

Описание трещиноватого коллектора с помощью непродольного ВСП: исследования на площади Varandei, на севере России

Characterization of fractured reservoir using offset VSPs: case study from the Varandei Field, Northern Russia

Anatoli A. Tikhonov (Petr o Alliance),¹ Ludmila A. Plekhodkina (Lukoil),² and Enru Liu (British Geological Survey)³ в этой технической статье описывают метод выделения вызванных трещиноватостью азимутальных анизотропных интервалов в разрезе, на примере российских данных.

Традиционные сейсмические подходы при исследовании сейсмической анизотропии, вызванной трещиноватостью, в стволе буровой скважины используют любые наблюдения прямых продольных волн (Horne 2003; Horne et al., 2002; Thompson et al.), наблюдения вертикальных поперечных волн с различной поляризацией (Brodov et al., 1991, Liu, Crampin and Queen, 1991; Winterstein, Ge, and Meadows 2001), или обменных волн совместно с данными непродольного ВСП (Horne и др., 2002). Традиционное ВСП позволяет создать индикатрису скорости распространения продольных волн (V_p). Наблюдения вертикальных поперечных волн основаны на разделении поперечной волны или измерении двойного луче преломления. Параметры среды обычно вычисляются из кинематических параметров сейсмических волн, использующих модель вкрест анизотропных сред с горизонтальной осью симметрии. Для более сложных моделей (например, тонкослоистый разрез с вертикальной трещиноватостью, используют призматическую модель) применяют 3С много-азимутальное, 3Д ВСП (Dewangan и Grechka, 2002). Наша цель состоит в определении сейсмической анизотропии возникающей в результате вертикальной трещиноватости регистрируемой традиционным методом выносного ВСП, с ненаправленными или взрывчатыми источниками. Мы пытаемся ответить на следующие два вопроса: (1) действительно ли возможно контролировать поляризацией обменные волны, чтобы получить свободные от помех моды S1 и S2? и (2) и как убрать влияние выноса на траекторию луча обменных волн, чтобы оценить запаздывание между волнами S1 и S2?

Идея контролировать поляризацию идущих вниз, обменных волн основана на использовании линейных комбинаций волновых полей, зарегистрированных по вертикальному сейсмическому профилю от пар ненаправленных источников (Рис 1).

Мы предполагаем, что поляризация поперечной волны после P-S преобразования для данной поверхности раздела в горизонтально слоистой изотропной среде существует в вертикальной плоскости лучей, проходящих от источников к приемникам. Эта технология, которая использует вращение поляризации поперечной волны, предложенная Бродовым и др. (1991), предполагает, что два различных типа сдвига распространяются по тем же самым траекториям пробега луча. Кроме того, поверхностные сейсмические данные используют метод вращения, чтобы обнаружить направления осей симметрии анизотропии, используя данные, полученные вдоль других траекторий луча. Эта технология предполагает, что введенные поправки NMO уменьшают влияние других

траекторий того же самого вертикального луча. Мы используем технологию прослеживания луча, чтобы убрать влияние геометрии обменных лучей на временах вступления и уменьшить длину вертикального профиля волнового поля, регистрируемое непродольным ВСП. Начальная кинематическая модель создана инверсией продольных и обменных волн. Мы корректируем двумерную кинематическую модель после формирования мигрированного сейсмического разреза в глубинной области.

Методика и применение синтетических данных

Моделирование 3С волновых полей, полученных по вертикальным профилям от азимутально распределенных выносных пунктов взрыва имеет цель оценить параметры трещиноватости от обменных низходящих и восходящих волн, а также проверить технику испытаний, которая используется для извлечения анизотропных параметров (Cllet и др., 1991). Коэффициенты упругости и геометрия модели, используемые для вычислений, получены в реальных условиях. Кровля трещиноватого пласта с 14%-ыми поперечными волнами и 5 % анизотропией Р волн установлена на глубине 1650 м, подошва залегают на глубине 3000 м. Азимут поверхности изотропии (или плоскость симметрии анизотропии) равна 90°. Все пласты, как предполагают, являются горизонтальными.

Геометрия модели – почти повторяет геометрию модели, полученную при непродольном ВСП и будет описана ниже (Рис 1). 3С волновые поля вычислены по вертикальному профилю по интервалу 1000 м. - 2032.5 м. с шагом 17.5 м.

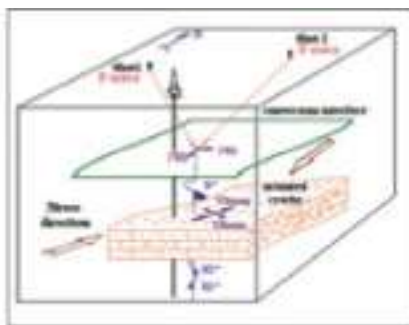


Рис 1 Принципиальная схема, иллюстрирующая полученную геометрию, используемую для моделирования и исследования трещиноватых прослоев с использованием обменных сейсмических волн.

¹ E-mail: Anatoli.Tikhonov@petroal.ru.

² E-mail: Lplehotkina @nmng.lukoil.com.

³ E-mail: E.Liu@bgs.ac.uk.

