

Комплексирование данных обнажений со скважинными данными в целях улучшения моделей трещиноватого коллектора. Integration of outcrop with borehole data to improve fractured reservoir models

Giovanni Bertotti,¹ Jose Taal-van Koppen,^{2,3} Tijs Beek,^{2,4} Stefan M. Luthi,² и Nico Hardebol¹

Введение

Знание моделей трещин в масштабе коллектора важно для оценки их физических свойств (например, связность трещин) и для ввода ограничений в цифровые модели. Это особенно справедливо в случае распространенных трещин, которые влияют на большие объемы пород, но вызывают деформации, которые лежат за пределами сейсмического разрешения.

Самым распространенным способом моделирования полей трещин в масштабе коллектора – *апскейлинг* скважинных данных (например, Rawnsley et al., 1997; Wu and Pollard, 2002). Данные, получаемые в скважинах, обладают пространственным масштабом 10^{-2} - 10^0 м и требуется экстраполяция на несколько порядков, для получения размеров, соответствующих размерам коллекторов, обычно достигающих 10^1 - 10^3 м, с помощью методов статистики (рис. 1). Этот процесс, однако, страдает от ограничений скважинных данных при корректной дискретизации популяций трещин (например, Peacock, 2006) и адекватности процедуры экстраполяции.

Другим подходом моделирования поля трещин является *даунскейлинг*, при котором модели трещин в коллекторе предсказываются на основании полей напряжений и трещин в осадочном бассейне, в котором расположен коллектор (рис. 1). Поле напряжений, зависящее от времени обычно моделируется с помощью цифровой методики и ограничивается структурой и тектоникой бассейна. Знание о трещинообразовании в слоях и группах слоев (стратиграфия трещин) более трудно получить и их всегда получают из обнажений литологических разностей, сравнимых с теми же, что слагают коллектор. В настоящее время, однако, методики сбора данных и протоколы обработки требуют много времени и на выходе дают наборы данных, которые не полны или не полностью объективны.

В этой работе мы представим новые разработанные нами методы сбора и обработки данных о трещинах, на основе результатов выполненной работы на трещиноватых месторождениях, затрагивающих пермскую систему конусов выноса дна бассейна формации Skoorsteenberg (суб-бассейн Tanqua-Karoo, Южная Африка) и комплексирования этих данных и сравнимых с ними данных, полученных в скважинах (деталисмотрите в Bertotti et al., в печати; Taal-van Koppen, в процессе написания). Последовательность пород состоит из песчаников, имеющих структуру четырех наложенных конусов выноса, переслаивающихся с глинами (Hodgson et al., 2006), которые претерпели погружение и были вновь подняты в мезозое (Ransome & de Wit, 1992). В пределах области исследований слои имеют субгоризонтальное строение и только локально

¹ Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands.

² Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

³ Present address: Total E&P The Netherlands, The Hague.

⁴ Present address: NAM, Assen, The Netherlands.

претерпевают неглубокие надвиги и характеризуются связанными с ними разрывными складками. Практически все породы претерпели распространенное трещинообразование (трещины в Ю направлении), которое часто организованные в скопления. Благодаря превосходному обнажению и семи (несколько сотен метров глубиной) исследовательским скважинам, пробуренным во время проекта NOMAD, финансируемого Евросоюзом (Luthi et al., 2006), область является идеальной природной лабораторией для исследований совокупной выгоды комплексных данных обнажений и скважин.

Подход апскейлинга

Методики и результаты скважинного анализа. Данные по разрезу, получены по скважинным изображениям и керну, по трем скважинам большого (6 дюймов) и четырем скважинам малого диаметра (4 дюйма) (Рис. 2). Кривые электрических сопротивлений (ФМ, марка Schlumberger) были получены по скважинам большого диаметра, а оптические и акустические данные (OBI и ABI, марка ALT) по скважинам малого диаметра. Анализ изображений дал детальную информацию по мощности слоев, а также ориентацию скважин, средней глубине, наклону, глубине, и т.д., трещин, которые затем были соотнесены с наблюдениями по керну. Для получения плотности трещин, каждый стратиграфический слой был подвержен классификации по мощности, и общее число слоев в каждом классе было умножено на диаметр скважины с целью получения минимальной горизонтальной длины осадочного слоя. Путем деления числа пересекающихся

