

# Характеристика сетей разломов: эффективный подход к использованию сейсмических атрибутов анизотропии

Characterizing fracture networks: an effective approach using seismic anisotropy attributes

Ann Freudenreich<sup>1</sup>, Erika Angerer<sup>2</sup>, Alessandro Amato del Monte<sup>3</sup> и Cyrille Reiser<sup>4</sup>

## Введение

Разработка естественно трещиноватых резервуаров в значительной степени подвержена влиянию характеристик сети разломов, так как они отвечают за объем и направление движения флюидов в породах резервуара. Наличие разломов может быть очень выгодным, так как знание их характеристик позволяет рассчитывать такие траектории стволов скважин, которые пересекают большое число проницаемых разломов, таким образом, повышая добычу. Оно также позволяет оптимальным образом выбирать размещение нагнетающих скважин для повышения коэффициента охвата и лучшего контроля над пластовым давлением. Однако разломы также могут снижать экономический потенциал месторождения. Они могут создавать преимущественные траектории движения пластового флюида, что может привести к преждевременным прорывам воды в добывающую скважину или, наоборот, действовать как преграды, препятствующие добыче. Хорошее понимание сети разломов в терминах интенсивности, ориентации и пространственного распределения, таким образом, важно для более эффективной разработки резервуара.

Некоторая информация о разломах может быть получена по измерениям на кернах и интерпретации каротажных данных, однако эти данные справедливы только для околоскважинного пространства, и экстраполяция данных дальше этой области может привести к ошибочному прогнозу всей динамики резервуара. Даже с учетом того, что геостатистические методы могут помочь в снижении неточностей, связанных с пространственными прогнозами, принимая во внимание неоднородность геологической среды, необходим реальный трехмерный атрибут для точной характеристики трещиноватого резервуара. После исследований Crampin (1985a, 1985b), Crampin и др. (1986), Thomsen (1988) и др. принято считать, что системы разломов часто располагаются вдоль некоторого преимущественного направления. Это вызывает направленную (или азимутальную) зависимость сейсмических параметров, таких как времена пробега, скорости и амплитуды отраженных волн. Эта зависимость от направления, также называемая анизотропией, может привести к разделению направления распространения сейсмических поперечных волн в преимущественных направлениях, связанных с ориентацией разломов: быстрые поперечные волны поляризуются в параллельном разломам направлении, а медленные поперечные волны поляризуются в направлении, перпендикулярном ориентации разломов. Это также может воздействовать на амплитуду продольных волн, зависящую от азимутального направления распространения волны. Анализ эффектов

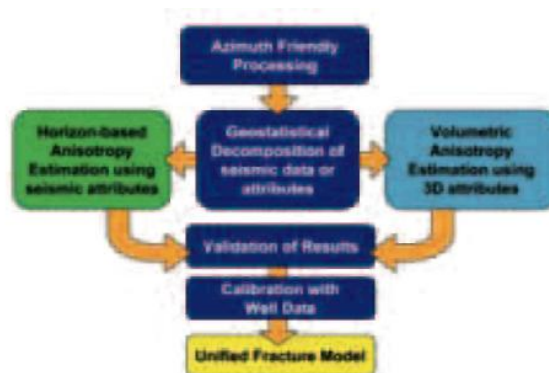


Рис. 1. Блок-схема используемого анализа азимутальной анизотропии.

анизотропии, наблюдаемых в трехмерных сейсмических данных, может, таким образом, обеспечить выявление характеристик разломов (Thomsen, 1995; Lynn и др., 1995, 1996). Методы, основанные на анализе разделения поперечной волны, хорошо установлены (Crampin, 2000), но, к сожалению, регистрация и обработка данных поперечных волн, относительно дороги.

Поэтому за последние несколько лет вырос интерес к азимутальным амплитудным вариациям продольных волн. Rüger и Tsvankin (1997) показали, что достоверные оценки параметров анизотропии можно получить по амплитудам продольных волн. Позже аппроксимации коэффициента отражения продольной волны, представленные Rüger (1998), Jenner (2002) расширил до линейаризованной формы, которая использовалась многими авторами для извлечения свойств разломов. Angerer и др. (2003a) затем нацелились на получение интегрированного графа сейсмической характеристики разломов по широко-азимутальным данным Р и PS волн, полученных на больших удалениях. Этот подход (рис. 1) включает современный геостатистический метод разложения, в комплексе с азимутальным анализом анизотропии и позволяет делать количественные оценки интенсивности и направления разлома. Этот метод может быть применен либо к атрибутам, связанным с горизонтом, таким как карты интервальной скорости и карты среднеквадратических амплитуд, либо к трехмерным кубам атрибутов, таких как амплитуды сейсмической волны и атрибуты AVO.

