

Картирование коридоров трещиноватости в естественно-трещиноватых коллекторах: пример карбонатов с Ближнего Востока

Sunil K. Singh, Hanan Abu-Habbiel и Badruzzaman Khan (Kuwait Oil Company) и Mahmood Akbar, Arnaud Etchescopar и Bernard Montaron (Schlumberger) указывают на важность картирования коридоров трещиноватости при оптимизации добычи из коллектора и показывают как высокоразрешенная сейсморазведка может внести вклад в изучение карбонатных обстановок Ближнего Востока.

Во многих нефтегазовых коллекторах, естественная трещиноватость может помочь дренажу углеводородов и других флюидов. Роль трещин особенно важна в коллекторах, которые имеют плотный матрикс. В формации карбонатов, например, часто можно наблюдать контраст проницаемости, достигающий 1000 или более между матриксом породы и окружающими трещинами. Естественные трещины – запись истории напряжения в коллекторе. Они организуются в различные семейства, ориентированные в определенных направлениях. Коридоры трещин (FC) – особый кластер, состоящий из огромного числа квазипараллельных трещин. FC может варьировать по

размеру и протяженности (вертикальной и латеральной). Их размеры могут варьировать в большом диапазоне. Например, некоторые из них были 10 м шириной, 100 м высотой, и 1000 м длиной. Такие FC могут содержать более сотен и до десяти тысяч трещин и иметь проницаемость выше 10 Дарси. Также могут наблюдаться другие типы кластеров. Отдельные трещины или трещины, которые могут не быть частью FC, называются диффузными трещинами.

Проводимые FC являются крупнейшим путем прохождения потока флюида в коллекторе и их точные местоположения могут быть известны и точно закартированы в модели коллектора с целью получения реалистичного динамического моделирования коллектора. Эта информация существенна для выбора местоположения нагнетательной и добывающей скважин, которое максимизирует эффективность выкачивания коллектора. Здесь описывается поток обработки, направленный на построение изображения всех основных FC в коллекторе. Результаты представлены для пяти ближневосточных карбонатных месторождений в Кувейте.

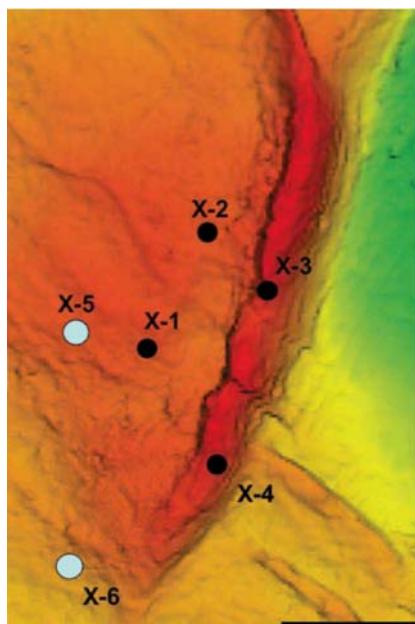


Рисунок 1 Месторождение Sabriyah в Северном Кувейте, который используется как ключевой участок в исследовании. X-5 и X-6 – новые скважины, которые пробурены на момент проведения исследования. Кластеры трещин, предсказанные FCM для этих скважин, были оценены по изображениям керна и скважинных данных, полученных по ним.

для того, чтобы убедиться в том, что последующий ввод атрибутов в обработку DES будет содержать значимую информацию для картирования кластеров трещин. Это может потребовать специальной схемы наблюдения и потоков обработки с использованием одного датчика. Сейсмические атрибуты, чувствительные к кластерам трещин, идентифицируются и вводятся в DES. Фильтры направлений (азимутальные) и наклонов (падения) используемые в обработке DES разрабатываются на основе анализа керна, скважинных изображений, акустических каротажных кривых, и ВСП (например, непрородольного ВСП, уровняенного ВСП кругового ВСП и 3Д ВСП). Более того, структурная и тектоническая история области исследования также используется в процессе оптимизации параметра и проверки получаемых результатов.