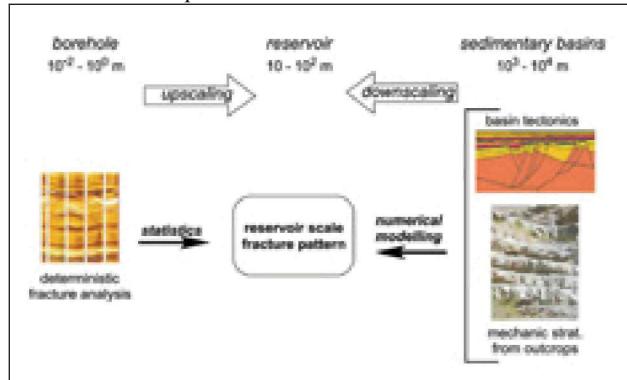


Рисунок 1 Процедуры апскейлинга и даунскейлинга в целях предсказания полей трещин в коллекторах. Указана характеристическая пространственная шкала различных областей.

трещин на длину осадочных слоев одного класса, получают минимальную интенсивность трещин по горизонтали (Taal-van Koppes, в процессе подготовки).

Оказалось, что ориентация трещин по скважинам Tanqua-Karoo имеет С3-ЮВ направление с некоторой тенденцией 3С3-ВЮВ (Рис. 2). Присутствует поднабор с ориентацией

В-3. Интенсивность трещин имеет диапазон от 0.5 м^{-1} в слоях, мощностью менее 3 см, до $>15 \text{ м}^{-1}$ в слоях мощностью более 1 м. В противовес предыдущим работам, данные говорят об удивительной прямой пропорциональности между интенсивностью трещин и мощностью слоя (Рис. 3) (Taal-van Koppes, в процессе подготовки).

