

## Визуализация/Интерпретация

**Трехмерные атрибуты кривизны: новый метод сейсмической интерпретации. 3D curvature attributes: a new approach for seismic interpretation**

Pascal Klein, Loic Richard и Huw James\* (Paradigm) представляют новый метод для расчета объемных атрибутов кривизны и его применения для структурного замыкания и качественной оценки основных параметров нарушения.

**М**ы представляем особый метод для расчета объемной кривизны и использования их характеристик в сейсмической интерпретации. Свойства объемной кривизны пластов являются геометрическими характеристиками, вычисленными для каждой модели трехмерного сейсмического объема по отдельным поверхностям, установленным по пространственным данным в области модели. Свойства объемной кривизны соответствуют изгибам и нарушениям сейсмических отражающих горизонтов. Поскольку объемная кривизна пластов фокусируется скорее на изменениях формы, чем амплитуд, она меньше подвержена влиянию изменений поля сейсмической амплитуды, обусловленного изменчивостью флюида и литологии, и в большей степени сосредотачивается на изменчивости, обусловленной нарушениями и складчатостью. Сжатые складки в сейсмическом масштабе могут показывать суб-сейсмические нарушения. Интерпретация сжатых складок может также дать качественные оценки основных параметров нарушений, таких как плотность трещиноватости, размещение и ориентация ее. Это знание нарушений и трещиноватости важно для оценки структурной конструкции, включающей ее замыкание, а также для оценки характеристик резервуарной добычи.

Сейсмические интерпретаторы используют множество характерных особенностей при интерпретации нарушений по трехмерным сейсмическим данным с той поры, как они стали доступны. Когерентность (Bahorich and Farmer, 1995) для этих задач без сомнения является самым распространенным свойством. В последнее время были признаны полезными при отображении нарушений и прогнозировании распределения и ориентации трещиноватости свойства форм кривизны пластов. Так как кривизна чувствительна к шуму и является довольно сложной вычислительной задачей, расчеты кривизны первоначально были выполнены геометрически по данным сейсмических горизонтов. Совсем недавно были сформулированы алгоритмы объемной кривизны, которые содержат предположение, что структура локально определяется по поверхности равных глубин. Более того, эти методы предполагают, что имеются в наличии массивы ориентации (угол наклона и азимут).

Donias (Donias et al., 1998) предлагает оценку кривизны, основанную на представлении дивергенции векторного поля угла наклона-азимута, вычисленного в нормальной плоскости. Chopra и Marfurt (2007) используют дробные производные истинного угла наклона на каждом временном интервале для получения измерений кривизны на каждом примере трехмерного массива. West et al. (2003) предоставляют метод, в котором отдельные кривизны вычисляются как горизонтальные градиенты истинного угла наклона для данного числа направлений и затем объединяются для того, чтобы образовать общий массив кривизны.

Эта статья представляет метод для вычисления объемной кривизны и ее применения для структурного замыкания и качественной оценки основных параметров трещиноватости. Иллюстрация и обсуждение используют массивы данных по оффшорной зоне Индонезии. Исходные сейсмические данные представлены нулевой фазой и содержат 300 линий вдоль профилей с интервалом 25 м и 1300 линий вкрест простирания профилей с интервалом 12.5 м при частоте опроса 4 мс. Региональная геометрия бассейна состоит из разорванных бассейнов, образованных вследствие тектонического вытеснения Юго-Восточной Азии в ответ на коллизию Индии с ранне-третичного времени. Структурная основа бассейна состоит множества грабенов растяжения, полуграбенов, нормальных разломов, горстов и кулисообразно расположенных складок (Рис. 1). Часть осадконакопления была синтетектонической (синхронной), предполагающей существенные вариации мощности осадочных толщ. В литературе описывается четыре тектонических периода, имеющих место в изучаемом районе: растяжение, состояние покоя, сжатие и новый период покоя.

**Кривизна поверхности**

Поверхностная кривизна хорошо описана Roberts (Roberts, 2001). Вкратце, поверхности антиклиналей дают положительную кривизну, поверхности синклиналей – отрицательную кривизну, седловины дают и положительную и отрицательную кривизну. Хребты дают положительную кривизну в направлении вкрест простирания хребта и нулевую кривизну в направлении вдоль простирания хребта. Трoghi дают отрицательную кривизну в направлении вкрест простирания трога и нулевую кривизну в направлении вдоль простирания трога.

В любой точке поверхности может быть измерена кривизна как показатель искривления (изгиба) (положительного или отрицательного) при каком-либо азимуте. Один из этих азимутов даст самую большую кривизну. Эта кривизна называется максимальной кривизной, а кривизна при азимуте, ортогональном этому, называется минимальной кривизной. Этот массив кривизны может быть использован для определения других характеристик кривизны. Например, среднее значение между максимальной и минимальной кривизнами, или какой-либо другой пары кривизн, измеренных при ортогональных азимутах, называется средней кривизной. Составляющая максимальной и минимальной кривизны называется Гауссовой кривизной.

\* Corresponding author, E-mail: [Huw.James@PDGM.com](mailto:Huw.James@PDGM.com).

