

Структурная геология часто является областью деятельности специалистов. Steve Dee,* Brett Freeman, Graham Yielding, Alan Roberts и Peter Bretan из Badley Geoscience определили стандартную процедуру анализа структурной геологии в рамках деятельности компании.

Структурный анализ часто кажется чем-то, выполнимым только «большими компаниями», областью деятельности технического специалиста компании или сторонней услугой. К тому же, растущая осведомленность о выгоде, которую может принести структурная геология рабочему циклу разведка-разработка, создала обстоятельство, в котором новшества упрощают работу с инструментарием технического программного обеспечения. Применение структурных методов в поиске нефти и газа имеет, несомненно, большое значение со времен начала большой работы Dahlstrom (1969) по восстановлению разрезов, тем не менее, стандартные процедуры по решению общих проблем часто не определены. Обычно это связано с тем, что структурная геология воспринимается как область для специалистов и компании для достижения результатов полагаются на штат сотрудников и консультантов, являющихся профессионалами в области структурной геологии. Неудивительно, что на конкурентном рынке программного обеспечения были развиты методики и процедуры для становления структурного анализа основным инструментом интерпретаторов данных сейсморазведки, геофизиков и геологов. Где нам применять эти методики в процессе обработки и где они могут иметь действительно важное значение?

Структурно-геологический анализ — это... ?

Для многих неспециалистов в нефтяной промышленности «геологическая структура» — это трехмерная конструкция разломов и трещин, пластов или горизонтов и интрузий, таких как соляные диапиры, силы и другие вулканические тела. С развитием современной 3D визуализации и систем интерпретации, знания об их геометрической взаимосвязи, несомненно, возросли.

Однако, в основной геологической литературе структурная геология используется геологами для понимания истории деформации, начиная с понимания и интерпретации смещений, растяжений и интенсивностей до расчетов напряжений, давлений и температур. Мы определяем структурно-геологический анализ, по меньшей мере, поскольку основное различие касается индустрии разведки и разработки, как применение методик структурной геологии. Другими словами, структурно-геологический анализ — это практическое применение структурной геологии в технических задачах поиска и разработки углеводородов.

Итак, где же основная область применения структурно-геологического анализа? Существуют, по меньшей мере, четыре ключевых области, где мы считаем, что методы структурно-геологического анализа показали свою важную роль:

- Сейсмическая интерпретация и контроль качества
- Построение типичных моделей геологических структур
- Понимание роли геологической структуры на миграцию и накопление углеводородов
- Понимание роли геологической структуры на движение флюидов в процессе добычи

Очевидно, также структурно-геологические методики можно применять на многих стадиях процесса обработки. Например, в процессе сейсмической интерпретации может возникнуть желание предсказания palaeo-bathymetry посредством отслоения толщ и восстановления разрезов, с целью уточнения анализа процесса отложения и эрозии (например, Kusznir и др., 1995; Roberts и др., 1998). Классическим примером было бы моделирование процесса эрозии грабена, ограниченного сбросами (Yielding и Roberts, 1992). Пока что, основные методики можно использовать для моделирования истории захоронения бассейна или как раздел обработки для прогнозирования теплового потока и изменения температуры горизонта во времени (Kusznir и др., 2005).

Ключом здесь является понимание того, что возможная польза применения структурно-геологических методик к решению особых проблем и их широкого применения к ряду возможных процедур обработки, больше чем польза от исследования самих структурно-геологических методик. В этой статье мы познакомимся с некоторыми примерами применения структурно-геологических методик, использующих программное обеспечение Badleys' TrapTester как основной инструмент структурного анализа.

Сейсмическая интерпретация и контроль качества

Выделение разломов — область, где структурный инструментарий способен дать незамедлительный результат. Например, выделение разломов — в основном полуавтоматический процесс благодаря пониманию распределения смещений на их поверхностях (Рисунок 1). Посредством корреляции амплитуд разломов вдоль сети возможно выявление суммарных аномалий, которые могут соответствовать неинтерпретированным областям или необдуманному отбрасыванию процедуры выделения разломов (Рисунок 1c).