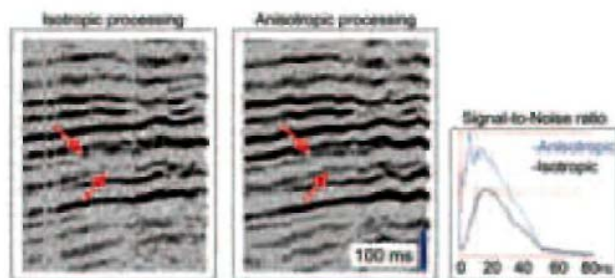
Здесь мы представляем результаты недавнего исследования, связанного с характеристикой разломов на основе азимутальной анизотропии Р-волны, по широкоазимутальному трехмерному набору данных. Целью исследования являлась характеристика распределения разломов в карбонатном резервуаре, на основе нескольких атрибутов, таких как интервальные скорости, среднеквадратические амплитуды и амплитуды сейсмической волны.

<sup>1</sup> CGG, now Shell E&P, The Netherlands

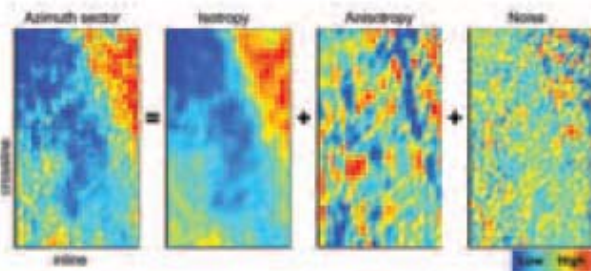
<sup>2</sup> CGG, now OMV, Austria

<sup>3</sup> CGG, now ENI E&P, Italy

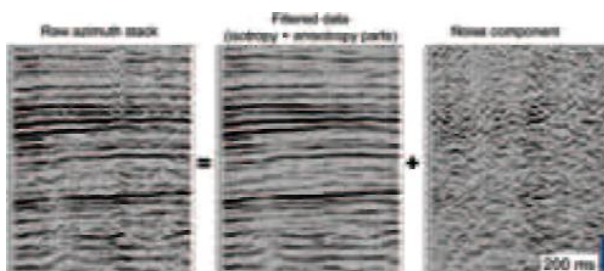
<sup>4</sup> CGG, Great West Road, London TW8 9GG, UK



**Рис. 2.** Сравнение результатов изотропной (слева) и анизотропной (справа) обработки демонстрирует преимущества учета наличия в данных азимутальной анизотропии. Улучшено качество результатов и выявлены мелкие детали.



**Рис. 3.** Любые азимутальные атрибуты (здесь карта интервальных скоростей) могут быть разложены на сумму изотропной части, анизотропного сигнала и небольшого шума (как случайного, так и систематического).



**Рис. 4.** Этот геостатистический метод разложения может быть непосредственно применен к трехмерным сейсмическим кубам и обеспечит существенное увеличение отношения сигнала/шум.

Кроме того, для подтверждения надежности полученных атрибутов анизотропии, данное исследование также включало анализ разломов с использованием данных микроэлектрического каротажа в шести скважинах. Несколько сравнений результатов анизотропной и обычной обработки демонстрируют преимущества нашего подхода на различных стадиях обработки. Наконец, мы выявили точность и эффективность каждого сейсмического атрибута в терминах оценки ориентации, амплитуды и распределения разломов.

### Азимутальная обработка

Несмотря на то, что широкоазимутальные данные, полученные на больших удалениях, рассматриваются как предпосылка для азимутального анализа, наблюдения часто не выполняются таким способом из-за экономических и практических соображений, таким образом, регистрируются неоптимальные для анализа данные. Поэтому очень важно гарантировать минимальные потери азимутальной информации в процессе всей обработки, если стоит задача успешной сейсмической оценки разломов. Благоприятная для