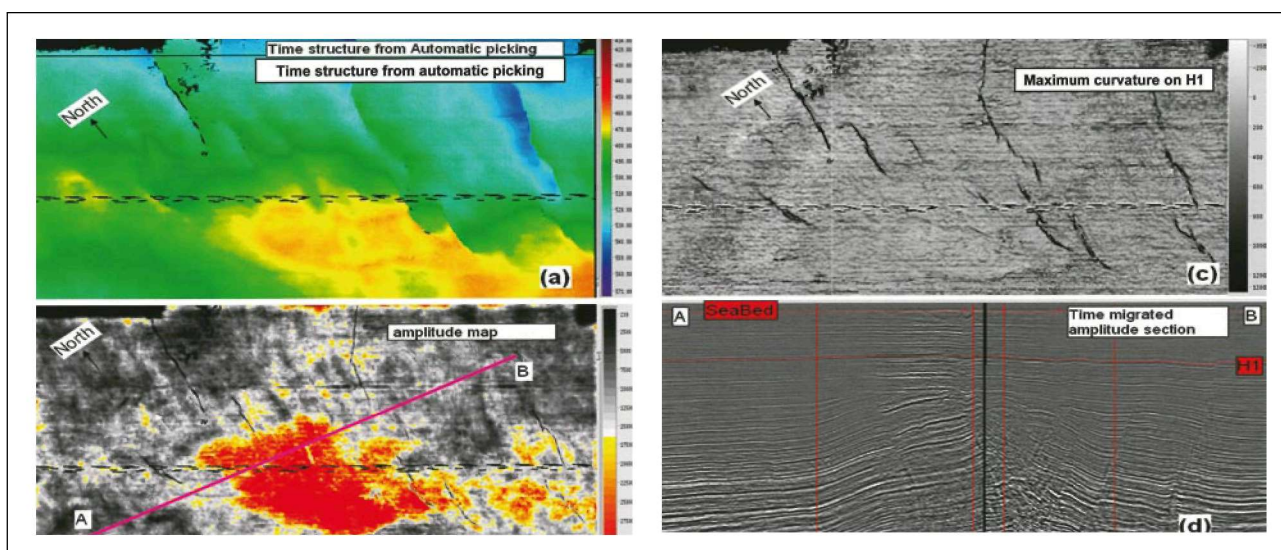


Рис. 1 Обзор массива данных по Индонезии а) Временная структура малоглубинного горизонта H1; б) Карта амплитуд для горизонта H1; в) Максимальная кривизна, извлеченная по H1; г) Амплитудный разрез.

Поверхности, являющиеся первоначально плоскими, будут иметь нулевую минимальную и максимальную кривизну и, соответственно, нулевую Гауссову кривизну. Складчатость таких поверхностей может увеличить максимальную кривизну, но поскольку минимальная кривизна остается нулевой, Гауссова кривизна будет также оставаться нулевой. Это является признаком того, что поверхность недеформирована. Естественно, если блок, ограниченный поверхностью, имеет мощность и не является полностью пластичным, должно быть некоторое трещинообразование, так как блок изгибается. Гауссова кривизна может играть

некоторую роль в качестве показателя деформации.

Вместо выделения азимута максимальной кривизны можно выбрать азимут для выделения самой положительной и самой отрицательной кривизны. Эти измерения дадут значения, аналогичные значениям максимальной кривизны, но сохраняют полярность (знак) кривизны с тем, чтобы изображения кривизны соответствовали представлениям хребты или трог. Неблагоприятная ситуация заключается в том, что интерпретаторам требуется рассмотреть два отдельных изображения положительной и отрицательной кривизны и объединить их в единой

