рамка). Съемка ВСП выполнялась на скважине Anadarko Gregory A-3, отмеченной красной звездочкой. Леса отмечены зеленым, а открытые области светлым цветом.

река Trinity поднялась на 10-13 м выше уровня паводка из-за пяти различных причин, что привело к некоторому простоя партии, но не повлияло на качество данных.

Параметры сейсмической регистрации приведены в таблице 1. Эти параметры были выбраны, чтобы обеспечить хорошо дискретизированную съемку 3D на Р-волнах с большими удалениями источник-приемник, адекватной кратностью, широкоазимутальным диапазоном и большой мощностью источника.

Акселерометры VectorSeis были развернуты по статической схеме 4.8 x 4.8 км (3.0 x 3.0 миль.). Каждый акселерометр был расположен поблизости от группы однокомпонентных сейсмоприемников с интервалом 220 футов вдоль каждой приемной линии. Расстановка акселерометров оставалась на месте на протяжении съемки и производила запись всех возбуждений. Данные с сейсмоприемников и акселерометров регистрировались с помощью двух отдельных систем в конфигурации ведущий/ведомый.

Данные однокомпонентных сейсмоприемников Р-волн были обработаны используя поток обработки миграции во временной области до суммирования. Была использована обработка с сохранением амплитуд, особое внимание уделялось соответствию фаз источников и получению данных с постоянной фазой.

Вслед за обработкой данных 3D сейсмоприемников мы обратились к обработке данных акселерометров. Эти данные были обработаны дважды, независимо, для того, чтобы убедиться в получении надежного финального изображения. Оба потока обработки были схожими, но отличались в деталях параметризации и подготовки данных. Было уделено внимание сохранению полосы частот, в частности частот ниже 10 Гц, где у акселерометров более плоская частотная характеристика, чем у сейсмоприемников.

Данные акселерометров были обработаны чтобы получить как 3D изображение на Р-волнах, так и 3-D изображение на Р-и S-волнах, чей обмен происходит на отображаемой границе. Мы обозначаем эти два куба изображений как Р-Р и Р-S, соответственно. Подавление шума источника и преломленных Р и S волн производилось в процессе предобработки. Информация по предыдущей обработке данных на Р-волнах использовалась в качестве стартовой точки для обработки данных акселерометра на Р-волнах и затем была уточнена для построения финального изображения Р-волн после миграции до суммирования во временной области.

Обработка данных Р-S была начата путем вращения горизонтальных компонент акселерометра по радиальной и поперечной осям, тогда как радиальная ось лежит в плоскости источник/приемник, а поперечная ось является ортогональной к ней. В изотропной среде обменная Р-S волна лежит в радиальной плоскости и поэтому обработка сейсмических данных начиная с этого пункта была основана на радианных данных. Мы не нашли очевидных свидетельств анизотропии поперечных волн и схема вращения Alford не применялась.

Статические и кинематические поправки для Р-волн были взяты из процедур обработки данных акселерометра для Р-Р волн, описанных выше. Оценка статики и скоростей для поперечных волн оказалась длительным процессом. Оценка статики поперечных волн включала анализ данных в областях ОПП и ОПВ, вслед за которым шел анализ остаточной статики. Таким образом, было изучено несколько моделей статики для поперечных волн. Для анализа скоростей поперечных волн

## Газ в плотных породах

	3-D Съемка	Многокомпонентная съемка
<b>Приемники</b>		
Групповой интервал	220 фут	220 фут
Интервал между линиями приема	1320 фут	1320 фут
Приемник	10 Гц сейсмоприемник	Акселерометр VectorSeis©
Элементов в группе	Линейная группа из 6 приемников на 50фут.	Одиночный агрегат
<b>Источники</b>		
Интервал между источниками	220 фут.	
Интервал между линиями возбуждения	1760 фут	
Ориентация линий возбуждения	По диагонали к приемным линиям	
Динамит (96.4%)	Заряд 8 фунтов на глубине 120 футов	
Вибросейс (3.6%)	4 вибратора с пиковым усилием 62,000	фунтов; 6-80 Гц, 10 с линейный свип;
<b>Параметры регистрации</b>		
Активная расстановка	20 линий X 160 групп	Статическая схема: 13 линий X 73 станций
Площадь	9 миль X 8 миль	3 мили X 3 мили
	72 кв.миль	9 кв. мили
Размер бина	110 X 110 фут.	110 X 110 фут.

Таблица 1 Параметры сейсмической регистрации.

сортировка данных производилась при использовании схемы бинирования асимптотической точки обмена (АСР). Бинирование АСР основано на предположении, что отношение  $V_p/V_s$  не меняется с глубиной, что является разумной аппроксимацией в зоне интереса. Эта аппроксимация существенно упрощает процедуру бинирования, поскольку точки обмена для всех дискретов для заданного удаления источник/приемник попадает в тот же бин, а не распределяется в пространстве.

Скорости поперечных волн пикировались, используя комбинацию панелей постоянных скоростей и анализ когерентности. Пикирование скорости поперечных волн оказалось проблематичной задачей и ключевым этапом обработки Р-S. После каждой итерации анализа статистики и скоростного анализа данные суммировались, используя бинирование АСР, и изображение сравнивалось с кубом Р-Р. Этот процесс продолжался несколько итераций до тех пор, пока мы не рассудили, что качество изображения достаточное.

Для построения финального разреза мы использовали схему бинирования по общей точке обмена (ССР). Этот метод более точен, чем бинирование АСР, поскольку рассчитывает точку обмена для каждого временного отсчета, учитывая поля скоростей Р-волн и поперечной волны, не используя асимптотическую аппроксимацию. Были построены кубы временной миграции до и после суммирования.