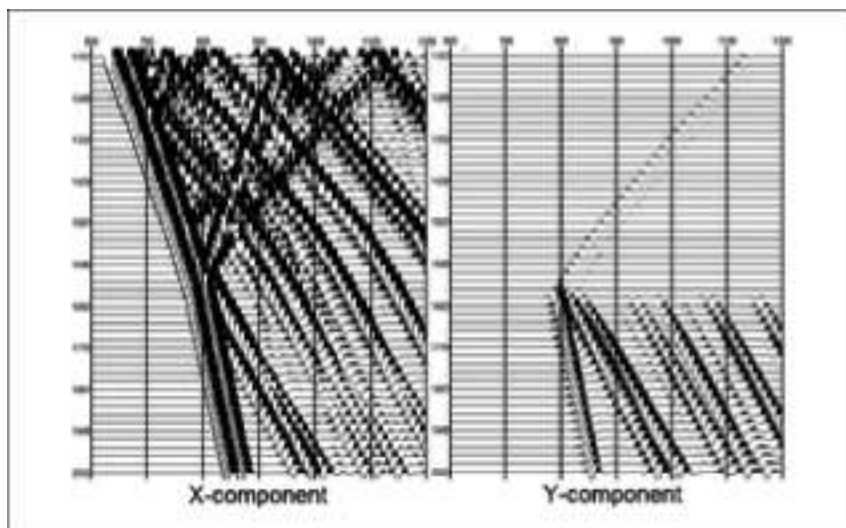


Рис 2 Вычисленное синтетическое волновое поле источника с сейсмического выносом 600 м, ориентированного под углом 45 ° к растрескиванию. На компонентах Y мы можем ясно увидеть отраженную и преломленную обменную волну от кровли трещиноватого пласта.

Взрывной сейсмический источник расположен на поверхности. Используется импульс Рикера с пиковой частотой 30Hz. Азимуты источников изменяются от 0 ° до 90 °, с 15° интервалами. Смоделированы два сейсмических выноса источника на 600 м и 900 м. Синтетические сейсмограммы созданы, используя отражения с применением анизотропии. Трещиноватость, представленная в модели, представлена эквивалентной теорией среды, описанной Liu, Hudson, и Pointer (2000).

Аномалии сейсмических полей, вызванные наличием трещиноватости регистрируются по вертикальному сечению от выносного ненаправленного пункта взрыва и ясно видны на рисунке 2, где представляют собой ориентированный к X-компоненте пункт взрыва и поперечную Y-компоненту волнового поля, вычисленную для выносного на 600 м источника, ориентированного под углом 45 ° к направлению трещиноватости. Аномальная поляризация обменной волны, отраженной от кровли пласта с анизотропными свойствами проявляет себя в наблюдаемой энергии на кросслайне Y-компоненты. Амплитуда этого отражения, которая должна отсутствовать в изотропной среде, является очень небольшой и зависит от угла между плоскостью луча и ориентацией трещин. Эта аномалия поляризации как функция азимутов источника может быть описана с помощью аномальных углов поляризации (APA), определенных соотношением амплитуд отраженной обменной волны

зарегистрированной на Y и X компонентах, обозначенных Apsy и Apsx, соответственно:

$$APA = \tan^{-1} \left(\frac{A_{psy}(\alpha)}{A_{psx}(\alpha)} \right)$$

Рис 3 показывает этот аномальный угол поляризации как функцию азимутов. Ясно, что из-за его небольшой величины такая аномалия не может использоваться как надежное средство для азимутального исследования анизотропии.

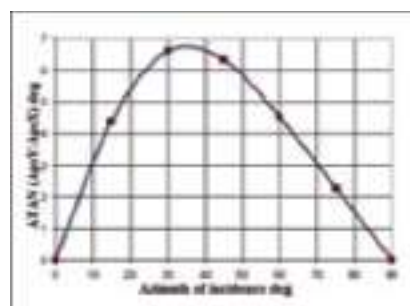


Рис 3 Аномальный угол Поляризации (APA), вычисленный как арктангенс соотношения амплитуды обменной волны, отмеченный на кросслайне и инлайне. Этот угол показывает отклонение вектора смещения от вертикальной плоскости.

Однако она может использоваться как количественный индикатор присутствия азимутальной анизотропии. Влияние азимутальной анизотропии на проходящие обменные волны более значительно. Энергия, зарегистрированная на кросслайне Y-компоненте сопоставима с энергией, зарегистрированной по главной X-компоненте. Кроме того, на X компоненте есть область сильного ослабления амплитуд, вызванная ослабляющей интерференцией нисходящих обменных волн в режимах S1 и S2. Это явление также справедливо для частотного спектра. Рис 4 показывает амплитудно-частотный

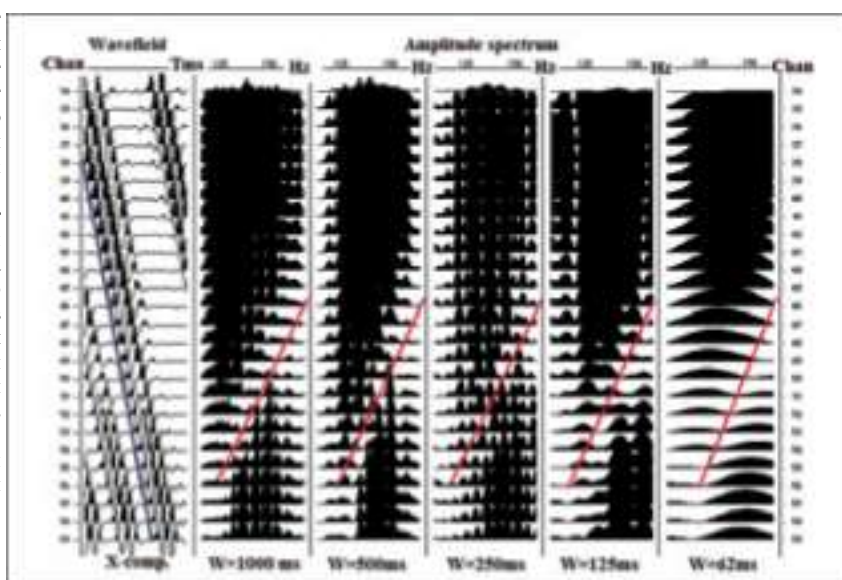


Рис 4 Идущие вниз обменные сейсмические волны и их частотные спектры вычисленные для области ослабляющей интерференции быстрых и медленных поперечных волн в различных окнах времени.

