

Изучение аномалий потока флюидов в коллекторе посредством картирования сети трещин Study reservoir flow anomaly through mapping a fracture network

M. Luo (*Resources and Environmental Engineering, Waseda University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-Ku, Tokyo 169-8555, Japan*), **I. Takahashi, M. Takanashi, and Y. Tamura**

Режим потока в большинстве коллекторов с естественной трещиноватостью в основном определяется глубинной сетью трещин и может быть предсказан посредством изучения сейсмической анизотропии. В данной работе демонстрируется результат предсказания аномалии потока посредством картирования сети трещин в коллекторе по данным морской сейсморазведки с донными косами/кабелями.

Введение

Семь из десяти крупнейших в мире коллекторов карбонатные, часто с низкой проницаемостью. В этих условиях единственным экономически выгодным способом добычи нефти и газа является поиск трещиноватости в породе, которая выполняет функции «трубопровода». Поэтому знание сети трещиноватости обязательно. Существует несколько прямых способов определения трещиноватости (например, анализ керна, скважинные измерения и т.д.). Наряду с ними также существуют дистанционные методы определения трещиноватости (например, сейсмические методы). Методы, основанные на анализе керна и данных каротажа в комплексе с данными пластовых испытаний, могут дать некоторую информацию о трещиноватости. До недавнего времени эта информация была ограничена тем, что все перечисленные методы являются локальными и не дают пространственного распределения трещиноватых свойств коллектора.

С другой стороны наличие вертикальной трещиноватости и/или ориентированности зерен в пористой породе изменяет физические свойства горной породы и может привести к возникновению сейсмической азимутальной анизотропии: в таких породах сейсмические волны будут реагировать на изменение жесткости и пластичности породы в зависимости от направления их распространения, что приводит к вариациям амплитуды и скоростей сейсмических волн в зависимости от азимута приемной установки. Это явление может быть обнаружено при использовании определенной методики сейсмической съемки (Lynn and Thomsen, 1986; Mallick and Frazer, 1987). Последние исследования в области определения трещиноватости пород методами сейсморазведки (MacBeth et al., 1999; Li et al., 2003; Burns et al., 2004; Luo et al., 2005) продемонстрировали способность выявлять трещины, размер которых намного меньше, чем длина сейсмической волны, по данным продольных волн традиционной 3D съемки.

Наиболее часто применяемым методом для обнаружения трещиноватости горных пород по данным продольных волн 3D съемки является извлечение азимутальной сейсмической анизотропии и последующего использования азимутальной информации для количественного предсказания простираения и плотности трещин в породе. Полученная по данным сейсморазведки информация о трещиноватости может быть в дальнейшем использована при интерпретации и построении модели коллектора для определения таких важных характеристик коллектора как тензор проницаемостей и/или

направления потоков флюида в коллекторе (Holmes and Thomsen, 2002; Laribi et al., 2003).

Первостепенной задачей в представленной работе являлась задача картирования вероятной сети трещин для интересующего слоя и изучение влияния трещин на поток флюида в коллекторе по данным морской сейсморазведки с донными косами/кабелями. Данные получены в морской части карбонатного месторождения, которое ранее характеризовалось непредсказуемыми прорывами пластовой воды в скважины. Выполнение поставленной задачи было разбито на два шага: (1) построение многоазимутальных карт атрибутов для интересующего слоя и (2) описание сети трещин в терминах простираения и плотности трещин, оцененных по картам атрибутов сейсмической анизотропии, построенным на первом этапе. В целях повышения качества карты трещиноватости в процессе обработки сейсмических данных было устранено влияние отложений, перекрывающих интересующий слой. Предполагалось, что детальная информация о глубинной системе трещин совместно с данными по известным крупным разломам объяснит имеющуюся аномалию потока флюида.