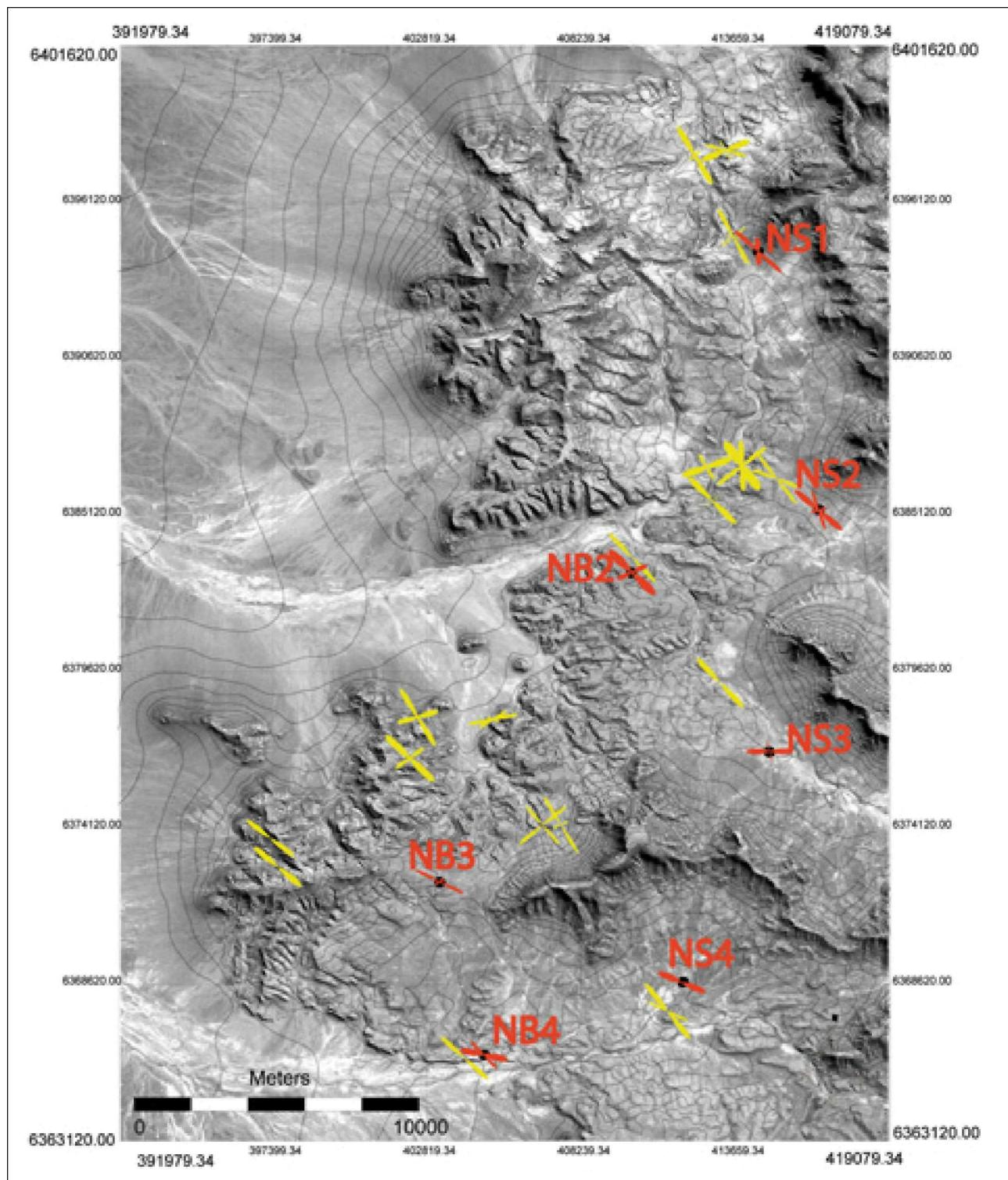


Рисунок 2 Спутниковое изображение области исследований с ориентацией трещин (розы-диаграммы) по обнажениям (желтым) и скважинам (красным).

Экстраполяция до масштаба коллектора

Скважинные модели трещин (ориентация и плотность) обычно экстраполируются до масштаба коллектора с помощью пакетов программ, которые требуют ввода предположений о числе и ориентации наборов трещин и их рассеяния. Тогда как ориентации отдельных трещин явственно определяются на скважинных данных, их статистическое распределение по стратиграфической колонке - нет. Стандартные пакеты программ предлагают различные статистические функции для построения полей трещин в масштабе коллектора (одномодальный, полимодальный), но часто выбор является произвольным, что является разрушительным для устойчивости получаемых предсказаний. На рисунке 4 показан пример экстраполяции до масштаба коллектора трещин, наблюдавшихся в скважинах на области исследований.

Подход даунскейлинга**Стратегия**

При подходе даунскейлинга, резервуар рассматривается как часть более крупной системы, а именно, осадочного бассейна, который на данной стадии своей истории, испытывает трещинообразование. Предсказание типа, ориентации и пространственного распределения трещин подразумевает знание полей напряжений и деформаций по всему бассейну. Если структура и тектоника бассейна известны, поле напряжений можно смоделировать с помощью цифровых методов, на которых мы не будем останавливаться в данной работе.

Мы лучше обратимся к тому, как будут образовываться трещины в различных породах (группах пород), и каковы будут получаемые интенсивности, интервалы, и пространственные распределения трещин. Это относится к последовательности осадков с хорошо различимой слоистостью, возможно с различным размером зерен, литологией, и т.д. Методы, используемые для получения данных по трещинам на обнажениях, часто не эффективны и априори предполагают, что группа осадков разделена на интервалы с постоянной интенсивностью трещин резкими переходами. Чтобы избежать подобных предположений, мы принимаем обратный подход, т.е. тот, при котором мы получаем и описываем объективно все трещины на обнажении и в последствии используем их для получения эмпирической схемы стратиграфии трещин обнажения (смитеите Underwood et al., 2003). Затем части этой схемы сравниваются со стратиграфией обнажения для получения зависимостей между моделями трещин и наблюдаемыми характеристиками,

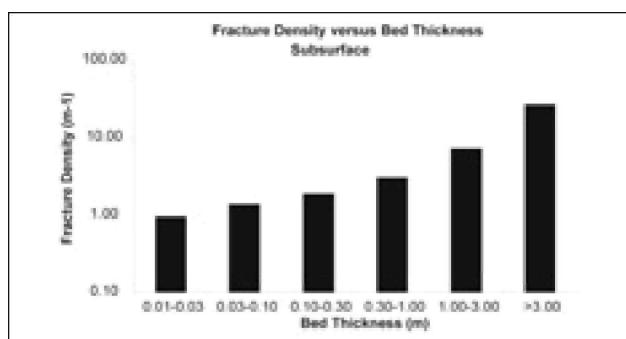


Рисунок 3 График, иллюстрирующий интенсивность трещин как функцию мощности слоя в одной из скважин большого диаметра. Используемый метод поясняется в тексте.