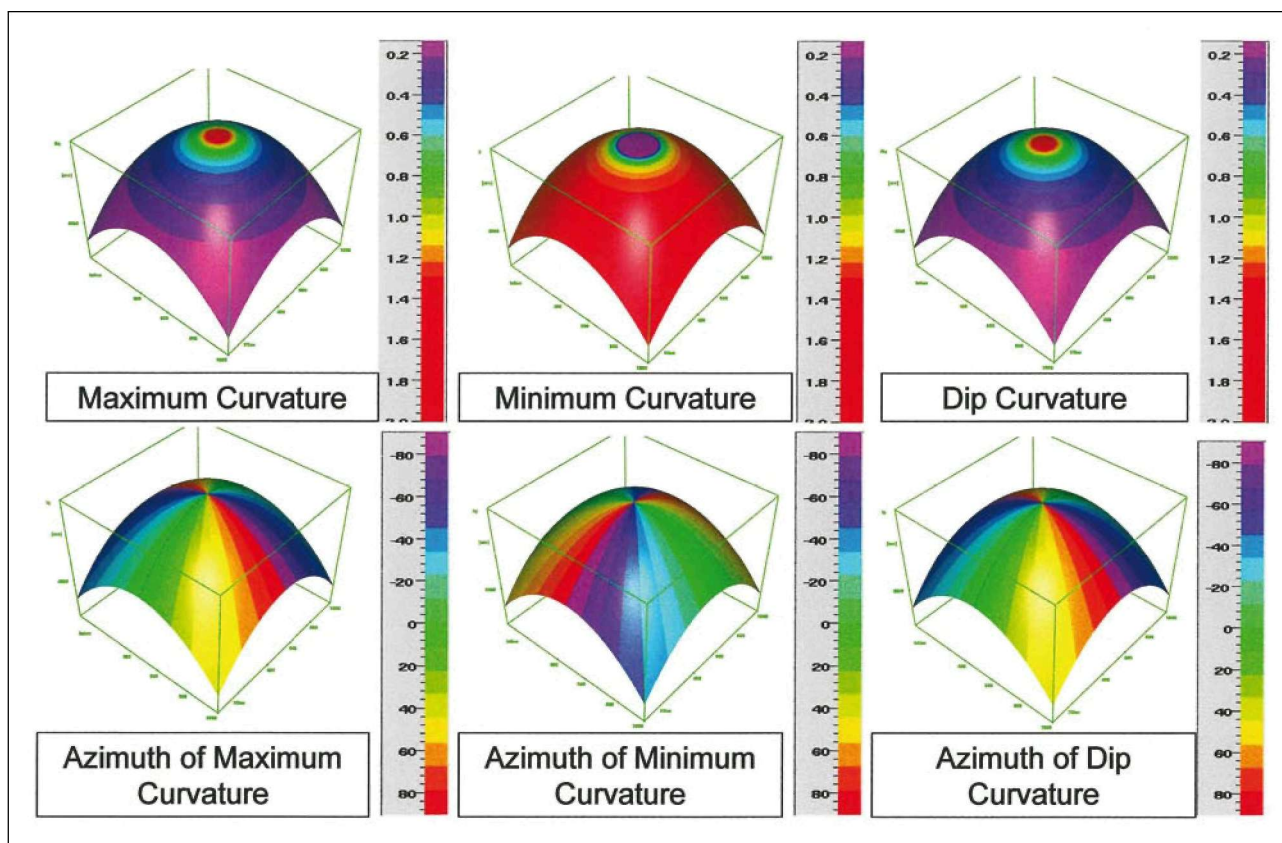


Рис. 2 Эллиптический параболоид.



## Визуализация/Интерпретация

интерпретации. Изображения, которые включают и минимальную и максимальную кривизну, разделены и могут стать менее очевидными. В противном случае, если первичный выбор азимутов является азимутом максимального угла наклона поверхности, то кривизна называется кривизной угла наклона, а кривизна по ортогональному азимуту называется кривизной простирания.

Три очень простых модели иллюстрируют предыдущие дискуссии о свойствах кривизны. Все простые поверхности созданы как анти-формы, но выводы являются такими же, как и для син-форм, только знак параметра кривизны будет меняться.

Первая, рассматриваемая здесь поверхность, это поверхность эллиптического параболоида (рис. 2), геологическими аналогами которой являются диапир, бассейн и карстовое разрушение. Распределения максимальной, минимальной кривизны и кривизны угла наклона радиальные. Мы отмечаем также, что азимут кривизны угла наклона равен азимуту максимальной кривизны.

Вторая форма поверхности – цилиндрическая поверхность (рис. 3) с геологическими аналогами диапира, синклинали и антиклинали. Минимальная кривизна равна нулю. Мы также отмечаем, что азимут кривизны наклона равен азимуту максимальной кривизны. Линеаменты максимальной кривизны и кривизны наклона параллельны и показывают гребень антиформы или оси синформы.

Последняя форма поверхности –

гиперболический параболоид (рис. 4) с геологическими аналогами диапира и литологической ловушки. Линеаменты максимальной и минимальной кривизны ортогональны. Пересечение обоих линеаментов относится к возможной литологической ловушке.

Объемная кривизна может быть рассчитана непосредственно по объемным данным, но существуют такие же измерения в качестве поверхностной кривизны.

**Объемная кривизна**

В выше приведенных примерах кривизна рассчитывается непосредственно по поверхностям, и такие же расчеты могут быть применены к интерпретированному горизонту и поверхностям нарушений. Вместо вычисления кривизны для поверхностей возможно рассчитать кривизну в каждой точке объема. Эти кривизны затем могут быть извлечены вдоль интерпретированных поверхностей, временных и глубинных разрезов, или какого-либо типа сейсмического разреза. Объемные кривизны могут быть также непосредственно воспроизведены в объеме или объемной визуализации. Мы обнаружили, что объемная кривизна, извлеченная вдоль интерпретированного горизонта, менее зашумлена, чем поверхностная кривизна для того же самого горизонта. Это является результатом того, что объемная кривизна непосредственно измеряет кривизну амплитудного поля, в то время как поверхностная кривизна обычно отслеживает «фиксированный горизонт», который должен быть подвержен влиянию конфигурации одиночной траектории или формы вручную интерпретированного нарушения, которое, предполагается, может содержать шум, обусловленный выделением волн вручную.