Общая обработка DES имеет тенденцию упускать из виду достаточно большой процент кластеров трещин различных ориентаций и размеров, когда направленный фильтр открыт для всех 360° азимутов с фиксированным диапазоном наклонов объектов. В подобной ситуации, обработка DES следует за самыми сильными латеральными несогласиями в вертикальной плоскости, вызываемыми самыми крупными кластерами трещин, и пропускает менее сильные несогласия или признаки кластеров трещин, которые либо имеют ту же ориентацию или другую ориентацию. Для обнаружения подобных несогласий, фильтр направлений делится на несколько окон/диапазонов и фильтр наклонов устанавливается на один или более диапазон наклонов. Обработка DES запускается отдельно для каждого набора фильтра направлений или наклонов. Каждый прогон

Поток картирования кластеров трещин и результаты

Поток обработки основывается на предположении, что когда существуют естественные трещины в форме кластеров более крупных размеров (т.е. 10-30 м или более в ширину, по вертикали или по горизонтали), они некоторым образом должны быть выражены в сейсмических данных 3Д. Поток обработки, прежде всего, включает комплексирование скважинных данных с 3Д сейсмикой в целях оптимизации процедуры извлечения, посредством специальной обработки в программе извлечения из зоны разрывов (DES).

Сейсмические данные 3Д должны иметь оптимальную пространственно/временную полосу частот и соотношение сигнал-шум

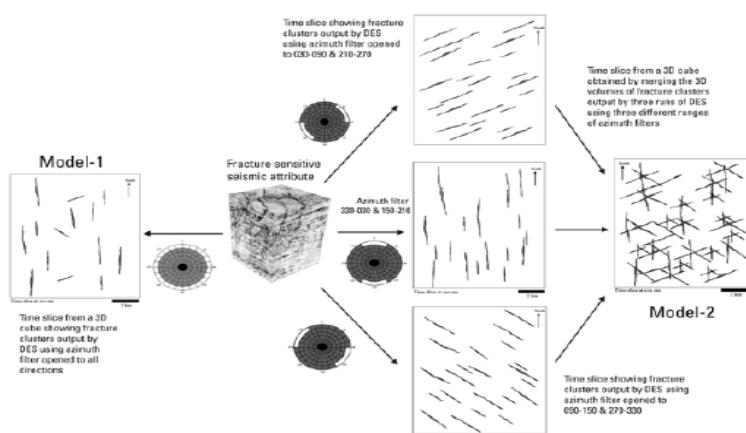


Рисунок 2 Схема, демонстрирующая эффект азимутального фильтра на извлекаемые кластеры трещин из сейсмического атрибута 3D, чувствительного к трещинам. 3D куб кластеров трещин, полученный с помощью многочисленных фильтров азимутов, дает более реалистичное изображение кластеров трещин (Модель 2), чем полученная с использованием одного фильтра азимута 360° (Модель 1).