такими как мощности, литология, размер зерен, и т.д. Успех данного подхода в значительной мере зависит от доступности надежной и беспристрастной базы данных.

Инновационные методы сбора данных и обработки данных о трещиноватости на обнажениях и представительные результаты. Для эффективного получения полных данных о трещиноватости, включая атрибуты, такие как положение, направление и апертура, мы разработали новый граф и соответствующее программное обеспечение, которое сокращает насколько возможно количество информации, измеряемой на обнажении явно, и дает возможность получать полностью цифровые данные. Оно также позволяет производить быструю и гибкую обработку данных.

Сбор данных выполняется на субвертикальных обнажениях, обычно несколько метров в поперечнике, на которых обнажаются слои с различной литологией и мощностью и могут измеряться все трещину вне границ разрешения. Производится ориентированное фотографирование обнажения, фото загружается в настольный ПК, и в программу ГИС, таким образом, получают не только положение в пространстве, но также внутренний масштаб, по которому автоматически определяется положение всех объектов на фотографии. Затем видимые трещины на обнажении и ПК трассируются на экране, таким образом, определяя их высоту и положение без последующих измерений. Кроме того, атрибуты, такие как направление, пустоты, и пр., измеряются и связываются с каждой определенной трещиной. За менее чем два часа можно описать до 100 трещин.

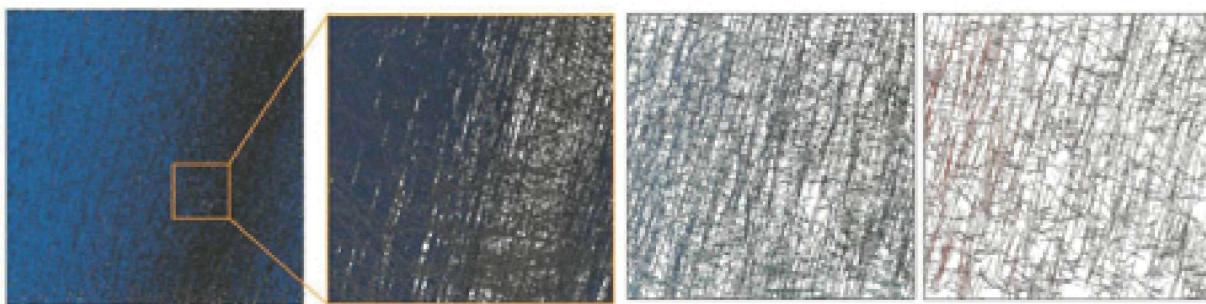


Рисунок 4 Пример модели трещин в коллекторе, полученный с помощью FracWorksXP (Golder Associates) по скважинным данным в бассейне Тапуа-Каро. Изображение является плоским изображением модели, мощностью 10 м и размерами 750x750 м. Входными данными являются два набора перпендикулярных трещин со стандартным отклонением 5° (van Galen, 2005). На четырех панелях указаны, слева направо, интенсивность трещин, поделенная на 5 (первые два изображения, из которых второе является увеличенным изображением первого), на 10 и на 100.