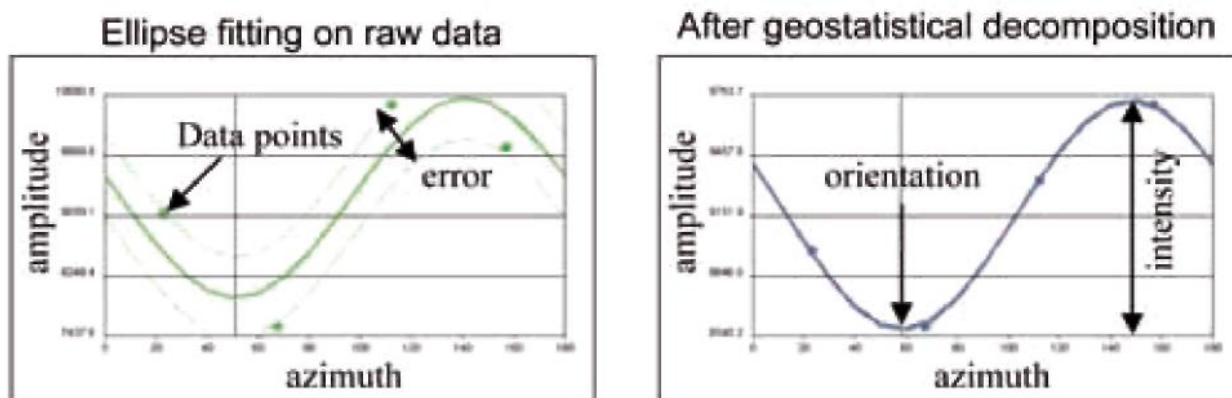
азимута обработка должна применяться последовательно ко всем азимутальным секторам.

Несколько аспектов, таких как перебинирование, удаление шумов и кратных волн и отображение требуют внимательного подхода для оптимальной обработки широкоазимутальных данных. Однако азимутальная вариация скоростей для кинематических поправок вызванная анизотропией среды, считается одним из самых важных (Jenner, 2002; Williams и Jenner, 2002). Это изменение скорости как функции азимута связано с временными задержками, которые могут значительно ухудшить качество данных после суммирования. Поэтому использование плотного анализа скоростей с коррекцией кинематики высокого порядка строго рекомендуется, чтобы должным образом суммировать широкоазимутальные данные.

Эффект неоптимальной обработки показан на рис. 2. Слева мы выполнили изотропную обработку с использованием одной изотропной скоростной модели для коррекции кинематики, в то время как для получения правого разреза мы проводили анизотропный скоростной анализ высокого порядка, используя автоматическую биспектральную пикировку с высокой плотностью (более подробно — см. Siliqi и др., 2003). Также применялась азимутальная гармонизация бинирования (перебинирование за азимут и удаление) для удаления отсутствующих трасс, связанных с нерегулярной системой наблюдений. Рис. 2 демонстрирует, что улучшенное отображение резервуара получается при анизотропной обработке. Лучше определено строение резервуара и увеличено отношение сигнал-шум.

Для сейсмического анализа анизотропии могут использоваться различные двумерные и трехмерные сейсмические атрибуты. В данном исследовании мы использовали карты среднеквадратических амплитуд, карты интервальных скоростей и сейсмические кубы, и применяли геостатистический метод разложения для улучшения качества сейсмической оценки разломов. Это разложение основано на методике автоматического факторного ко-крикинга (AFACK), разработанной Coléou (2002) для временной обработки, которая позже была расширена Angerer и др. (2003b) для применения в азимутальной обработке. Этот метод автоматически вычисляет функции вариограмм и кросс-вариограмм, которые позволяют разложить каждый азимутальный сектор на изотропную, анизотропную компоненты и шум. Рис. 3 представляет разложение карты среднеквадратических амплитуд по одному азимуту (заметьте, что каждая карта масштабирована независимо). Такое геостатистическое разложение дает эффективный способ улучшения пространственно когерентной информации в данных, удаляя случайный шум и след системы наблюдений, который может проявиться при извлечении атрибутов анизотропии. На рис. 4 мы применяли этот метод непосредственно к сейсмическому азимутальному разрезу. Фильтрованные данные представляют собой сумму изотропной и анизотропной компонент исходных сейсмических данных и характеризуются увеличенным отношением сигнал-шум. Свободные от помех секторы азимутальных атрибутов могут затем использоваться для оценки ориентации и величины анизотропии.

Оценка атрибутов анизотропии (интенсивность и ориентация) выполнена для каждого бина, подбирая эллипс к анизотропной компоненте данных, используя линейный метод наименьших квадратов. Величина этого



**Рис. 5.** Примеры подборки эллипсов при (справа) и без (слева) применения геостатистического разложения до выделения анизотропии. Эллиптическая вариация анизотропии лучше ограничена после геостатистической фильтрации. Это гарантирует более точную оценку интенсивности и ориентации анизотропии.