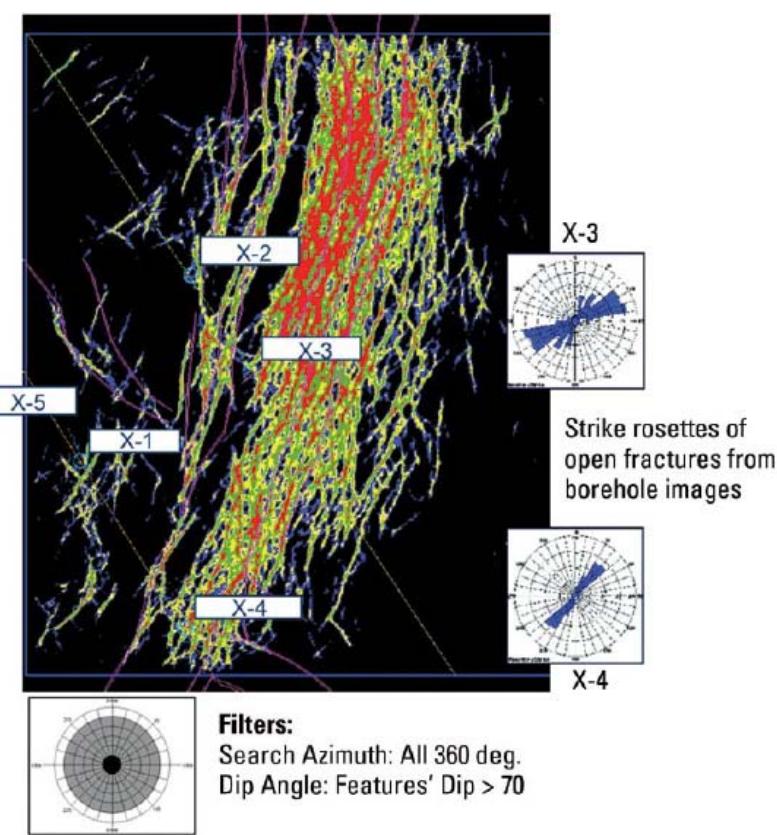


Рисунок 3 Временной срез среднего Marrat, демонстрирующий кластеры трещин, ориентированные преимущественно в направлении NNE-SSW когда азимутальный фильтр не имеет ограничений.

DES дает куб 3D линеаментов кластеров трещин. Далее, эти отдельные 3D кубы объединяются в один 3D куб (Рисунок 1) кластеров трещин, который можно преобразовать из временного обозначения в глубинное.

Поток обработки был применен к серии юрских карбонатов на пяти месторождениях (NW Raudhatain, Raudhatain, Umm Niqqa, Sabriyah, и Bahra), расположенных в Северной части Кувейта. Месторождение Sabriyah было выбрано в качестве ключевой области исследований ввиду того, что на момент исследования было пробурено максимальное количество скважин (четыре), ввиду нового бурения, и интересной структурной обстановки (возникшая структура, вызванная трансгрессией вдоль восточной и западной ограничивающих сбросо-сдвиговых разломов). Помимо свидетельств о наличии разлома в существующих скважинах (X-3 и X-4, Рисунок 2), недавно разбуренные скважины (X-5 и X-6, Рисунок 2) были использованы для оценки кластеров трещин, выявленных DES на сейсмическом кубе.

На Рисунке 3 демонстрируются кластеры трещин, имеющие преимущественный NNE-SSW тренд на участке одного из горизонтов в карбонатном коллекторе среднего Marrat, извлеченные при помощи DES из сейсмического куба. Кластеры трещин приблизительно одной ориентации и наклона наблюдались в кубе 3D через разрез Marrat. Наоборот, данные по скважине X-3 продемонстрировали преобладание трещин, имеющих простирание ENE-WSW (более чем 400 открытых трещин) в пределах Marrat, в частности. Когда к тому же кубу сейсмических атрибутов была применена процедура DES но с двумя различными азимутальными фильтрами (315-045, 135-225 и 045-135, 225-315), были выделены кластеры трещин с простиранием NNE-SSW, ENE-WSE, NE-SW, NW-SE, и WNW-ESE (Рисунок 4). Кластеры трещин с простиранием NNE-SSW скорее всего связаны со складками, параллельными осями антиклинали Sabriyah, а кластеры в простирании ENE-WSW и WNW-ESE, которые наиболее часто сконцентрированы в пределах антиклинали Sabriyah, возможно образуют сдвиги Риделя (Рисунок 4).

Результаты оценивались в местах существующих скважин и также в точках новых скважин X5 и X-6. Рисунок 5