Тестовый полигон и база данных

Тестовый полигон, расположенный в сводовой части морского карбонатного месторождения на среднем Востоке, был выбран для данного исследования (Рис. 1а). Площадь полигона составляет примерно 5 км² (2 км x 2.5 км) с относительно пологим характером залегания геологических объектов. На территории месторождения известны две системы разрывных нарушений (региональные разломы СЗ-ЮВ и радиальные разломы СВ-ЮЗ), которые образовались при крутящем перемещении пород в один из периодов геологической истории месторождения, а также при напряженном по сей день состоянии горного массива в направлении ССВ. Также, доступные данные анализа керна и каротажа FMI (микроэлектрический скважинный сканер) по этому месторождению свидетельствуют как о сильной изменчивости ориентации трещин, так и о локализации зон трещиноватости на территории месторождения. Поэтому, изучение трещиноватости пород сейсмическими методами должно было пролить свет на СЗ-ЮВ/СВ-ЮЗ разломы и на крутящие перемещения горных пород.

Продуктивные зоны на данном месторождении характеризуются хорошей пористостью скелета породы, но низкими значениями проницаемости. Также на данном месторождении ранее были зарегистрированы непредсказуемые прорывы пластовой воды в скважины. Они могут быть вызваны разрывами/трещинами и/или высокопроницаемыми прослоями в толще коллектора. Поэтому знание о расположении разломов сейсмического масштаба и трещин с размерами меньше длины волны и характер их влияния на поток флюида в коллекторе - это одна из ключевых задач для успешного построения геологической модели коллектора и увеличения общей

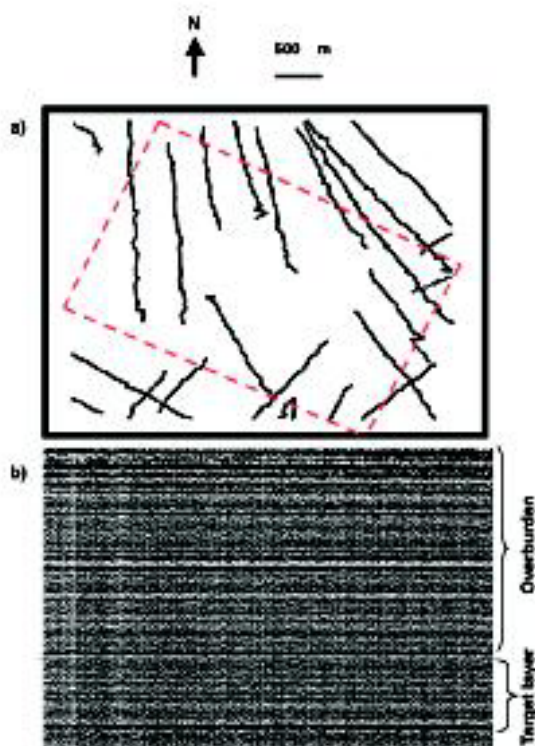


Рис. 1 (а) Карта разломов, построенная для глубокозалегающего слоя, на которой показаны региональные разломы СЗ-ЮВ направления и радиальные разломы СВ-ЮЗ направления. Также на рисунке обозначен тестовый полигон (красный пунктир) (Luo et al., The Leading edge, 2005). (b) Представительные данные до суммирования с сортировкой по выносам, и интересующий слой.

интенсивности добычи полезных ископаемых с месторождения.

Морская сейсморазведочная съемка с применением донных кос/кабелей была сделана с установкой параметров, которые обеспечивают высокую разрешающую способность полученных данных - высокую плотность наблюдений, полный набор выносов и азимутов, максимальный вынос составлял 4 км по инлайну и 3 км по кросслайну. В результате были созданы идеальные условия для выявления трещиноватости пород по данным сейсморазведки. Сейсмические данные до суммирования (Рис. 1b), которые были использованы в данной работе, подверглись таким типичным для морской съемки процедурам предобработки как суммирование данных с двух типов приемников донной косы; линейное подавление шумов, подавление шумов от ряби, необходимых для подавления помех, но имеющие видимого влияния на амплитуду полезного сигнала. В данной работе для достижения максимальной чувствительности к трещиноватости были использованы амплитуды отражений.