эллипса пропорциональна интенсивности анизотропии, а азимут максимальной амплитуды связан с ориентацией анизотропии. На рис. 5 приведены конечные эллипсы, подобранные для заданного бина при (справа) и без (слева) применения геостатистического разложения. Точки представляют данные по каждому азимутальному сектору, сплошные линии представляют подобранные эллипсы, а пунктирные линии — нормализованные среднеквадратические отклонения подборки. Может быть ясно замечено, что использование геостатистического разложения до такого выделения анизотропии гарантирует лучшую оценку эллиптической вариации данных (как видно по существенному уменьшению ошибки подборки) и, таким образом, более точную количественную оценку сейсмических атрибутов анизотропии.

### Анализ результатов и сравнение со скважинными данными

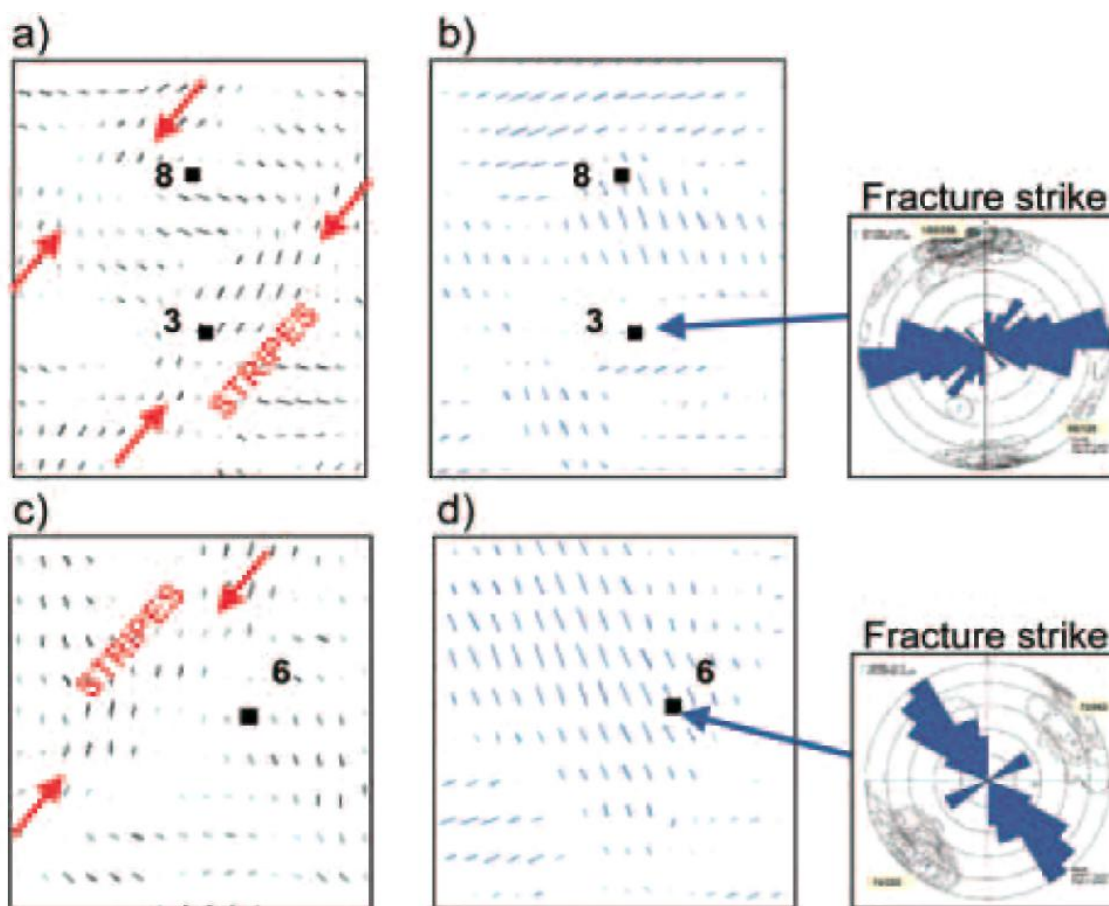
Чтобы показать возможное влияние обработки на конечную интерпретацию разломов, на рис. 6 приводятся две карты сейсмической анизотропии, полученные по азимутальным картам среднеквадратических амплитуд, вычисленных во временном окне 100 мс на уровне кровли резервуара. Интенсивность анизотропии для каждого бина показывается длиной вектора, а направление вектора показывает ориентацию анизотропии. Результаты слева были получены по сейсмическим данным, обработанным по стандартному графу (включая кинематическую поправку за угол наклона отражающей границы и изотропную коррекцию кинематических поправок), в то время как результаты справа были получены по оптимизированному графу обработки, который включал азимутальное перебинирование, трехмерную временную миграцию Кирхгофа до суммирования, анизотропную коррекцию кинематики высокого порядка и геостатистическое разложение.