Определение пересечений разлома в процессе интерпретации может быть проблематичным. Принятая методика анализа пересечений разломов — срез сейсмического куба параллельно поверхности разлома и висячем, и в лежащем крыльях разлома, и интерпретация пересекающихся разломов в прямых направлениях. Пример на рисунке 2 иллюстрирует способ быстрого выделения

*E-mail: stephen@badleys.co.uk, Тел.: +44(0)1790 753 472, Веб: www.badleys.co.uk.

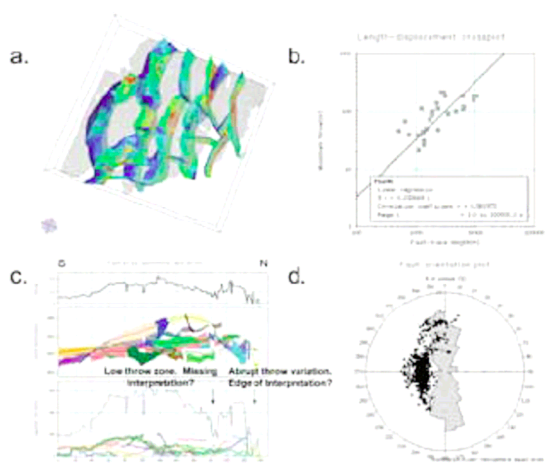


Рисунок 1 а) Методики анализа разломов помогают выявлять разломы посредством систематического применения простых понятий. б) Амплитуды разломов сопоставимы с длиной разломов. Построение кросс-плотов ключевых атрибутов для группы разломов быстро выявляет статистические выбросы. Обоснованы ли они хорошей интерпретацией? в) Разбиение разломов на точки с постоянным шагом вдоль плоскости разлома показывает, что ошибки интерпретации могут проявиться везде, где есть аномальные значения размаха разлома (показаны стрелками). г) Простые статистические характеристики и графики дают много сведений о системе разломов.

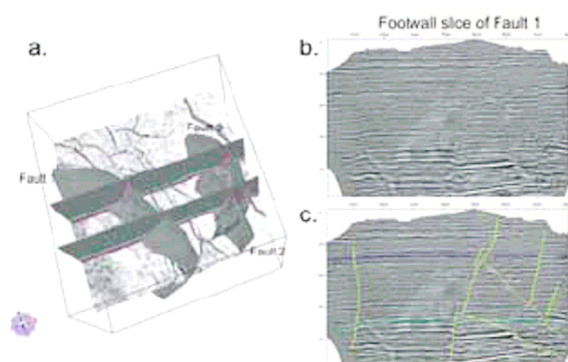


Рисунок 2 а) Построение сейсмических срезов — методика получения срезов сейсмического куба вдоль произвольных поверхностей, например, вдоль горизонта или разлома. б) При получении срезов вдоль разломов, срезы строятся параллельно поверхности разлома и висячем, и в лежащем крыле. В данном случае — в висячем крыле разлома 1. в) Количество пересечений разлома точно показывается в срезе вдоль поверхности висячего крыла разлома. Построение срезов не только уточняет моделирование разломов, но и помогает в определении пересечений разломов при картировании слияний разломов.

комплекса пересечений в процессе выделения горизонта с получением более ясной разломной обстановки.

Простые инструменты очень помогают при выделении разломов на сейсмических разрезах, но пока не реализованы в системах интерпретации. В TrapTester бесшовная стыковка инструментов интерпретации и анализа позволяет даже не структурному геологу делать значительные выводы относительно системы разломов, достоверно и быстро.

Построение типичных моделей геологических структур

Это область, где роль методик 3D интерпретации и визуализации вместе с приходом недорогих, но ценных инструментов программного обеспечения огромна для геологов и геофизиков. Геологическое моделирование часто выполняется в две стадии. В начале строится слоеная и разломная структура, здесь основная задача — точное представление пространственной геометрии геологического строения среды, которое дается сейсмическими данными. На этой стадии особое внимание уделено к форме, расположению и взаимосвязи плоскостей разломов. Вторая стадия обычно включает в себя создание клеточной пространственной структуры угловых точек и это здесь непрерывные седиментологические и физические свойства разреживаются для создания клеточной модели. Геометрия угловых точек используется, поскольку конечной точкой этого процесса является построение модели для расчетов течения пластовых флюидов.