частотный спектр, вычисленный для других временных окон для нисходящих обменных волн.

Для области ослабляющей интерференции существует плавающий ноль амплитуды для гармоник, соответствующих условию равенства временного запаздывания между быстрыми и медленными поперечными волнами к половине периода истинного сигнала. В реальных данных этот эффект может быть полезным только для относительно мощных анизотропных интервалов. Например, для оценки анизотропных параметров, перемещение нуля в частотном спектре в сейсмическом диапазоне частот 60-80 Гц, необходимо, для изменения запаздывания от 6.25 мс до 8.3 мс, что соответствует изменению длины луча от 110 м. до 150 м. для скорости S1 на 3600 м/с и 20%-ой анизотропии.

Рис 5 представляет своего рода следящую азимутальную сейсмограмму, где каждая глубина (правый масштаб) фиксированного числа компонентов X и Y соответствует различным азимутальным позициям источников (левый масштаб). Это рисунок показывает, что естественные направления могут быть найдены на основе кинематических комбинаций (изменение времени пробега) и динамическими (отсутствие энергии на боковой компоненте или кросслайне для чистых волн S1 и S2) свойствами идущих вниз обменных волн. В реальном случае это не всегда целесообразно (особенно в береговых условиях), надо отстреливать большое количество азимутально раздельных пунктов взрыва. Изменчивость по простиранию геологических структур часто делает такой эксперимент трудным из-за необходимости принять во внимание азимутальные изменения скоростей и структур.

С другой стороны, вместо волнового поля, полученного для некоторых азимутов, возможно использование линейных комбинаций волновых полей, полученных от двух пунктов взрыва, расположенных в различном (лучше почти ортогональном) азимуте. Синтетическое волновое поле для некоторого угла поворота может, быть получено как

$$W_i(h, t, \alpha) = W_i^{SP1}(h, t) * \cos(\alpha_2^{SP1} - \alpha) + K_i(h) W_i^{SP2}(h, t - dt(h)) * \cos(\alpha_2^{SP2} - \alpha),$$

где $i = X, Y, Z$, h - глубина получения, и t время записи, α - азимут синтетического источника, $dt(h)$ - компонента компенсирующая различие во временах вступления из-за различия в геометрии луча для различных пунктов взрыва, $K_i(h)$ - компонента компенсирующая различие в амплитудах.

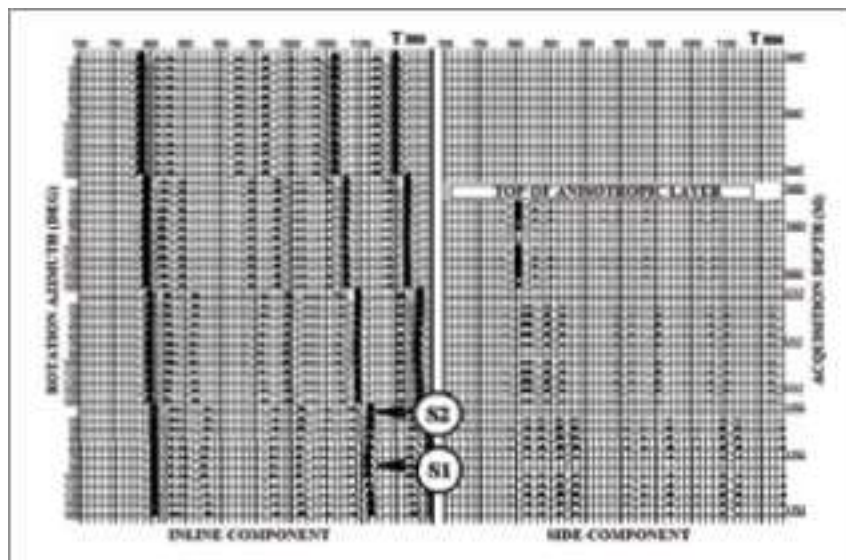


Рис 5, Следящая азимутальная сейсмограмма, составленная с использованием синтетических волновых полей вычислена с шагом 600 м. для пунктов взрыва вокруг скважины и регулярными 15° азимутальными интервалами.