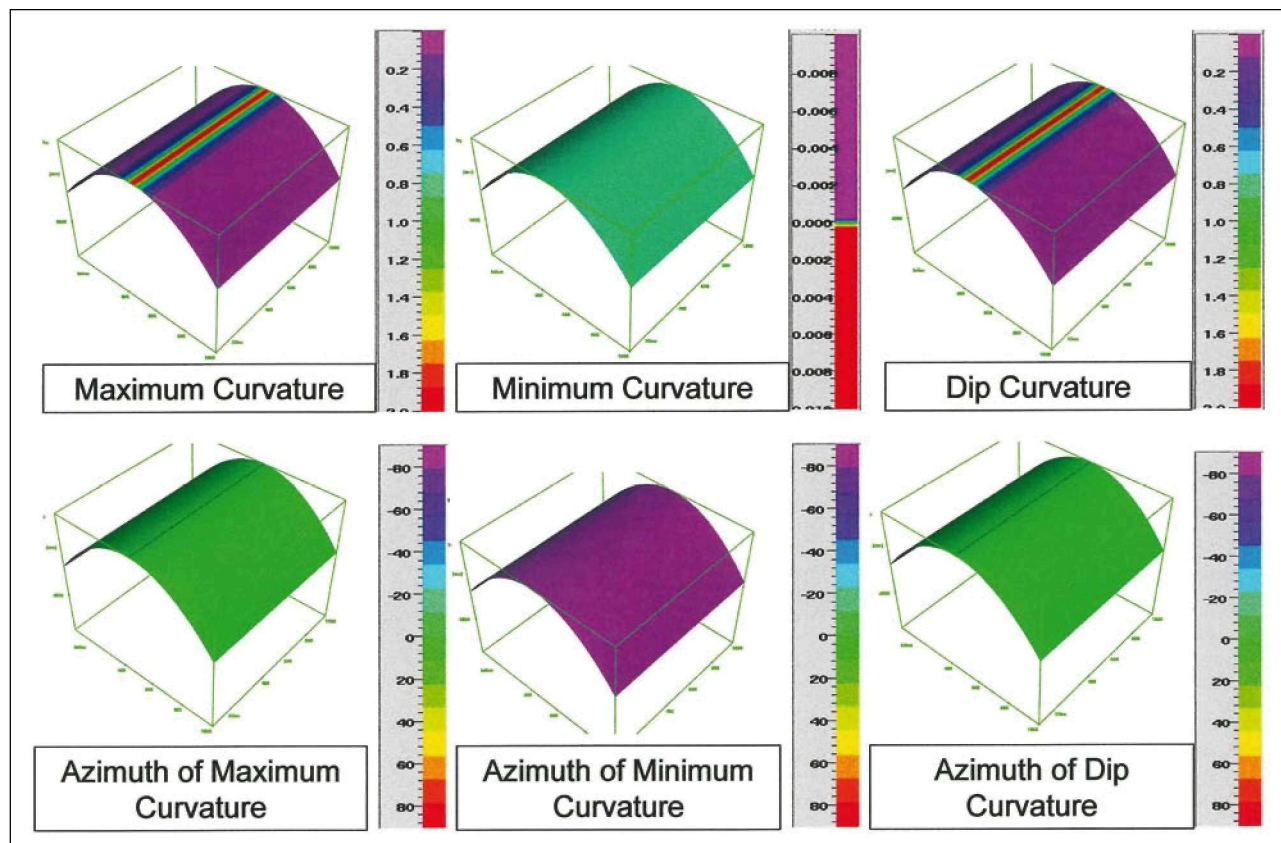


Рис. 3 Цилиндр

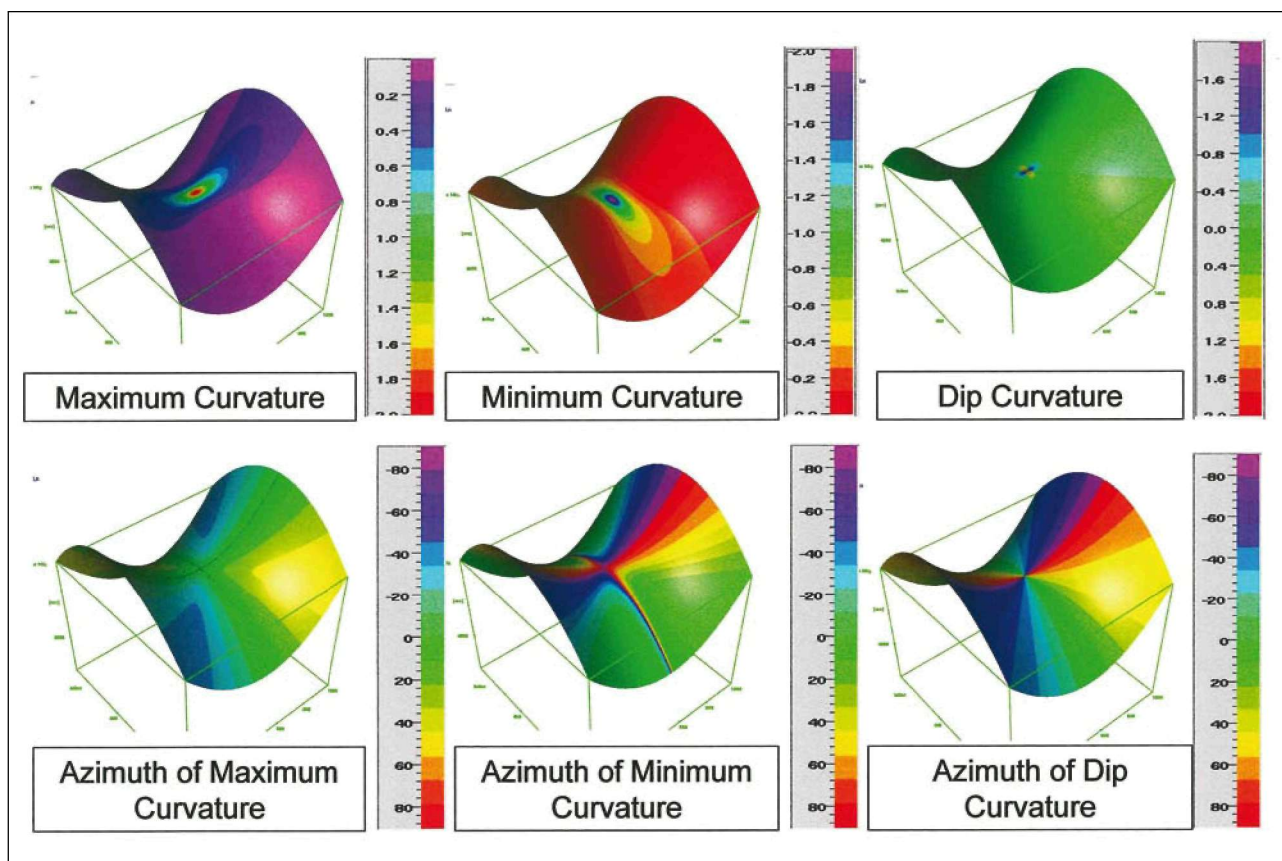


Рис. 4 Гиперболический параболоид или седловина.

### Методология

Представленная оценка кривизны выполняется в три этапа. Первый этап осуществляется для каждой модели; небольшая поверхность распространяется вокруг модели в пределах установленного по горизонтали масштаба анализа. Глубины поверхности устанавливаются нахождением в окне вертикального анализа максимального значения взаимной корреляции между центральной траекторией и каждой соседней траекторией в пределах установленного по горизонтали масштаба анализа. Взаимная корреляция является обратно интерполированной, используя параболическую аппроксимацию для определения точного вертикального смещения максимума взаимной корреляции. Затем поверхность наименьших квадратов, представленная уравнением второй степени  $z(x,y)$ , подгоняется к вертикальным смещениям в пределах анализируемой площади. Наконец, рассчитывается набор параметров кривизны по коэффициентам поверхности, представленной уравнением второй степени, используя классическую дифференциальную геометрию (Roberts, 2001). Параметры кривизны, наиболее часто используемые, представляют максимальную и минимальную кривизну, которые мы обозначаем, соответственно, как  $k_1$  и  $k_2$ .

### Когерентность и кривизна

И когерентность (Bahorich and Farmer, 1995), и кривизна используются для оконтуривания нарушений и стратиграфических особенностей, таких как каналы (пустоты). Когерентность выделяет части амплитудного объема, где существуют несогласия в амплитудном поле. Они имеют место там, где существуют нарушения и горизонтальные амплитуды прерываются, так как породы разрушены. Нарушение непрерывности имеет место также там, где границы каналов (пустот) прерывают горизонты, и они к тому же хорошо отображаются по когерентности.

Объемная кривизна покажет высокие значения там, где горизонты скорее изогнуты, чем разорваны. Объемная кривизна над несогласиями не должна давать предсказуемые результаты, но обычно горизонты изгибаются перед тем, как разорваться по разломам, поэтому объемная кривизна может хорошо выделять нарушение. Например, объемная кривизна, рассчитанная на участке небольшого нормального сброса, покажет высокую положительную

