

Использование многокомпонентных сейсмических данных для характеристики коллектора в Венесуэле

Renaldo J. Michelena, Maria S. Donati, Alejandro A. Valenciano, Claudio D'Agosto, Petroleos de Venezuela (Pdvsa) Intevep, Caracas, Venezuela

В данной статье рассматривается часть работ по регистрации, обработке и интерпретации многокомпонентных сейсмических данных в Венесуэле за последние восемь лет. Мы представляем результаты трех проектов, которые должны были помочь другим исследованиям характеристик литологии, трещиноватости и тяжелой нефти в геологических условиях различного типа.

Месторождение Maroral. Продуктивность этого месторождения, расположенного на западе Венесуэлы в бассейне Barinas-Apure, связана с трещиноватым карбонатным коллектором на глубине 10 000 футов. Площадь проста в структурном отношении. В начале 1994 года компания Pdvsa выполнила на этом месторождении первые в Венесуэле работы по регистрации трехкомпонентных 2-D данных с целью получения информации об ориентировке и плотности трещин на уровне коллектора. Такая информация могла оказаться полезной при проектировании траекторий горизонтальных скважин.

Проект предусматривал использование скважинного контроля и высокое качество данных с точки зрения разрешающей способности и отношения сигнал/помеха. Центры трех 10-километровых 2-D многокомпонентных профилей проходили над центром коллектора по трем азимутам.

Профили 1 и 3 проходили параллельно двум основным системам разломов месторождения. Профиль 2 делит на две части угол между профилями 1 и 3, образуя с профилем 1 угол приблизительно 41° (рис.1). Чтобы избежать неоднозначности поверхностных волн, были использованы линейные группы сейсмоприемников с интервалом 17 м. Дальний вынос был увеличен до 3600 м, что обеспечивает вступление обменных волн за пределами конуса поверхностных волн.

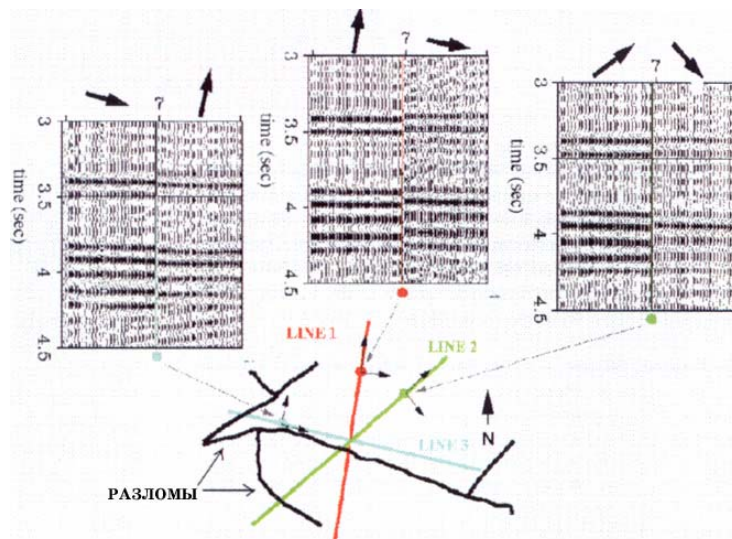


Рис.1. Примеры мигрированных горизонтальных составляющих для выбранных точек вдоль трехкомпонентных (3-C) профилей. Анализ поперечной составляющей (rotation analysis) этих данных позволил построить карту ориентировки и плотности трещин на рис.2.

На рис.1 показано поведение мигрированных горизонтальных составляющих вокруг точек, удаленных на 7 км от начала каждого профиля. В синей точке на профиле 3, вступление радиальной составляющей происходит раньше, чем вступление поперечной составляющей. В красной точке на профиле 1, вступление радиальной составляющей задерживается относительно поперечной составляющей; то же самое отмечается в зеленой точке на профиле 2. Эти наблюдения предполагают, что ориентировка быстрых поперечных волн приблизительно совпадает с направлением профиля 3, который также параллелен ориентировке максимального горизонтального напряжения.

Мы выполнили анализ поперечной составляющей вдоль мигрированных горизонтальных составляющих с целью оценки ориентировки вступления самых быстрых поперечных волн и разности времен пробега двух вступлений в каждой точке. Анализ основывался на отношениях амплитуд двух горизонтальных составляющих. После анализа отношений энергии вокруг различных значимых отражений, мы получили карту ориентировки вступлений самых быстрых поперечных волн, которая очень хорошо коррелируется с ориентировкой основных разломов, секущих месторождение. На рис.2 показана карта по кровле карбонатного коллектора, где влияние перекрывающих отложений устранено путем удаления слоев. Ориентация оценивалась только вдоль 3-С профилей. Углы для участков между профилями рассчитывались методом двумерной сплайн-интерполяции. Длины красных отрезков пропорциональны разностям времени пробега быстрых и медленных поперечных волн. На рис.3 можно видеть, что ориентировки, полученные в результате анализа поперечной составляющей, также согласуются с ориентировками, полученными по диаграммам FMS. Ориентировки показывают, что основная система трещиноватости на месторождении простирается с северо-запада на юго-восток, образуя с профилем 3 угол приблизительно 30° . Поскольку имела место хорошая корреляция с ориентировкой основных разломов на месторождении и хорошее совпадение с ориентировкой основной серией трещин, наблюдаемой в скважине, мы интерпретировали рис. 2 как карту ориентировки серии трещин с наибольшей плотностью на месторождении. Эта карта была использована для проектирования траекторий горизонтальных скважин.

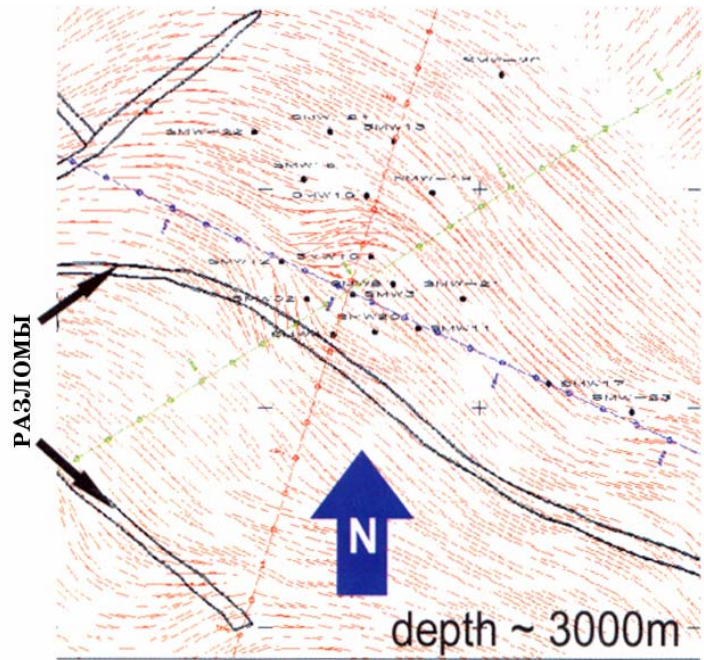


Рис.2. Карта ориентировки и плотности трещин по кровле карбонатного коллектора. Максимальное горизонтальное напряжение параллельно профилю 3 (синий цвет). Ориентировка трещин тесно связана с ориентировкой главных разломов. Изменения в плотности трещин связаны со структурными изменениями и изменениями типа породы.

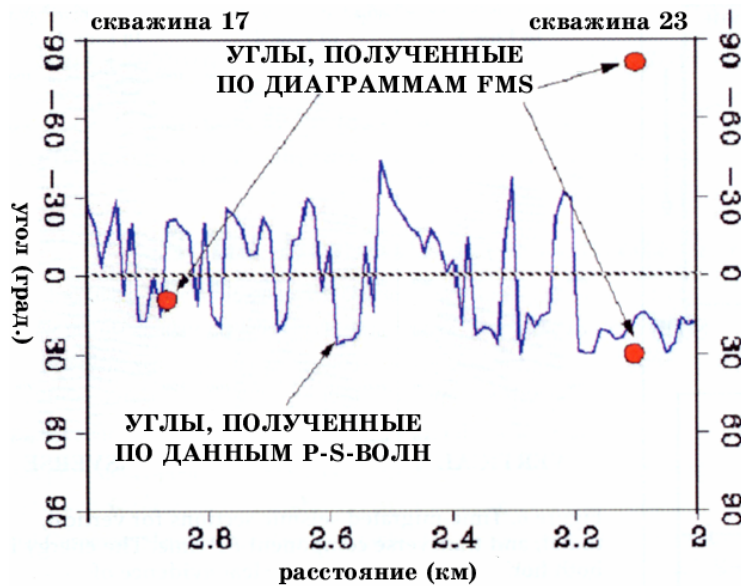


Рис.3. Сопоставление ориентировки трещин, полученной по диаграммам FMS и по многокомпонентным сейсмическим данным. Две серии трещин пересекают скважину 23. Сейсмические данные проявляют тенденцию к следованию серии трещин с наибольшей плотностью.

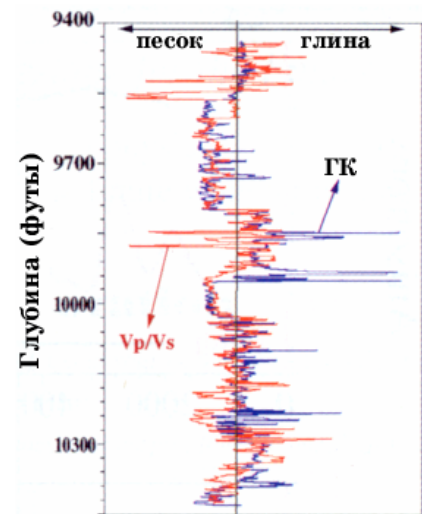


Рис.4. Корреляция между данными ГК и отношением V_P/V_S .

Отношение V_P/V_S хорошо коррелируется с литологией отложений, перекрывающих объект поиска на месторождении. На рис.4 приводится сравнение отношения V_P/V_S , рассчитанного по данным двухкомпонентного АК, с данными ГК по одной скважине. Отношения V_P/V_S , полученные после тщательной интерпретации и корреляции данных PP - и PS -волн, следуют тому же тренду отношений V_P/V_S , которые были получены по двухкомпонентному АК. Отношения, рассчитанные по сейсмическим данным, хорошо коррелируются с мощностью чистого песчаника, оцененной по данным ГК в различных точках. Отношения V_P/V_S , выведенные по сейсмическим данным, позднее были использованы для построения карт мощностей чистых песков по коллектору.

На рис.5 показаны соотношения между структурными изменениями вдоль профиля 1, изменениями в литологии, о которых свидетельствуют изменения отношения V_P/V_S , выведенного по сейсмическим данным, и изменениями в анизотропии. Последние пропорциональны плотности трещин, и их признаком является непостоянство разностей времен пробега быстрых и медленных поперечных волн вдоль одного и того же профиля. Зеленой линией обозначены изменения глубины кровли искомого объекта. Обратите внимание на несимметричность интенсивности анизотропии вокруг зоны структуры с наибольшей кривизной. Причиной несимметричности является то, что фланги зоны с наибольшей кривизной содержат различные типы пород, которые по-разному реагируют на одну и ту же деформацию. Поскольку глины более пластичны, нежели пески, они менее склонны к образованию трещин при приложении сходной нагрузки.

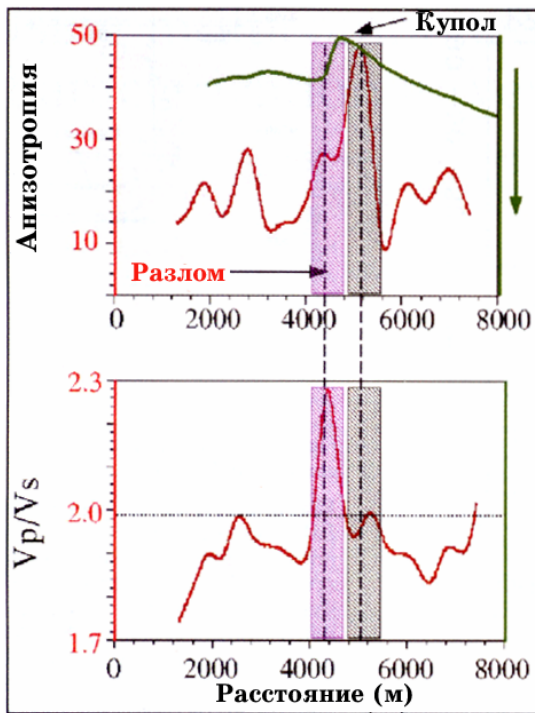


Рис.5. Соотношения между структурными деформациями, плотностью трещин, пропорциональной интенсивности анизотропии, и литологии по профилю 1. Вертикальная ось анизотропии на верхнем рисунке показывает разность (в миллисекундах) между вступлениями медленных и быстрых поперечных волн. Более пластичные глины ($V_p/V_s > 2$, розовый цвет) меньше склонны к образованию трещин, нежели пески вокруг купола.

связывающего породы на продуктивной площади. Коллектор представляет собой моноклиральную структуру с незначительным падением на юго-запад.

В 1997 году, компания Pdvsa зарегистрировала набор 3-D/3-C данных по базисной линии одновременно с общепринятым 3-D объемом. Это было выполнено в рамках проекта контроля нагнетания пара. Цель 3-D/3-C работ заключалась в оценке возможности применения многокомпонентных данных для количественной характеристики изменений пластовых условий с течением времени.