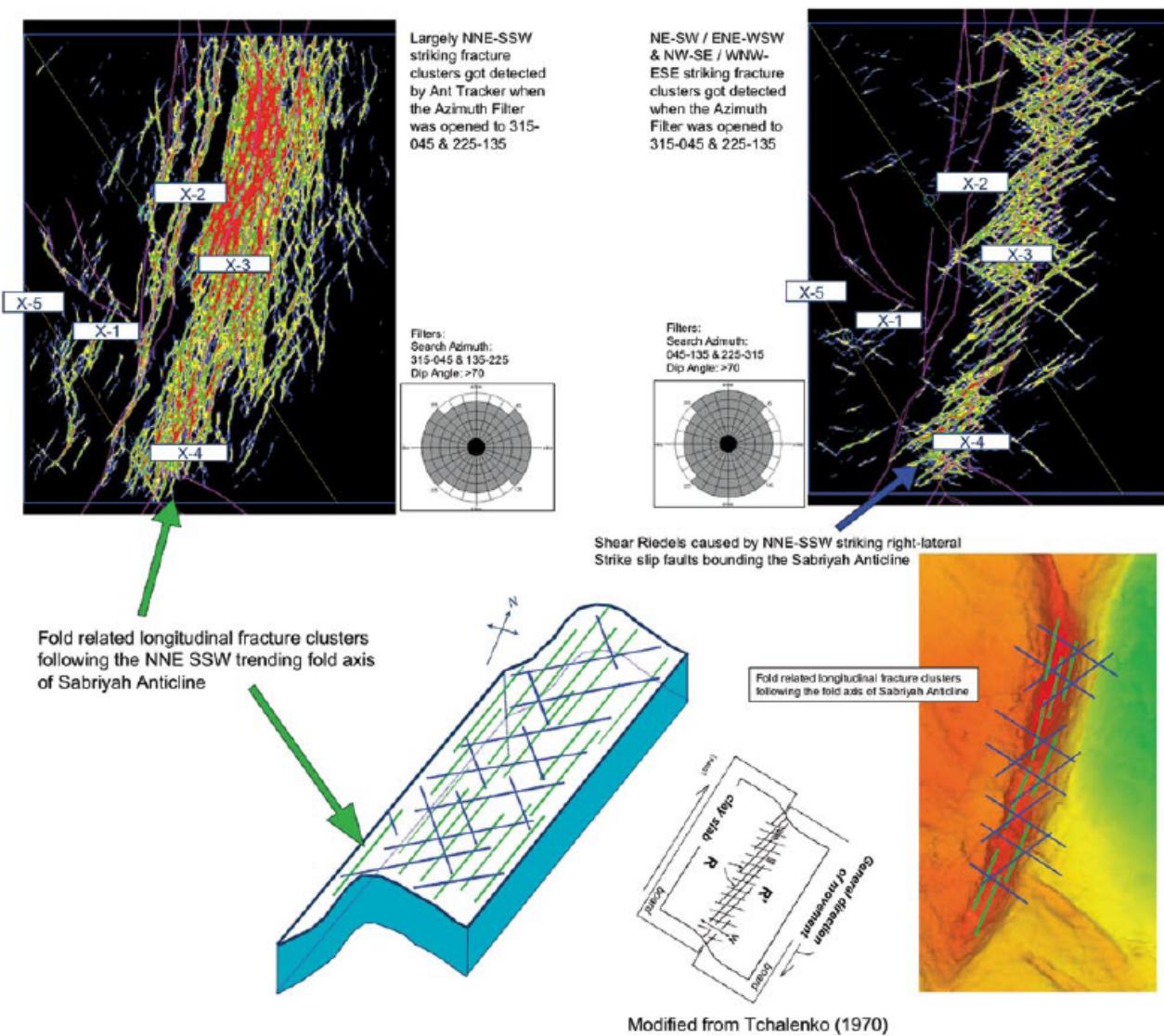


Рисунок 4 Как видно из скважинных изображений, почти все ориентации кластеров трещин были обнаружены по данным 3D сейсморазведки с использованием DES для двух различных наборов параметров. С помощью этого метода были обнаружены меридиональные трещины, возможно связанные со складчатостью и кластеры трещин, связанные со сбросо-сдвиговым разломом и сдвигами Риделя.