## Визуализация/Интерпретация

**Структурное замыкание**

Структурные ловушки углеводородов часто состоят из замыкания трех направлений наклонов, имеющих место на фоне нарушения. Эффективность улавливания этого типа в тектоническом режиме исследуемого района зависит, среди других факторов, от размещения коллектора на воздымающемся блоке относительно погружающегося блока. По этой причине необходимо тщательно проанализировать латеральную непрерывность нарушения и вертикальное перемещение висячего блока от лежащего блока.

Параметры кривизны дают возможность определить количество и качество большинства этих аспектов и проанализировать каждую структурную ловушку. Вертикальная высота сброса при субвертикальном сбросообразовании является в основном самой видимой на вертикальном сейсмическом разрезе, в то время как сдвиговые разломы (латеральное перемещение) лучше видны на горизонтальных срезах. Горизонтальные срезы, полученные по трехмерному кубу кривизны, дают возможность интерпретатору подтвердить вертикальное и сдвиговое перемещение по разлому.

Параметры минимальной и максимальной кривизны высоко чувствительны к хрупким деформациям, особенно в областях носовой части разлома. Высокие значения главной кривизны непосредственно коррелируют с высокими значениями хрупкой деформации. Высокие значения минимальной и максимальной кривизны должны быть пространственно упорядочены таким образом, чтобы они определяли геологические линейменты, связанные с разломами (Рис. 5с). Латеральная непрерывность, длина, ориентация, расстояние между разломами определяются по анализу линейментов на горизонтальном срезе, извлеченном из куба трехмерных параметров минимальной и максимальной кривизны. Результат этого анализа поможет оценить возможную связь между обоими блоками. В настоящей работе линейментный анализ показывает эшелонированные особенности со средней длиной разлома, равной 400 м (рис. 6с).

Кривизна наклона является параметром, который часто выделяет области, где слои нарушены. В обширной системе положительные значения этого параметра связаны с «восходящими» формами, такими как носовая часть разлома; отрицательные значения соответствуют синформам, таким как эрозионная промоина. Высокие значения этого параметра указывают, что деформация хрупкая, относительно низкие значения указывают на пластическую деформацию или вообще отсутствие деформации. Границы между пластической и хрупкой деформациями могут быть выделены на карте цветовым маркированием. Пространственное рассогласование этих границ между лежащим и висячим блоками отражает сдвиговое перемещение. После этого возможна количественная и качественная оценки сдвигового перемещения. В настоящем исследовании левостороннее смещение подтверждается средним значением горизонтального смещения, равным 150 м (рис. 6а).