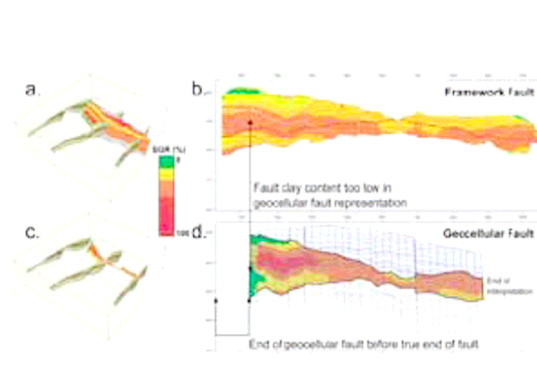


Рисунок 3 Сопоставление атрибутов разлома, рассчитанных для структурной модели (а and б), и для клеточной (с and d). Разломы окрашены в цвета, закодированные для коэффициента трещиноватости глинистых сланцев, вместо содержания глины в зоне разлома. Пока имеет место хорошая корреляция значений коэффициента трещиноватости, рассчитанных для структурной и клеточной моделей, описание разлома в клеточной модели согласуется в том случае, когда она не имеет ни вертикальной, ни горизонтальной границы изменения параметра — когда она безгранична.

Самое эффективное место оценки геометрии проявления разломов — структурная модель, однако большей информативностью свойств обладает клеточная модель. После получения клеточной модели может упасть качество структурной модели в показателях количества разломов, их форм, положений, взаимосвязей слоев и их смещений; в процессе моделирования возникают ошибки, которые невозможно оценить. Например, обрезка границ в клеточных моделях (Рисунок 3) может привести к недооценке возможности разлома экранировать резервуар. В приведенном примере разлом в клеточной модели достигает его вершины на 500 м ниже, чем в структурной модели!

Построение структурной модели, осложненной разломами, в реальной области определения данных до детализации модели разломов в пределах сеточного моделирования, является начальной точкой для более эффективного анализа влияния разломов на миграцию и течение флюидов.

Понимание роли геологической структуры в миграции и накоплении углеводорода

Понимание ситуаций, когда разломы являются покрывками для ловушек и обеспечивают замкнутость резервуара, является ключевым требованием для многих геологов, а

количественная методология была описана в ряде предыдущих номеров (например, Yielding 2002, Bretan и др. 2003).

Другой пример в данной особой области структурного анализа — возможное влияние давления при естественном залегании на стабильность разлома. Разломы, которые активируются при изменении текущей системы давлений, проницаемы для углеводородов. Для оценки данной возможной опасности можно использовать новую методику, которая вычисляет поровое давление, необходимое для воздействия на поведение разлома и показывает это значение на разломе (Рисунок 4). Необходимо небольшое повышение порового давления, чтобы разлом активировался. Этот анализ относительно быстр, поскольку он только требует определения поверхности разлома и границы изменения давления в естественном залегании.

Заполнение резервуара и анализ ловушки теперь могут быть объединены в одну процедуру. Совместно с «Permedia Research Group» мы развили процедуру включения свойств разлома из программы «Trap Tester» в модели заполнения резервуара (Рисунок 5) программы «Permedia Research Groups MPath». Модель определена как однородная, регулярная, свойства можно задавать либо на 2D, либо 3D сети. Разломы представлены в модели линейно согласно их капиллярным свойствам на соответствующей ячейке сети. Нефтяные

