

## Restoring the seismic image with a geological rule base

### Восстановление сейсмического изображения с

#### использованием базы геологических правил

**Stuart Bland\*, Paul Griffiths and Dan Hodge**

**Стюарт Блэнд\*, Пол Гриффитс и Ден Ходж из Мидлэнд Велли Эксплорейшн, Глазго, Шотландия, обсуждают новую концептуальную модель для понимания развития структур.**

В этой работе представлена методика, которая оптимизирует использование сейсмических данных посредством обработки изображения с использованием базы геологических правил. Этот подход может быть легко использован при использовании стандартной интерпретации и экономит время за счет быстрого обращения к моделям, также благодаря увеличению достоверности при работах на участках с плохими данными и сложной структурой.

Сейсмическое изображение является первичным источником информации, используемой при разведке углеводородов. Можно провести аналогии между сейсмическим изображением при разведке и добыче (E&P) и медицинским изображением в здравоохранении. Имеется подобие в ключевых функциях интерпретатора-сейсмика и рентгенолога: оба полагаются на высоко-разрешенные изображения, такие как разрезы 2D или модели 3D для отображения того, что нельзя наблюдать напрямую. В обеих отраслях ключевыми задачами является выделение характерных признаков с целью постановки точного диагноза. Никакой буровик или хирург не оценит сюрпризов; они хотят, чтобы их предупреждали об опасных факторах и возможных рисках заранее. Хирург интересуется локализацией и эффективным путем к пораженному органу. Так же и инженер-буровик находится нуждается в определении цели. Однако, в обоих сценариях, какая бы передовая технология не была применена, результат зависит от интерпретации данных, которые до применения бурения или операции, остаются лишь оценкой действительности. На фундаментальном уровне разведки углеводородов, интерпретация данных является продуктом потоков решений - 'На что похож горизонт?', 'Можно ли его коррелировать через разломы?', 'Где заканчиваются разломы?', 'Соединяются ли разломы?', 'Смят ли горизонт?'

Одна из технологий, доступных геофизикам, это выравнивание сейсмики по ключевому маркирующему горизонту. Это цифровая версия интерпретатора, который берет складчатый бумажный разрез и накладывает одну часть на другую для проверки динамических особенностей и корреляции. На следующей стадии этой технологии она используется для имитации простых деформаций там, где плоско-лежащие породы становятся смятыми или нарушенными разломами. Поскольку горизонты являются не только пространственными, так и временными объектами – они определяются геометрией и возрастом – выполнение горизонта может обнаружить существенные черты, соответствующие конкретному времени. К сожалению, этот процесс имеет недостатки, которые вынуждают интерпретатора пропускать искажения в изображении, артефакты процедуры выравнивания.

\* Автор: [stuart@mve.com](mailto:stuart@mve.com)

Эти артефакты могут возникнуть там, где горизонт интерполируется через разлом или большей частью потому, что выпрямление не отвечает той деформации, которая наблюдается в разрезе. Эти артефакты могут вводить в заблуждение интерпретатора, если они вовремя не распознаны.

Там, где врач может обратиться к записям, чтобы получить сведения из истории болезни пациента, геолог может восстановить разрез, чтобы понять его эволюцию. Используя структурную реконструкцию, чтобы последовательно убрать эффекты уплотнения осадков, изостатическое сбросообразование и складчатость, связанную с разломами, которые изменили современный разрез после отложения осадков, у нас есть действенный способ изучить историю развития нашей структуры, обращаясь к современному сейсмическому изображению. Структурная оценка помогает в процессе принятия решения выбирать между альтернативными интерпретациями, путем тестирования результатов в рамках нашего понимания геологической истории и эволюции. Использование сейсмики дает возможность подтвердить правильность геологической истории в контексте наших данных.

Для иллюстрации технологии восстановления сейсмического изображения представлены три примера.