Разделение между интенсивными отрицательными и положительными значениями параметра кривизны наклона (красный и голубой цвет на рис. 6) определяет вертикальное перемещение. В настоящем исследовании вертикальное перемещение варьирует от 35 до 110 миллисекунд (рис. 6b). Используя вышеупомянутые параметры, был сделан вывод, что улавливание углеводородов в исследуемом регионе контролируется

кривизну на краю лежащего бока, сопряженную с интенсивной отрицательной кривизной на краю висящего бока. Эта пара характеристик интенсивных положительной и отрицательной кривизн может быть использована для интерпретации небольших нормальных сбросов. Объемная кривизна на границах каналов (пустот) может иметь высокие положительные значения на русловых валах рек и отрицательные значения в тальвегах.

Следовательно, обе характеристики могут выделять нарушения и каналы. Когерентность может быть рассчитана по относительно длинным временным интервалам для создания очень точных отображений нарушений в горизонтальной проекции. Когда пользуются этим способом, когерентность становится детальным качественным показателем нарушений и их положения. Это дает возможность интерпретаторам быстро и легко выделять их по точному положению так, как они могут делать это, когда используют только амплитудные данные.

Объемная кривизна дает количественные размеры изгибов и обычно рассчитывается по интервалу одиночной элементарной волны. Значение объемной кривизны может быть более надежно использовано в дальнейших вычислениях, и объемная кривизна более приемлема для эффективного выделения участков пликативных нарушений или суб-сейсмических разрывных нарушений.

Эти две характеристики высвечивают характерные различные черты разломов, пликативных нарушений и стратиграфические особенности. Поэтому разумно использовать обе при детальной интерпретации.

**Линеймент фильтрованной кривизны**

Параметры кривизны в основном анализируются, используя линейментную концепцию, введенную Hobbs (Hobbs, 1904). Линеймент может быть представлен единичным на карте или композиционной линейной особенностью на поверхности, чьи участки выстраиваются в прямолинейную или слегка криволинейную взаимосвязь, и которые отчетливо различаются по свойствам соседних особенностей и предположительно отражают подповерхностные эффекты. Двухмерный анализ параметра кривизны показывает, что линейменты не обязательно указывают на геологическую структуру, такую как зона деформации или особенности осадочного чехла. Основной вопрос заключается в том, как идентифицировать особенности, которые относятся только к геологической структуре. Самый лучший ответ состоит в том, чтобы отменить вопрос и постараться исключить негеологические характеристики.

Может быть легко проведена фильтрация линейментов помех от антропогенных источников, таких как поверхностные установки, интерпретируемые как близповерхностные помехи. С другой стороны, ослабление проявлений полученных помех не является легкой задачей. Рекомендуется выполнить эту процедуру в процессе обработки сейсмических данных. Независимо от этого объемная кривизна позволяет нам существенно уменьшить помехи, приобретенные при сборе данных, все еще остающихся в пост суммированном амплитудном объеме. Для линейментов, интерпретированных по максимальной кривизне, могут быть построены розы-диаграммы азимута и углов наклона. Эти розы-диаграммы могут быть в свою очередь проинтерпретированы, чтобы выделить линейменты, обусловленные геологией, в отличие от линейментов, обусловленных поверхностной помехой, или помехами, приобретенными при сборе данных.



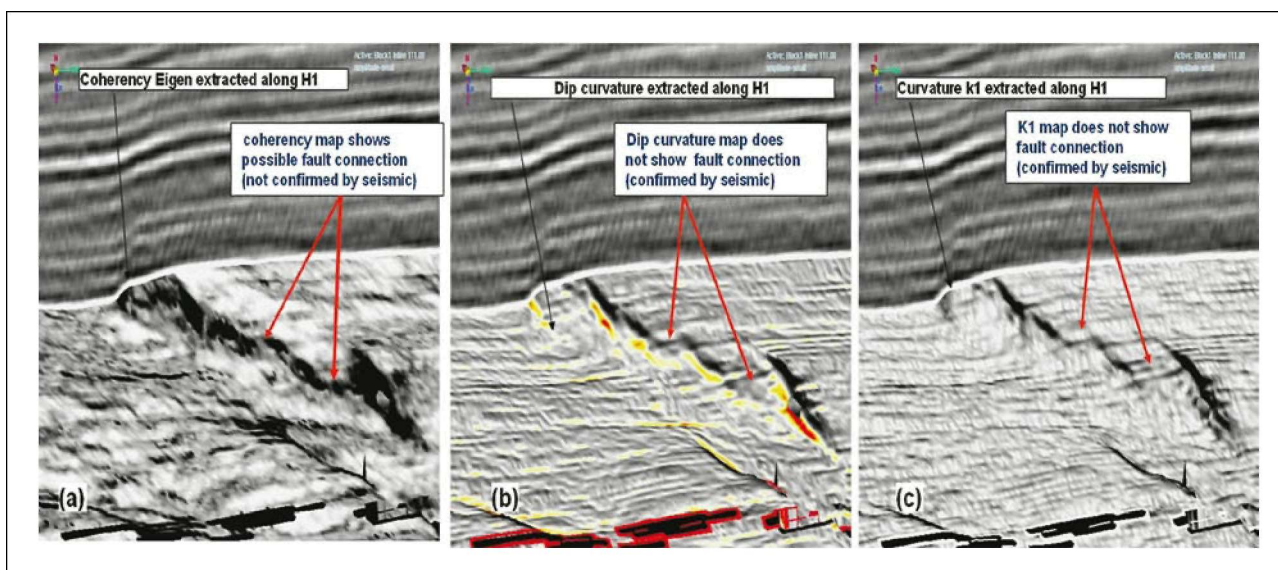


Рис. 5 а) Структурный срез с когерентностью; б) Структурный срез с кривизной наклона; в) Структурный срез с максимальной кривизной.