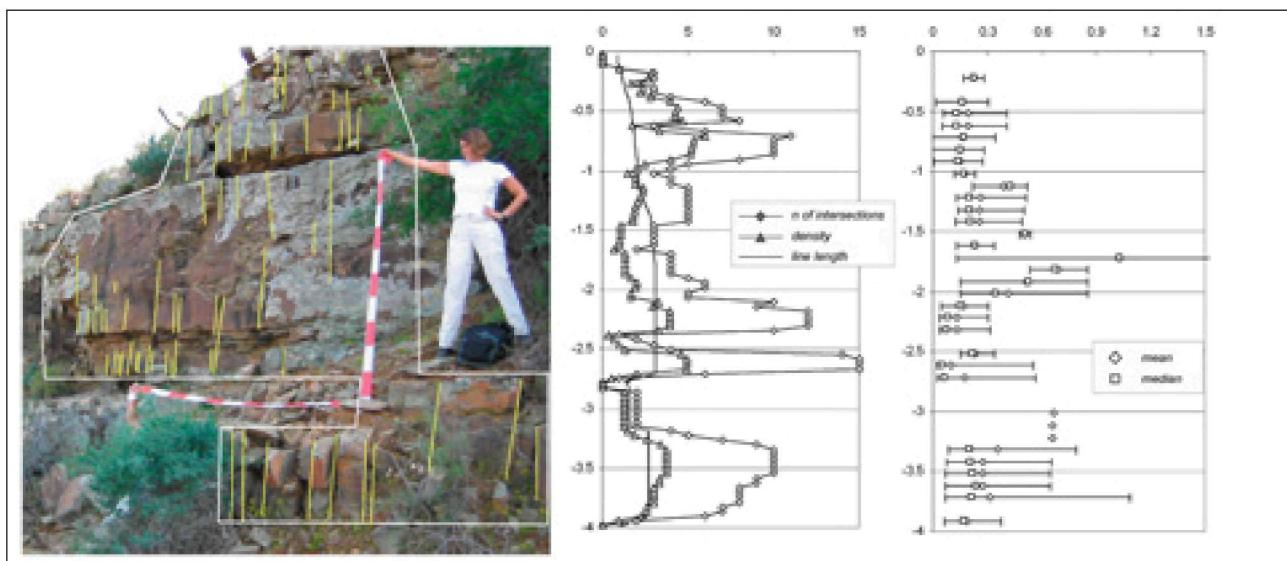


Рисунок 5 Обнажение, трещины и результаты анализа трещин на представительном обнажении бассейна Танкуа-Кароо. На левой панели показано обнажение с трещинами и границы полезной части обнажения. На центральной части панели, длина полезной части обнажения, число пересечений и полученная интенсивность трещин выведены как функция стратиграфии обнажения (длина комплексов обнажений дана в м, абсолютное число - абсолютное число пересечений и m^{-1} для интенсивностей). Медианный интервал размещения и рассеяние показаны как функция стратиграфии обнажения на правой панели.

Затем файла формы, получаемые в ПО ГИС можно легко обработать для получения, например, распределения ориентации и высоты трещин. Более продвинутый анализ с использованием сканирования обнажения в направлении, параллельном напластованию при небольших инкрементах (обычно 1 см) обеспечивает получение полной статистики изменений интенсивности трещин и интервалов поперек слоев обнажения. Такой анализ можно производить для полного набора данных или для под-наборов, такие как, например, трещины с особой ориентацией или длиной.

Мы используем графики интенсивности трещин или интервалов как функции стратиграфии трещин в целях идентификации групп пластов, характеризующихся особыми и устойчивыми моделями трещин (стратиграфия трещин). В отличие от предыдущих методов, изменения в интенсивности трещин (и другие характеристики) описываются в объективной манере без предположений о наличии резкого скачка между интервалами с постоянными характеристиками.

Результаты изучения одного представительного обнажения турбидитного конуса выноса бассейна Танкуа-Кароо говорят о том, как кластеризуются ориентации трещин и имеют направление СЗ-ЮВ (рис. 2). На всем разрезе трассируются интенсивности (Рис. 5), которые обычно не превышают $6-8 m^{-1}$, и существенно меняются по разрезу. Трещины начинаются и/или оканчиваются в различных положениях даже внутри слоев и ведут к нерезким переходам от одного интервала трещинобразования к другому.

Анализируя обнажения, представительные для различных осадочных и структурных участков района, можно получить модель поля трещин в масштабе коллектора и его свойства.

Сравнение и комплексирование данных

Бассейн Танкуа-Кароо является уникальным местом для сравнения информации двух групп данных из-за наличия разведочных скважин вблизи обнажений.

Трещины, измеряемые в скважинах и на обнажениях, имеют близкую ориентацию. По скважинам получена более высокая интенсивность, чем на обнажениях, возможно из-за более низкого разрешения на поверхности. Оба набора данных характеризуются удивительной положительной корреляцией между мощностью слоев и интенсивностью трещин (например Taal-van Korpen, в процессе подготовки; Bertotti et al., в печати). Трещины, наблюдавшиеся в скважинах, большей частью сцепленные, тогда как те, которые наблюдались на обнажении - нет, возможно, вследствие вымывания на поверхности. Мы можем заключить, что данные с обнажения являются представительными для поля трещин, по меньшей мере, до глубины, на которую пробурены скважины.