Все сейсмоприемники улавливают скорость движения частиц, тогда как акселерометры улавливают ускорение частиц и можно было бы ожидать смещение фазы на  $90^\circ$  между двумя этими наборами данных. Учитывая

Много факторов, которые влияют на форму импульса набора данных, никакой явной компенсации фазы не применялось на этапе предобработки; вместо этого каждый блок данных обрабатывался независимо. В частности, операторы деконволюции определялись для каждого набора данных независимо. После построения финальных кубов разрезов мы определяли относительную фазу кубов сейсмоприемников и акселерометров Р-Р и обнаружили, что она  $75^\circ$ , т.е. в пределах  $15^\circ$  от ожидаемой разности фаз. Мы также проанализировали соответствие суммарных кубов синтетическим сейсмограммам для скважин на месторождении и данным ВСР. Фаза обоих кубов Р-Р была повернута чтобы соответствовать результатам ВСР.

**Результаты**

Программа Colony в Теннесси дала богатый набор данных, который помог нам проанализировать сейсмический отклик в газонасыщенных плотных песках и оценить различные методы построения изображений этих песков.

**Параметры источника**

Тестирование помогло нам выбрать подходящий набор параметров для этой съемки. Это дало существенное улучшение полосы частот регистрируемых данных и также существенно сократило количество выбросов из скважины по сравнению с предыдущими съемками. Уменьшение числа выбросов дает два преимущества: улучшенное качество изображения и уменьшение воздействия на окружающую среду.

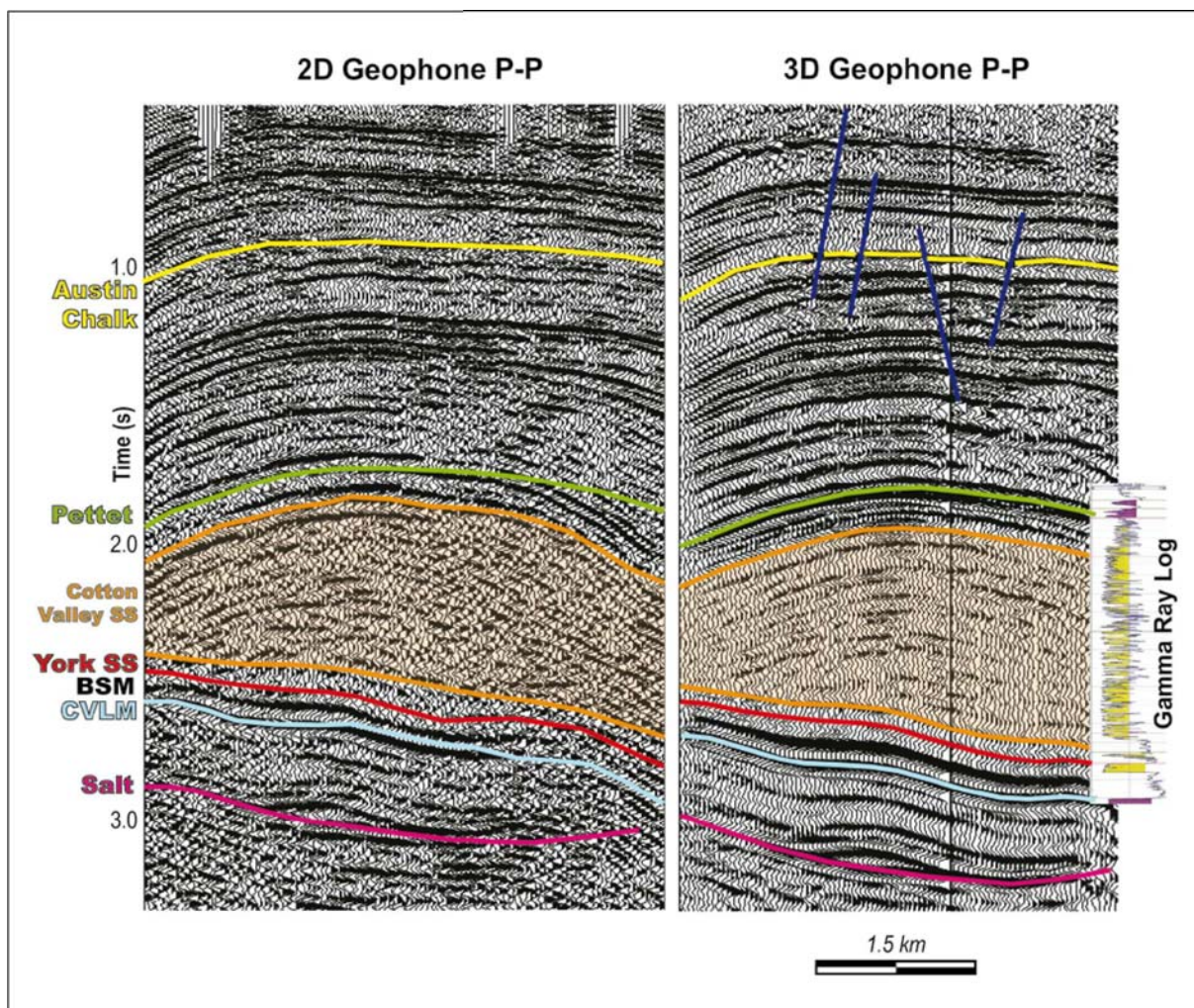


## Газ в плотных породах

### Построение изображений сейсмоприемниками P-P 3D

Как и ожидалось, куб 3D P-P дает существенное улучшение в качестве изображения по сравнению с традиционными данными 2D (смотрите рисунок 5). В разрезе на изображении 3D существенно улучшилось соотношение сигнал/шум, а разломы выделяются более четко в малоглубинном участке. На данных 2D Cotton Valley Fm отображается в виде набора коротких, низкоамплитудных сегментов отражений с плохой латеральной прослеживаемостью. На изображениях съемки 3D этот интервал характеризуется улучшенным соотношением сигнал/шум и лучшей латеральной прослеживаемостью. В частности, мы можем идентифицировать и закартировать ось синфазности, которая коррелируется с песчаниками York, целевой формацией на месторождении Colony в Теннесси. Таким образом, хотя песчаник York имеет низкий акустический импеданс контраст со вмещающими глинами, этот контраст ненулевой и оказывается достаточным для получения оси отражения, которую можно наблюдать и картировать на данных 3D съемки на P-волнах с хорошей дискретизацией.