Каждый практический пример отвечает своей характерной обстановке, характеристикам, ключевым проблемам и попутным рискам. Первый пример взят с участка протяженной системы разломов Галфакса, северной части Северного моря, этот пример иллюстрирует непроверенную интерпретацию. Во втором примере показаны обращенные полу-грабены в южной части Северного моря; в этом примере иллюстрируется ухудшение качества сейсмических данных с глубиной. Последний пример взят из бассейна в Альберта Футхилз, Канада. Каждый пример демонстрирует собой расширенный уровень детальности интерпретации и сокращение риска ошибки окончательной интерпретации для простых структур.

**Пример растяжения:** Галфакс, северная часть Северного моря

**Проблема:** Непроверенная интерпретация сейсмики

**Подход:** Реставрация перемещения по разлому, для того, чтобы согласовать лежащий блок и висящий блок в точке отрыва

**Итог:** В текущей интерпретации имеются неправильные пикировки. Был отрегулирован объем висячего блока, уточнены величины смещения по сбросу (что важно при анализе запечатывания разлома).

На стадии разведки важна структурная точность, чтобы быстро идентифицировать любые ошибки 'первого порядка' и генерировать структурно согласованную модель.

## Нефтяная геология

Реставрация перемещения-по-разлому предлагает набор средств, используя которые, можно обосновывать структурную целостность горизонта блока, ограниченного сбросами, на глубине. Предполагается, что складчатость относится к тектоническим нарушениям и геометрия висячего крыла внутренне связана с формой разрыва. Выбирая соответствующий алгоритм реставрации, как только будет убрано сбросовое смещение, результатом должна быть геологически жизнеспособная модель. Восстановление можно считать законченным, если соединены линии отрыва висячего блока и лежачего блока. Мощности напластования и падение должны быть одинаковы поперек разлома, если только висячий блок не был подвержен раздвигу или переменному уплотнению. Процедура проиллюстрирована следующей серией схем. Современный разрез, показанный на Рисунке 1, адаптирован из работы Фоссена (Fossen *et al.*, 2000) и был взят с профиля NSDP84-1. Видимый размер изображения около 5 км, качество изображения хорошее и структура вполне распознаваема. На рисунке показаны три субпараллельных наклоненных горизонта (красный, зеленый и голубой), пересеченные крутопадающим экстенсиональным разломом и листрический отрыв под маленьким углом. Листрический отрыв делит пополам непрерывный маркер (обведенный фиолетовым), который, скорее всего, представляет собой случайное выстраивание по одной линии двух различных отражающих границ.

Предполагая обвал висячего блока, сначала был восстановлен последний из разломов. В этом случае объекты висячего блока, перекрывающие листрический отрыв, были восстановлены, используя алгоритм наклонного сдвига, который подходит для разнообразных тектонических обстановок. Было убрано сбросовое смещение в несколько сотен метров, путем выравнивания зоны отрыва зеленого и голубого горизонтов. Восстановленный профиль геологически жизнеспособен, поскольку он отображает без искажений региональный наклон восстановленного блока, то можно считать, что метод восстановления удовлетворителен и геометрия разрыва допустима.

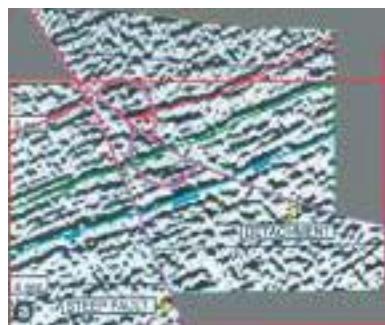
В завершающую фазу восстановления было убрано сбросовое смещение на крутопадающем разломе. Нами был получен результат, отличный от результата Фоссена и др. (Fossen *et al.*) Несмотря на то, что линии отрыва зеленого и голубого горизонтов успешно подобраны, показано, что красная отражающая граница не восстановилась, проявилось несовпадение мощности через разлом.



**Рисунок 1** Современный временной разрез, разломный блок из северной части Северного моря, адаптировано из Фоссена и др., 2000



**Рисунок 2** Данный правый висячий блок был восстановлен на листрическом отрыве и границе и подогнан по зеленому и голубому горизонтам.