Работы 3-D/3-C были выполнены на площади 0.33 кв. км. Шестнадцать сейсмоприемников постоянно находились на глубине 30 м, что обеспечивает повторяемость для 4-D работ. Расстояние между сейсмоприемниками и приемными профилями равно 196 м. 4104 взрывных источника находились на глубине 15 м и располагались по схеме «кирпичная кладка». Такие же источники использовались для регистрации общепринятых данных P-волн на большой площади. Данные P-волн характеризовались хорошим отношением сигнал/помеха, высокочастотным составом и хорошей выдержанностью по целевому горизонту.

Наиболее значимыми результатами, полученными после обработки многокомпонентных данных, являются следующие:

- Неконсолидированные пески формируют азимутальную анизотропию. Как видно на рис.6, на обоих горизонтальных составляющих по всем временным разрезам существует когерентная энергия. Мы полагаем, что

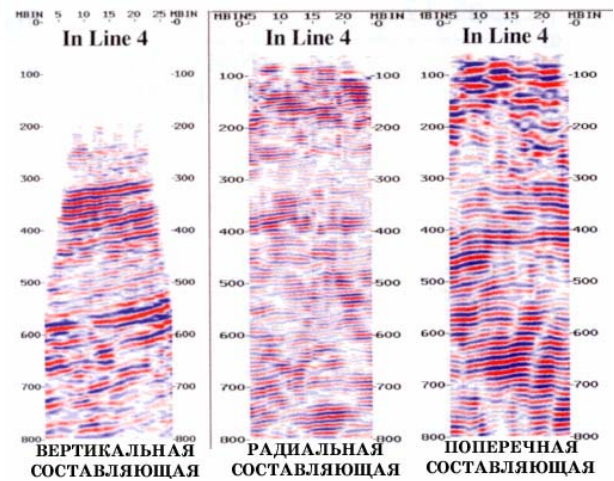


Рис.6 Мигрированные во времени сейсмические разрезы для вертикальной, радиальной и поперечной составляющих данных PP-волн. Энергия в обоих горизонтальных составляющих четко свидетельствует об азимутальной анизотропии на этом месторождении. Объект поиска расположен между 300 и 500 мс (время PP-волн).

Месторождение Lagunillas. Это месторождение расположено восточнее бассейна Lake Maracaibo. Целевым горизонтом является миоценовая формация (Miocene Formation), которая характеризуется чередованием глинистых сланцев, глин и сильно неконсолидированных песчаников на глубине 2000-2600 футов (300-500 м). Тяжелая нефть играет роль клея,

в этом случае сейсмические данные реагируют на горизонтальное напряжение на участке. Анализ двойного лучепреломления на этих данных не выполнялся.

- Горизонтальные составляющие имеют более высокую разрешающую способность, нежели вертикальная составляющая (рис.6). Это позволяет предположить, что по данным *PS*-волн можно получить более детальную информацию о коллекторе, нежели по общепринятым данным *PP*-волн.
- Горизонтальные составляющие демонстрируют изменения амплитуды в горизонтальном направлении, которые не наблюдаются на вертикальной составляющей. Это можно видеть на рис.6 и, более четко, на рис.7, где сравниваются три временных среза данных *PP*- и *PS*-волн. Причины этих изменений неизвестны, но их можно связать с изменениями пластовых условий вследствие нагнетания пара в коллектор за 18 месяцев до регистрации данных, с изменениями азимутальной анизотропии в горизонтальном направлении, или с изменениями литологии в горизонтальном направлении. Для подтверждения какой-либо из этих гипотез потребуется выполнить большой объем моделирования и калибровки, и тщательно устранить эффекты азимутальной анизотропии.
- Миграция времен с применением скорости миграции *PS*-волн дала лучшие изображения, нежели миграция с применением среднеквадратичных скоростей *PS*-волн.

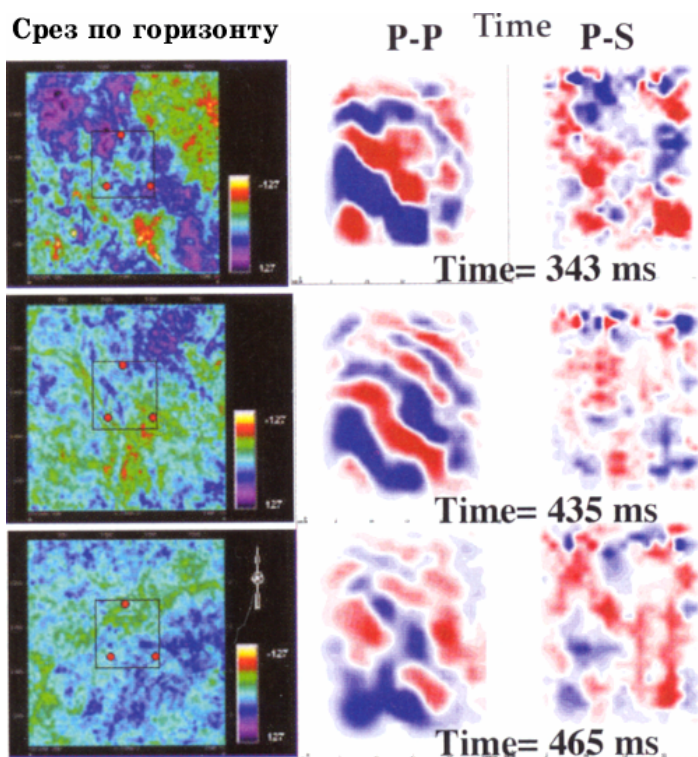


Рис.7. Сопоставление срезов по горизонтам (по 3-D данным *P*-волн) и временных срезов (по сейсмическим данным *PP*- и *PS*-волн). Между объемами данных *P*-волн имеется хорошая корреляция. В данных обменных волн наблюдаются сильные изменения амплитуд. Скважины, использованные при обработке, обозначены тремя красными точками.

Нефтяной пояс Ориносо. Эта площадь, которая представляет собой крупнейшее в мире скопление тяжелой нефти, расположена в Восточной Венесуэле. Коллекторы состоят из переслаивающихся последовательностей песчаных тел, содержащих тяжелую нефть, на очень малых глубинах. В августе 1997 года одна из нефтедобывающих компаний зарегистрировала набор 3-D/3-C многокомпонентных данных, чтобы выяснить, как 3-C данные могут улучшить разрешение коллектора на малых глубинах, при слабом различии по импедансу между

песками и глинами (или при отсутствии такого различия). 3-D/3-C данные были обработаны двумя исполнителями. В настоящем исследовании используется один из окончательных кубов данных P - P - и PS -волн после миграции. Дополнительно к сейсмическим данным, компания Pdvsa представила данные двухкомпонентного АК, плотностного каротажа, ГК и ПС по трем скважинам (хотя и не полный комплект диаграмм по каждой из скважин).

На рис.8 показано, как данные ГК коррелируются с различными сейсмическими свойствами, такими как скорости, плотности и импедансы. Как и ожидалось для этой площади, имеется слабая корреляция между данными ГК и акустическим импедансом, поэтому данные продольных волн не обеспечивают надежного выявления изменений в литологии. Корреляция между скоростями сейсмических волн и литологией также мала. Корреляция со скоростями поперечных волн лучше, чем со скоростями продольных волн. Величина V_P/V_S и данные ГК также плохо коррелируются. Однако связь между данными ГК и плотностью хорошая; это предполагает, что средняя плотность может быть использована для различения литологии на этой площади. Если построить график взаимной зависимости двух параметров, которые демонстрируют лучшую корреляцию с данными ГК (речь идет о плотности и скорости поперечных волн), и каждую точку обозначить цветом, соответствующим значению ГК, можно уверенно разделить пески и глины (рис.9). Это предполагает, что упругие параметры среды, рассчитанные по сейсмическим данным, могут быть использованы для отделения глин от песков после обучения алгоритма классификации на скважине.

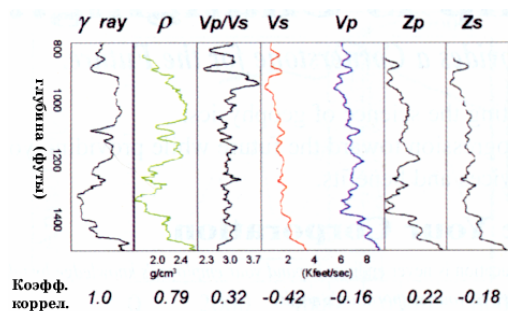


Рис.8. Корреляция между данными ГК, плотностного каротажа, отношением V_P/V_S , скоростью S -волн, скоростью P -волн, характеристическим сопротивлением P -волн и характеристическим сопротивлением S -волн. Числа внизу – коэффициенты корреляции между данными ГК и перечисленными характеристиками.

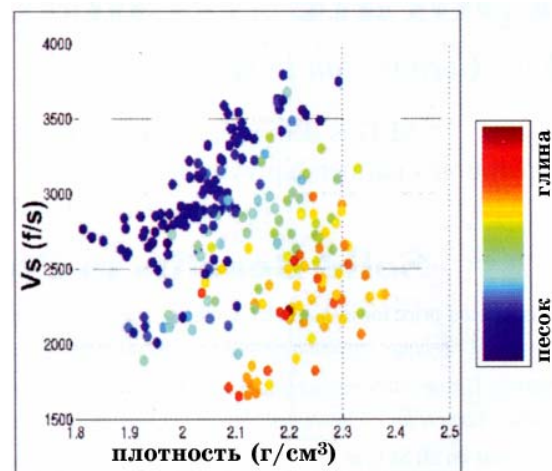
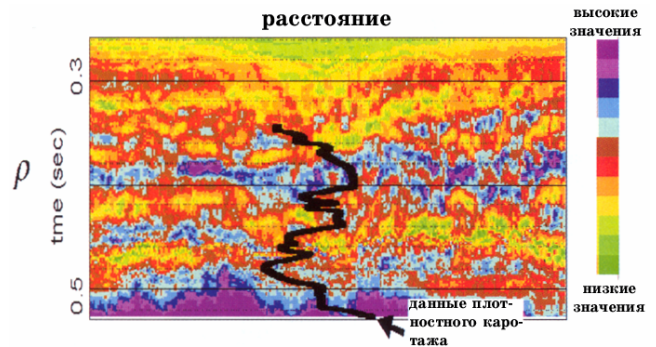


Рис.9. График взаимной зависимости плотности и скорости S -волн с использованием цветового кодирования по данным ГК. Пески и глины хорошо различаются.

Рис.10. Плотностной разрез, полученный после объединения результатов инверсии данных PP - и PS -волн. Рассчитанные и ожидаемые плотности хорошо согласуются между собой; исключение составляет интервал между 0.2 и 0.4 с, где плотность, выведенная по сейсмическим данным, демонстрирует изменения в гори-

зонтальном направлении вокруг скважины.



По кубам 3-D/3-C данных PP - и PS -волн была выделена произвольная линия, пересекающая три скважины с имеющимися данными ГИС. Для выполнения стратиграфической инверсии по двум профилям после суммирования использовался коммерческий алгоритм. Результаты были объединены с целью получения упругих параметров среды (Valenciano и Michelena, 2000). На рис.10 показан плотностной разрез, построенный после инвертирования суммарных данных PS -волн и объединения полученного результата с акустическим импедансом и оценками полученного отношения V_P/V_S и отношения V_P/V_S , выведенного по двухкомпонентному АК.

На рис.11 показано распределение литологии по произвольной линии, выделенной из набора 3-D/3-C данных, после экстраполяции вдоль разреза соотношений между скоростью и плотностью на скважине в середине. Экстраполяция соотношений между упругими параметрами была выполнена с применением основанного на использовании нейронной сети алгоритма классификации упругих параметров, выведенных по сейсмическим данным. Пески обозначены синим цветом, глины – желтым цветом, а переходные зоны – желтым цветом.

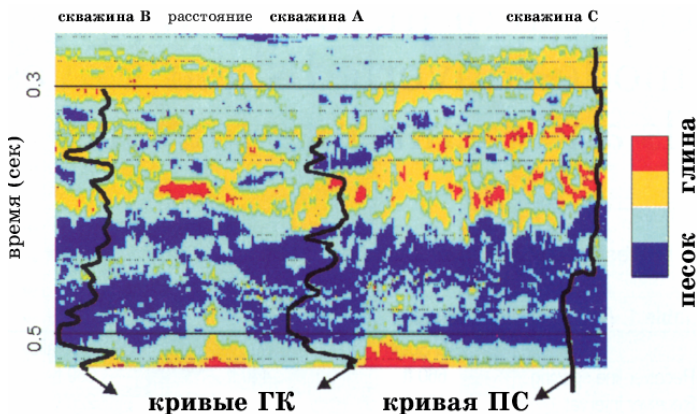


Рис.11. Распределение литологии после классификации рассчитанных упругих параметров с применением алгоритма, основанного на использовании нейронной сети. Имеется хорошее совпадение между предсказаниями по сейсмическим данным и диаграммами ГИС; в частности, ниже 0.44 с, где расположен объект поиска. При построении начальной модели использовались данные только по скважине А.