Хотя мы можем строить структурные карты на основе этой оси синфазности, стратиграфические построения остаются проблемой. На рисунке 6 показана карта амплитуд отражающей границы York, пропикированной по данным съемки 3D с сейсмоприемником. Положения скважин отмечены на этой карте, совместно с эффективными толщинами песчаников York в каждой скважине. Карта амплитуд демонстрирует явную пространственную структуру, которая возможно обозначает две лопасти дельтовых осадков размывающихся на север и срачиваются. Мощность коллекторов характеризуется сильной пространственной вариацией, которая подтверждается скважинными наблюдениями, в некоторых случаях она меняется с 60 м до нуля на расстоянии 300 м. Однако эта вариация не отражается в информации об амплитудах. В качестве примера, скважины Gregory A-1 и Royall B-3 обе расположены в областях со сравнимой сейсмической амплитудой на расстоянии 300 м одна от другой, но мощность коллектора в них была разной, 60 м и 1 м соответственно. С другой стороны скважина TDC A-1 расположена в



**Рисунок 5** Сравнение традиционного 2D сейсмического профиля (слева) и совпадающего с ним профиля, полученного по данным съемки 3D P-P, записанной сейсмоприемниками (справа). Подписанные горизонты пропикированы на данных 3D съемки и отмечены на обоих профилях. На вставке показана диаграмма гамма каротажа по скважине Anadarko Gregory A-1 с желтой заливкой, которая обозначает песчаники.

## Газ в плотных породах

области с низкой амплитудой отражений, но разбурила 50 м коллектора. Мы можем заключить, что амплитуда сейсмического отражения York не является надежным предсказанием мощности коллектора на месторождении.

#### Построение изображений с помощью акселерометра P-P 3D

На Рисунке 7 продемонстрировано сравнение между данными P-P, записанными с использованием сейсмоприемников и акселерометров. Как показано выше, две съемки были записаны одновременно с использованием одних и тех же источников и совмещенными приемниками. Основное различие между двумя зарегистрированными наборами данных кроется в приемниках и приемных группах: данные с сейсмоприемников записывались с помощью шестиземельной группы, тогда как в данных акселерометра применялся единственный элемент на каждой станции. Кроме того спектральная характеристика акселерометра более плоский на низких частотах, тогда как характеристика сейсмоприемника имеет характерный спад частотной характеристики на низких частотах. Таким образом,

два куба изображений потенциально могут иметь различия в соотношении сигнал-шум и в частотном составе, что может повлиять на любой процесс обработки данных и окончательное сравнение.

На Рисунке 7 мы видим хорошее соответствие между двумя изображениями. Пренебрегая краевыми эффектами, которые влияют на изображение, полученное акселерометрами, но не на изображение сейсмоприемника, мы видим более высокий коэффициент отражения в разрезе Cotton Valley Fm на данных акселерометра, чем на данных сейсмоприемника, хотя оси синфазности на данных сейсмоприемников более прослеживаемые. Два набора данных также характеризуются разными формами сейсмического сигнала, и в результате, детальная корреляция осей на обоих разрезах является проблемой для интерпретатора. В частности мы отмечаем низкоамплитудную хорошо прослеживаемую ось синфазности, которая коррелируется с песчаниками York, но которая достаточно прерывистая на