**Рисунок 3** Висячий блок был восстановлен на крутопадающем разломе, линии отрыва на зеленом и голубом горизонте соглашены. Заметим, что красный горизонт свидетельствует о неправильной пикировке через разлом в текущей интерпретации.

Несмотря на то, что видимый непрерывный маркер, который сечется листрическим отрывом на современном разрезе, все еще считается случайным соприкасанием отражающих границ, скорее всего он не затрагивает красный горизонт. Текущая интерпретация красного горизонта в висячем блоке необоснована, красный горизонт висячего блока должен быть припикирован на несколько периодов выше показанного.

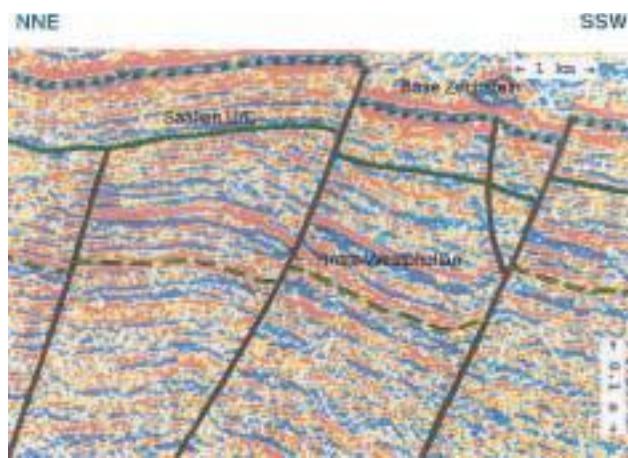
Хотя этот пример был изначально использован для демонстрации присутствия отрывов с малым углом в северной части Северного моря внутри простой структуры, возможно, его коммерческое использование в приложении к разведке углеводородов. Если бы эта структура была внутри перспективной ловушки, требовалось бы пересмотреть объемные расчеты, касающиеся коллектора висячего блока. Кроме того, если бы предполагалось наличие углеводородов внутри блока, ограниченного сбросами, расположенным между крутым сбросом и листрическим отрывом, потребовалось бы пересмотреть разрывы и уменьшить смещение красного висячего блока по разлому.

**Пример опрокинутых грабенов:** Континентальный шельф Великобритании, южная часть Северного моря.

**Проблема:** Уменьшение качества сейсмики с глубиной

**Подход:** Разобрать разрез и добавить сейсмическое изображение

## Нефтяная геология



**Рисунок 4** Современный временной разрез, иллюстрирующий опрокинутые ряды полу-грабенов в южной части Северного моря.

**Результат:** Улучшенная корреляция внутренних стратиграфических маркеров, Установленная геологическая эволюция

Традиционные оценки разреза 2D и технологии реставрации ограничены детальностью производимой интерпретации сейсмических данных. Этот уровень детальности, в свою очередь, ограничен качеством и сложностью сейсмического изображения и тектонической обстановки. Анализ обработки сейсмики после восстановления и разбора последовательности действий позволяет интерпретатору проверять интерпретацию и визуализировать внутреннюю архитектуру сейсмических данных между интерпретируемыми горизонтами на протяжении всей структурной эволюции разреза. Поток сейсмической обработки также позволяет интерпретатору переоценить неправильные пикировки при восстановлении без необходимости обращения к исходным данным. В этом примере, горизонты и разломы