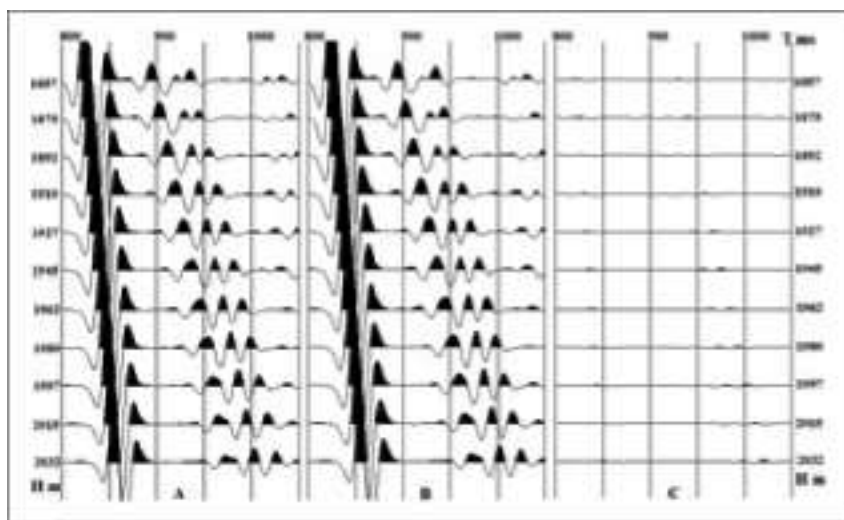


Рис 6 X компонента синтетического волнового поля? вычисленная для пункта взрыва, расположенного в азимуте 45°: (A) непосредственно вычисленная, (B) составленная из пунктов взрыва, вычисленных для азимутов 15° и 75°, (C) различие между (A) и (B).

Рис 6 показывает, что различие между волновыми полями, вычисленными непосредственно для источника 45° азимутов ориентации и волнового поля, составленного для этого азимута из двух волновых полей, вычисленных для 15° и 75° незначительно. Это означает то что, если есть два волновых поля, зарегистрированные с различными ориентациями пунктов взрыва, они могут использоваться для азимутального анализа анизотропии, основанного на комбинациях волновых полей.

Геологические условия

Антиклиналь Varandei расположена к северу от Sorokin Ridge и является частью структурной области Varandei-Adzva. Структура Varandei - 9 км в длину и имеет тенденцию в простирании в юго-восточном направлении. Амплитуда складчатой структуры по кровле пласта Пермского периода изменяется от 1.5 км на юге к 2.5 км на севере. Северо-восточная крыло складки более пологое чем юго-западная. Градиент последней - 10 м. на 100 м., в то время как северо-восточной части - 5 м. на 100 м.

Асимметрия антиклинали соответствует ее надвиговому происхождению с направлением движения с северо-востока к юго-западу.

Антиклиналь Varandei ограничена на западе и востоке разломами того же самого распространения как гряда в целом. Учитывая надвиговое происхождение гребня этой области, мы предполагаем, что главные направления воздействия и напряжения были ортогональны простиранию. Соответственно, северо-западное простирание плоскости основной трещиноватости является наиболее возможной.

Самая вероятная формация, определяющая вертикальное растрескивание - карбонатная формация Artian, представленная главным образом морскими карбонатными сланцами. Присутствие микротрещин было установлено анализом керна. Этот интервал был целью нашего исследования.

Полевые данные были получены, тремя выносными взрывными источниками под углом 120° от устья скважины. Выносные пункты взрыва обычно используются в экспериментах с Р-волнами. Прямые поперечные волны, сгенерированные существованием 'естественной направленности' в пределах области разрушения источника (Puzghev и др., 1985) поляризованы в случайной манере и мало используются в исследовании явления сейсмической анизотропии.

Как правило, в разрезе существует достаточное количество акустических поверхностей раздела, чтобы генерировать обменные волны. В этом исследовании, обменные волны используются для исследования сейсмической анизотропии. Метод использует построение волнового поля, от двух или большего количества выносных источников, активированных в различных направлениях, для получения поляризации поперечных волн, вызванных преобразованиями.

В скважине А, поле было получено от четырех пунктов взрыва (SP): SP с нулевым выносом (117м сейсмический вынос) и три выносных пункта взрыва с L_SP2=620м, L_SP3=645м и м. L_SP4=700 выносами. Географические азимуты пунктов взрыва, измеренных от устья равны Az_SP2=170°, Az_SP3=50°, Az_SP4=290°. Чтобы генерировать сейсмические волны в глубокие скважины между 11 м. к 15 м были опущены 0.6-килограммовые заряды взрывчатого вещества TNT. Использовались скважинные приемники с тремя компонентами, помещенные в интервал на 10 м. от глубины на 10 до 1700 м.

Обработка данных

Обработка данных состояла из двух стадий: предварительной и специальной обработки. Главный аспект

предварительной обработки - получение высококачественных однотипных (Р или S) сейсмограмм. Восходящие и нисходящие волны были отфильтрованы в течение этой стадии обработки. Кинематическая модель была создана, используя Р и S скорости.

Цель специализированной обработки состоит в том, чтобы вычислить сейсмический разрез, используя нисходящие быстрые и медленные поперечные волны. Рис 7 показывает действующие (X) и боковые или кросслайновые (Y) составляющие сейсмограммы обменных сейсмоволн, полученных SP3. Исследуя обменную волну, мы можем заметить, что в некоторых случаях существенная часть энергии преломленных и отраженных амплитуд зарегистрирована на компонентах кросслайн. Такие аномалии в поляризации обменной волны могут указать на присутствие азимутальной анизотропии в карбонатных формациях Artian нижележащего Пермского периода. Чтобы подтвердить это наблюдение, была применена специальная технология. Эта технология основана на вычислении синтетического волнового поля преломленных поперечных волн контролирующей поляризацией. Основные моменты этой технологии могут быть сформулированы следующим образом.