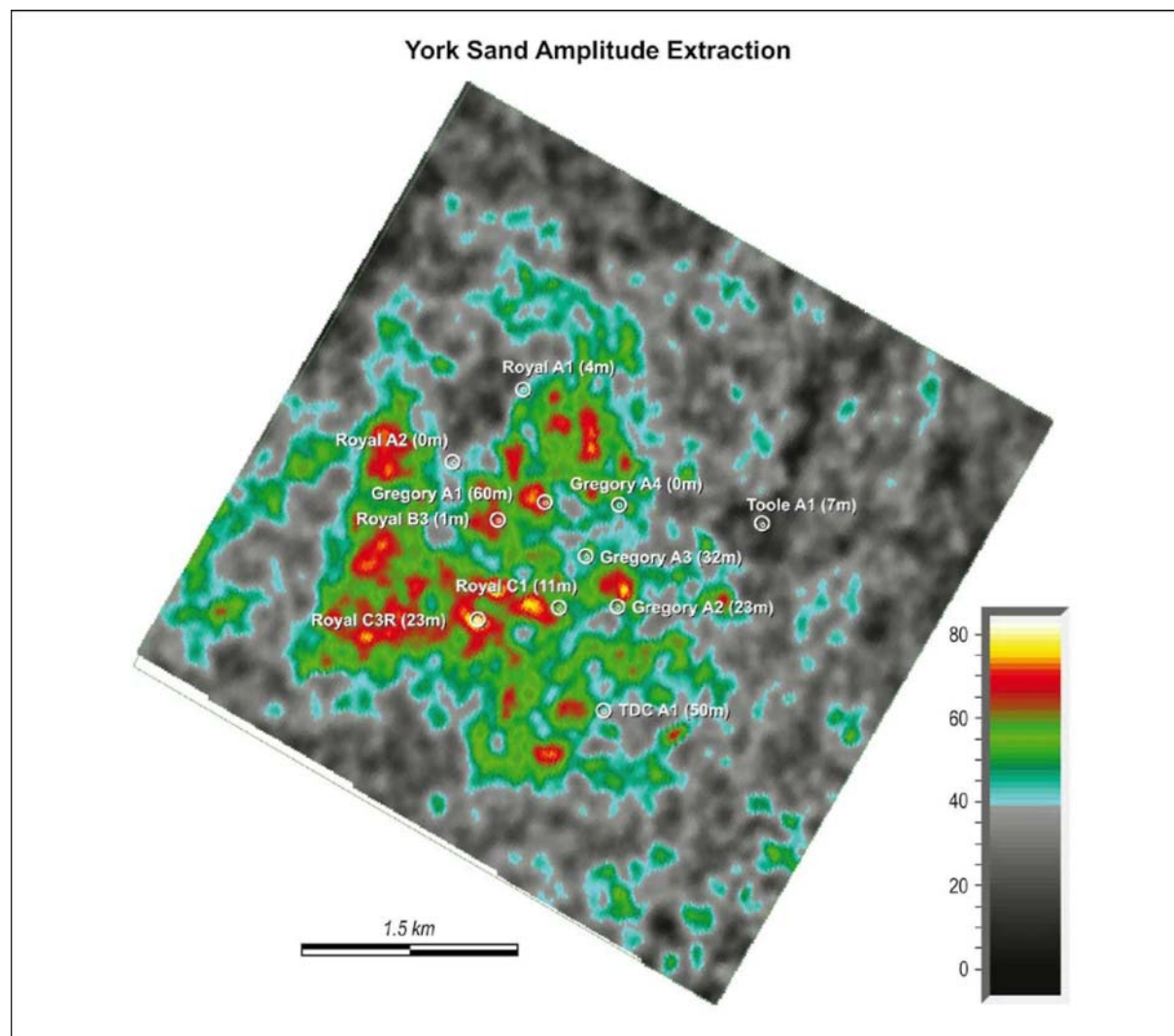


Рисунок 6 Карта амплитуд для оси синфазности песчаников York, пропикшированной по съемке с сейсмоприемниками P-P 3D, с положениями скважин и обозначением эффективной толщины коллекторских песков.



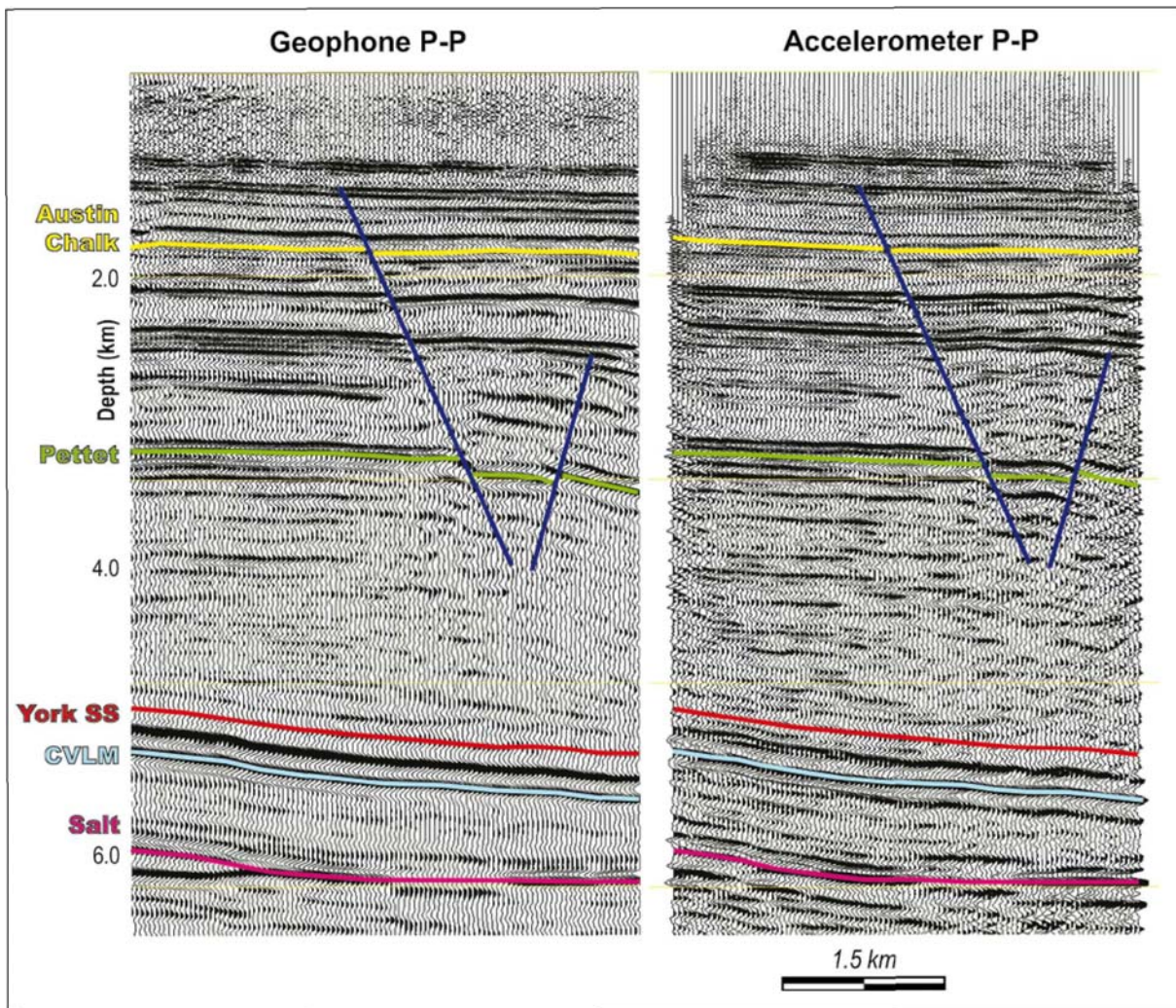


Рисунок 7 Сравнение съемок 3D P-волн, записанных с сейсμοприемниками (слева) и с акселерометрами (справа). Оба набора данных были обработаны с помощью миграции до суммирования во временной области и переведены в глубинную область, используя общее поле скоростей. Сейсмические горизонты пропикированы на разрезе сейсμοприемников и отмечены на обоих разрезах. Краевые эффекты видны на данных акселерометров; они отсутствуют на данных сейсμοприемников ввиду более крупного размера съемки.