На рис. 6а и 6с приведены некоторые модели анизотропии в направлении СВ-ЮЗ, которые, по-видимому, были подвержены влиянию геометрии системы наблюдений. Этот отпечаток системы наблюдений в значительной степени связан с неортогональной конфигурацией системы наблюдений, которая мешает получению однородного азимутального распределения.

На рис. 6b и 6d отпечаток системы не проявился на ориентации анизотропии, и наблюдается хорошая корреляция с простиранием разломов, вычисленным по скважинным данным. Как можно увидеть на этом примере, выбор графа обработки может сыграть большую роль на последующий анализ анизотропии и может привести к ошибочной интерпретации разломов. Если планируется получение достоверных результатов, то необходимо уделить внимание при выборе графа обработки, который смог бы обеспечить оптимальный азимутальный анализ анизотропии.

Рис. 7 представляет карту анизотропии, полученную по интервальным скоростям, вычисленным во временном окне 300 мс, расположенном в области резервуара. Для вовлечения скважинных данных был проанализирован набор диаграмм микроэлектрического каротажа в шести скважинах. На рис. 8 приводится подсчет разломов разного типа, наблюдаемых в скважинах. В данном исследовании мы учитываем только проводящие непрерывные разломы (показаны темно-синим), поскольку влияние разрывных разломов, так же как и резистивных разломов на сейсмическую анизотропию незначительно. Области высокой и низкой анизотропии, показанные на рис. 7, коррелируются со скважинными данными. Интерпретация каротажных диаграмм показала, что наиболее трещиноватые зоны (выделены красными кружками) расположены вокруг скважины 5 в юго-западной части исследуемой области и вокруг скважины 8, в то время как две области слабой интенсивности (выделены синими кружками) наблюдаются около скважины 3 и между скважинами 4 и 7. Это подтверждает, что азимутальная анизотропия, выведенная по сейсмическим данным Р-волны, может сильно коррелироваться с наличием разломов. Следует отметить, что карты анизотропии, вычисленные по интервальным скоростям, в общем случае более гладкие, чем те, которые вычислены по среднеквадратическим амплитудам (см. рис. 6). Это объясняется тем, что данные по скоростям более «литологичны» по сравнению с амплитудными данными. Поэтому не удивительно видеть некоторые несоответствия между рисунками 6 и 7.



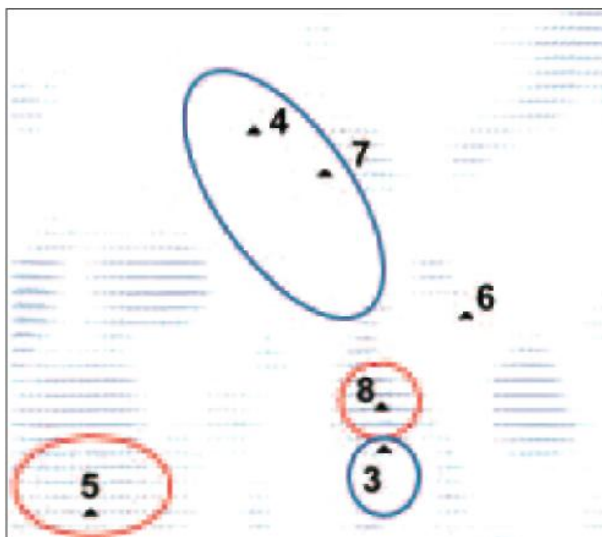


**Рис. 6.** Примеры карт анизотропии, вычисленных по азимутальным картам среднеквадратических амплитуд после изотропной (a и c) и анизотропной обработки (b и d). Улучшения, полученные по графу анизотропной обработки, подтверждаются простираем разломов, вычисленным по скважинным данным.