Многоазимутальные карты атрибутов

Первым шагом при картировании трещиноватости было построение многоазимутальных карт амплитуд для интересующего слоя. Это позволило нам выявить наличие сейсмической анизотропии посредством простого визуального анализа построенных карт, которые количественно характеризуют трещины и позволяют построить модель системы трещин для интересующего слоя. Для минимизации

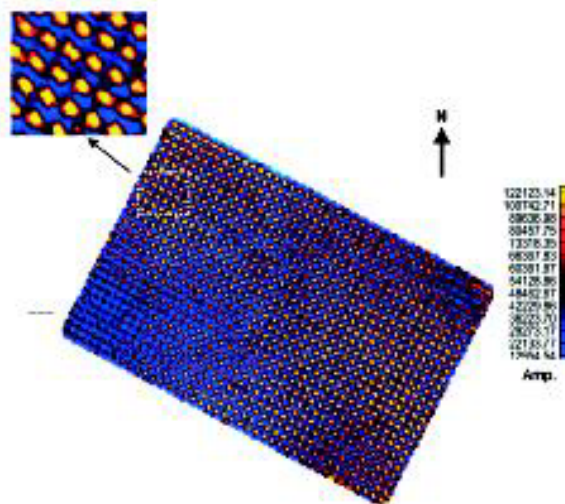


Рис. 2 Многоазимутальные карты и увеличенный участок интересующего слоя. По данной карте может быть выделено преобладающее направление распространения трещин - СЗ-ЮВ.

влияния системы наблюдений на (кинематические и динамические) параметры массива полученных данных, при анализе были использованы трассы с выносом меньшим, чем 3 км.

На Рис. 2 показаны карты амплитуд интересующего слоя. При построении карт в общей сложности были использованы 1107 супербинов с интервалом между ними 60 м. При построении каждой карты были использованы все азимутальные трассы, расположенные в радиусе 30 м от срединных точек. На картах ярко выделяется разрастание амплитуд в направлении СЗ-ЮВ в большинстве участков, что, как предполагается, вызвано глубинной трещиноватостью и содержит в себе информацию о локальных свойствах трещин.

Картирование сети трещин

Карта глубинной сети трещин ограничена в том, что она не может представлять детальные картины трещиноватости из-за ограничений длин сейсмических волн. Однако, мы можем картировать сеть трещин количественно с привлечением параметров простираения и плотности трещин, которые могут быть оценены по сейсмической анизотропии, вызванной наличием трещиноватости. В данной работе, мы измеряли эти два параметра прямо по многоазимутальной карте, на которой длинная ось анизотропии определялась в зависимости от заданного направления распространения сейсмической волны и отвечала за простираение трещин, в то время как отношение короткой оси к длинной характеризовало собой относительную плотность трещин. К амплитудам интересующего слоя была применена специальная методика исключения перекрывающихся отложений, которая заключалась в умножении исходной трассы на функцию, рассчитанную по перекрывающимся отложениям. Это частично компенсирует азимутальное затухание амплитуд от трещиноватых перекрывающихся отложений и обеспечивает то, что полученная информация о трещиноватости относится только к интересующему слою.

В первую очередь мы картировали интересующий слой по 1107 супербинам. На Рис. 3 показаны карты плотности трещин (сверху) и простираения трещин (снизу), на которые наложено расположение крупных разломов. Карта изолиний плотности трещин отображает то, что сильнотрещиноватые

зоны чаще всего близко расположены к крупным разломам, что согласуется с данными исследования обнажений пород в районе месторождения.

В значительной мере, на картах простираения отображаются особенности с направленностью СЗ-ЮВ/СВ-ЮЗ, а также крутящие особенности глубинной сети трещин для интересующего слоя: преобладающее направление трещиноватости СЗ-ЮВ совпадает с направлением региональных разломов на различных участках; тренд приблизительно на СВ-ЮЗ соответствует известным радиальным разломам в нижнем правом углу полигона; круговые направления выделяются приблизительно в центре полигона. Тесная связь между расположением разломов и трещиноватости свидетельствует о том, что картирование было сделано удачно.