данных акселерометра. Таким образом, хотя два набора данных похожи, в общем, имеются небольшие отличия в деталях. На основе данного сравнения трудно определить который из них дает изображение с более высокой точностью воспроизведения.

#### Результаты ВСП

Основные результаты ВСП получены на больших удалениях, и записаны при выносе источника 2424 м (7970 фут) от устья скважины. Этот вынос был выбран для обеспечения эффективного обмена P-S, при этом сигнал оставался высокоамплитудным и широкополосным. Полное описание результатов ВСП приводится в работе O'Brien и Harris (2006).

На Рисунке 8 показаны глубинные изображения P-P и P-S, полученные по непродольному ВСП, которые демонстрируют большие коэффициенты обмена на плотных песчаниках. На интервале

помимо Cotton Valley Fm, P-P и P-S изображения демонстрируют высокую степень корреляции. Оба набора данных показывают высокую степень корреляции. Маркер глин Bossier, который подстилает песчаники York, и более глубокозалегающий маркер известняков Cotton Valley демонстрируют пару высокоамплитудных хорошо прослеживаемых осей синфазности на обоих изображениях, которые также типичны для данных наземной сейсморазведки. Таким же образом карбонатный маркер Pettet, перекрывающий Cotton Valley Fm легко коррелируется на разрезах P-P и P-S.

И напротив разрез P-S, в общем, характеризуется гораздо более высокими коэффициентами отражения, чем разрез P-P в Cotton Valley Fm. Песчаник York отображается похожим образом как на P-P и P-S волнах. В комплексе, перекрывающем песчаники York, мы идентифицируем несколько фаций с высоким коэффициентом обмена P-S в пределах Cotton Valley Fm, которые помечаем как CVS фации A, B, и C. Это характерные фации



## Газ в плотных породах

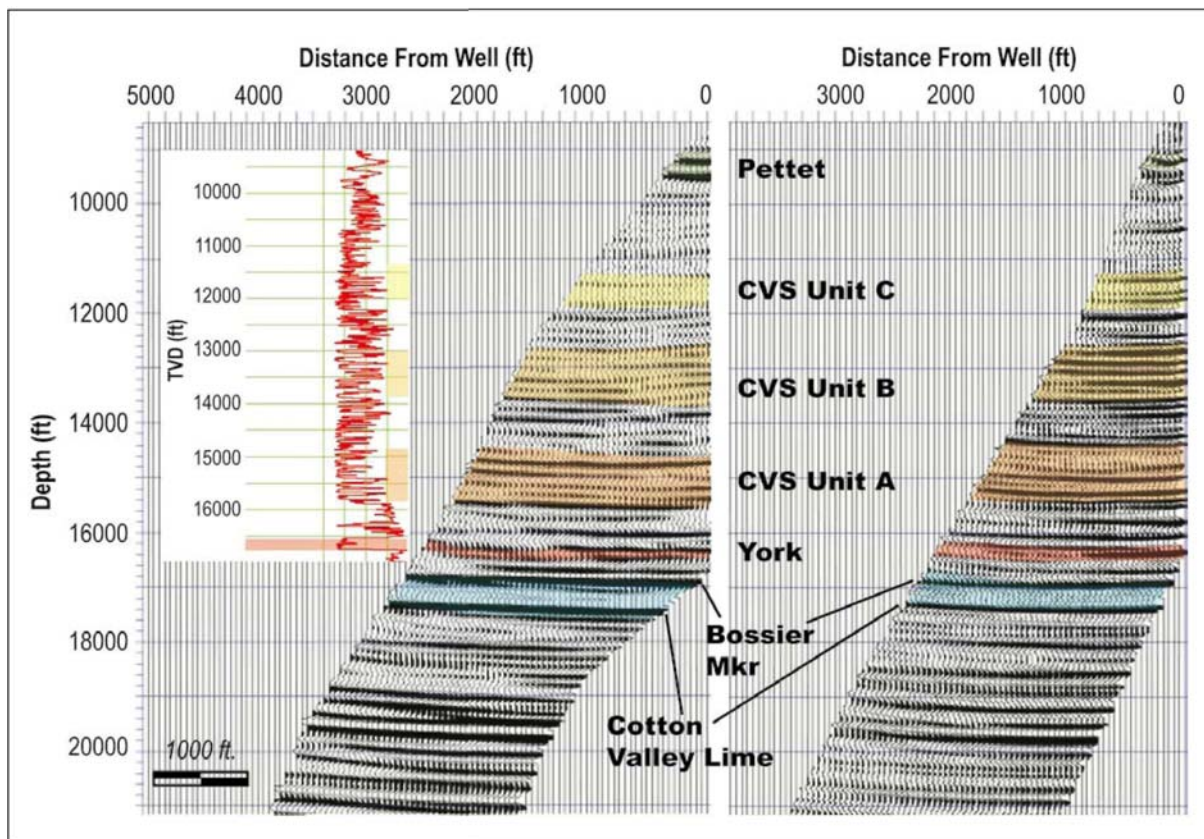
с высокими коэффициентами обмена P-S и мощностью, варьирующей от 350 м до 450 м (1000-1400 футов). В этом масштабе мы можем коррелировать фации A и B на разрезах P-P и P-S волн. Однако, фация CVS C выражена более явно на разрезе P-S, тогда как она едва различима на P-P. Эти фации коррелируются с разрезами по скважине, и характеризуются наличием смеси чистых песков и глин и содержат высокий уровень импеданс-контраста поперечных волн внутри этих фаций. Однако внутри этих фаций трудно прокоррелировать отдельные оси. Очевидно, коэффициенты отражения и обмена для песков существенно отличаются и изменчивы для того, чтобы произвести корреляцию осей синфазности между разрезами.