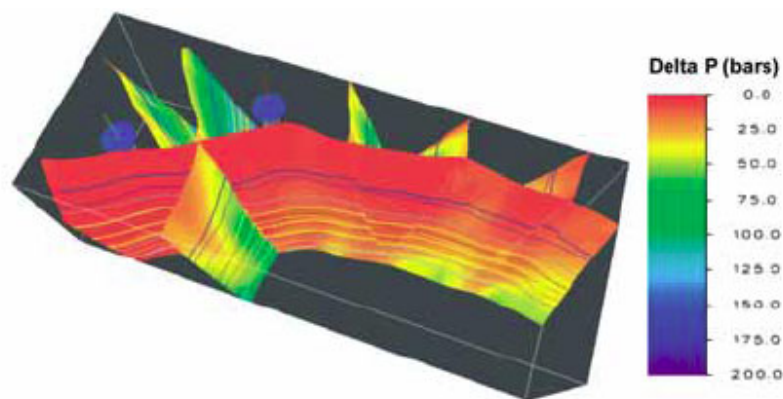


Рисунок 4 Для картирования на поверхности разлома его активации необходимы изменение давления флюида, сведения о системе давлений в естественном залегании, о поровом давлении и о геометрии разлома. Для активации разломов, отмеченных красным цветом, требуется небольшое повышение порового давления. Такие разломы проницаемы для мигрирующих и текущих углеводородов.

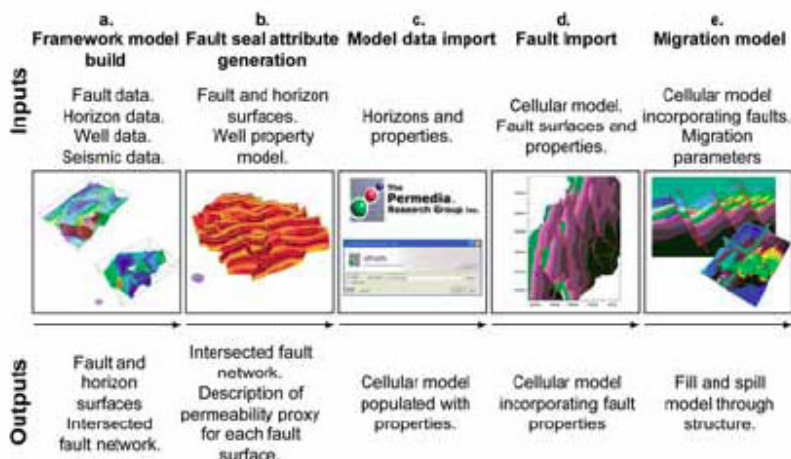


Рисунок 5 Процедура извлечения сведений о контролируемых разломами заполнении и проницаемости ловушки, смоделирована с использованием программ TrapTester и MPath. Параметры разлома и структура горизонта получена в TrapTester на основе реализации ввода поровых давлений для сети разломов.

флюиды представлены в предварительно заданных местах и свободно перемещаются соответственно балансу локальных давлений воды, плавучести нефти и резистивным капиллярным давлениям. Свойства разлома могут меняться по вертикали и латерали так, чтобы такая обстановка была моделируема (Рисунок 6a). Углеводороды мигрируют через область разломов вследствие заполнения и протекания. Ключом понимания распространения углеводородов является понимание путей миграции, ограниченных разломами (Рисунок 6b).

Понимание роли геологической структуры на течение флюидов

Свойства разломов для моделирования резервуара были доступны некоторое время в коммерческой программе TransGen — продукт Dublin-based Fault Analysis Group (Manzocchi и др. 1999, 2002). Процедуры интеграции информации о свойствах были доступны в модели резервуара с геометрией плоскости разлома, для получения реалистичности проницаемости. Данная модель основывалась на строении и толщине зоны разлома (Рисунок 7). Реалистичное моделирование свойств разлома в динамичном моделировании резервуара — попытка понять роль разломов на образование углеводородов в постоянном временном масштабе. Определяются те разломы, которые могут влиять на пределы образования и на сценарий развития

Оценка роли разломов и трещин на течение флюидов использует клеточные модели резервуара; моделирование резервуара осложнено учетом сетей разломов и трещин, например особой ориентацией или типом трещиноватости. Применении методов, основанных на учете разломов дает возможность извлечения информации о разломах и трещиноватости из сейсмических и скважинных данных (Gillespie и др. 1993; Yielding и др. 1996), но не легко определение особых свойств разломов и трещин по всему резервуару. Ошибки распространения на разломы, которые имеют значимую роль, не рассматриваются и механика горных пород игнорируется при создании модели, осложненной разломами, в масштабе, разрешимом сейсмическими данными.