- Выбор целевой преломленной волны, которая преобразована из Р в S когда одна из траверсных поверхностей раздела выше кровли изучаемого пласта.
- Прослеживание луча и восстановление к вертикальному направлению целевых волн требуется от выносных пунктов взрыва (коррекция за различие геометрии луча).
- Коррекция за анизотропию этой волны в пределах интервала выше кровли пласта целевого разреза (последовательное снятие влияния вышележащих слоев). Эта операция эквивалентна размещению двух псевдоисточников поперечных волн с заданной поляризацией над изучаемым интервалом.
- Вычисление прослеженной азимутальной сейсмограммы, и определение направления поляризации быстрых и медленных поперечных волн. Трассирование азимутальных сейсмограмм (TAS) полученных на заданных глубинах одновременным вращением в горизонтальной плоскости синтетических S-источников и приемников.

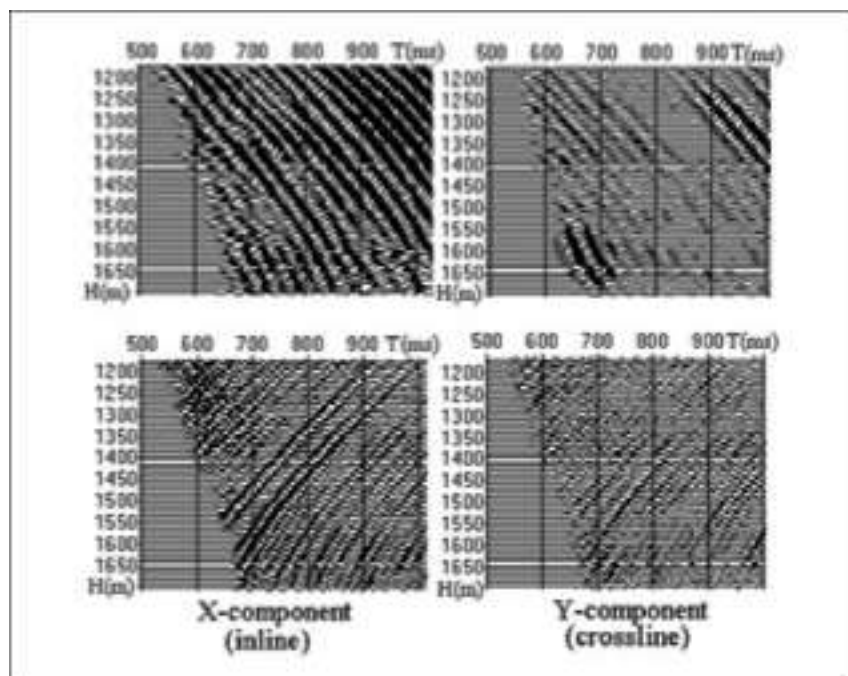


Рис 7 Нисходящие и восходящие обращенные обменные волны, полученные по вертикальному сечению по SP3 после 3C волнового разделения. (© Lukoil)

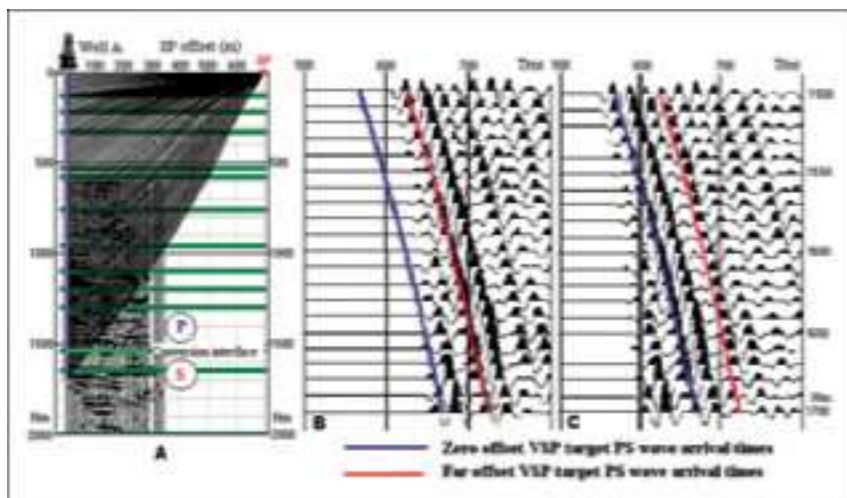


Рис 8 технология восстановления преломленного обменной волны к вертикали: (A) структурная модель хорошей разрешимости и траектория луча для волны, преобразованной на глубине 1530м, (B) Нисходящие обменные волны, полученные от SP2, и (C) То же самое как B после приведения к вертикали. (© Lukoil)

- Расчет профиля сейсмограмм для быстрых S1 и медленных волн S2 и вычисление их кинематических параметров.

- Объединение полученных интерпретацией параметров анизотропии с данными бурения и сейсмическими данными после глубинной миграции.