Используя вибраторы с вертикальным смещением в качестве источника энергии поперечных волн, мы наблюдали слабое распространение поперечных волн с поверхности вниз на сейсмоприемники, расположенные в разрезе. Качество данных достаточно для построения вертикальных годографов поперечных волн на глубинах ниже 3000 м (10,000 футов). На меньших глубинах трубные волны засоряют вступление прямых поперечных волн. Данные вертикальных годографов более глубоких поперечных волн дают ключевую информацию для согласования кубов P-P и P-S волн, как показано ниже. Однако качество данных ВСП, зарегистрированного с помощью источника поперечных волн неадекватно для построения изображений отраженных волн.

Хотя мы можем однозначно продемонстрировать, что нисходящая волна P претерпевает обмен в плотных песчаниках Cotton Valley Fm и York, и мы можем согласовывать эти волны с данными скважинных сейсмоприемников, мы не знаем, распространяются ли они обратно к поверхности без затухания и можно ли их там зарегистрировать. Мы обратимся к этому вопросу на основе многокомпонентной съемки 3D.

*Построение изображений P-S 3-D*

Одной из основных целей этого проекта была оценка реализуемости использования обменных волн P-S для построения изображения газа в плотных песках. На Рисунке 9 приведено сравнение разрезов на P-P и P-S волнах, данные были зарегистрированы с помощью акселерометрами. Оба набора данных были обработаны во временной области и преобразованы в глубинную, используя данные сейсмокаротажа на P-и S волнах в комбинации с данными дипольного акустического каротажа. Данные сейсмокаротажа были записаны до глубины 4980 м, в 7 м над песчаниками York. Данные вертикального годографа недоступны для более глубоких отражений, которые могли бы потенциально помочь в работе. Однако мы отметили, что соотношение скоростей P-волн и поперечных волн,  $V_p/V_s$ , стабильно в Cotton Valley Fm, и имеет значение 1.6. В этой связи мы использовали это значение  $V_p/V_s$



**Рисунок 8** Сравнение (слева) P-P и (справа) P-S 2D изображений, согласованных с помощью непродольного ВСП. Оба набора данных получены при использовании глубинной миграции Кирхгофа и отображены в глубинной области. На вставках показаны кривые гамма каротажа, отображенные в том же вертикальном масштабе. Данные ВСП и каротажа были скорректированы разницу уровней приведения. Песчаники York, целевой горизонт, и перекрывающие песчаники Cotton Valley Fm, обозначенные как фации CVS A, B, и C, характеризуются высоким коэффициентом обмена.

## Газ в плотных породах

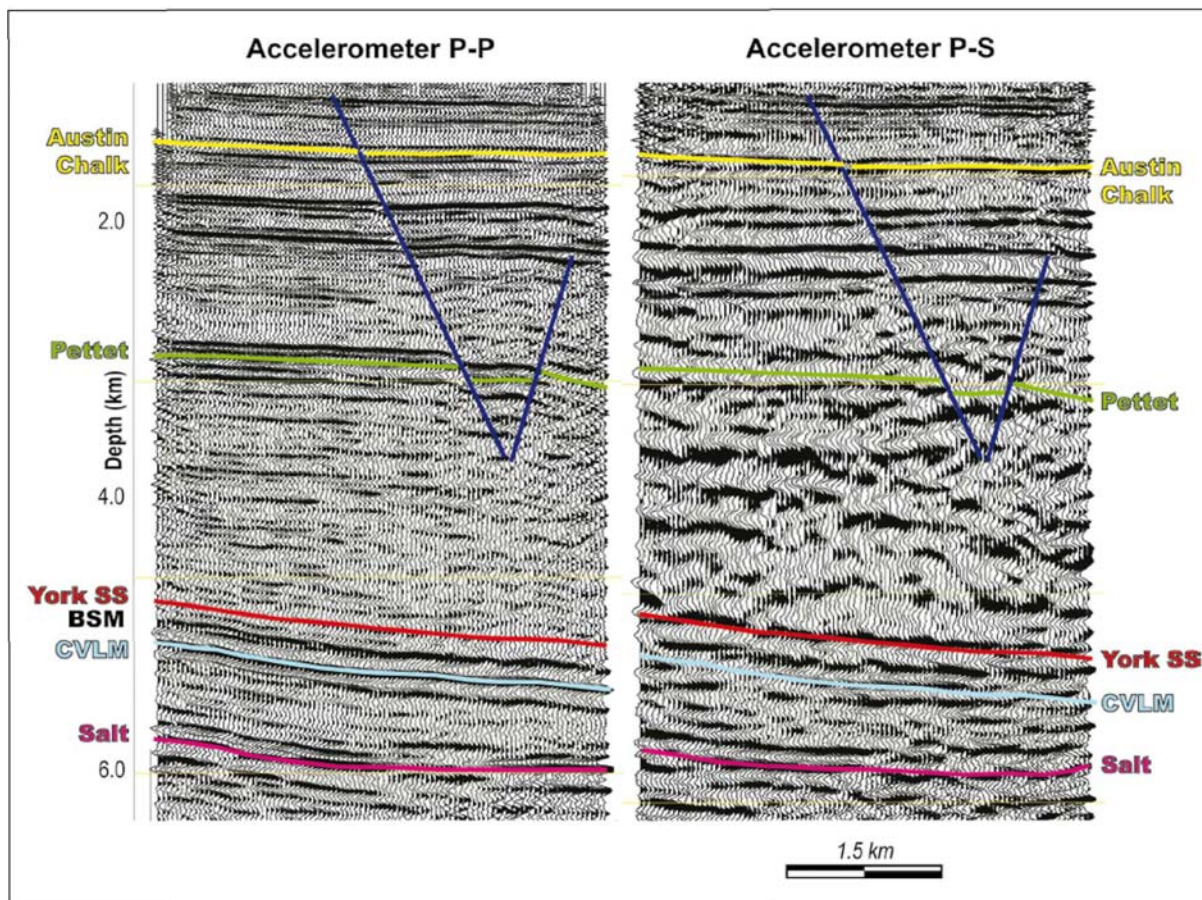
для разреза под песчаниками York. Мы считаем, что это разумная аппроксимация для этих сильно консолидированных формаций, даже, несмотря на то, что литология неодинакова. Согласование двух кубов было уточнено путем визуальной корреляции на основе использования малоглубинного и глубинного горизонтов, которые мы посчитали, что сможем уверенно проинтерпретировать: мел формации Austin на глубине 1.6 км и соль Юрского возраста на глубине 6 км.