Последние достижения в применении теории упругих движений в моделировании разломных геологических структур привели к развитию нового метода для прогноза и картирования областей проницаемости разломов и областей повышенной продуктивности резервуара (Bourne и Willemse 2001, Bourne и др. 2001). Теория упругих перемещений широко используется (уже несколько лет) сейсмиками и геологами для моделирования деформации поверхности после землетрясения (например, Neale и др. 2004), недавно была расширена для анализа картирования разломов на сейсмических профилях, для прогноза плотности, локализации и ориентации за пределами

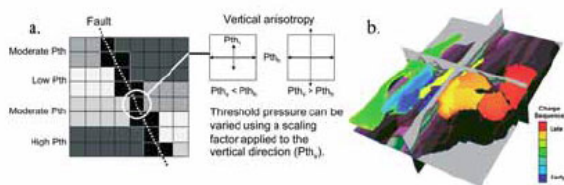


Рисунок 6 а)Высоко разрешенная клеточная модель MPath,объединяющая явные разломы, разломы с латеральной и вертикальной проницаемостью и капиллярные свойства. Эта модель позволяет описывать латеральные и вертикальные течения в разломной зоне. б) Реализация сценария заполнения и просачивания для месторождения Gullfaks в Северном море. Заполнение и просачивание контролируются областью низких давлений на плоскость разлома.

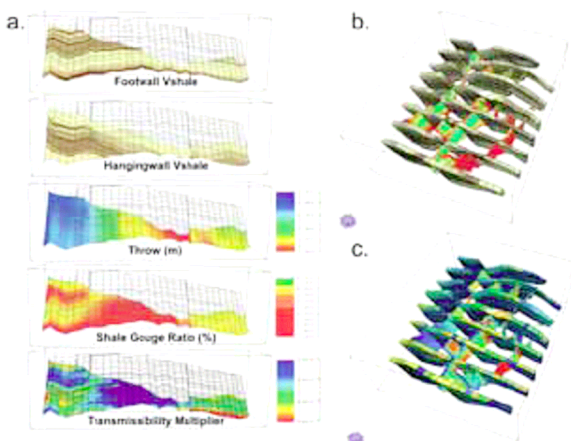


Рисунок 7 Свойства разлома для моделирования резервуара. а) Описание параметров течения для разлома требует описания геометрии разлома и Vshale в висячем и лежащем крыльях разлома. Проницаемость рассчитана для структуры разломной зоны, представленной коэффициентом трещиноватости сланца толщиной разломной зоны. б) Модель резервуара с Vshale параметрами в клеточной модели и соответствующими значениями коэффициента трещиноватости сланца на разломах. в) Значения проницаемости на плоскостях разломов на сетке.

разрешающей способности сейсмики. Это было реализовано как часть процедуры структурного анализа в модуле FaultED программы TrapTester (Рисунок 8).

Благодарности

Спасибо за идеи и вдохновение Andy Foster, Jim Parsons и Helen Jones из Badleys, Alan Gibbs и коллег из Midland Valley Exploration, Nick Kusznir и David Healy из Liverpool University, John Walsh и Tom Manzocchi из Fault Analysis Group (University College Dublin) и Dan Carruthers из The Permedia Research Group. Использованы лицензии PL050/PL050B и the Norwegian Petroleum Directorate для Gullfaks Public Data Release.

Ссылки

Bourne, S.J. and Willemse, E.J.M. [2001] Elastic stress control on the pattern of tensile fracturing around a small fault network at Nash Point

,
UK.
Jour

nal of Structural Geology, 23, 1753-1770.

Bourne, S.J., Rijkels, L., Stephenson, B.J., and Willemse, E.J.M. [2001] Predictive modelling of naturally fractured reservoirs using geomechanics and flow simulation. *GeoArabia*, 6, 27-41.

Bretan, P., Yielding, G., and Jones, H. [2003] Using calibrated shale gouge ratio to estimate hydrocarbon column heights. *AAPG Bulletin*, 87, 397-413.

Dahlstrom, C.D.A. [1969] Balanced cross-sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6, 743-757.

Freeman, B., Yielding, G., Needham, D.T., and Badley, M.E. [1998] Fault seal prediction: the gouge ratio method. In: Coward, M.P., Daltaban, T.S. & Johnson, H. (eds), *Structural Geology in Reservoir Characterization. Geol. Soc. Spec. Publ.* 127, 19-25.