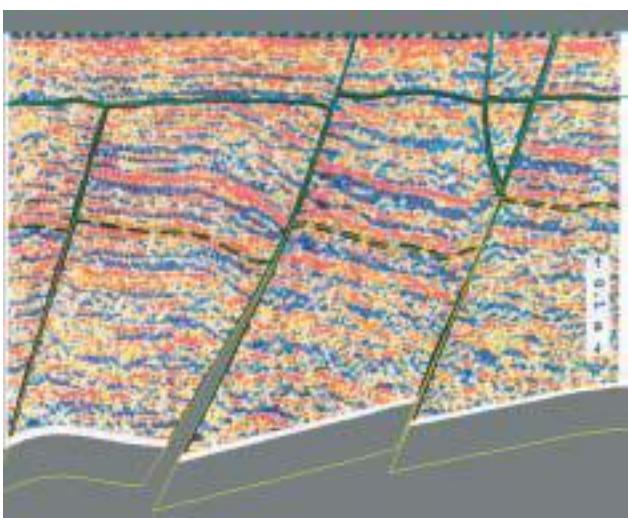
легко идентифицируются в пост-Вестфальском комплексе, но качество сейсмики понижается с глубиной. Интерпретации, сделанные для более глубокой части разреза несут в себе больший потенциальные погрешности.

В примере, проиллюстрированном в Рисунке 4, показана серия наклонных полу-грабенов, взятых из работы Квирка и Айткена (Quirk & Aitken, 1997). Центральный блок, ограниченный сбросами является свидетельством инверсии (или перемещения вне плоскости), с положительным смещением выше регионального на базовом уровне цехштейна; заметим, что имеется явное растяжение на внутри-Вестфальском уровне. Восстановленный сейсмический разрез использовался для выявления и реконструкции архитектуры сейсмических комплексов, которые до этого были скрыты разломами. В этой процедуре данные подвергались более детальному изучению, пополняя сейсмостратиграфическую интерпретацию лиофациальными моделями. Далее можно применять прямое моделирование ретро-деформаций для предсказания песчаных объектов с коллекторскими свойствами в сложной обстановке.

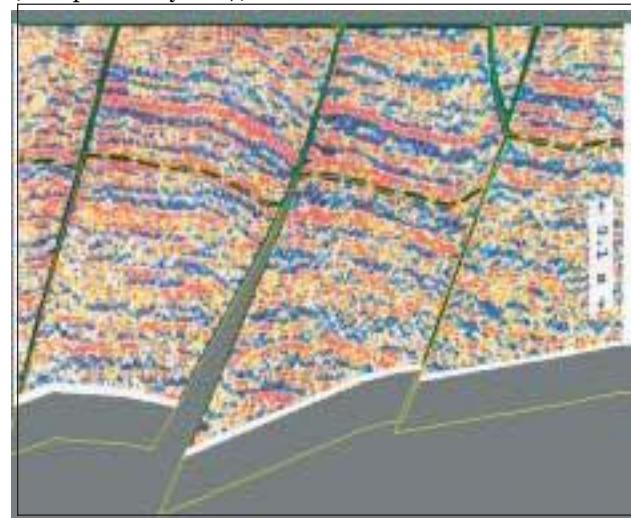
Структурное восстановление выполнялось последовательно, используя временной сейсмический разрез. Перемещения по разломам в основании цехштейна (верхняя часть ротлигенда) были убраны в порядке, обратном тому, в котором предполагалось образование разломов, так, что самые поздние по времени разломы были восстановлены самыми первыми. После того, как было убрано влияние разломов, были убраны складчатые деформации путем выпрямления складок в основании цехштейна, (верхний горизонт Ротлигенда) до горизонтального. На рисунке 5 отражен полный цикл восстановления основания цехштейна.

В Саалианском несогласии были убраны складчатые деформации и перемещение по разлому, как это сделано ранее для основания цехштейна, смотрите Рисунок 6.

В конце были убраны перемещения по сбросу на внутренне-Вестфальском маркере, а оставшаяся часть выпрямлена, чтобы выявить геометрию на момент завершения осадконакопления Вестфальских отложений (смотрите Рисунок 7).