Для этого исследования мы выбираем объект, где волна трансформируется на глубине 1500 м., пересекая поверхности раздела в осадочных слоях обломочной породы Триасового периода. Эта волна последовательно наблюдается относительно всех пунктов взрыва. Преломленная волна связанная с кровлей пласта целевой формации известняка Artian P1 на глубине 1650 м., имеет слабый сигнал, и следовательно это не использовалась при анализе. Кинематическая модель была построена на основе скоростей поперечных волн и волн сжатия. Анализ луча для целевой волны был сделан, чтобы уменьшить число полученных целевых волн к вертикали и составить другие конфигурации луча от других пунктов взрыва. Рис 8 показывает принципиальную схему траекторий лучей и затухание целевой волны по вертикали. Коррекция за анизотропию верхнего интервала была сделана для глубины на 1640 м. Суть этой технологии в устранении азимутальной зависимости кинематических и динамических параметров целевой волны на выбранном уровне (устранении влияния вышележащих пластов)

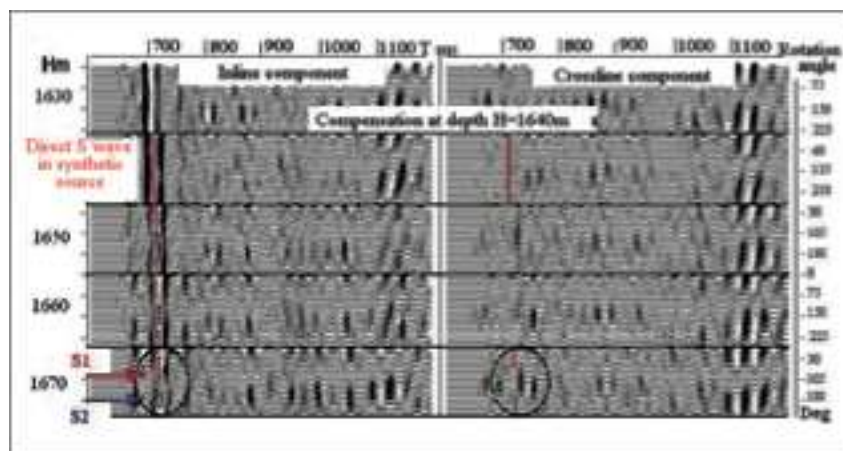
которая является ортогональной к данной. В такой технологии сначала успешно применялись одиночные поперечные волны, зарегистрированные в трещиноватых карбонатах в месторождении Romashkino в Татарии (Бродов и ал., 1991).

Наша технология использует обменные волны. Используемая целевая волна была преобразована, при прохождении кровли пласта Kungurian P1 Нижне Пермской обломочной формации. Экспертиза TAS показала, что для заданной глубины учет влияния верхних слоев (1640 м) целевого сигнала прослежен в подобной манере для всех направлений поляризации поперечной волны источника. На поперечной компоненте, амплитуда целевого сигнала - близка к нулю. Такое поведение волнового поля - эквивалентно размещению линейно поляризованных

источников поперечной волны, которыми контролировать на заданной глубине применение технологии учета вышележащих слоев (Winterstein and Meadons, 1991).

В то время как волна распространяется в анизотропном интервале, линия целевой волны коррелируется плохо (отклоняется от иллюстрирован пример вычисления прямой). На поперечной компоненте, энергия следящей азимутальной сейсмограммы сигналов проявляется для азимутов источника, перемещенных под углом приблизительно 45° относительно азимут, которые сейсмограммы были вычислены для обеспечения времени экстремума вступлений каждой глубины изученных интервалов целевой волны на прослеживаемой или пересечении волновых полей от двух инлайновой компоненте. Такое поведение волнового поля, которое сгенерировано эквивалентно генерации двух поперечных волн гипотетическим источником поперечной с ортогональной поляризацией и различными волнами с predetermined скоростями распространения. Анализом TAS, характеристиками поляризации, 0°-180° предполагаемые направления находящиеся на указанной глубине. Этот является направлением поляризации метод включает вычисление двух медленных S-волн.

компонентов волновых полей - прослеживание компоненты инлайн, коллинеарной с направлениями поляризации источника, и поперечной или боковой компонентой (кросслайн), Рис 9 пример прослеживания азимутальной сейсмограммы, вычисленной с использованием обменных преломленных волн. (© Lukoil)



направления поляризации 90° - 270° относятся к поперечным волнам.

Результаты

Подтверждение результата анализом TAS для данных глубин, волновые поля были повторно вычислены в определенных направлениях поляризации поперечной волны синтетического источника в пределах изученного интервала вертикального профиля. Результаты показаны на рисунке 10. Анализ волнового поля в вертикальном направлении для значений азимутов приемников и источников подтверждает интерпретацию, основанную на следящих азимутальных сейсмограммах. Максимальное разделение годографов быстрых и медленных S-волн (T_{S1} и T_{S2}) соблюдено соответственно для направлений поляризации 0° и 90° . Минимум энергии сигнала на поперечной компоненте также соблюден для тех же самых направлений. Для промежуточных направлений (45° и 135°), волновое поле на прослеживаемой или инлайновой компоненте становится комплексным, в то время как энергия сигнала на поперечных компонентах увеличивается.

Запаздывания, полученные в результате рассмотрения быстрых S1 и медленных S2 волн показаны на рисунке 11

Мы можем заметить, в пределах интервала глубин на 1500-1620 м, что никакое регулярное или когерентное различие не может быть соблюдено на временах вступления поперечных волн, поляризованных в направлениях 0° и 90° соответственно. Ниже глубины 1620 м, волна, поляризованная в направлении 90° начинает перемещаться перед волной, поляризованной в направлении 0° . Увеличение времени запаздывания продолжается фактически до забоя. Надо отметить, что есть интервалы, например, 1670-1690 м., где нет никакого увеличения времени запаздывания. Отметим также, что разделение вертикальных годографов на глубине приблизительно 1620 м., то есть, на 30 м. выше кровли целевого известняка Artian, где трещиноватость, как известно, доказана анализом данных керна в скважине А. Согласно данным анализа керна в скважине В, в обломочных породах Kungurian (Нижне Пермского периода) сформированного выше изучаемого интервала, есть слой твердого песчаника с явным, почти вертикальным растрескиванием. По данным ГИС, подобный слой обнаружен в скважине расположенной в 500 м. от скважины В.