Заключительные замечания. В процессе характеристики коллекторов в Венесуэле, компания Pdvsa столкнулась с рядом проблем, в частности, на суше, где вклад многокомпонентных сейсмических данных может быть весьма значительным. Многие коллекторы в Венесуэле имеют сложную стратиграфию и располагаются в пределах площадей, сложных в структурном отношении. Для характеристики трещиноватости, литологии и флюидов на таких площадях требуется улучшенное изображение сейсмических данных. Поэтому, в течение нескольких последующих лет геофизики компании Pdvsa будут сосредотачиваться на использовании и усовершенствовании алгоритмов обработки и получения изображения 3-C сейсмических данных, а также на разработке новых методов их анализа и интерпретации. Особый акцент будет сделан на оценке петрофизических параметров и на интерпретации атрибутов 3-C сейсмических данных. В

рамках своей стратегии разведки и разработки, компания Pdvsa планирует использование 3-С сейсмических данных для оконтуривания и характеристики коллекторов в дальней зоне в ближайшем будущем.

Рекомендуемая литература.

Suggested reading. "Multicomponent 3-D seismic pilot study in the Orinoco heavy oil belt," by Lansley et al. (*TLE*, 1998). "Mapping distribution of fractures in a reservoir with PS converted waves," by Ata and Michelena (*TLE*, 1995).

"Birefringence study on 3-C/2-D: Barinas Basin (Venezuela)" by Donati and Brown (*SEG 1995 Expanded Abstracts*). "Quantifying errors in fracture orientations estimated from PS converted wave" by Michelena (*SEG 1995 Expanded Abstracts*). "Stratigraphic inversion of poststack PS converted waves data," by Valenciano and Michelena

(*SEG 2000 Expanded Abstracts*). "Tomography + prestack depth migration of PS converted waves" by D'Agosto et al. (*SEG 1998 Expanded Abstracts*). "P- and S-wave separation at a liquid-solid interface," by Donati and Stewart (*Journal of Seismic Exploration*, 1996). "Making AVO analysis for converted waves a practical issue" by Donati and Martín (*SEG 1998 Expanded Abstracts*). E

Стратиграфическое описание формации Morgow с использованием обменных поперечных волн: Средства интерпретации и методика для трех сухопутных съемок

Richard Van Dok and James Gaiser, WesternGeco, Denver, Colorado, U.S.

Исторически, формация Morgow пенсильванского возраста всегда представляла собой объект, сложный для исследования общепринятым методом продольных волн (*P*-волн). Относительно малое изменение акустического импеданса, ассоциированное с тонкими продуктивными песчаными слоями (объектами поиска), сделало данные *P*-волн ограниченно полезным средством в этих районах. Для исследования возможности использования обменных поперечных волн (*PS*-волн) для определения и описания этих песчаных русел, были проведены три сухопутные 3-D/3-С съемки. Хотя площади этих съемок располагаются в различных бассейнах, они представляют прогресс в нашем понимании проектирования, обработки и интерпретации многокомпонентных данных МОВ.

Будучи примененными к данным *PS*-волн, общепринятые методики интерпретации, такие как построение карт амплитуд или изохрон, часто подходят для анализа данных. Однако в некоторых случаях могут потребоваться более специализированные средства. Ключевым вопросом для всех съемок была правильная корреляция осей синфазности между объемами данных *P*- и *PS*-волн. В некоторых ситуациях, характер геологии был достаточным для хорошей визуальной увязки. В других случаях, для корреляции использовались более тонкие признаки. Методики анализа V_P/V_S , основанные на использовании корреляции, могут обеспечить большую детальность и подчеркнуть малозаметные элементы, пропущенные субъективными методами интерпретации. Сложность

корреляции время-глубина также свидетельствует о ценности дополнительной информации, такой как АК методом P - и S -волн или ВСП, которые в общем случае отсутствуют. Хотя результаты интерпретации для этих съемок являются предварительными, они показывают значительную перспективу, которую имеет применение данных PS -волн.

Места проведения трех съемок: юго-запад штата Канзас, выступ территории штата Оклахома и юго-восток штата Нью-Мексико (рис.1). Во всех трех случаях, объектом поисков был коллектор в составе формации Moggow пенсильванского возраста. Формация представлена в основном глинистым сланцем с включениями песка, оолитовых известняков и углей. Глубина объекта поиска изменяется от 5500 футов в Канзасе и Оклахоме приблизительно до 8500 футов в Нью-Мексико. Средняя мощность продуктивных отложений изменяется, и на некоторых участках может достигать 35 футов, при средней пористости 10-20%.



Рис.1. Региональная карта, показывающая относительные положения трех 3-D/3-C съемок.

При проведении работ использовались 3-С сейсмоприемники и обычные вибрационные источники P -волн. Мы оценим энергию генерируемых сейсмических волн, когда падающая P -волна возбуждет восходящую поперечную волну, определяемую как обменная волна (или PS -волна). Это и есть энергия S -волны, которая используется для выделения дополнительной литологической информации о коллекторе.

Eva South, Оклахома. Первую съемку (округ Техас, Оклахома) первоначально планировалось выполнить только общепринятым методом P -волн. В Таблице 1 перечислены различные параметры регистрации. Ключевым моментом является то, что это почти те же параметры, которые предназначались для первоначальных работ методом P -волн с применением только общепринятых вертикальных сейсмоприемни-

ков. Однако обсуждения дополнительной ценности данных S -волн на этой площади привели к решению о развертывании 3-С сейсмоприемников и исследовании энергии PS -волн.

| Таблица 1. Параметры регистрации | | | |
|---------------------------------------|-----------|-----------|----------------|
| | Eva South | Cave West | Buffalo Valley |
| Расстояние между приемными профилями | 660 футов | 440 футов | 660 футов |
| Расстояние между сейсмоприемниками | 165 футов | 220 футов | 220 футов |
| Расстояние между профилями источников | 990 футов | 880 футов | 880 футов |
| Расстояние между источниками | 165 футов | 220 футов | 220 футов |

| | | | |
|--|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Регистрирующая группа сейсмоприемников | 12 профилей × 64 Т.Н. | 16 профилей × 56 Т.Н. | 6 профилей × 108 Т.Н. |
| Размер бина | 82.5 × 82.5 фута | 110 × 110 футов | 110 × 110 футов |
| Источник | Вибросейс | Вибросейс | Вибросейс |
| Частота свип-сигнала | 14-128 Гц (нелинейное изменение) | 10-80 Гц (нелинейное изменение) | 8-98 Гц (нелинейное изменение) |

Высокоамплитудные поверхностные волны стали причиной проблем при регистрации данных *P*-волн на площади Eva South. С учетом этого, было решено перенести начало низкочастотной части свип-сигнала на относительно высокую частоту (около 20 Гц) и применили линейные группы сейсмоприемников. Хотя частота 20 Гц является результирующей для регистрации данных *P*-волн, она находится в середине ожидаемой ширины полосы для данных *PS*-волн на этой площади. В качестве компромисса, мы понизили начальную частоту до 14 Гц для рабочих свип-сигналов. Вследствие азимутальной изменчивости схемы съемки и горизонтального перемещения частиц в *S*-волнах, любой тип регистрирующей расстановки, не являющийся азимутально-симметричным, может стать причиной проблем. Для данной съемки, мы объединили три 3-С сейсмоприемника и получили, в сущности, точечный сейсмоприемник. В результате, действие поверхностных волн стало менее жестким, и они были успешно удалены в ходе обработки данных *P*- волн и *PS*-волн.

На рис.2 сравниваются изображения данных *P*-волн и *PS*-волн для одного и того же вертикального разреза. Когда мы начинаем интерпретацию многокомпонентных данных, важно подчеркнуть следующее. При интерпретации данных *P*-волн, определение положения оси синфазности, ассоциированной с коллектором, является решающим. Это относится также к данным *PS*-волн, но может оказаться весьма сложной задачей, если отсутствуют какие-либо скважинные данные *S*-волн. Корреляция с данными *P*-волн по АК была хорошей и обеспечила надежное определение Morrow. Однако, как видно на рис.2, идентифицировать формацию Morrow на объеме данных *PS*-волн затруднительно из-за ограниченной ширины полосы и недостатка значимых когерентных осей синфазности в верхней части данных. Благоприятным фактором является то, что два ключевых разлома были интерпретированы на обоих объемах; поскольку вертикальное перемещение этих разломов изменяется в пространстве и во времени, их можно использовать для согласования двух объемов. Кровля формации Morrow обозначена на рис.2 осью синфазности синего цвета. Временной масштаб для разреза, построенного по данным *PS*-волн, откорректирован так, чтобы он приблизительно совпадал с данными *P*-волн. Следует также отметить, что указанные оси синфазности дали среднее отношение V_P/V_S , близкое к 2.0, что приемлемо для данной площади.

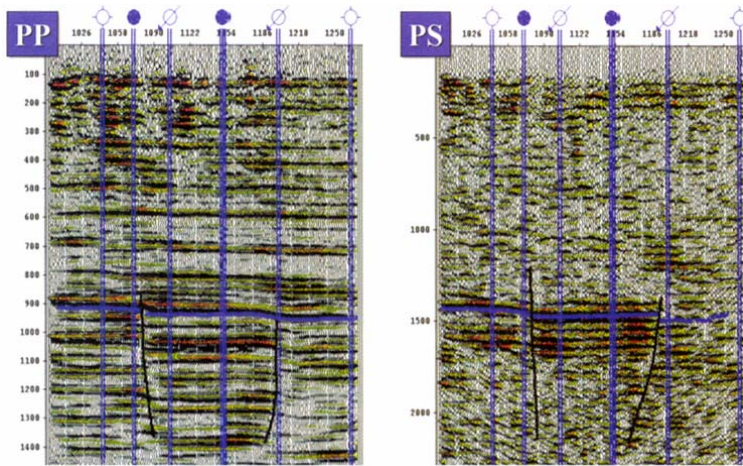


Рис.2. Разрезы, построенные по данным *P*-волн и *PS*-волн (съёмка в Eva South), показывают интерпретацию разломов и кровлю формации Mowgow (синий цвет).

В рамках интерпретации, мы построили карты амплитуд для Mowgow по обоим объемам (рис.3 и 4). Амплитуды *P*-волн четко определяют общий тренд долины и региональный разлом TeePee, но детальная корреляция с мощностью продуктивных отложений (рис.5) не столь проста. Оконтурирование тренда долины по амплитудам *PS*-волн (рис.4) является очевидным – также как и выраженность разлома TeePee. Это изображение имеет драматическое сходство с рис.5. Шаг изолиний на рис.5 составляет 10 футов; максимальная мощность в центре составляет приблизительно 35 футов.

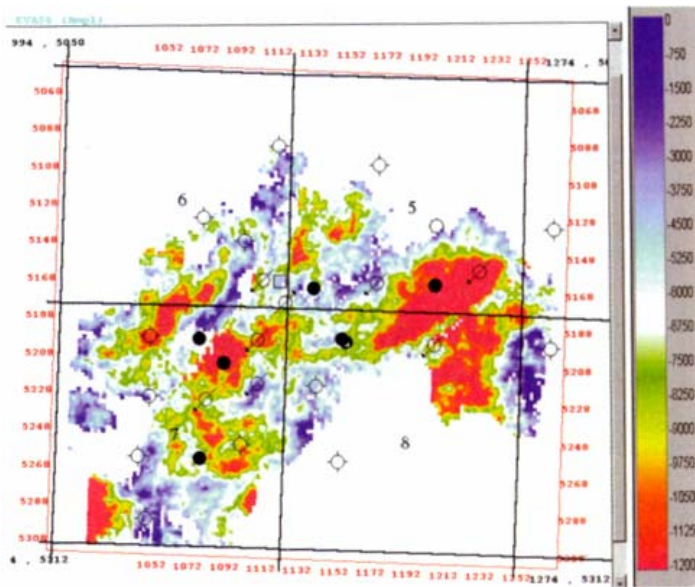


Рис.3. Карта амплитуд *P*-волн (площадь Eva South) по кровле Mowgow со скважинным контролем. Большие абсолютные амплитуды обозначены красным цветом.

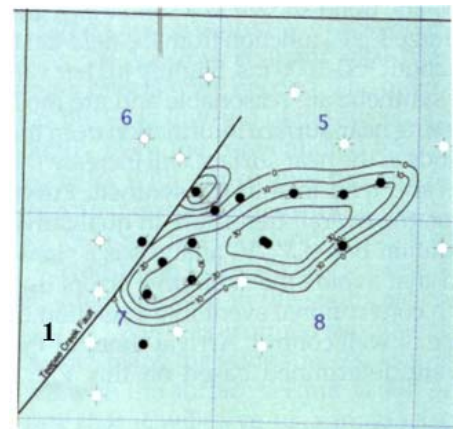


Рис.5. Изолинии мощности продуктивных отложений по данным скважинного контроля на месторождении Eva South. Шаг изолиний равен 10 футов, максимальная мощность в центре составляет около 35 футов.
(1- Разлом TeePee Creek)

Cave West, Канзас. Данные по Cave West были зарегистрированы к северу от Eva South в округе Stevens, Канзас. Параметры, представленные в Таблице 1, сходны с параметрами, использо-

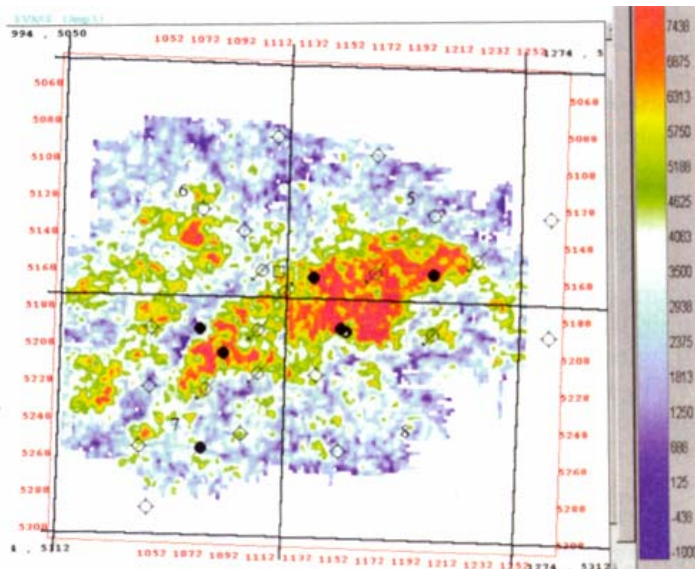


Рис.4. Карта амплитуд PS -волн (площадь Eva South) по кровле Morgow со скважинным контролем. Большие абсолютные амплитуды обозначены красным цветом.