демонстрирует кластеры трещин вдоль разреза через скважины X-2 и X-3, извлеченные с использованием методики FCM используя азимутальный фильтр 050-080 и 230-260 для усиления кластеров трещин, которые имеют ориентацию простирания в пределах заданного диапазона азимутов. Из рисунка видно, что скважина X-3 не пересекает никакого кластера трещин в интервале с кровли Naj-mah до кровли среднего Martat. Она пересекает крупный кластер трещин в интервале от среднего Martat до кровли Minjur (Рисунок 5). То же наблюдение было сделано в скважине на основе керна и скважинных данных как показано на кривых диаграммы наклонометрии плотности трещин (число трещин на фут) для открытых трещин.

Помимо упомянутых факторов для потока обработки FCM, разрешение входных сейсмических данных крайне важно для выделения кластеров трещин более крупного и мелкого масштабов. Поток обработки FCM был применен к сейсмическим данным *Q-Land* на месторождении NW-Raudhatain с целью определения возможного улучшения детализации кластеров трещин. На Рисунке 7 приводится сравнение результатов FCM для традиционных 3D сейсмических данных, полученных на поверхности и данных, полученных по Q-технологии с использованием одного датчика. Между производительностью скважины и близостью кластеров трещин наблюдалась хорошая корреляция, что было предсказано FCM.

Это демонстрирует, что получение карты коридора трещин может быть принципиально важным элементом для размещения нагнетательных и добывающих скважин в целях максимизации извлечения на месторождении.

Возможное происхождение коридоров трещин

Независимо от возможного механизма в микроскопическом масштабе, трещинообразование в породе происходит в присутствии двух мод в мезомасштабе: моды растяжения и моды сдвига (Рисунок 7). Мода растяжения (Мода 1) – это разрушение, происходящее перпендикулярно минимальному основному напряжению без сдвига в плоскости трещины. И наоборот, в разрушение сдвига