Обнажения дают единственную возможность построения схем стратиграфии трещин. Используя разработанную нами процедуру, можно определить модели трещин для слоев (групп), не только в отношении осадков, но также в отношении механических взаимодействий с покрывающими и подстилающими породами. Кроме того, исследования обнажений являются единственным путем проверить имеется ли связь трещин с региональными и локальными напряжениями. Это знание необходимо для того, чтобы решить какой из наборов трещин, наблюдавшийся в скважине, относится к целевому коллектору.

После того, как построена модель трещины в масштабе по обнажению, можно предсказывать наличие реального резервуара в недрах. Информация по скважине крайне важна на этой стадии, поскольку она позволяет калибровать модель с трещинами в самом коллекторе. Кроме того, на эти данные не влияют деформации, которые происходили при поднятии или на поверхности.

Наши исследования показывают как комплексирование скважинных данных и данных с обнажений существенно увеличивают устойчивость предсказаний в масштабах коллектора. Для более надежного комплексирования требуется выполнение

большой работы, а именно, улучшение качества и количества реальных наборов данных о трещинах и разработка численных моделей, способных объяснить сложность строения напластования слоистых осадков.

Благодарности

Мы благодарны компании Shell за финансовую поддержку и консорциум NOMAD за разрешение на использование скважинных данных. Университету Stellenbosch и в частности, Dr-ru Ville Wickens мы благодарны за поддержку в поле и научные дискуссии. Мы благодарим F. Salvini (Рим) за возможность пользования программой вывода на плоттер Daisy. Благодарим R. Gras за приглашение на публикацию работы в специальном выпуске и редактирование.

Литература

- Bertotti, G., Hardebol, N., Taal-van Koppen, J., and Luthi, S.M. [in press] *Towards a quantitative definition of mechanical units: new techniques and results from a deep water turbidite succession*. *Bulletin American Association of Petroleum Geologists*.
- Hodgson D.M., Flint S.S., Hodgetts D., Drinkwater N.D., Johanessen E.P., and Luthi S.M. [2006] Straitgraphic evolution of fine-grained submarine fan systems, Tanqua Depocenter, Karoo Basin South Africa. *Journal of Sedimentary Research*, 76, 19-39.
- Luthi, S.M., Hodgson, D.M., Geel, C.R., Flint, S.S., Goedbloed, J.W., Drinkwater, N.D., and Johanesses, E.P. [2006] Contribution of research borehole data to modelling fine-grained turbidite reservoir analogues, Permian Tanqua-Karoo basin floor fans (South Africa). *Petroleum Geoscience* 12, 175-190.
- Peacock, D.A. [2006] Predicting variability in joint frequencies from boreholes. *Journal of Structural Geology*, 28, 353-361.
- Ransome, M.J. and de Wit, I.G.D. [1992] Regional inversion tectonics along the southern margin of Gondwana. In: M.J. de Wit and I.G.D. Ransome (Eds), *Inversion Tectonics of the Cape Fold Belt, Karoo and Cretaceous Basins of Southern Africa*, A.A. Balkema, Rotterdam, 15-21.
- Rawnsley K., Auzias V., Petit J. P., and Rives, T. [1997] Extrapolating fracture orientations from horizontal wells using stress trajectory models. *Petroleum Geoscience*, 3, 145-152.
- Taal- van Koppen, J.K.J. [in preparation] *Natural Fracture Systems: Multi-Scale Field Studies in Boreholes and Outcrops, and Application to Reservoir Modelling*. PhD Thesis, Delft University of Technology.
- Underwood, C.A., Cooke, M.L., Simo J.A., and Muldoon M.A. [2003] Stratigraphic controls on vertical fracture patterns in Silurian dolomites, northeastern Wisconsin. *American Association Petroleum Geologists*, 87, 121-142.
- Van Galen, M.W.N. [2005] *Sensitivity study of fracture properties, related to the production of hydrocarbons*. Master Thesis, TU Delft.
- Wu, H. and Pollard, D.D. [2002] Imaging 3D fracture networks around boreholes. *Bulletin American Association of Petroleum Geologists*, 86, 593-604.