Как и в предыдущем случае, недостаток каких либо скважинных данных S -волн в пределах площади съемки помешало попытке увязать объемы данных P -волн и PS -волн. Чтобы установить соотношение время-глубина для двух съемок, мы использовали ближайшую скважину для получения скоростей P - и S -волн. Для привязки могут быть использованы одномерные синтетические данные, но PS -волны при нулевом выносе, согласно теории, отсутствуют. Чтобы создать полезную модельную трассу, мы сформировали синтетические данные в полностью упругой среде для множества выносов и суммировали трассы.

На рис.6 показаны результаты анализа V_P/V_S полевых данных, основанного на использовании корреляции. В процессе анализа, происходит систематическое сканирование и корреляция объемов данных P -волн и PS -волн, и создается изображение, сходное изображением при обычном скоростном анализе. По горизонтальной оси отложена средняя величина V_P/V_S , а по вертикальной оси – полное время пробега P -волн. Тренд, обозначенный штриховой линией, – это средняя функция V_P/V_S по синтетическим трассам, которая изменяется от 1.7 до 2.4. Тренд, обозначенный сплошной черной линией, показывает интерпретированную среднюю функцию V_P/V_S по полевым данным. Искомый горизонт расположен на времени около 950-1000 м/с. Несколько более высокие значения, сравнительно с синтетическими данными, скорее всего, являются результатом отсутствия данных ГИС в верхней части разреза. Повышенные величины V_P/V_S в верхней части разреза повысят средние величины V_P/V_S , и будут стремиться сдвинуть синтетическую кривую вправо. Тем не менее, общие тренды хорошо согласуются. Анализ V_P/V_S , основанный на использовании корреляции, является статистически устойчивым методом. Он позволяет избежать субъективных ошибок, которые могут быть ассоциированы с общепринятой интерпретацией данных PS -волн в отсутствии скважинного контроля. Времена вступления эквивалентных отражений были определены на основе анализа V_P/V_S .

ванными на площади Eva South. Существенным различием является то, что начальная частота свип-сигнала была понижена до 10 Гц. Снова были использованы точечные сейсмоприемники; после обработки данные P -волн, полученные по результатам многокомпонентных работ, сопоставлялись с данными обычных работ методом P -волн, зарегистрированными параллельно.

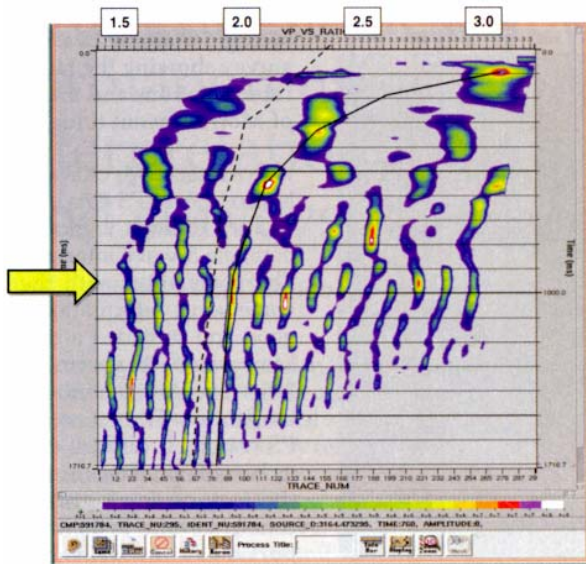


Рис.6. Анализ средней величины V_P/V_S , основанный на использовании корреляции, для съемки Cave West. Горизонтальная ось – средняя величина V_P/V_S , вертикальная ось – полное время пробега P -волн. Красным и желтым цветами обозначены повышенные коэффициенты корреляции. Ось синфазности, соответствующая Morrow, расположена на времени приблизительно 950 мс (желтая стрелка). Черная штриховая линия представляет тренд, определенный по результатам моделирования в упругой среде, а черной сплошной линией обозначен тренд, основанный на сейсмических данных. Различия в трендах, скорее всего, обусловлены недостатком информации о скоростях S -волн в верхней части модели.



Рис.7. Разрез по данным P -волн (Cave West), показывающий различные интерпретированные горизонты. Кровли Morrow, Mississippian Chester и St. Genevieve обозначены, соответственно, желтым, красным и синим цветом.

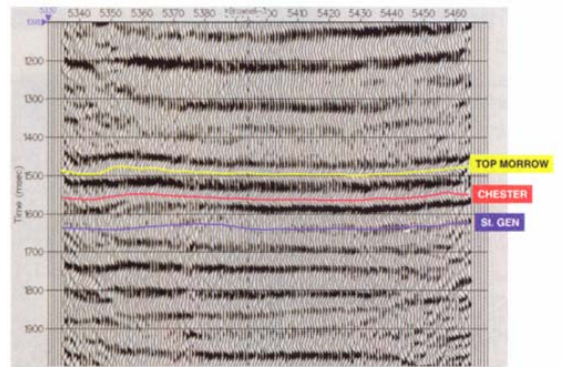


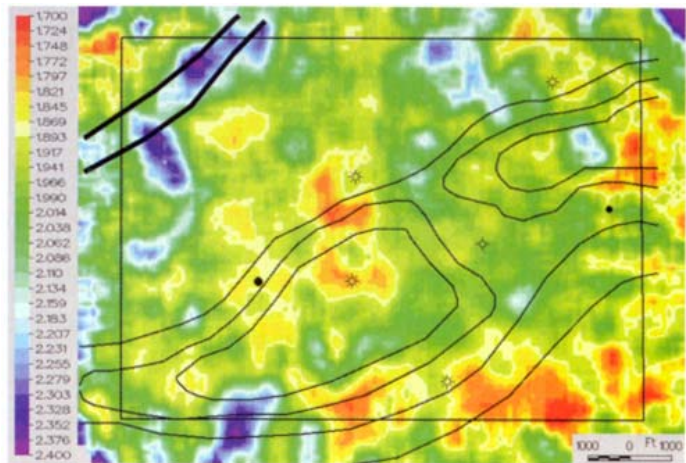
Рис.8. Разрез по данным PS -волн (Cave West), показывающий только кровли Morrow, Mississippian Chester и St. Genevieve.

На рис.7 и 8 показан профиль в направлении восток-запад, выделенный по данным P -волн и PS -волн соответственно. По данным обеих съемок выделены три опорных оси синфазности, соответствующие кровлям формаций Morrow, Mississippian Chester и St. Genevieve. Очевидных структурных маркеров для увязывания объемов данных нет, и данные PS -волн также имеют отчасти ограниченную полосу пропускания, что затрудняет визуальную увязку.

Для данной съемки, мы выделили карту среднеквадратичных амплитуд (здесь она не показана) в 30-миллисекундном окне из объема данных PS -волн, но она не показывает хорошего совпадения с мощностью песка, определенной по разбросанным скважинным данным. Мы исследовали также интервальные величины V_P/V_S , полученные на основе интерпретации двух осей синфазности выше и ниже Morrow на двух объемах. Затем были использованы изохроны для расчета V_P/V_S в интервале между осями синфазности. Поскольку точная увязка осей синфазности была неопределенной, карты носили такой же неоднозначный характер, как и среднеквадратичные амплитуды. На рис.9 показана карта, полученная в результате анализа корреляции интервальной величины V_P/V_S в положении каждой пары трасс в 100-миллисекундном окне, центрированном на кровле Morrow. Желтым и красным цветами обозначены низкие значения V_P/V_S , которые, возможно, представляют участки скопления песка. Черной рамкой ограничена площадь, где получены полнократные данные. Показан скважинный контроль и изолинии, представляющие общую мощность продуктивной едини-

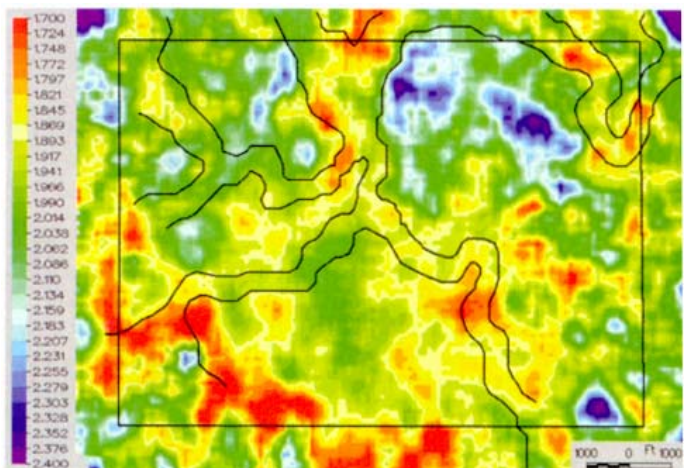
цы, песка С в Morrow. Шаг изолиний равен 10 мс; наибольшая мощность составляет около 35 футов. Тренд низких значений V_P/V_S отличается от первоначальных изолиний, построенных на основе разбросанных скважинных данных, но отдельные точки совпадают относительно хорошо. Две толстые линии в северо-западном углу определяют границы известного русла, заполненного глинистыми сланцами, в пределах формации Morrow, которое хорошо видно на данных P -волн. Повышенные значения внутри русла могут указывать на возросшее содержание глин.

Рис.9. Результаты анализа интервальных значений V_P/V_S , основанного на использовании корреляции, для 100-миллисекундного окна, центрированного по кровле формации Morrow (Cave West). Красный и желтый цвета представляют низкие интервальные значения V_P/V_S и, возможно, обозначают участки скопления песка. Показан скважинный контроль и изолинии, представляющие общую мощность продуктивного интервала (песков С). Шаг изолиний 10 футов, наибольшая мощность составляет около 35 футов. Две толстые линии в северо-западном углу представляют границы известного непродуктивного русла, заполненного глинистыми сланцами, в формации Morrow. Черной рамкой ограничена площадь, где получены полнократные данные.



Мы провели дополнительный анализ, не ассоциированный прямо с формацией Morrow, чтобы облегчить корреляцию осей синфазности P -волн и PS -волн. Ниже Morrow, в формации St. Genevieve появляется другая серия русел, заполненных глинистыми сланцами и врезанных в карбонатное основание. Границы русла были интерпретированы по данным P -волн, с применением методологии выявления границ. На рис.10 показан результат аналогичного анализа интервальных величин V_P/V_S в 100-миллисекундном окне на площади St. Genevieve, с наложенными интерпретированными границами русел. Здесь мы видим приемлемую корреляцию между руслами и пониженными значениями V_P/V_S , особенно в северо-восточном углу. Некоторые интересные элементы наблюдаются также на юго-западе, где данные P -волн были нечеткими, указывая на возможную древнюю береговую линию.

Рис.10. Анализ интервальных величин V_P/V_S , основанный на использовании корреляции, для 100-миллисекундного окна с центром на формации St. Genevieve. Красный и желтый цвета представляют низкие интервальные значения V_P/V_S . Наложены границы русел, интерпретированные по объему данных P -волн с применением методологии выявления границ; они показывают приемлемую корреляцию с пониженными значениями V_P/V_S .



Результаты анализа на уровне St. Genevieve показан для того, чтобы подчеркнуть два момента. Первый момент: результаты анализа укрепили наше доверие к соотношению время-глубина между объемами данных P -волн и PS -волн, поскольку на обоих объемах можно видеть один и тот же элемент. Второй момент: предлагается объединить метод выявления границ с анализом отношения V_P/V_S для получения полной картины геометрии русла и изменчивой литологии.

Buffalo Valley, Нью-Мексико. Третий пример представлен 3-D/3-C данными, зарегистрированными в округе Chaves, Нью-Мексико. При регистрации использовались параметры, приведенные в Таблице 1. Эта съемка несколько отличается от двух предыдущих съемок тем, что она первоначально была спроектирована и выполнена методом PS -волн. Здесь глубина формации Morrow составляет около 8500 футов; следовательно, были необходимы более длинные выносы. Другое существенное различие заключается в том, что на низкочастотном конце свип-сигнала использовалась частота 8 Гц. В проект было внесено незначительное изменение: вместо общепринятой геометрии «кирпичная кладка» использована диагональная геометрия, где профили источников были ориентированы с северо-востока на юго-запад. Это обеспечило более однородное распределение выносов на площади съемки. В центре площади съемки кратность достигает 60-70.