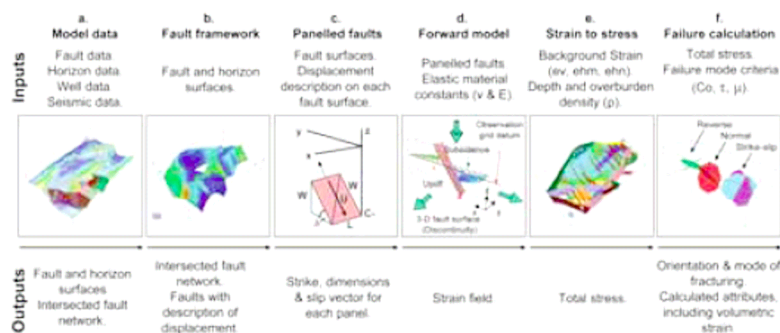


Рисунок 8 Прогноз маломасштабных трещин и сбросов возможен при использовании геомеханических методов, таких как моделирование упругих дислокаций. Вместе TrapTester, упругие дислокации введены в простом рабочем потоке и позволяют прогноз мод трещин, ориентацию и плотность, используя модели недр на входе.

- Gillespie, P.A., Howard, C. H., Walsh, J.J., and Watterson, J. [1993] Measurement and characterisation of spatial distributions of fractures. *Tectonophysics*, 225, 113-141.
- Healy, D., Yielding, G., and Kusznir, N. [2004] Fracture prediction for the 1980 El Asnam Algeria earthquake via elastic dislocation modelling. *Tectonics*, 23, TC6005. doi:10.1029/2003TC001575.
- Kusznir, N.J., Hunsdale, R., Roberts, A.M., and iSIMM Team. [2005] Timing and Magnitude of Depth-dependent Lithosphere Stretching on the S. Lofoten and N. Vøring Continental Margins Offshore Mid-Norway: Implications for Subsidence and Hydrocarbon Maturation at Volcanic Rifted Margins. In: *Proceedings of the 6th Conference on Petroleum Geology of NW Europe*. The Geological Society, London.
- Kusznir, N.J., Roberts, A.M., and Morley, C.K. [1995] Forward and Reverse Modelling of Rift Basin Formation. In: Lambiase, J. (Ed). *Hydrocarbon Habitat in Rift Basins. Special Publication*, 80, 33-56. The Geological Society, London
- Manzocchi, T., Walsh, J.J., Nell, P., and Yielding, G. [1999] Fault transmissibility multipliers for flow simulation models. *Petroleum Geoscience*, 5, 53-63.
- Manzocchi, T., Heath, A.E., Walsh, J.J., and Childs, C. [2002] The representation of two phase fault-rock properties in flow simulation models. *Petroleum Geoscience* 8, 119-132.
- Roberts, A.M., Kusznir, N.J., Yielding, G., and Styles, P. [1998] 2D flexural backstripping of extensional basins: the need for a sideways glance. *Petroleum Geoscience*, 4, 327-338.
- Yielding, G. [2002] Shale Gouge Ratio - Calibration by geo-history. In: Koestler, A.G. and Hunsdale, R. (eds) *Hydrocarbon Seal Quantification, NPF Special Publication* 11, 2002, 1-15.
- Yielding, G., Freeman, B., and Needham, D.T. [1997] Quantitative Fault Seal Prediction. *AAPG Bulletin*, 81, 897-917
- Yielding, G., Needham, T., and Jones, H. [1996] Sampling of fault populations using sub-surface data: a review. *Journal of Structural Geology*, 18, 135-146
- Yielding, G., Øverland, J.A., and Byberg, G. 1999. Characterisation of fault zones for reservoir modelling: An example from the Gullfaks Field, Northern North Sea. *AAPG Bulletin*, 83, 6, 925-951.
- Yielding, G. And Roberts, A.M. 1992. Footwall uplift during normal faulting - implications for structural geometries in the North Sea. In: Larsen, R.M., Brekke, H., Larsen, B.T. and Talleraas, E. (Eds). *Structural and Tectonic Modelling and its Application to Petroleum Geology. NPF Special Publication*, 1, 289-304, Elsevier, Amsterdam.