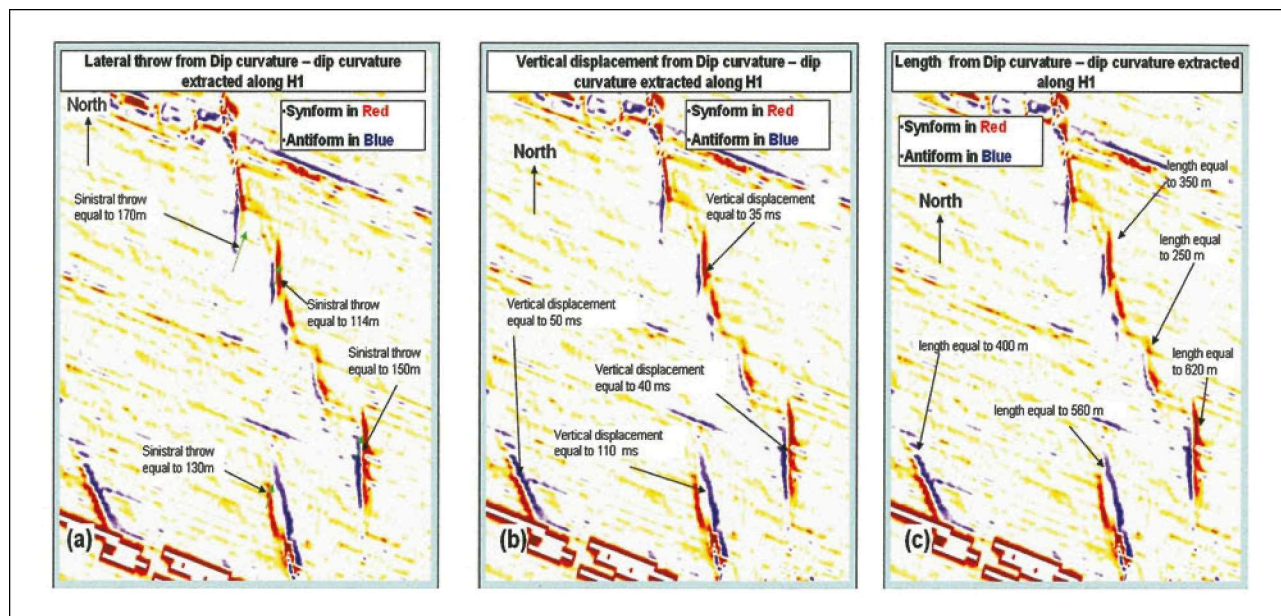


Рис. 6 а) Латеральный сброс по кривизне наклона; б) Вертикальное смещение по кривизне наклона; в) Длина по кривизне наклона.

серией нормальных эшелонированных разломов с простираем с севера на юг. Параметры максимальной кривизны и кривизны наклона предполагают, что режим ограничения определяется напряжением растяжения с левосторонним сдвигом с северо-востока на юго-запад.

#### Характеристика коллектора и анализ трещиноватости

Естественно трещиноватые коллекторы являются важной составной частью общих углеводородных коллекторов. Для прогнозирования эксплуатационных качеств будущих коллекторов важно определить зоны трещиноватости и, по крайней мере, качественно оценить их основные параметры, например, плотность и ориентацию трещиноватости. Трещиноватость, как правило, трудно определить по данным сейсмической амплитуды в силу сейсмического частотного состава, который ограничивает сейсмическое разрешение. В нашем примере массива данных, несмотря на то, что трещиноватость слабо проявлена, параметры

кривизны выделили области трещиноватости. Характерные признаки трещиноватости, полученные по параметрам кривизны, показаны умеренными по сравнению с высокими значениями минимальной кривизны. Большинство линейных элементов, определенных по пространственному расположению параметра минимальной кривизны, связаны с трещиноватостью.

В настоящей работе зоны трещиноватости в основном зарегистрированы близко к главным проявлениям хрупкого нарушения (рис. 7).

#### Выводы

Новый метод, представленный здесь, для расчета параметров объемной кривизны, выполняет вычисления на одном этапе, не требуя каких-либо предварительных расчетов промежуточных значений, таких как наклон и азимут.