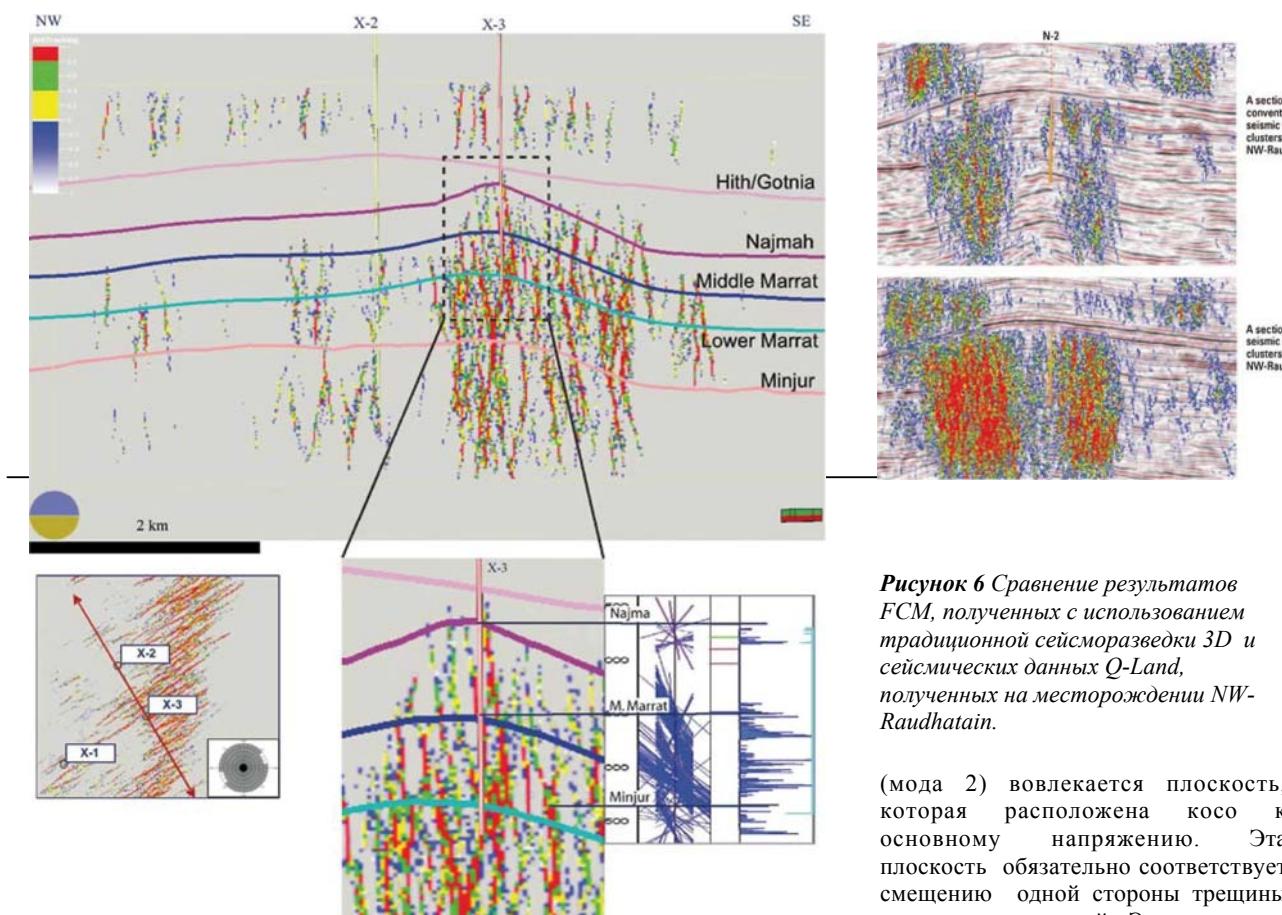


Рисунок 5 Разрез через скважины X-2 и X-3, на котором демонстрируется кластер трещин, полученный с использованием методики FCM с применением фильтра 050-080 и 230-260 для усиления линеаментов с простирианием ВСВ-ЗЮЗ. Скважина X-3 не пересекает никакого кластера трещин в интервале с кровли Najmah до кровли среднего Marrat. Тогда как она пересекает крупный кластер трещин в интервале со среднего Marrat до кровли Minjur. Подобное же наблюдение касается изображений керна и скважинных данных, как показано на кривой диаграмм наклонометрии и плотности трещин для открытых трещин.

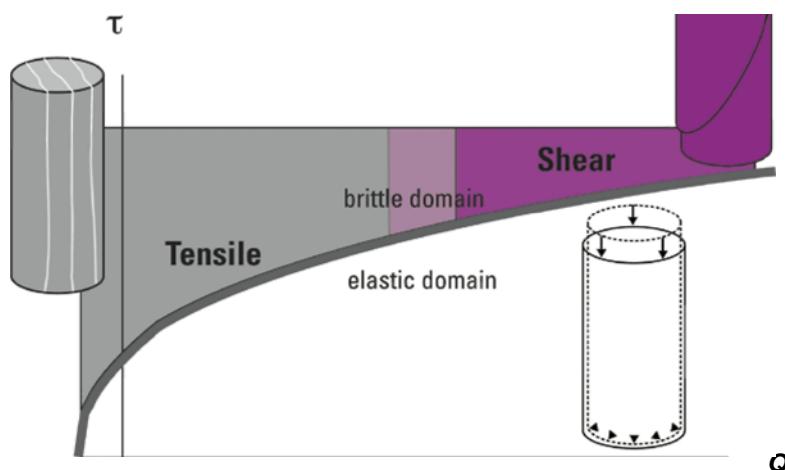


Рисунок 7 Представление Мора, на котором предел упругой области и области разрушения, а также области между разрушения растяжения и разрушения сдвига являются собственным свойством породы.

Рисунок 6 Сравнение результатов FCM, полученных с использованием традиционной сейсморазведки 3D и сейсмических данных Q-Land, полученных на месторождении NW-Raudhatain.