Дополнительно к поверхностной сейсморазведке, в скважине, расположенной в юго-восточном углу площади съемки, был выполнен полный комплекс ГИС. Одновременно с сейсмическими данными, регистрировались данные 3-D/3-C ВСП, с применением тех же источников. Однако интеграция ВСП с поверхностной сейсморазведкой в настоящее время исследуется. Мы надеемся, что она даст более точное соотношение время-глубина для объемов данных P - и PS -волн, а также детальную литологическую информацию в окрестности скважины.

Качество данных P - и PS -волн хорошее, увязка особенностей очень хорошая, что позволяет выполнить надежную визуальную увязку. На рис.11 показаны разрезы по данным методов P - и PS -волн вдоль линии, ориентированной с севера на юг. В целях упрощения сравнения, разрез по данным метода PS -волн преобразован в приблизительные времена пробега P -волн. Желтыми стрелками обозначена кровля формации Morrow. Обратите внимание на улучшенную разрешающую способность на малых глубинах, полученную по данным S -волн. Она связана с более низкими скоростями и, следовательно, с меньшими длинами волн. На рис.12 показаны результаты основанного на применении корреляции анализа, который использовался для определения средней величины V_P/V_S в центре площади съемки. Хорошая визуальная увязка предполагает наличие выраженного тренда средней величины V_P/V_S .

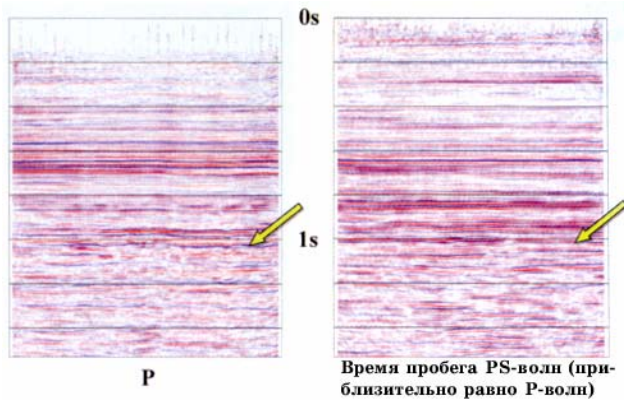


Рис.11. Разрезы по данным методов *P*- и *PS*-волн (площадь Buffalo Valley). Желтыми стрелками отмечена кровля формации Morrow. Улучшенная разрешающая способность на разрезе по методу *PS*-волн, который преобразован во времена пробега *P*-волн, связана с пониженными скоростями и меньшими длинами восходящих *S*- волн.

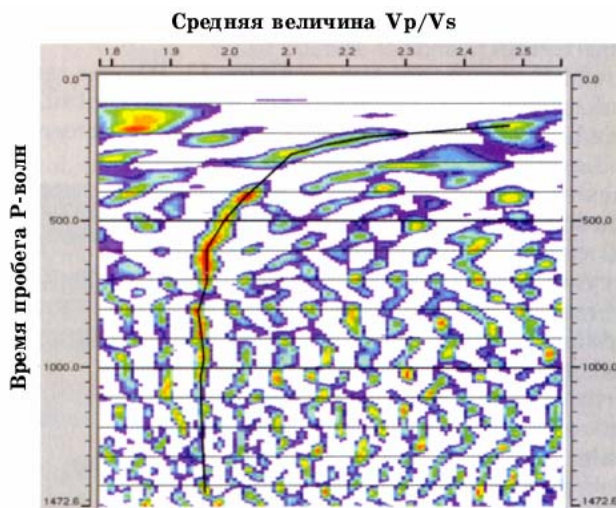


Рис.12. Результаты основанного на корреляции анализа V_P/V_S вблизи центра площади съемки. Сплошная черная линия показывает интерпретированный тренд средней величины V_P/V_S .

присутствие более чистых песков. Для этого случая, для идентификации границ врезанной долины по данным *P*-волн и для направления процесса интерпретации горизонта Barnett потребовался обширный скважинный контроль, поскольку основанный на использовании корреляции анализ V_P/V_S на этом же уровне дал неоднозначные результаты.

Опорные горизонты показаны на линиях пересечения с разрезами по профилям, выделенным из объемов данных *P*- и *PS*-волн (рис.13 и 14). Кровля интересующей нас зоны – формации Atoka – обозначена фиолетовым цветом, а подошва врезанной долины (горизонт Chester) – красным цветом. Внутри долины, серия продуктивных пачек (packages) песка Morrow определяется как Upper, Middle и Lower Morrow. На рисунках Upper Morrow обозначена зеленым цветом. Опорная ось синфазности в глинистых сланцах Barnett выделена розовым цветом. Карта изохрон по данным *P*-волн между Atoka и Chester четко оконтуривает врезанную долину (рис.15). Амплитуды по Upper Morrow, выделенные из объемов данных *P*- и *PS*-волн, оказались неубедительными.

Интерпретация опорных горизонтов Atoka и Barnett выше и ниже коллектора Morrow позволяет рассчитать интервальное значение V_P/V_S , оценивая полные вертикальные времена пробега по каждому объему. Полученная карта V_P/V_S для этого интервала (рис.16) показывает совершенно определенный тренд низких величин V_P/V_S в границах врезанной долины, указывая на возможное

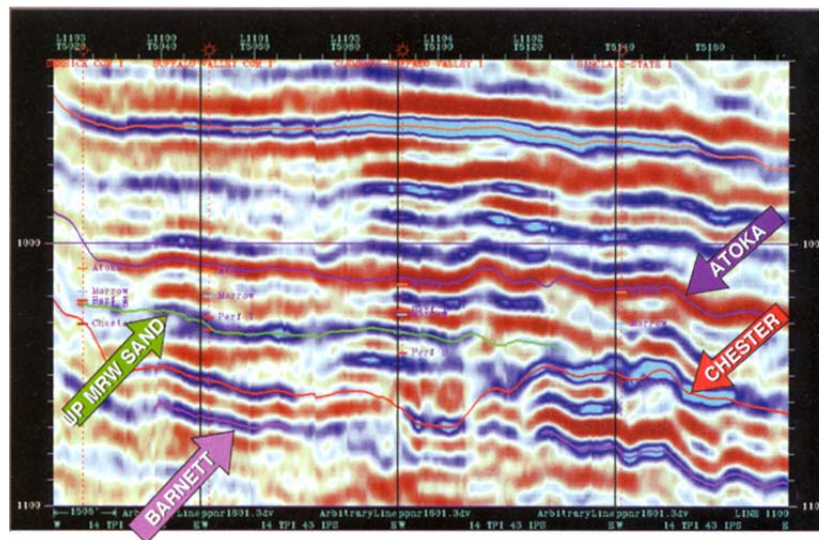


Рис.13. Разрез, выделенный из объема данных *P*-волн (площадь Buffalo Valley) со скважинным контролем. Опорные горизонты включают Atoka (фиолетовый цвет), Chester (красный цвет), Upper Morrow (зеленый цвет) и глинистый сланец Barnett (розовый цвет).

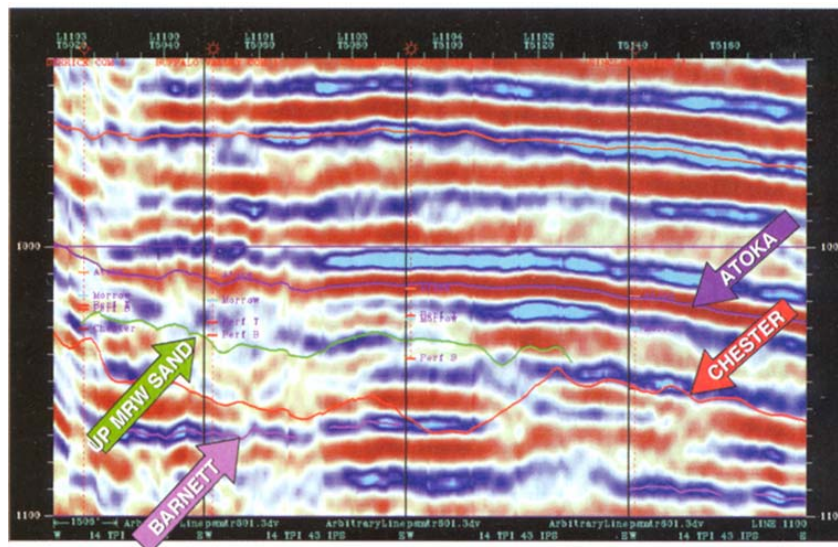


Рис.14. Разрез, выделенный из объема данных *PS*-волн (площадь Buffalo Valley) со скважинным контролем и теми же опорными горизонтами, что и на рис.13.

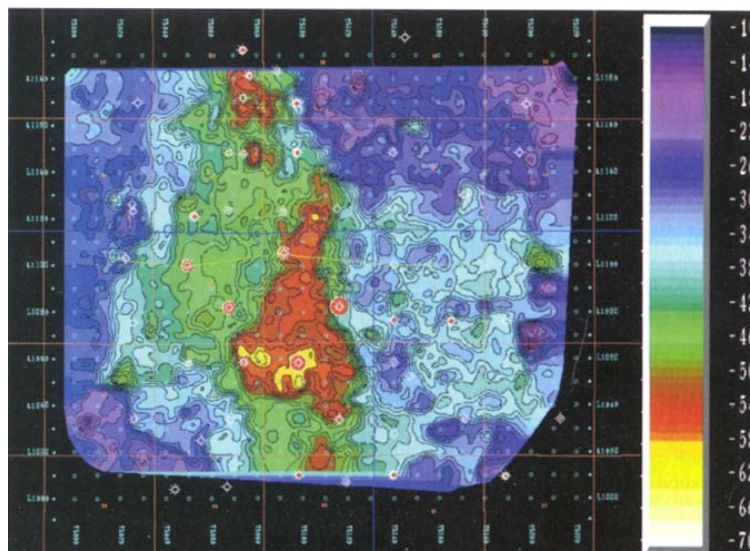


Рис.15. Карта изохрон по данным метода *P*-волн между Atoka и Chester. Красный и желтый цвета обозначают большие значения изохрон и четко оконтур-

ривают врезанную долину.

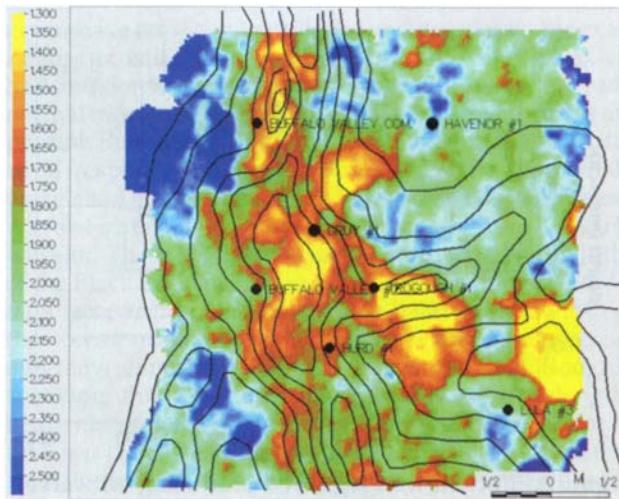


Рис.16. Карта интервальных значений V_p/V_s , основанная на сопоставлении изохрон выше и ниже пачки (unit) Morrow (Атока и глинистый сланец Barnett). Желтым и красным цветами обозначены низкие значения V_p/V_s и показан тренд внутри границ врезанной долины. Низкие значения V_p/V_s указывают на возможное присутствие более чистых песков, а повышенные значения V_p/V_s предполагают более высокое содержание глинистого сланца. Черные изолинии представляют общую мощность песка по данным скважинного контроля.

Обсуждение и выводы. Можно сделать несколько выводов относительно пользы данных PS -волн для оценки формации Morrow и методов/средств интерпретации, применяемых для анализа. Во-первых, из вышесказанного следует, что мы успешно регистрируем энергию обменных волн, достаточную для интерпретации на всех трех площадях. Однако качество данных может существенно изменяться и, как можно ожидать, связано с особенностями регистрации данных. Хотя все параметры схемы имеют значение, представляется, что наиболее значимыми могут быть частота свип-сигнала и кратность.

Мы полагаем также, что полученная нами временная разрешающая способность не соответствует задаче разрешения отдельных продуктивных песков внутри формации Morrow. Чтобы непосредственно выявлять эти маломощные пески, необходимо повысить преобладающую частоту PS -волн не менее чем вдвое по сравнению с частотой, которая применялась в данных работах. Дальнейшие усилия следует сосредоточить на повышении частотного состава и улучшении общей интенсивности сигнала. Этого можно достичь, определяя различные параметры свип-сигнала, исследуя альтернативные типы источников (ВВ, источник S -волн), или повышая общую кратность съемки.

Хотя мы находимся на пределе разрешающей способности для всех трех съемок, мы все же выявляем некоторый отклик, связанный с руслами Morrow. Однако остается неясным, имеем мы дело с эффектом резонанса, или с каким-то другим явлением интерференции, таким как двойное лучепреломление S -волн.

Мы также исследовали значение скважинной информации в установлении привязки время-глубина. Это особенно важно на площадях с относительно пологим залеганием слоев и отсутствуют структурные особенности, которые могли бы облегчить корреляцию. В условиях отсутствия дополнительной информации, основанный на использовании корреляции анализ V_p/V_s представляет собой эффективное средство корреляции объемов P - и PS -волн. Такой способ свободен от невязок, свойственных визуальному подходу, и считается более устойчивым, нежели общепринятые методы изохрон. Он также позволяет выполнять детальный анализ интервальной величины V_p/V_s в отдельном окне для каждой точки изображения в пределах площади съемки.