## Визуализация/Интерпретация

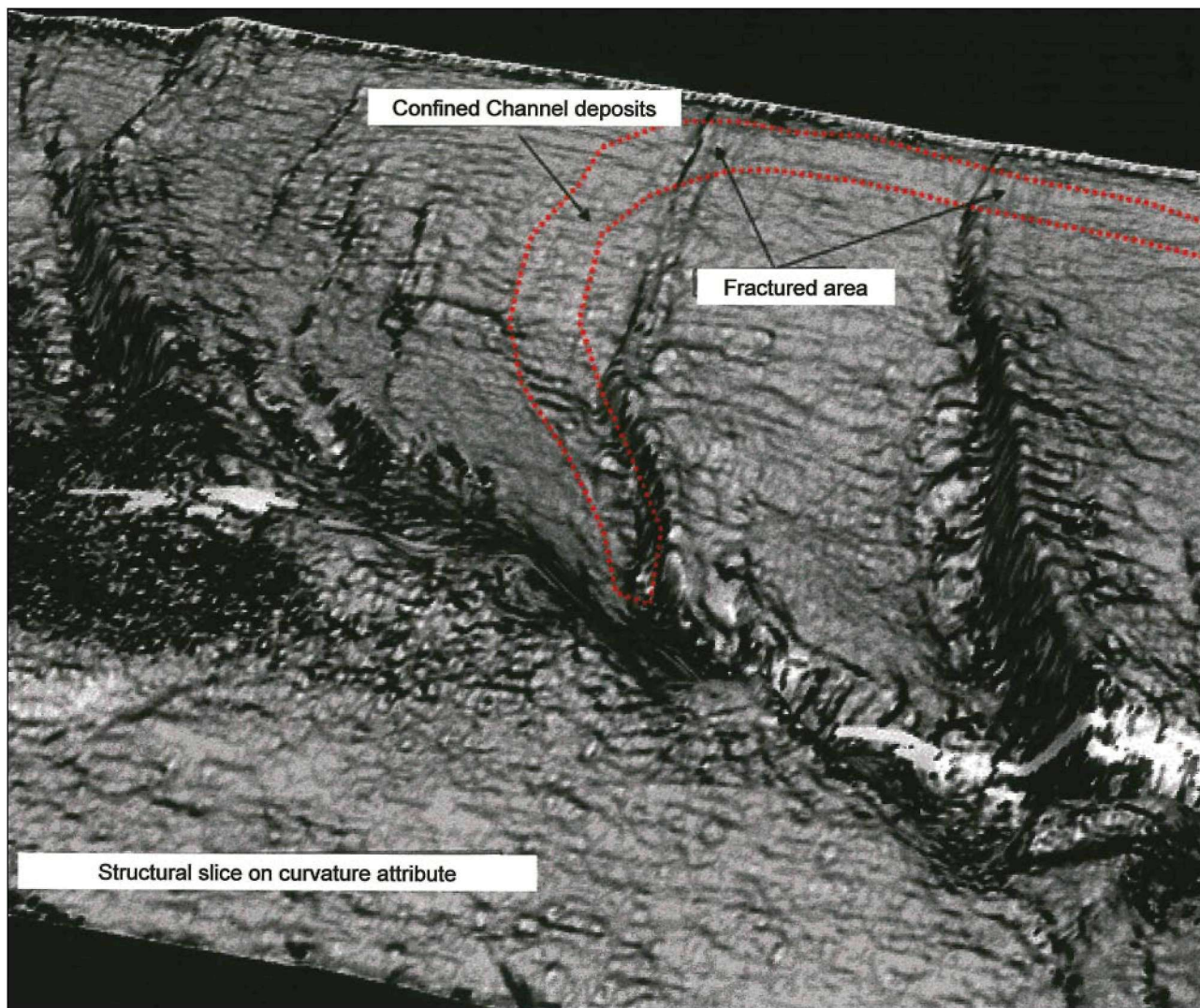


Рис. 7 Структурный срез с минимальной кривизной. Области трещиноватости, показанные вблизи нарушений.

Параметры кривизны позволяют количественно и качественно оценить латеральную непрерывность нарушения и его вертикальное смещение. Они способствуют проведению анализа структурных ловушек, имеющих место на фоне нарушения.

Свойства геологической модели выигрывают благодаря качественной и количественной информации, извлеченной по параметрам кривизны, таким как плотность и ориентация трещиноватости.

В качестве перспективы на будущее, может быть выполнена пост-обработка параметров кривизны для того, чтобы классифицировать своеобразную ориентацию геологических линеаментов. Этот метод может быть также использован для удаления негеологических линеаментов, таких как помехи, полученные при сборе данных.

Параметры кривизны могут увеличить показатель когерентности при анализе геологической схемы.

#### Благодарности

Мы благодарим Paradigm за разрешение на публикацию этой работы и Clyde Petroleum за использование их сейсмических данных.

#### Литература

- Al-Dossary, S. and Marfurt, K. [2006] 3D volumetric multispectral estimates of reflector curvature and rotation. *Geophysics*, 71(5).
- Bahorich, M. and Farmer, S. [1995] 3D seismic coherency for faults and stratigraphic features. *The Leading Edge*, 14(10).
- Chopra, S. and Marfurt, K. [2007] Curvature attribute applications to 3D surface seismic data. *The Leading Edge*, 26(4).
- Donias, M., Baylou P., and Keskes, N. [1998] Curvature of oriented patterns: 2-D and 3-D Estimation from Differential Geometry. *IEEE International Conference on Image Processing*, 1, 236-40.
- Hobbs, W. H. [1904] Lineaments of the Atlantic border region. *Geological Society of America Bulletin*, 15.
- Roberts, A. (2001) Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons. *First Break*, 19(2).
- West, B. P., May, S. R., Gillard, D., Eastwood, J. E., Gross, M. D., and Frantes T. J. [2003] *Method for analyzing reflection curvature in seismic data volumes*. US Patent No 6662111.