(мода 2) вовлекается плоскость, которая расположена косо к основному напряжению. Эта плоскость обязательно соответствует смещению одной стороны трещины относительно другой. Это смещение очень мало в момент разрушения. Любая хрупкая порода может реагировать двумя способами, но не для одного и того же типа напряжения. Предел между модами растяжения и сдвига являются внутренними свойствами породы, также как и огибающая Мора, которая ограничивает упругую и хрупкую области. Во многих вертикальных скважинах трещины, вызванные пертурбацией напряжений из-за бурения, иллюстрируют это двоякое поведение. Они зависят от растяжения, от эшелонирования, или от литологии. Подобным образом, во время тектонической фазы, разрушение для пород одного литологического состава может быть разрушением растяжения, для другого типа литологии – разрушением сдвига.

На начальной фазе стандартного разлома, разрушение в слое, работающем на сдвиг, развивается вдоль одной плоскости (Рисунок 8). Движение вдоль этой плоскости раскладывается на вертикальный сброс и горизонтальное удлинение. Это горизонтальное удлинение обязательно вызывает сокращение величины минимального напряжения с слоях, которые залегают над и под ним. Если эти слои работают на растяжение, число вертикальных трещин, т.е. коридор трещин, будет в результате в вертикали зоны разломообразования.

Сумма апертур трещин будет компенсировать удлинение, наблюдаемое в слое, работающем на сдвиг, когда вертикальный сброс обычно вмещает вертикальное смещение на одной из этих трещин. Эти вертикальные смещения очень трудно наблюдать на скважинных данных, поскольку большое число трещин осложняет прослеживание маркера. Много коридоров этого типа наблюдалось в палеозойском разрезе Алжира (Рисунок 9). Конечно, это частая ситуация, но может быть и другое происхождение данного феномена.

Заключение

Мы представили поток обработки, который позволяет нам картировать в 3D все крупные коридоры трещин на месторождении. Поток обработки был успешно применен к карбонатным месторождениям NW Raudhatain, Sabriyah, Umm Niqqa, и Bahra в Кувейте. Из-за ограниченной сейсмической сигнатуры некоторых коридоров трещин, наилучшие результаты получены при использовании высокоразрешенной сейсмической технологии. Наличием коридоров трещин всегда объяснялись прорывы воды, которые встречались гораздо раньше, чем ожидалось. Когда стали применяться 3D карты коридоров трещин, теперь их можно интегрировать в модели коллекторов в целях определения оптимального положения скважин, используя более реалистичное моделирование коллектора. Мы надеемся, что такая методология позволит избежать (Montaron et al., 2007) прорыва воды в добывающую скважину и,

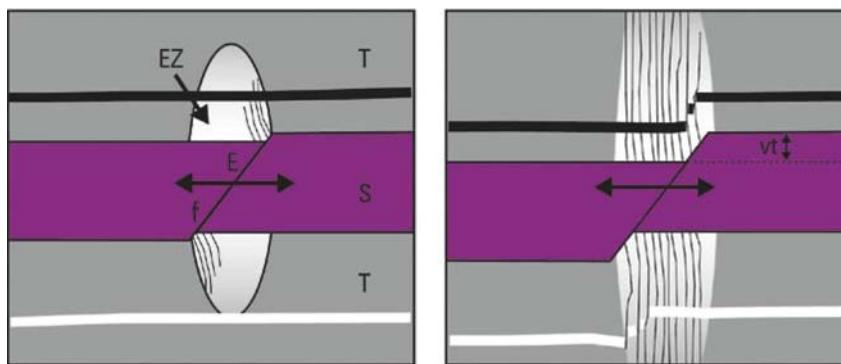


Рисунок 8 Развитие коридора трещин. Слева: Образование разлома (f) в слое, работающем на сдвиг (S), вызывающее латеральное растяжение (E) в этом слое и зоны напряжения растяжения *extensional (EZ)* в слоях, работающих на сдвиг, где образовались трещины. Справа: распространение трещин, вызывающее коридор трещин, чья апертура компенсирует удлинение разлома (E) и вертикальное смещение по некоторым из этих трещин в целях компенсации вертикального взброса по разлому (vt).

что более важно, это поможет существенно увеличить коэффициент отдачи в карбонатном коллекторе и других формаций с естественной трещиноватостью.