Построение изображений на P-S волнах дает когерентный разрез в его верхней части до глубины порядка 2.5 км (8,000 футов). Мы наблюдаем средний уровень корреляции между осями синфазности на разрезах P-S и P-P в этом интервале. Оба разреза имеют преобладающие длины волн на глубинах порядка 1.5 км (5000 фут), но длины волн на разрезе P-S становятся все больше ниже этой отметки.

Глядя на более глубокую часть разреза, данные P-S волн дают плохое представление карбонатной формации Pettet, на глубине около 3 км, что дает хорошо прослеживаемую ось синфазности на данных P-волн. Также плохо отображается подстилающая формация Cotton Valley Fm но, что удивительно, мы наблюдаем когерентные прослеживаемые оси синфазности в более глубокой части разреза

на глубинах 5-6 км. В частности, мы наблюдаем хорошее совпадение типов записи для юрской соли на разрезах P-P и P-S волн, что говорит в пользу используемого согласования P-P/P-S.

Перекрывающие юрскую соль - несколько когерентных осей синфазности на разрезе P-S. Мы наблюдаем убедительное соответствие характера записи разрезов P-P и P-S на уровне известняка Cotton Valley (CVLM) и соседних осей синфазности, что говорит в поддержку согласования двух кубов. Мы также наблюдаем прослеживаемую ось синфазности P-S, которая коррелируется с отражениями песчаника York на разрезе по P-волнам. Это указывает на то, что мы можем наблюдать обмен P-S в коллекторе газа в плотных песках на глубине 5 км на многокомпонентных данных, записанных на поверхности, что является многообещающим результатом. Имея данную интерпретацию остается открытым вопрос почему ось синфазности песчаников York такая же высокоамплитудная как и ось синфазности известняков Cotton Valley в разрезе P-S и существенно выше по амплитуде, чем коэффициент обмена подстилающих песчаников Cotton Valley. Однако мы наблюдаем, что менее глубинная карбонатная формация Pettet, также не дает большого отклика на разрезе P-S.



**Рисунок 9** Сравнение разрезов 3D P-P (слева) и P-S (справа), обе группы данных записаны акселерометрами VectorSeis. Оба набора были обработаны во временной области, переведены в глубинную область и дальнейшая интерпретация проводилась с использованием в качестве маркеров малоглубинного мела Austin и глубинной юрской соли. Сейсмические горизонты пропикированы на разрезе P-P и обозначены на обеих панелях. Отметим хорошую прослеживаемость оси синфазности песчаников York на разрезе P-S.



При привязке кубов P-P и P-S к юрской соли, мы признаем, что возможны другие способы привязки. На рисунке 10 иллюстрируется альтернативный вариант, когда мы растянули вниз разрез P-S вниз на фазу известняка Cotton Valley, и при этом закрепили разрез на меловых отложениях Austin. Эта корреляция руководствуется сильным откликом P-S, который мы наблюдаем на данных ВСП для маркера глин Bossier и известняков Cotton Valley. Однако корреляция между кубами P-P и P-S на глубине не настолько хороша как предыдущая и привязка юрской соли плохая. Эта корреляция означает, что мы не можем получать отображения газа в плотных песчаных коллекторах на основе многокомпонентных данных 3D.