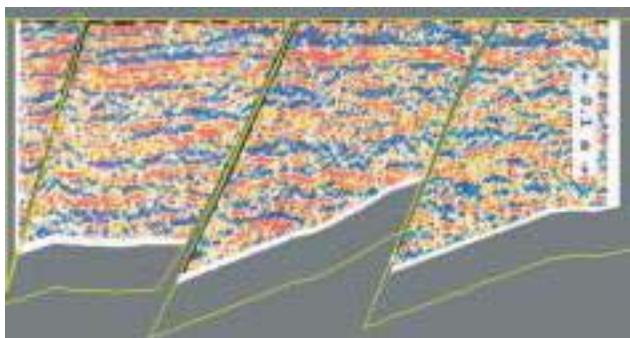


**Рисунок 5** Разрез после выпрямления складок, на котором показана геометрия во время отложения горизонта Ротлигенд.



**Рисунок 6** Геометрия образования Саалианского несогласия.

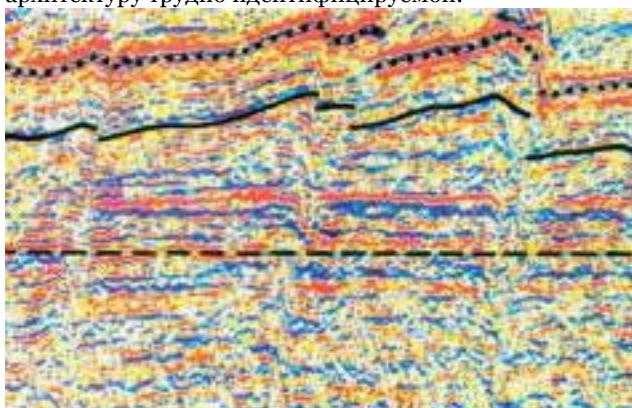
## Нефтяная геология



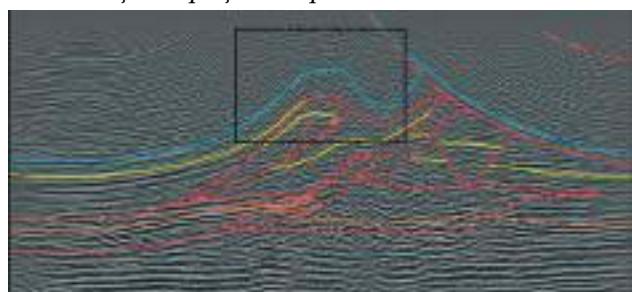
**Рисунок 7** Выпрямленная структура отражает геометрию толщи на конечном этапе накопления Вестфальских осадков.

Непропицированные внутренние маркеры более четко коррелируются через границы разлома, чем в деформированном современном разрезе. Окончательно восстановленный разрез дает уверенность в том, что современная интерпретация верна, восстановленный разрез позволяет картировать внутреннее строение толщи, которое было не совсем ясно из-за отсутствия скважинных данных.

Полезно сравнить восстановленное изображение на Рисунке 7 с сейсмическим изображением, полученным в результате выравнивания на Рисунке 8. Процесс выравнивания генерирует искажения на границах блока, ограниченного сбросами на данных сейсмике под и над выравненным маркером, что делает внутреннюю архитектуру трудно идентифицируемой.



**Рисунок 8** Сейсмические данные 'выравненные' по внутреннему Вестфальскому маркеру; заметны артефакты, возникающие в процессе выравнивания.



**Рисунок 9** Сложные структуры Шау Бейсинг. Черный прямоугольник показывает локализацию Рисунков 11 и 12.

На восстановленном разрезе можно прокоррелировать тонкую стратиграфическую структуру внутренних отражающих границ в разрезе с плохим качеством изображения, эта структура была сильно осложнена разломами. Эта процедура дает возможность дальнейшего анализа данных, включая интерпретацию сейсмических комплексов и литофаций - т.е. т.е. процедуры, которые нельзя с легкостью делать в деформированном состоянии, если нет скважинных сведений. Затем можно провести прямое моделирование с усовершенствованными и уточненными литофациальными моделями с целью получения их современного состояния и использовать в предсказании песчаных объектов с коллекторскими свойствами в данных с низкой разрешающей способностью.