После этого мы предприняли попытку картирования интересующего слоя в более крупном масштабе - 10 м, т.е. выявление трещин и последующий анализ выполнялся каждые 10 м. При анализе и построении карты было использовано 38801 супербинов. На Рис. 4 выделены те простираения

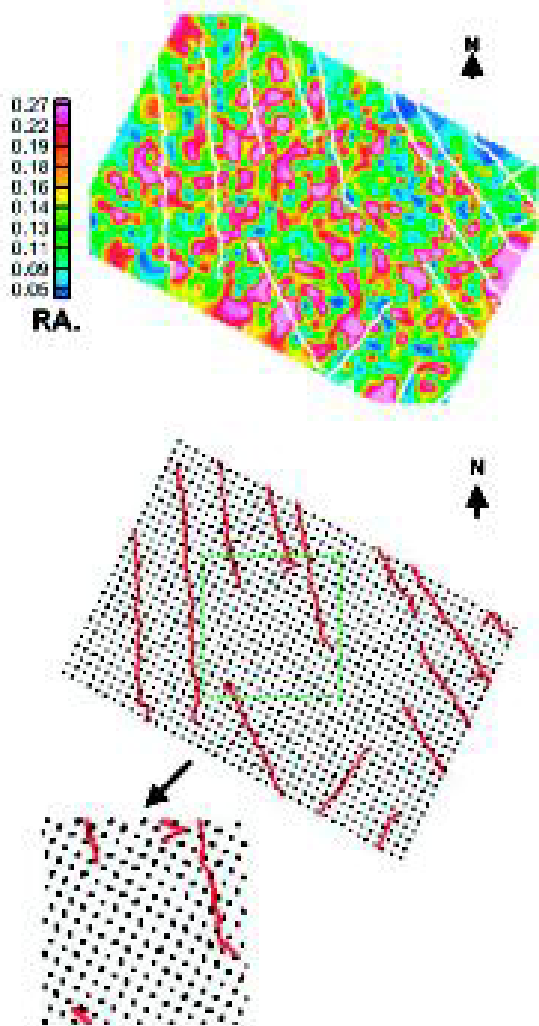


Рис. 4 Карта оценки плотности трещин (сверху) и карта простираений трещин (снизу) для интересующего слоя. Белые линии на верхней картинке и красные линии на нижней картинке обозначают крупные разломы. Увеличенный участок центральной части (зеленый квадрат) демонстрирует круговые особенности от вращательных движений горного массива.

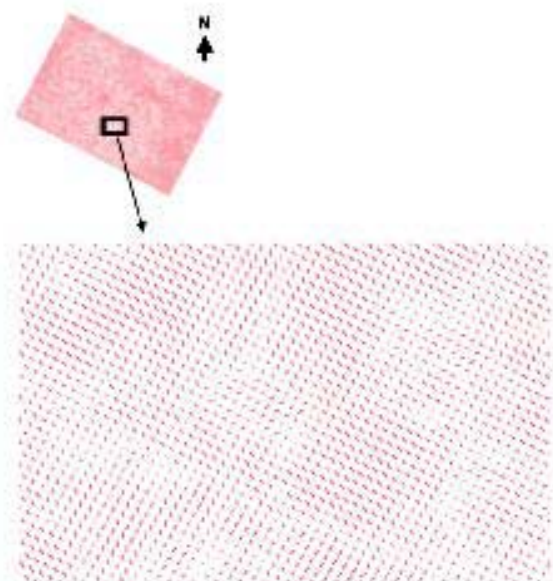


Рис. 3 Общее простираение трещин (сверху) и увеличенный участок (снизу) для интересующего слоя. Простираение трещин плавно меняется от точки к точке и образует области беспорядочной трещиноватости (Luo et al., The Leading edge, 2005).