Техника, используемая в определении направлений симметрии анизотропии включает коррекцию за анизотропию пласта выше интервала 1640 м. - 1700 м.

Именно поэтому полученное разделение вертикальных годографов для интервала 1620-1640 м. может быть интерпретировано как признак азимутальной анизотропии в песчанике Kungurian. Толщина трещиноватого песчаника - меньше чем шаг по вертикали, следовательно, более детальная оценка параметров анизотропии в этих формациях по существующим данным не выполнима. Таким образом, этот слой, во-первых, обнаружен азимутальным анализом анизотропии и затем подтвержден анализом керна.

Анализируя вышесказанное, мы можем утверждать, что была применена система трещиноватости, существующей в песчанике Kungurian и карбонатах Artian, с ориентацией плоскости трещиноватости приблизительно 90° - 100° (географический азимут $N110^\circ E$ к $N120^\circ E$). Детальный анализ акустического каротажа показал, что в пределах Kungurian отложений в интервале глубин 1610-1636 м, происходит увеличение скорости поперечных волн от 1700-1800 м/с до 2200-2300 м/с, в то время как скорость распространения продольной волны Р остается почти неизменной около 3400-3500 м/с. Это сопровождается изменениями параметра $y=V_s/V_p$ от 0.48-0.5 до 0.6-0.62. Такие изменения в акустических свойствах обломочной формации соответствуют переходу от сланцеватых пород до плотных песчаников. Анализ калибровки и данных собственной поляризации позволяет сказать, что самые тонкие изменения песчаников лежат в интервале 1621-1630 м. Все данные указывают, что это интервал, где трещиноватость присутствует в формациях обломочной породы Kungurian. Значение оцененного коэффициента анизотропии $K_{an} = [(V_{s1} - V_{s2})/V_{s1}] = 14\%$.

Кровля пласта карбонатов Kungurian определена каротажными данными на глубине 1648 м. Скорости поперечных волн и волн смещения растут до значений $V_p = 4500$ - 4600 м/с и против $= 2600$ - 2700 м/с, соответственно. Скоростная зависимость V_p остается приблизительно такой же как у плотных песчаников Kungurian, ($y=0.58$ - 0.6). Значение коэффициента анизотропии для этого интервала - $K_{an} = 24\%$. Такое изменение в коэффициенте анизотропии может быть интерпретировано как

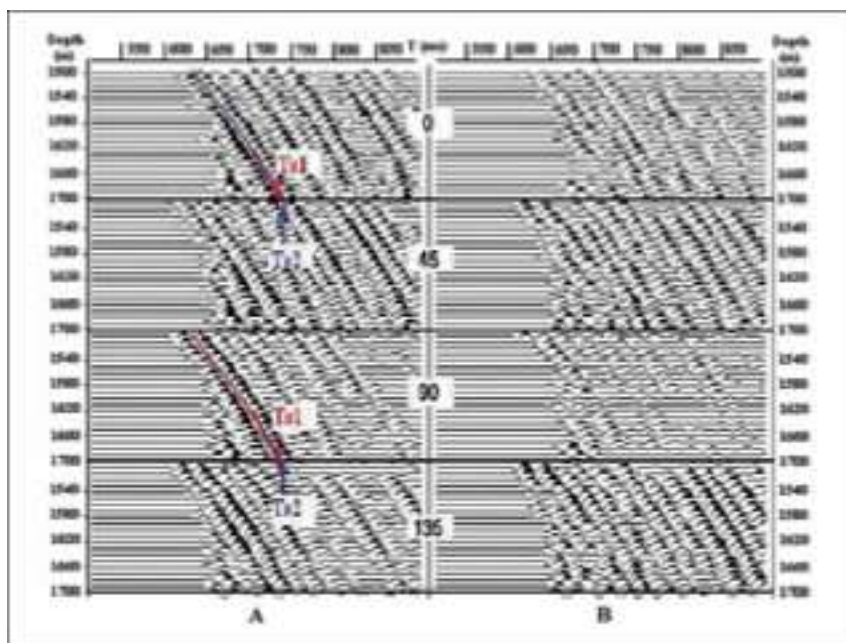


Рис 10 Пересчет преломленного обменного волнового поля, совмещенного от SP2 и SP3 в синтетическом S источнике с предопределенной поляризацией в направлениях 0° , 45° , 90° и 135° . S1 поляризацией 90° , S2 - 0° . (A) Инлайновая компонента и (B) Поперечная компонента. (© Lukoil)