На площади Eva South, структурные элементы, такие как разломы, были использованы для подтверждения корреляции между объемами. После того, как была определена увязка, среднеквадратичные амплитуды из объема дан-

ных PS -волн продемонстрировали заметную связь с эффективной мощностью по данным скважинного контроля, хотя для понимания истинного характера этого коллектора требуется выполнить дополнительный объем работ.

Работы на площади Cave West позволили по-другому взглянуть на интерпретацию данных метода PS -волн. Хотя среднеквадратичные амплитуды не продемонстрировали связи с картами общей мощности песков, карты интервальный величин V_P/V_S показали некоторую связь с отдельными скважинами; тем не менее, предполагается другой тренд. Кроме того, использование методики выявления границ совместно с анализом V_P/V_S может оказаться полезным для ограничения литологических изменений.

Наконец, результаты работ на площади Buffalo Valley, которые планировалось проводить методом PS -волн, демонстрируют намного лучшее качество сигнала, нежели в двух предыдущих примерах. Это позволяет выполнять достоверную корреляцию между объемами. Анализ интервальных величин V_P/V_S показывает интересные тренды, качественно подтвержденные данными скважинного контроля. Привлечение скважинной информации способно также обеспечить необходимую связь между временем пробега сейсмических волн и глубиной, и дополнит интерпретацию ценной литологической информацией.

Мы продемонстрировали разнообразие методик интерпретации данных PS -волн. Некоторые из них основываются на разностях времен пробега, ассоциированных с распространением S -волн через чистые пески. Основу других методик составляют пространственные изменения амплитуд PS -волн. Однако, исходя из нашего опыта работ на этих трех площадях, мы полагаем, что нет единой методики, применимой ко всем данным, и что в каждом случае необходимо привлечение другой геологической информации для данной площади.

Рекомендуемая литература.

Suggested reading. "Interpreting channel sands with 3C-3D seismic data" by Margrave et al. (*TLE*, 1998). "Applications for vector coordinate systems of 3-D converted-wave data" by Gaiser (*TLE*, 1999). "The Alba Field ocean bottom cable seismic survey: Impact on development" by MacLeod et al. (*TLE*, 1999). "Using converted shear waves to image reservoirs with low impedance contrast" by Engelmark (*TLE*, 2000). \blacksquare

Совместная инверсия данных PP -и PS -волн

*Gary F. Margrave and Robert R. Stewart, Crewes, University of Calgary
Jeffrey A. Larsen, Husky Energy, Calgary, Alberta, Canada*

Мы представляем полевой пример совместной инверсии данных PP - и PS -волн с применением методики взвешенного суммирования. Пример относится к месторождению Blackfoot Field (юго-восток Альберты, Канада), владельцем и разработчиком которого является компания PanCanadian Petroleum. Объектом разведочных работ является система русел нижнемелового возраста на глубине приблизительно 1.4 км (рис. 1).



Рис.1. Система глауконитовых русел на нефтяном месторождении Blackfoot (Альберта) представляет собой последовательность заполненных песком и глиной долин, врезанных в нижнемеловые и миссисипские карбонаты. На месторождении интерпретируются верхнее и нижнее русла, которые считаются перспективными и разделены руслом, заполненным непористым лититом.

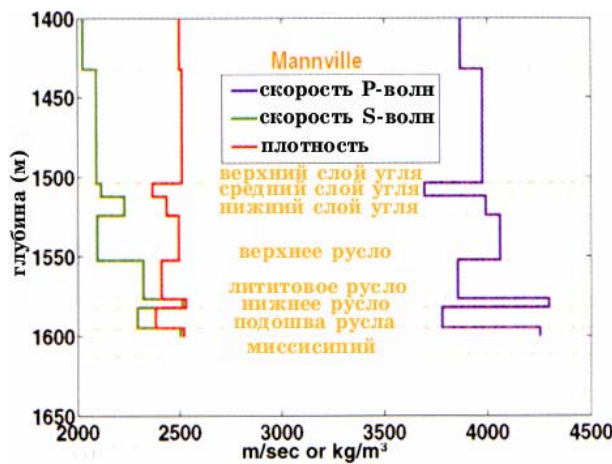


Рис.2. Блочная форма данных ГИС для добывающей скважины на месторождении Blackfoot.

Эти глауконитовые русла, заполненные песком или глинистым сланцем, прослеживаются по всему региону, и, поскольку имело место множество эпизодов формирования русел, они могут накладываться одно поверх другого. На месторождении Blackfoot, интервал русел имеет мощность около 40 м и ширину 100 м. Отмечается хорошая пористость в верхнем и в нижнем руслах, которые разделены руслом, заполненным плотным лититом. Верхнее русло, там, где оно присутствует, благоприятно для газа, а нижнее русло, в общем случае, благоприятно для нефти. Когда поровый флюид в русловых песках представляет собой сжимаемый углеводород вместо несжимаемой воды, объемная сжимаемость уменьшается, что приводит к изменению сигнатуры данных МОВ. Поскольку продольные волны и поперечные волны «опознают» различные свойства пород и поровых флюидов, совместное использование данных *PP*- и *PS*-волн может обеспечить уверенное разделение пород по литологическому составу.

Отраженные *PP*- и *PS*-волны. Преобразование одного типа упругой волны (*P* или *S*) в другой тип после отражения или прохождения на границе раздела описывается уравнениями Zoeppritz. Эти уравнения являются алгебраически сложными, и было бы непрактично воспроизводить их здесь. Вместо этого мы представим концепции и приближительные выражения. Мы приглашаем читателя посетить наш веб-сайт, <http://www.crewes.org>, и исследовать уравнения, используя наш анализатор Zoeppritz.

Рассмотрим две однородные упругие среды, разделенные горизонтальной плоской границей, и плоскую волну (*P* или *S*), которая падает на границу раздела. Обозначим через α, β, ρ значения скоростей *P*-волн, *S*-волн и плотности, осредненные по границе раздела, и $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\rho$ – разности этих физических величин. Коэффициент отражения *P*-волны обычно выражается приближением *Aki* и Richards как $R_{pp} \approx c_\alpha f_\alpha + c_\rho f_\rho + c_\beta f_\beta$. Величины $f_\alpha = \Delta\alpha / \alpha$, $f_\rho = \Delta\rho / \rho$, $f_\beta = \Delta\beta / \beta$ представляют собой флуктуации двух скоростей и плотности, а $c_\alpha, c_\rho, c_\beta$ – коэффициенты, которые в значительной степени зависят от углов падения *P*-волны и *S*-волны и от α, β, ρ , но не от

$\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\rho$. Зависимость между c_ρ, c_β определяется как $c_\rho = 0.5 + 0.5c_\beta$. Отметим, что это относительные, а не абсолютные флуктуации, но мы предпочитаем использовать выражение в простых слагаемых.

При нормальном падении, $c_\alpha = c_\rho = 0.5$, и $c_\beta = 0$, так что R_{pp} несет равную информацию о f_α и f_ρ , и не несет никакой информации о f_β ; однако по мере движения к падению, отличному от нормального, картина изменяется. Для фиксированной глубины в горизонтально-слоистой среде, увеличение угла падения означает также увеличение выноса. При возрастании угла падения, происходит быстрое увеличение c_α по нелинейному закону, тогда как c_α и c_β сильно уменьшаются. Таким образом, c_α быстро становится большей положительной величиной, c_β изменяется от нуля до большой отрицательной величины, а c_ρ изменяется от 0.5 до отрицательных значений. Следовательно, если $f_\alpha, f_\rho, f_\beta$ имеют один знак, плотность и скорость S-волн стремятся оказать действие, противоположное действию скорости P-волн. На кровле верхнего русла (рис.2), f_α и f_ρ уменьшаются, т.е. оказывают противодействие друг другу, а f_β возрастает и усиливает действие P-волн. На подошве нижнего русла, все три флуктуации увеличиваются, в результате чего реакция P-волн сводится к минимуму.

Aki и Richards дают также приблизительную запись коэффициента отражения для P-волны, преобразованной в S-волну: $R_{ps} \approx d_\beta f_\beta + d_\rho f_\rho$. Как и ранее, коэффициенты d_β, d_ρ зависят от угла падения и средних (фоновых) упругих параметров. Коэффициенты плотности и скорости S-волн не являются полностью независимыми, хотя связывающее их соотношение становится сложнее: $d_\rho = -\sin \theta / (2 \cos \varphi) + 0.5d_\beta$ – угол падения P-волны; φ – угол отражения S-волны. d_β и d_ρ равны нулю при нормальном падении и в общем случае являются отрицательными при углах падения менее 20° или 30° . Фактически, для $\alpha / \beta \approx 2$, эти коэффициенты почти равны для углов менее 20° . Обычно d_β и d_ρ возрастают по абсолютной величине до относительно большого отрицательного числа в диапазоне $30-50^\circ$, после чего их тренд становится другим. Поскольку на кровле верхнего русла f_β и f_ρ имеют противоположные знаки, R_{ps} стремится к малой величине. На подошве нижнего русла флуктуации имеют один и тот же знак (рис.2), и их величина сходна с величиной на кровле коллектора. Следовательно, частные отражательные способности усиливаются, что обуславливает более интенсивный отклик.

Мы наложили этот разрез синтетическими сейсмограммами PP- и PS-волн, которые показаны на рис.3. Сейсмограммы содержат только первичные отраженные волны, амплитуды которых рассчитаны по уравнениям Zoeppritz, без потерь при распространении и сферическом расхождении; введена поправка за нормальное приращение, но присутствуют эффекты растяжения, вызванного приращением (moveout stretch effects). Обе сейсмограммы первоначально были созданы как широкополосные отклики, а затем свернуты соответствующими импульсами. Сейсмограмма PP-волн имеет нуль-фазовый импульс с частотой 10-80 Гц, а сейсмограмма PS-волн – импульс с частотой 10-40 Гц. Эти варианты моделируют восстановленные значения ширины полосы данных Blackfoot. Из опыта наших работ следует, что ширина полосы данных PS-волн,

зарегистрированных на суше, составляет приблизительно половину ширины полосы соответствующих данных *PP*-волн. Тем не менее, как показывают эти сейсмограммы, они имеют сходную разрешающую способность. Грубо говоря, это последовательность *S*-волн, длины которых составляют около половины длин *P*-волн, поскольку типичное отношение скоростей $\alpha / \beta = 2$. Сейсмограммы отображены таким образом, что возрастание импеданса выглядит на них как положительная амплитуда.

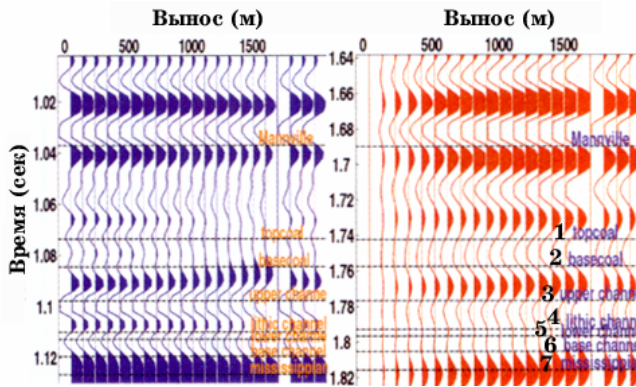


Рис.3. Синтетические сейсмограммы *PP*-волн (синий цвет) и *PS*-волн (красный цвет) для данных ГИС на рис.2. Для получения сейсмограмм использовалась обычная (не блоковая) форма данных. На каждой сейсмограмме, три трассы справа представляют собой трехкратное повторение суммарной трассы. Сейсмограмма *PP*-волн имеет нуль-фазовый импульс с частотой 10-80 Гц, а сейсмограмма *PS*-волн – нуль-фазовый импульс частотой 10-40 Гц. (1- верхний слой угля; 2- нижний слой угля; 3- верхнее русло; 4- лититовое русло; 5- нижнее русло; 6- подошва русла; 7- миссисипий)

Инверсия данных *PP*-волн методом наименьших квадратов. Считается, что идея инверсии данных *PP*-волн методом наименьших квадратов принадлежит Smith и Gidlow (1987), которые показали, что аппроксимация Аки и Richards для R_{pp} может быть инвертирована для флуктуаций $f_\alpha, f_\rho, f_\beta$. Предполагается, что данные отраженных *PP*-волн дают оценки R_{pp} в диапазоне выносов, и для каждого выноса можно записать уравнение:

$$R_{pp}(x(\theta)) = c_\alpha(\theta)f_\alpha + c_\rho(\theta)f_\rho + c_\beta(\theta)f_\beta$$

где θ – угол падения. Затем, учитывая все возможные выносы, можно записать матричное уравнение:

$$\begin{bmatrix} R_{pp}(x_1) \\ R_{pp}(x_2) \\ \dots \\ R_{pp}(x_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_\alpha(\theta_1) & c_\rho(\theta_1) & c_\beta(\theta_1) \\ c_\alpha(\theta_2) & c_\rho(\theta_2) & c_\beta(\theta_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ c_\alpha(\theta_n) & c_\rho(\theta_n) & c_\beta(\theta_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\rho \\ f_\beta \end{bmatrix}$$

Левая часть этого уравнения – вектор-столбец, представляющий амплитуды определенной отраженной *PP*-волны в функции выноса. Матрица ($n \times 3$) в правой части содержит коэффициенты $c_\alpha, c_\rho, c_\beta$, рассчитанные при соответствующем угле падения для каждого выноса. Эта матрица приблизительно известна, если имеется модель скорости во вмещающих породах, через которую можно построить лучи для определения углов падения. Запись этого уравнения в символической форме имеет вид: $R = Cf$, его обратная величина, рассчитанная методом наименьших квадратов: $f = AR$, где $A = (C^T C)^{-1} C^T$. Smith и Gidlow смогли рассчитать содержимое матрицы A аналитически и показали, что алгоритм $f = AR$ представляет собой взвешенную сумму. Таким образом, f_α , в принципе, можно рассчитать по уравнению вида

$$f_{\alpha} = \sum_{k(\text{offset})} a(\theta_k) R_{pp}(\theta_k)$$

(где offset – вынос), со сходными уравнениями, имеющими различные весовые коэффициенты, для f_{β}, f_{ρ} . В этом уравнении, суммирование выполняется по всем имеющимся выносам, а веса $a(\theta_k)$ – известные функции скорости во вмещающих породах и угла падения для k -того выноса. Обычно считается, что общее влияние плотности на R_{pp} невелико, и это означает, что инверсия для f_{ρ} будет проблематичной в случае данных, осложненных помехами. Smith и Gidlow предложили, используя соотношение Гарднера, преобразовать зависимость от плотности в дополнительный элемент скорости P -волн. Другой подход предлагает Fatti и др. (1994), который переформулировал уравнения с целью инвертирования флуктуаций, ассоциированных с характеристическими сопротивлениями P - и S -волн: $f_I = \Delta(\rho\alpha)/(\rho\alpha)$, и $f_J = \Delta(\rho\beta)/(\rho\beta)$. Тем самым удастся избежать использования правила Гарднера, но имеется независимый элемент f_{ρ} , который должен быть проигнорирован. Благоприятным фактором является то, что коэффициент этого элемента обычно мал.