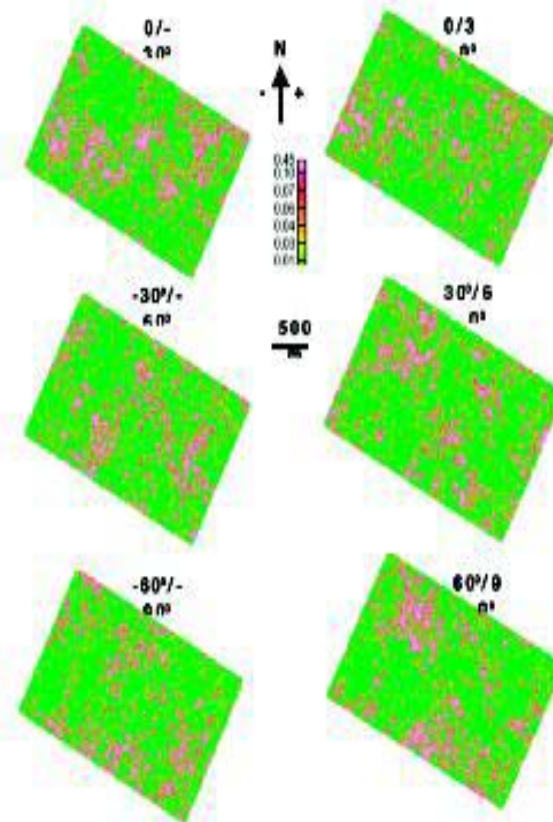


Рис. 5 Карты плотностей трещин для интересующего слоя, сгруппированные по простираению через каждые 30° начиная с нуля (север).

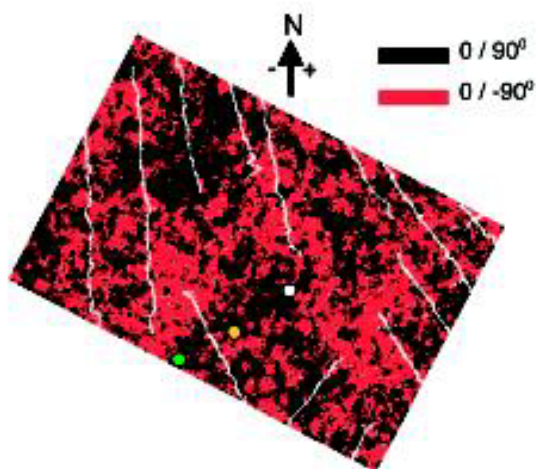


Рис. 6 Карта простираций трещин для интересующего слоя для СВ и СЗ четвертей с указанным расположением основных разломов. Белым кружком отмечена добывающая скважина, зеленым и оранжевым кружками отмечены две скважины для нагнетания воды.

трещин, которые могут играть значительную роль в формировании режима потока флюидов в коллекторе. Простираения трещин плавно меняются между соседними супербинами, в результате чего образуются области беспорядочной трещиноватости. Это явление может быть вызвано крутящими тектоническими воздействиями и/или сменами напряженного состояния горного массива, которые имели место в истории развития месторождения.

Предсказание аномалии потока флюидов

На некоторых участках рассматриваемого месторождения были зарегистрированы неожиданные прорывы пластовой воды в скважины. При этом необходимо учитывать взаимосвязанную сеть трещин рассматриваемого слоя и тот факт, что трещинная проницаемость гораздо больше, чем скелетная, так как первая вызвана трещинными каналами. Для того чтобы разобраться с этим явлением использовалась информация о простираении трещин, полученная через каждые 10 м.

На Рис. 5 показаны карты плотностей трещин интересующего слоя по простираениям через каждые 30°. Эти карты дают достаточно детальную информацию о местах большой плотности трещин одинакового простираения. Создается впечатление, что хотя зоны трещиноватости в общем меняют свое местоположение, зоны с направлениями простираения трещин от 0° до 30° (СЗ-ЮВ) и от 60° до 90°, которые примерно ортогональны, отчетливо выделяются. Объясняется это наличием взаимосвязанных трещинных каналов с размерами в сотни метров.

На Рис. 6 показана карта простираений трещин интересующего слоя в СВ и СЗ четвертях с наложенным изображением крупных разломов. Как видно, движение флюида может определяться расположением разломов и простираением трещин в коллекторе. Например, если мы представим себе, что и разлом и трещины полностью открыты, то скважина для нагнетания воды (зеленый кружок), расположенная ниже разлома, будет способствовать движению флюида сначала вдоль СВ трещин, потом вдоль СЗ трещиноватости до тех пор пока флюид не дойдет до разлома, после чего флюид будет продолжать свое движение до конца разлома. Однако, если скважина для нагнетания воды (оранжевый кружок) будет поставлена над региональным

разломом, то это вероятнее всего выразится в прорывах воды в добывающую скважину (белый кружок).