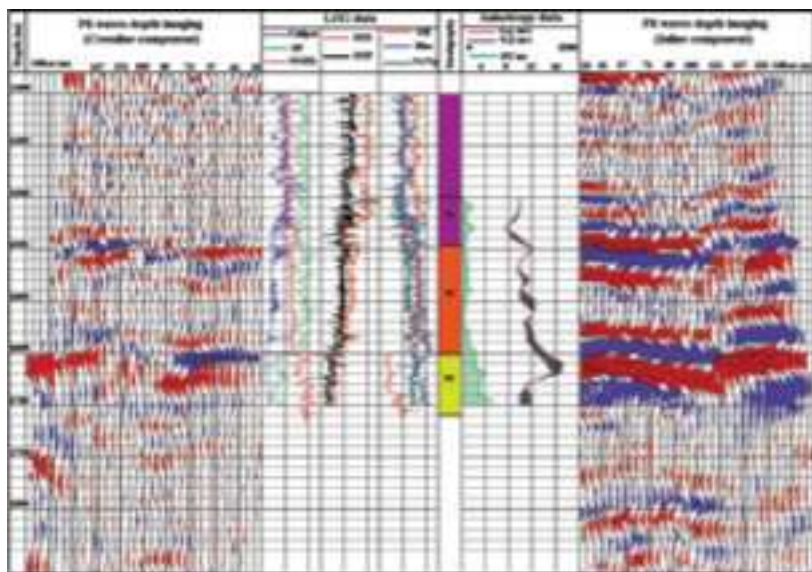


Рис 11 Объединение данных ГИС, мигрированных сейсмических данных и данных анизотропии. (© Lukoil)

увеличение плотности расположения трещин в формации карбоната.

Скважинные данные помогают нам в интерпретации трещиноватых интервалов по вертикальным профилям. Добавление сейсмических данных после глубинной миграции позволяет анализировать эти интервалы латерально. Рис 11 показывает сравнение параметров анизотропии с каротажными данными и сейсмическими профилями после глубинной миграции. Мигрированные сейсмические профили были построены по отраженным обменным волнам, зарегистрированным на горизонтальных составляющих. Геологическая интерпретация скважинных данных предполагает, что самые вероятные углеводородно насыщенные интервалы – пропластков песчаника на (H=1621-1630 м) и кровлю пласта Пермского карбоната (1652-1665 м). Анализ мигрированных профилей обменной сейсмоволны говорит, что трещиноватая зона ограничена приблизительно 120 м. в северо-восточном направлении из-за разлома, который ясно виден на рис 11.

Заключения

Используя всесторонний анализ сейсмической анизотропии в скважине области Varandei, мы пришли к следующим выводам:

- предложенная технология является пригодной для выделения трещиноватых азимутальных анизотропных интервалов в разрезе.

- Были показаны два интервала где существует выравнивание трещиноватости вдоль линии: плотный песчаник Kungurian (P1kg) с $Kan = 14\%$, и Artian (P1art) формации карбоната с $Kan = 24\%$.
- Для карбонатов Artian, направление ориентации трещиноватости принято в азимуте $Az_g = 110^\circ - 120^\circ$.
- Интегрированная интерпретация зарегистрированных данных и миграции дают возможность проследить азимутально анизотропные интервалы далеко от скважины. Это также увеличивает достоверность съемок.

Благодарности

Мы хотели бы благодарить Л.И. Бродова за его поддержку и плодотворное обсуждение главных принципов этой статьи. Работа Enru Liu была поддержана Естественным Советом Исследования Окружающей среды Великобритании, и спонсорами Эдинбургского Проекта Анизотропии (ЕАР). Эта статья опубликована с согласия компаний PetroAlliance, Lukoil, и руководителя Британской геологической службы (NERC).

Ссылки

Brodov, L.Y., Tikhonov, A.A., Chesnokov, E.M., Tertychnyi, V.V., and Zat-sepin, S.V. [1991] Estimating physical

parameters of cracked porous oil reservoirs by inverting shear-wave splitting. *Geophysical Journal International*, **107**, 429-432.

Cliet, Ch., Brodov, L.Y., Tikhonov, A.A., Marin, D., and Michon, D. [1991] Anisotropy survey for reservoir definition. *Geophysical Journal International*, **107**, 417-427.

Dewangan, P. and Grechka, V. [2002] Inversion of multicomponent, multi-azimuth, walkaway VSP data for the stiffness tensor. *72nd SEG Annual International Meeting*, 161-164.

Horne, S.A. [2003] Fracture characterization from walkaround VSPs. *Geophysical Prospecting*, **51**, 493-500.

Horne, S.A., Slater, C., Malek, S., Hill, A., and Wijnands, F. [2000] Walkaround VSPs for fractured reservoir characterization. *70th SEG Annual International Meeting*, 1401-1404.

Horne, S.A., Thompson, C., Moran, R., Walsh, J., Hyde, J., and Liu, E. [2002] Planning, Acquiring and Processing a Walkaround VSP for Fracture Induced Anisotropy. *64th EAGE Meeting*, B028.

Liu, E., Crampin, S., and Queen, J.H. [1991] Fracture detection using cross-hole surveys and reverse vertical seismic profiles at the Conoco Borehole Test Facility, Oklahoma. *Geophysical Journal International*, **107**, 449-463.

Liu, E., Hudson, J.A., and Pointer, T. [2000] Equivalent medium representation of fractured rock. *Journal of Geophysical Research*, **105**, B2, 2981-3000.

Puzyrev, N.N., Brodov, L.Y. and Trigubov, A.V. [1985] *Seismic surveying method using shear and converted waves*. Nedra, Moscow.

Thompson, C., Moran, R., Horne, S.A., Walsh, J., and Fairborn, J. [2002] Seismic fracture characterization of a sandstone reservoir, Rangely Field, Colorado. *72nd SEG Annual International Meeting*, 1049-1052.

Winterstein, D.F. and Meadows, M.A. [1991] Shear-wave polarizations and subsurface stress directions at Lost Hills field. *Geophysics*, **56**, 1331-1348.

Winterstein, D.F., De, G.S., and Meadows, M.A. [2001] Twelve years of vertical birefringence in nine-component VSP data. *Geophysics*, **66**, 582-597.