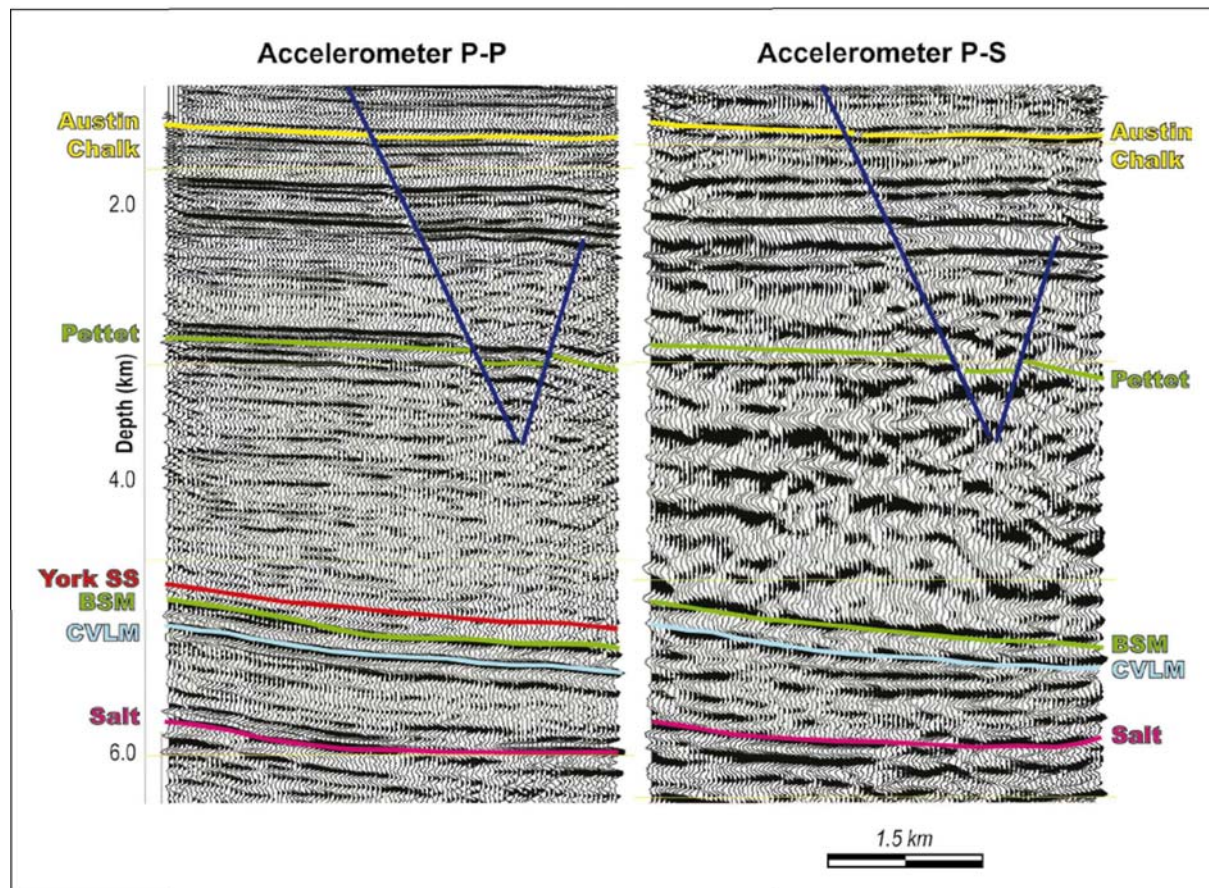
Мы приходим к выводу, что построение отображений 3D P-S дает когерентное изображение разреза в малоглубинной части до глубин порядка 2.5 км. Качество изображения падает существенно ниже этой отметки и, к сожалению, мы не наблюдаем таких высоких коэффициентов обмена Cotton Valley Fm на поверхности, которые были зарегистрированы скважинными сейсмоприемниками при работах ВСП. Однако, на удивление мы смогли записать некоторые обменные волны P-S, почти до

глубин 6 км. Одна из этих глубинных осей может быть образована при обмене на границе песчаников York, но имеются некоторые сомнения в этой идентификации из-за неточности в согласовании кубов P-P и P-S, даже при наличии скважинной информации.

#### Заключение

Anadarko выполнила развернутую программу геофизических исследований в Colony, Теннесси, для получения характеристик сейсмического отклика от плотных песчаников Cotton Valley Fm и для изучения способов построения изображений этих пород. Мы обнаружили, что даже несмотря на малый акустический импеданс-контраст между газом в плотных песках и вмещающих глинах, он ненулевой и в результате построение разрезов 3D P-P дает когерентное отображение песчаников York. Мы наблюдали значительное улучшение качества данных по сравнению с традиционными данными 2D, как и ожидалось. Однако окончательным успехом была бы возможность построения стратиграфического разреза. Это остается проблемой для имеющихся данных 3D P-P.

Обменные волн P-S помогают получать когерентный разрез до глубин порядка 2.5 км, который коррелируется с кубом P-P.



**Рисунок 10** Разрезы 3D P-P и P-S волн, данные записаны с помощью акселерометров VectorSeis. Этот рисунок похож на Рисунок 9, за исключением того, что на изображении в качестве маркеров использовался мел Austin и глины Bossier. На этих записях мы не наблюдаем прослеживаемых осей синфазности песчаников York на разрезе P-S.

## Газ в плотных породах

Однако качество данных ухудшается ниже этой глубины, где мы боролись за надежную идентификацию отражений от песчаников York. Мы определили горизонт, который мог бы претендовать на то, чтобы быть песчаником York, но решили, что эта идентификация ненадежна из-за трудностей перевода из временного в глубинный масштаб и согласования P-S и P-P изображений. Мы наблюдали когерентные оси синфазности обменных волн P-S на глубинах 5-6 км – что является очень ободряющим результатом многокомпонентной сейморазведки.

Некоторые наших самых значимых результатов получены и помощи данных ВСП. При использовании источника на выносе, данные ВСП однозначно демонстрируют большие коэффициенты обмена между песчаниками формаций York и Cotton Valley Fm, что говорит о том, что построение изображений P-S газа в плотных песках достижимо и дает доказательства концепции метода. На участке Colony в Теннесси глубина целевого объекта несет трудности при применении методики наземной регистрации: наш целевой объект может залегать слишком глубоко для настоящих методов. Однако, метод можно применять для обнаружения газа в плотных песках на меньших глубинах (менее 2.5-3 км) в других бассейнах.

Для глубинных целей, когда наземная регистрация данных P-S не обеспечивает адекватного качества изображений или в областях, где требуется более высокое качество изображения вблизи скважины, 3D ВСП может оказаться жизнеспособным решением.

Наши данные непродольного ВСП демонстрируют высокий уровень коэффициента обмена, и достижимое качество данных при регистрации в скважине, даже с одним пунктом возбуждения. Распространение этого до 3D может дать изображение в локальной области, подходящее как для структурного, так и стратиграфического картирования газа в плотных песчаниках.

**Благодарности**

Мы благодарны нашим коллегам из Anadarko Petroleum, внесшим большой вклад в успех данного проекта; в частности, мы хотим поблагодарить Gerry Wilbourn, John Moran, Stan Morris, и Guichang Lin. Компания Anadarko Petroleum любезно предоставила разрешение на публикацию этих результатов. Сейсмические данные были получены Trace Energy Services, и обработаны Fairfield Industries и Axis Geophysics, отделением ION. ВСП данные были получены Baker Atlas и обработаны VSFusion. Мы благодарим персонал этих компаний за их превосходную работу. Vectorseis является торговой маркой ION.

**Литература**

O'Brien, J, and Harris, R. [2006] Multicomponent VSP imaging of tight-gas sands. *Geophysics*, 71, E83-E90.