**Пример сжатия:** Шау Бейсинг, Альберта, Канадское предгорье

**Проблема:** Непроверенная сейсмическая интерпретация антиклинальной ловушки на востоке (слева) разреза

**Подход:** Моделирование процесса деформации, для проверки интерпретации используя а) проверку достоверности выпрямления складки (изгиба со скальванием), и б) восстановление перемещения по разлому для приведения в соответствие линий отрыва лежащего и висячего блоков.

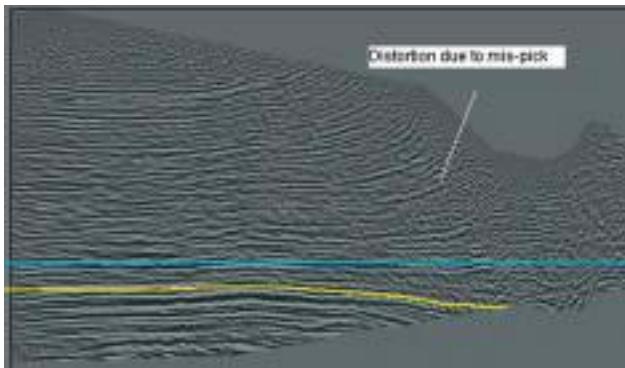
**Результат:** Новая интерпретация, в которой имеется дополнительный разлом через гребень основной структуры.

В последнем примере сейсмическое восстановление было применено к сбросу и опоясывающей складчатой структуре предгорья Альберты, Канада. На рисунке 9 показана текущая интерпретация на основе разреза, опубликованного Ян и Лайнс (Yan and Lines, 2001), двойной надвиг с треугольной зоной области Шау Бейсинг. Структура отличается сложностью и характеризуется треугольным обратным сбросом с двойным ядром. Треугольная зона ограничена нижним и верхним скальванием.

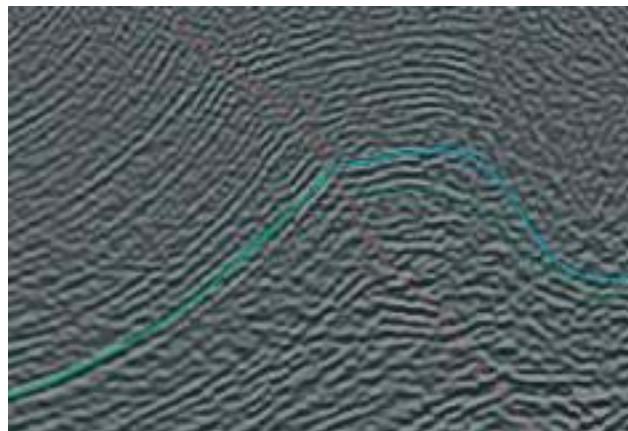
Основное внимание было сфокусировано на геометрии расщепленного верхнего комплекса, перекрывающего двойной надвиг. Тектонический клин был выпрямлен, используя выпрямление изгиба со скальванием до горизонтального уровня (бирюзовый отражающий горизонт использовался как опорный). Алгоритм изгиба со скальванием копирует механизмы деформации, наблюдаемые в надвиговых складках. Для параллельных пластов, выпрямление изгиба со скальванием отображает изгибание со скальванием во время образования складки. Как только бирюзовый горизонт был выпрямлен, другие маркирующие горизонты, пикировки разломов и сейсмическое изображение внутри блока перенеслись с ним как пассивные объекты (смотрите Рисунок 10).

Технология выпрямления складок позволяет интерпретатору проверять достоверность маркирующих пачек внутри блока, ограниченного сбросами.