Заключение

В данном исследовании демонстрируется практически реализуемая процедура картирования глубинной сети трещин и изучения режима потока пластовых флюидов методами сейсморазведки. Хотя наличие и простираение системы трещин в интересующем слое тесно связаны с аналогичными параметрами главных разломов, картина сети трещин, содержащая в себе особенности малых размеров может давать более подробную информацию, которая может быть полезна в будущем при управлении коллектором. Как было показано, по данным сейсморазведки в пределах интересующего слоя нам удалось выделить преобладающие простираения трещин (СЗ-ЮВ/СВ-ЮЗ) и локализовать места крутящих движений горного массива, следы которых невозможно обнаружить по данным анализа керна или крупных разломов.

На данном месторождении возможны проявления прорывов воды в добывающие скважины. Поэтому поток флюида в интересующем слое может проходить либо в СЗ-ЮВ, либо в СВ-ЮЗ направлениях, в зависимости от местоположений нагнетающих и добывающих скважин, а также от проводимости сети трещин. Режим потока может усложниться, по мере того как главные разломы и области неоднородности начнут пересекаться с зонами беспорядочной трещиноватости. В любом случае, знание о сети трещин малого размера в комплексе с информацией о крупных разломах может способствовать получению лучшего решения в предсказании режима потока флюида. Это было продемонстрировано в данной работе.

В данной работе представлен новый взгляд на анизотропию коллектора. Параметры трещиноватости, оцененные по данным сейсморазведки, могут быть использованы в качестве входных данных для алгоритма симуляции.

Благодарности

Эта работа было опубликована с разрешения Abu Dhabi National Oil Company (ADNOC), Japan Oil Development Co (JODCO) и Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC). В первую очередь, автор выражает благодарность своему научному руководителю Norio Arihara за его постоянную помощь в работе. Мы благодарим Hitoshi Okamura, менеджера проектов в JOGMEC, за его поддержку. Автор благодарен Brian Evans, Shunya Takahashi, Kazuo Nakayama за полезную дискуссию, а также всех его коллег в группе исследования карбонатных коллекторов в JOGMEC. Также автор благодарит Japan Society for the Promotion of Sciences (JSPS) за финансовую поддержку, а также всех его коллег в Arihara Laboratory, Waseda University. Также благодарность выражается коллегам из China University of Geosciences (Wuhan). Мы очень благодарны за конструктивные замечания от Mike Bascon и критика, который пожелал остаться анонимным.

Ссылки на литературу

Burns, D.R., Wills, M.E., Minsley, B.J., and Toksoz, M.N. [2004] Characterizing subsurface fractures from reflected and scattered seismic energy. *7th SEGJ International Symposium*, 517-522.

Holmes, G.M. and Thomsen, L.A. [2002] Seismic fracture detection at a Middle East Offshore Carbonate Field. *SPE paper 78507*.

Laribi, M., Boubaker, H., Beck, B.J., Chen, H.K.,

Garroussi, K.A., Rassas, S., Rourou, A., Boufares, T., Douik, H., Saidi, H., and Quenes, A. [2002] Integrated fractured-reservoir characterization and simulation: Tunisian application. *SPE paper 84455*.

Li, X. Y., Liu, Y. J., Liu, E., Shen, F., Li, Q., and Qu, S. [2003] Fracture detection using land 3D seismic data from the Yellow River Delta, China. *The Leading Edge*, **22**, 680-684.

Luo, M., Takahashi, I., Takanashi, M., and Tamura, Y. [2005] Mapping a fracture network using wide-azimuth OBC seismic data. *The Leading Edge*, **24**, 95-99.

Lynn, H.B. and Thomsen, L.A. [1986] Reflection shear-wave data along the principal axes of azimuthal anisotropy. *56th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists, Session: S 9.5*.

MacBeth, C., Jakubowicz, H., Kirk, W., Li, X-Y., and Ohlsen, F. [1999] Fracture-related amplitude variations with offset and azimuth in marine seismic data. *First Break*, **17**, 13-26.

Mallick, S. and Frazer, L.N. [1987] Practical aspects of reflectivity modelling. *Geophysics*, **52**, 1355-1364.