При наличии оценок флуктуаций, можно рассчитать другие литологические индикаторы, f_{α}, f_{β} или f_I, f_J . К ним относятся флуктуация псевдокоэффициента Пуассона, $f_{\alpha} - f_{\beta}$, которая также называется флуктуацией отношения скоростей P - и S -волн, $r = \alpha / \beta$, показатель флюида Smith-Gidlow, $f_{\alpha} - 1.16 f_{\beta} r$, и относительные параметры Lamé (Goodway и др., 1997). Все эти величины имеют значение для распознавания литологии.

Совместная инверсия данных PP - и PS -волн методом наименьших квадратов. Stewart (1990) расширил метод Smith-Gidlow, который использует отраженные PP - и PS -волны для ограничения флуктуаций $f_{\alpha}, f_{\beta}, f_{\rho}$. Larsen и др. (1998) и Larsen (1999) представили практическую реализацию этих идей, примененных к 3-C/3-D съемке Blackfoot. Подобно Smith-Gidlow, Stewart вывел точные аналитические формы для весов суммирования в данных PP - и PS -волн. Алгебраические выражения для этих весов слишком сложны, и не приводятся в настоящей статье. Чтобы получить полное описание тезисов Larsen, обратитесь по адресу: <http://www.crewes.org>. В сущности, флуктуации рассчитываются по уравнению вида

$$f_{\alpha} = \sum_{k(\text{offset})} a(\theta_k) R_{pp}(\theta_k) + \sum_{k(\text{offset})} b(\theta_k) R_{ps}(\theta_k)$$

где θ_k – угол падения P -волны для k -того выноса, $a(\theta_k)$ – веса суммирования для данных отраженных PP -волн, $b(\theta_k)$ – веса для данных отраженных PS -волн. По сходным уравнениям, с другими весами, можно рассчитать f_{β} или f_{ρ} . Веса для данных отраженных PP -волн, $a(\theta_k)$, в этом выражении, в общем случае, отличаются от аналогичных весов в инверсии с применением только данных PP -волн.

Как и в случае *PP*-волн, часто оказывается предпочтительным обойти расчет f_p . Larsen (1999) показывает, что возможен расчет флуктуаций импеданса по Smith-Gidlow, где используется правило Гарднера, или по Fatti. В последнем случае, снова появляется элемент f_p , которым нужно пренебречь. Интересно, что инверсия для f_α, f_β, f_p более выполнима с данными *PP*- и *PS*-волн, хотя мы здесь это не рассматриваем.

Практическая реализация. Для сочетания данных *PP*- и *PS*-волн в инверсии необходимо, чтобы два типа данных были мигрированы, и чтобы была установлена корреляция осей синфазности. Обоим этим условиям можно удовлетворить, выполнив миграцию глубин перед суммированием объемов данных *PP*- и *PS*-волн с применением правильных скоростей *P*- и *S*-волн. Однако для этого необходим значительный объем вычислений и программные средства, которые не всегда имеются. Поэтому мы реализовали более практичный метод, где используется довольно стандартные технологии.

Во-первых, мы разработали последовательности обработки данных *PP*- и *PS*-волн (от редакции до суммирования), используя общепринятые методы. Данные *PP*-волн суммировались по CMP (OCT – общей средней точке), а данные *PS*-волн – по CCP (common conversion point – общей точке преобразования). Для сохранения информации об изменении отражательной способности с выносом, каждый набор данных был сегментирован на пять сумм с ограниченными выносами. Для данных *PP*-волн, диапазон выносов от 0 до 1350 м был разделен на пять перекрывающихся бинов шириной 450 м, а для данных *PS*-волн были использованы 700-метровые бины (пределы изменения выносов – от 0 до 2100 м). При выборе пяти диапазонов выносов руководствовались исключительно желанием ограничить объем работы.

После суммирования, десять объемов 3-D данных прошли процедуру улучшения качества осей синфазности, которая заключалась в изменяющемся во времени спектральном отбеливании (TVSF – time-variant spectral whitening), затем последовало пространственное прогнозирование (*f*-*x*-*y*) и миграция времен данных *PP*- или *PS*-волн после суммирования. После миграции была выполнена корреляция осей синфазности путем увязки синтетических сейсмограмм *PP*- и *PS*-волн (рис.3). Сейсмограммы были сформированы по тому же диапазону выносов, что и данные *MOB*, и суммированы в такие же бины выносов. После корреляции осей синфазности, пять объемов данных *PP*- и *PS*-волн были сглажены по опорной оси синфазности над руслом, и преобразованы в глубины относительно этой оси синфазности.

Чтобы воспрепятствовать суммированию помех, мы включили в обработку выравнивание амплитуд от трассы к трассе (выравнивание трасс) перед суммированием. Процесс восстановления амплитуд, имевший целью восстановление среднего поведения *AVO* *PP*- и *PS*-волн, был конечным шагом перед инверсией. Для каждого выноса, среднеквадратичная амплитуда каждой трассы данных *MOB* была выровнена так, чтобы совпадала с амплитудой соответствующей синтетической сейсмограммы в упругой среде. Например, каждая трасса данных *PS*-волн, подвергшихся биннингу в диапазоне выносов от 1050 до 1750 м, была согласована по среднеквадратичной амплитуде с откликом синтетической сейсмограммы *PS*-волн, который представляет суммарный отклик *PS*-волн по этим выносам.

На этой стадии, пять объемов 3-D данных *PP* и *PS*-волн могут рассматриваться как оценки R_{pp} и R_{ps} в ограниченной полосе. Поскольку они были преобразованы в глубины относительно этой оси синфазности, срезы по горизонту этих

объемов, выполненные непосредственно под опорной глубиной, должны соответствовать этому же стратиграфическому уровню. Затем на каждой требуемой глубине была реализована схема взвешенного суммирования. В частности, были сформированы оценки $f_I = \Delta(\rho\alpha)/(\rho\alpha)$ и $f_J = \Delta(\rho\beta)/(\rho\beta)$. Флуктуации псевдокоэффициента Пуассона были оценены как $f_I - f_J$.

Результаты. На рис.4 показан результат последовательности тестовых инверсий синтетических данных для одной границы раздела. Для получения точных значений R_{pp} и R_{ps} были использованы полные уравнения Zoeppritz. В случае отсутствия помех, инверсия данных *PP*-волн и совместная инверсия данных *PP*- и *PS*-волн дает идентичные оценки флуктуаций. Если к величинам R_{pp} и R_{ps} прибавить случайные помехи, превосходство метода совместной инверсии становится очевидным. Хотя оба метода ограничивают одинаковое количество неизвестных, метод совместной инверсии использует в два раза больше данных.

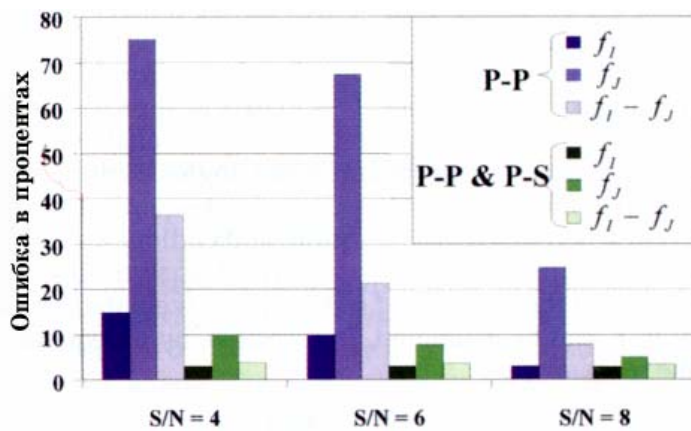


Рис.4. Результаты сравнения инверсии данных *PP*-волн и одновременной инверсии данных *PP*- и *PS*-волн для простой модели, состоящей из одной отражающей поверхности с амплитудами отраженных волн, рассчитанными по точным уравнениям Zoeppritz. Ошибка в процентах показана для трех различных величин сигнал/помеха (S/N).

На рис. 5 и 6 показаны веса, рассчитанные для оценки $f_I = \Delta(\rho\alpha)/(\rho\alpha)$ и $f_J = \Delta(\rho\beta)/(\rho\beta)$ по методу Smith и Gidlow для *PP*-волн и по совместному методу для *PP*- и *PS*-волн. Модель скорости во вмещающих породах была получена путем сильного сглаживания скоростей по данным двухкомпонентного АК на Blackfoot. Для верхней части разреза, где данные ГИС отсутствовали, был включен однородный слой, который дал наблюдаемые полные времена пробега. Для оценок f_I и f_J , в методе *PP*-волн результаты дальних выносов вычитаются из результатов ближних выносов. Совместный метод дает некоторое отличие R_{pp} на малых глубинах, но стремится к различию R_{pp} от R_{ps} на больших глубинах. Глубина системы русел (рис.2) представляет собой нижний предел этих величин.

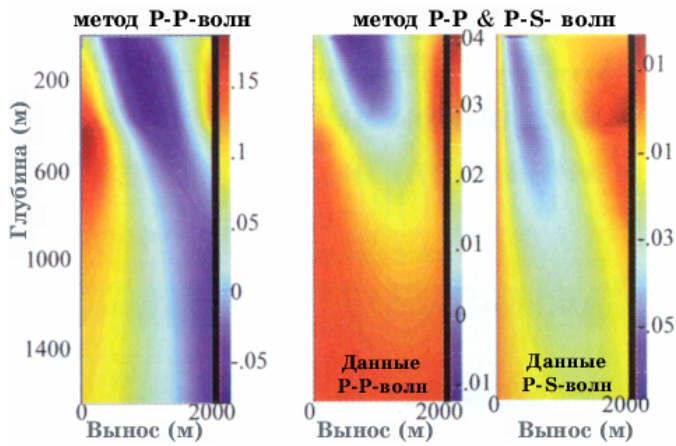


Рис.5. Суммарные веса, требуемые для оценки $f_I = \Delta(\rho\alpha)/(\rho\alpha)$, показаны для метода PP-волн (слева) и для совместного метода PP- и PS-волн (справа). Для совместного метода требуются два множества весов – для данных PP- и PS-волн. Обратите внимание на цветовую шкалу в правой части каждого графика.

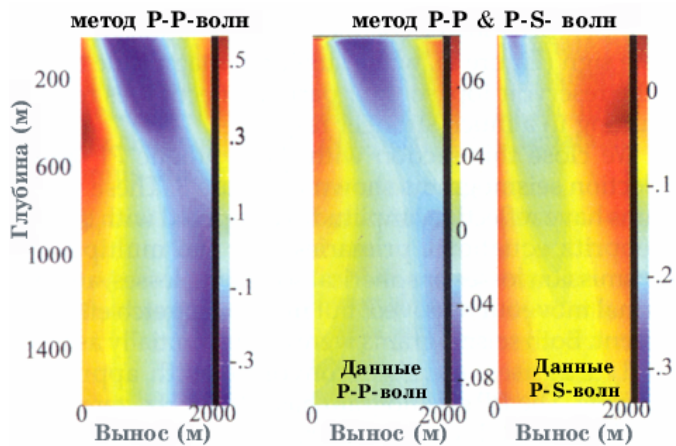


Рис.6. Веса суммирования (инверсия методом наименьших квадратов), требуемые для оценки $f_J = \Delta(\rho\beta)/(\rho\beta)$, показаны для метода PP-волн (слева) и для совместного метода PP- и PS-волн (справа).