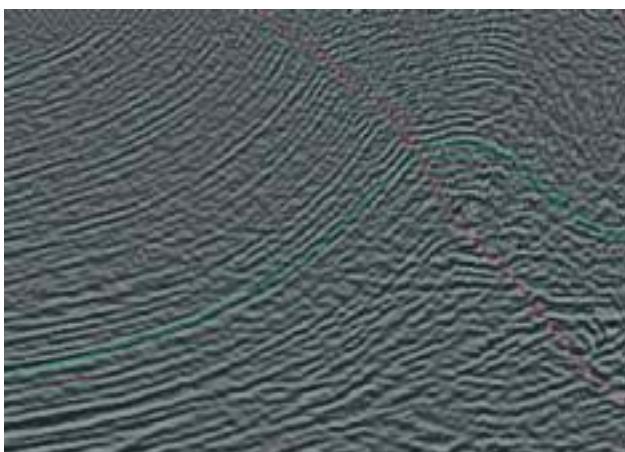
Подчеркивается искажение в выпрямленном сейсмическом изображении, которое объясняется наличием ранее нераспознанного разлома в гребне структуры. Переинтерпретация сейсмики становится ясной при выпрямлении горизонтов. Интерпретацию можно модифицировать в восстановленном состоянии, а также в условиях современной геометрии.



**Рисунок 10** Распрямленный бирюзовый горизонт в отслоенном блоке, ограниченном сбросами; выделено искажение, вызванное присутствием дополнительного разлома в гребне структуры.



**Рисунок 11** Пересмотренная интерпретация показана зеленым.



**Рисунок 12** Пересмотренная интерпретация, восстановленная с помощью перемещения по разлому.

В результате пересмотра интерпретации гребневой структуры появился разлом растяжения с высотой перемещения 160 м. Новая интерпретация показана зеленым цветом, ее можно сравнить с исходной интерпретацией бирюзового цвета, которая показана в середине Рисунка 11. Новая интерпретация была проверена путем восстановления перемещения по разлому; смещение по разлому 160 м было убрано, путем приведения в соответствие точек разрыва зеленого горизонта.

Этот способ восстановления был признан удовлетворительным, а геометрия разлома правомерной, т.е. восстановленный профиль геологически жизнеспособен, а непропицированные внутренние отражающие горизонты можно прокоррелировать через разлом, как показано на Рисунке 12.

Последствия этой новой интерпретации весьма значимые, так как требуется новая концептуальная модель для понимания развития современных структур. Обычно считается, что ловушки углеводорода в этой тектонической обстановке формируются в гребне антиформы. Интерпретируя разлом растяжения через гребень структуры, при оценке перспектив пласта необходимо включить еще один риск, связанный с запечатыванием разрыва.

Если интерпретация проводится с использованием жизнеспособной структурной основы, она представляет собой нечто большее, чем сумма частей; она может раскрыть понимание геологической эволюции.

Такая интерпретация дает возможность тестировать геологические концепции, вопреки распространенным геологическим правилам. Чем больше понимание структурных правил, тем проще ее оценить и тем ниже геологические риски. В каждом из описанных практических примеров, углубленное понимание было достигнуто путем анализа восстановленного сейсмического разреза. Взгляд на возможности сейсморазведки под новым углом обнаруживает другой уровень детальности и уверенности стратиграфических и седиментационных интерпретаций, которые иначе были невозможными. Процедура восстановления комплексов при разгадывании геологической истории помогает понять структуру объектов разведки и концепцию развития нефтеносных пластов.

### Признательность

Мы хотим выразить нашу благодарность Джо и Лу Мичелы (Jo and Lou Michels) за советы по использованию и применению визуализации в медицине и Энди Ньюсон (Andy Newson) из Moose Oils, Калгари.

### Список литературы

- Fossen, H., Odinsen, T. Faerseth, R.B. & Gabrielsen, R.H. [2000] Detachments and low-angle faults in the northern North Sea rift system, from Nottvedt, A. *et al* (eds) *Dynamics of the Norwegian Margin*, Geological Society, London, Special Publications No 167, 105-131.
- Quirk, D.G. & Aitken, J.F. [1997] The structure of the Westphalian in the northern part of the southern North Sea, from Ziegler, K., Turner, P. & Daines, S.R. (eds), *Petroleum geology of the Southern North Sea: Future Potential*, Geological Society, London, Special Publications No. 123, 143-152.

Yan, L. and Lines, L.R. [2001] Imaging of an Alberta Foothills seismic survey, *The Leading Edge*, 20, 80-86.