Благодарности

Авторы выражают признательность Kuwait Company за разрешение на публикацию данной работы и Donatella Astratti и Robert Godfrey за их ценный вклад.

Литература

Akbar, M., Singh, S.K., Khan, B., Abu-Habbiel, H., Maizeret, P.D., Astratti, D., Sonneland,

L., Pedersen, L.S., Bakiler, C. and Godfrey, R. [2008] An Innovative Approach to Characterizing Fractures for a Large Carbonate Field of Kuwait by Integrating Borehole Data with the 3D Surface Seismic. *GEO2008*, Bahrain, Abstract 118994.

Montaron, B.A., Bradley, D., Cooke, A., Prouvost, L., Raffin, A., Vidal, A. and Wilt, M. Shapes of Flood Fronts in Heterogeneous Reservoirs and Oil Recovery Strategies. *SPE/EAGE Reservoir Characterization & Simulation Conference*, Paper 11147.

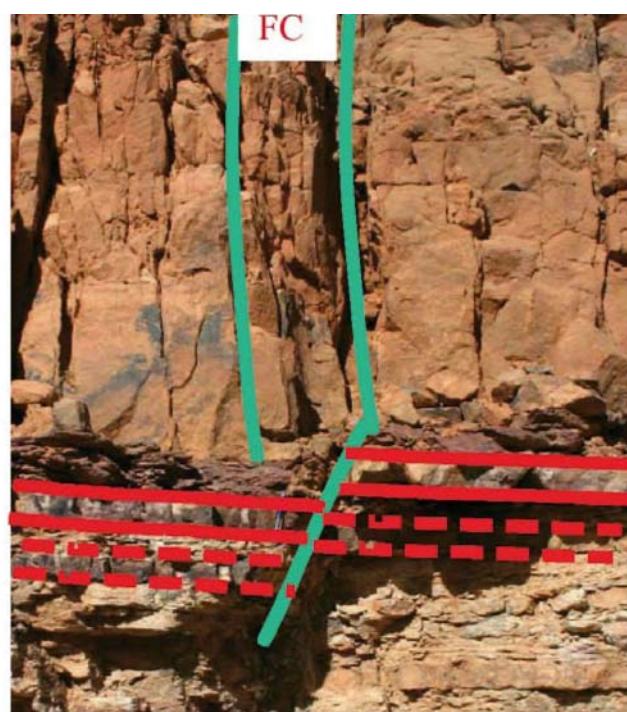
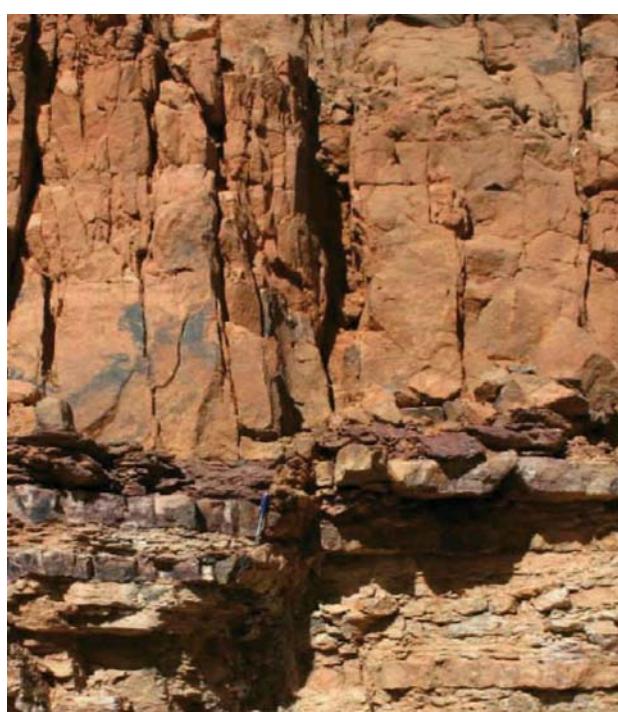


Рисунок 9 Коридор трещин в кварците, который развился в кровле небольшого разлома в глинистых слоях.