На рис.7 показана оценка f_I на стратиграфическом уровне кровли верхнего русла. Совместный метод показывает более крупную и резкую аномалию, ассоциированную с добычей, нежели метод PP-волн. Вопрос о том, связана эта аномалия с добычей, или она присутствует в незатронутой среде, не является предметом данной работы. На рис.8 показана соответствующая оценка f_J . По данным PP-волн, получаются оценки преимущественно $f_J > -0.02$, тогда как совместная оценка дает большие области $f_J < -0.02$. Области больших отрицательных величин f_J являются признаком низкой жесткости и интерпретируются как глины. Инверсия совместным методом предполагает наличие относительно жесткого песчаного русла в регионально распространенных глинах, что согласуется с моделью Blackfoot. На рис.9 можно видеть оценку псевдокоэффициента Пуассона, $f_I - f_J$. Интересно, что аномалия, ассоциированная с продуктивными скважинами, сейчас намного лучше согласуется между двумя методиками, нежели для любого из двух предыдущих рисунков. Однако ассоциация продуктивных скважин с низкими значениями $f_I - f_J$ больше соответствует совместной инверсии, особенно для скважин 01-08 (внизу в центре) и 13-16 (вверху справа). Скважина 05-16 выглядит аномальной на обоих изображениях $f_I - f_J$.

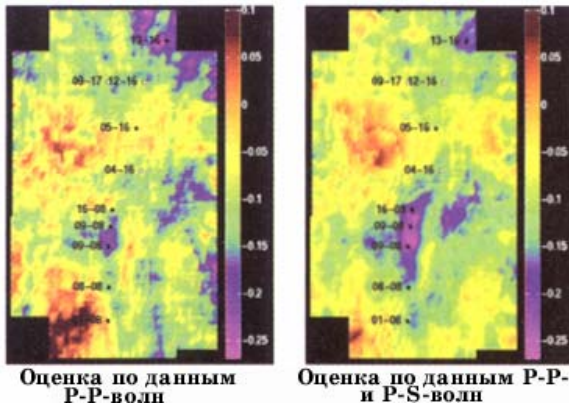


Рис.7. Флуктуация характеристического сопротивления продольных волн по кровле верхнего русла: оценка только по данным *PP*-волн (слева) и по данным *PP*- и *PS*-волн (справа). Черными кружками обозначены продуктивные скважины, белыми кружками – сухие скважины. Как показывает тренд добывающих скважин, продуктивное русло имеет ориентировку юг-север (внизу в середине рисунка).

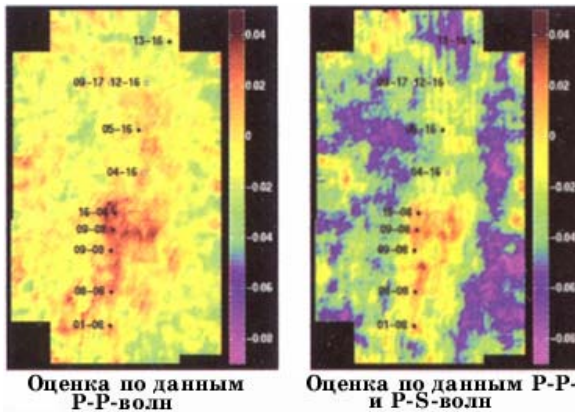


Рис.8. Флуктуация характеристического сопротивления поперечных волн по кровле верхнего русла: оценка по данным *PP*-волн (слева) и по данным *PP*- и *PS*-волн (справа). При дальнейшем обсуждении обращайтесь к рис.7.

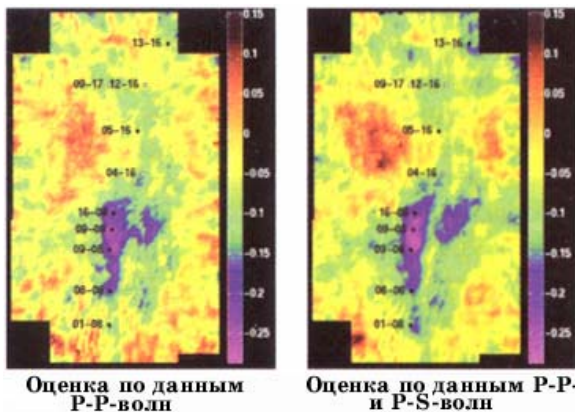


Рис.9. Флуктуация псевдокоэффициента Пуассона по кровле верхнего русла: оценка по данным *PP*-волн (слева) и по данным *PP*- и *PS*-волн (справа). Рисунок представляет собой

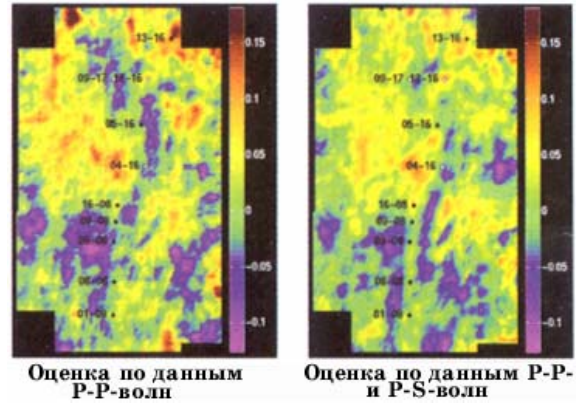


Рис.10. Флуктуация характеристического сопротивления продольных волн по нижнему руслу: оценка только по данным *PP*-волн (слева) и по данным *PP*- и *PS*-волн (справа).

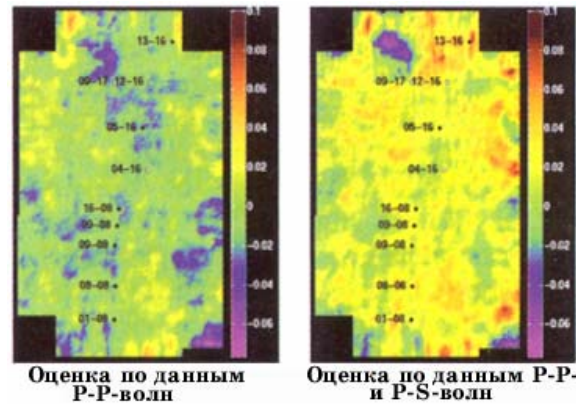


Рис.11. Флуктуация характеристического сопротивления поперечных волн по нижнему руслу: оценка только по данным *PP*-волн (слева) и по данным *PP*- и *PS*-волн (справа).

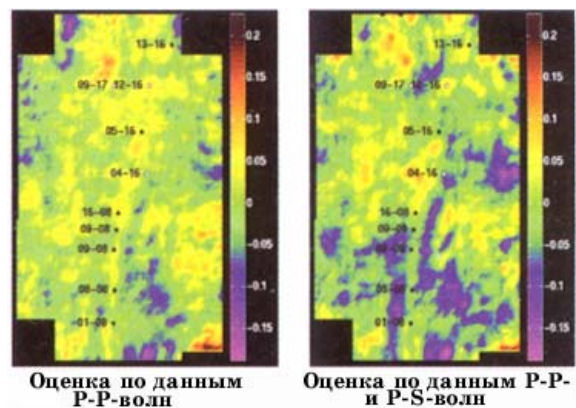


Рис.12. Флуктуация псевдокоэффициента Пуассона по подошве нижнего русла: оценка по данным *PP*-волн (слева) и по данным *PP*- и *PS*-волн (справа).

Из вышесказанного следует, что совместный метод дает резуль-

результат вычитания карты на рис.8 из карты на рис.7.

таты лучшего качества, сравнительно с методом *PP*-волн, для f_I и f_J , но оценка $f_I - f_J$ лишь ненамного лучше. Иначе говоря, метод

PP-волн чувствителен к изменениям коэффициента Пуассона, но менее эффективен при отдельной оценке f_I и f_J . Метод *PP*-волн должен рассчитывать и вычитать f_J из R_{pp} для получения f_I , и на него сильное влияние оказывают помехи, поскольку f_J стремится быть малой долей f_I . Однако ошибки в оценке f_J стремятся вызвать компенсирующие ошибки f_I , поэтому разность $f_I - f_J$ является относительно устойчивой. Совместный метод дает более прямую оценку f_J , которая позволяет дать лучшую оценку f_I .

На рис.10 показаны оценки f_I для подошвы нижнего русла. Линейность, ассоциированная с трендом продуктивных скважин, хорошо видна на результатах совместной инверсии, и в основном отсутствует на результатах инверсии *PP*-волн. Трудно сказать точно, почему эта линейность должна быть численно близка к нулю, хотя мы отмечаем, что мощности русел, в общем случае, меньше преобладающей длины волны по данным *PP*- и *PS*-волн, так что мы видим резонансные характеристики (tuned responses). На рис.11 можно видеть отклик f_J , а на рис.12 – оценку $f_I - f_J$. На рис.12 оба метода ассоциируют линейность с руслом, хотя и с другими числовыми значениями.

Несмотря на то, что результаты совместной инверсии выглядят более интерпретируемыми, для получения оценки с меньшей степенью неоднозначности мы сравниваем результаты с данными скважинного контроля. Мы использовали семь различных скважин, как добывающих, так и сухих. По всем скважинам имеются данные плотностного каротажа и АК, но, что весьма важно, по трем скважинам имеются данные двухкомпонентного АК, которые позволяют получить скорости *P*- и *S*-волн. Таким образом, мы получили возможность сравнивать характеристические сопротивления *P*-волн по семи скважинам и характеристические сопротивления *S*-волн по трем скважинам. Значения флуктуаций, f_I , f_J , $f_I - f_J$ были рассчитаны в скважинах на требуемой глубине путем осреднения величин выше и ниже этой глубины на расстояние около длины волны, с последующим делением разности этих локальных средних на их среднее. В Таблице 1 приведены ошибки, или стандартные отклонения для каждой флуктуации, рассчитанной по каждой методике инверсии; при этом предполагается, что скважинные данные свободны от ошибок. Показано также отношение ошибки, полученной при инверсии данных *PP*-волн, к ошибке, полученной при совместной инверсии. Это сравнение показывает, что совместная инверсия дает улучшение оценки f_I (флуктуация характеристического сопротивления *P*-волн) на 300%. Для f_J (флуктуации характеристического сопротивления *S*-волн), эта величина составляет 900%. Было бы лучше иметь большее количество скважин, чтобы в этом статистическом анализе участвовало больше точек, но нас удовлетворяет то, что анализ подтвердил преимущество методики совместной инверсии данных *PP*- и *PS*-волн.

Таблица 1. Результат статистического сравнения результатов инверсии данных *PP*- и *PS*-волн с привлечением скважинного контроля*

| | | |
|--|--|--|
| | Среднеквадратичная ошибка в сравнении со скважинными данными | |
|--|--|--|

| Свойство | σ_{PP} = ошибка метода PP-волн | σ_{PP+PS} = ошибка метода PP- & PS-волн | $\frac{\sigma_{PP}}{\sigma_{PP+PS}}$ |
|---|---------------------------------------|--|--------------------------------------|
| $f_I = \Delta(\rho\alpha)/(\rho\alpha)$ | 0.0238 | 0.081 | 2.94 |
| $f_J = \Delta(\rho\beta)/(\rho\beta)$ | 0.0215 | 0.0025 | 8.60 |
| $f_I - f_J$ | 0.0316 | 0.0064 | 4.94 |

*Использовались семь скважин; в трех из них имелись данные двухкомпонентного АК и плотностного каротажа, которые дали детальную информацию для α , β , ρ . В четырех других скважинах имелись данные АК и плотностного каротажа без информации о поперечных волнах.

Заключение. Мы представили практический метод совместной инверсии данных отраженных PP- и PS-волн, и документировали его показатели в сравнении с данными только PP-волн, на основании результатов 3-C/3-D съемки на месторождении Blackfoot. Аналогично методу PP-волн, совместный метод реализуется как взвешенная сумма, но с различными весами и с двойным статистическим выигрышем. Совместный метод дает заметно лучшие оценки флуктуаций характеристического сопротивления P-и S-волн, f_I и f_J , но лишь умеренно лучшие оценки псевдокоэффициента Пуассона, $f_I - f_J$. Мы сравнили результаты инверсии с данными скважинного контроля, и нашли сильное статистическое преимущество совместного метода, которое поддерживает наши выводы. Более подробная статья находится по адресу: <http://www.crews.org>.

Рекомендуемая литература.

Suggested reading. The complete Zoeppritz equations are most conveniently found in the classic text *Quantitative Seismology Theory and Methods* (Freeman, 1980) by Aki and Richards. An excellent historical and practical discussion can be found in "AVO analysis—tutorial and review" by Castagna (in *Offset-Dependent Reflectivity—Theory and Practice of AVO Analysis*, SEG, 1993). Articles cited in the text include "Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis" by Fatti et al. (GEOPHYSICS, 1994); "Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters: " $\lambda\rho$ " " $\mu\rho$ " and " $\lambda\mu$ fluid stack," from P and S inversions by Goodway et al. (CSEG 1997 *Expanded Abstracts*); Simultaneous PP and PS Inversion by Weighted Stacking Applied to the Blackfoot 3-C/3-D survey by Larsen et al. (1998 CREWES Research Report available at <http://www.crewes.org>); "AVO inversion by simultaneous PP and PS inversion" by Larsen (master's thesis at The University of Calgary, available at www.crewes.org); "Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas" by Smith and Gidlow (*Geophysical Prospecting*, 1987); "Joint P and P-SV inversion" by Stewart (1990 CREWES Research Report, available at <http://www.crewes.org>). **E**