Направление простираения разломов, полученное по каротажным данным, и оцененная ориентация сейсмической анизотропии показаны на рис. 9. Наблюдаемая ориентация разломов показана синими ромбами, в то время как оцененная ориентация показана зелеными треугольниками для среднеквадратической амплитуды и красными квадратами для интервальных скоростей. Хорошее совпадение наблюдается для направления анизотропии, полученного по среднеквадратическим амплитудам. Смещение ориентации на 7 скважине может быть вызвано малой интенсивностью анизотропии, увеличивающей неоднозначность в процессе подборки эллипса и, таким образом, порождающей большую неопределенность ориентации анизотропии. Этот эффект, по-видимому, имеет наибольшее воздействие на ориентации, вычисленные по интервальным скоростям, что может быть замечено на скважинах 4 и 6. Кроме того, несмотря на высокую интенсивность разломов в скважине 8, оцененное направление анизотропии скорости сильно расходится от наблюдаемой ориентации. Это объясняется присущими характеристиками интервальной скорости, которые дают среднее значение анизотропии в интересующем интервале. Поэтому можно заключить, что для оценки сейсмической анизотропии использование амплитудных данных более выгодно, чем использование интервальных скоростей, поскольку они обеспечивают более детальную и точную оценку атрибутов анизотропии.

На рис. 10 может быть замечена хорошая корреляция между нормализованной интенсивностью разломов, вычисленной по скважинным данным, и оцененной интенсивностью сейсмической анизотропии по интервальным скоростям (красные квадраты) и по среднеквадратическим амплитудам (зеленые треугольники). Можно заметить, что на 5 скважине получена низкая интенсивность анизотропии по среднеквадратическим амплитудам, в то время как для этого участка ожидается большая трещиноватость. Эта скважина расположена на краю исследуемой области, поэтому предполагается, что данные анизотропии подвержены краевым эффектам. Этот эффект не проявляется на скоростном анализе, так как он выполнен на большем кубе. Однако данный анализ демонстрирует, что интенсивность анизотропии, оцененная по сейсмическим атрибутам коррелируется с интенсивностью разлома, вычисленной по каротажным данным высокого разрешения (микроэлектрический каротаж). Это подтверждает надежность графа количественной оценки азимутальных атрибутов анизотропии.

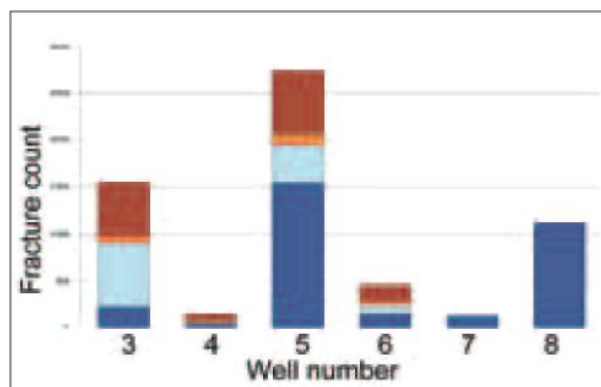
Сейсмические атрибуты, такие как карты интервальных скоростей и среднеквадратических амплитуд, могут обеспечить получение детальных изображений распределения разломов. Интервальные скорости представляют больший интерес для скважин, в которых планируется прогноз ориентаций большого количества разломов, в то время как среднеквадратические амплитуды могут использоваться в случае горизонтального бурения для изучения тонких литологических интервалов. Однако в общем случае эти



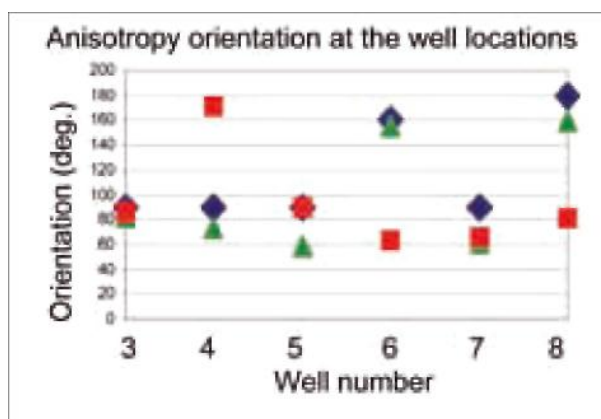
**Рис. 7.** Карта анизотропии, вычисленная по интервальным скоростям. Положения скважин показаны черными треугольниками. Анализ диаграмм микроэлектрического каротажа выявляет области высокой (красный) и низкой (синий) трещиноватости, которые коррелируются с сейсмической анизотропией.

два атрибута либо ограничены вертикальным разрешением (интервальная скорость), либо ограничены малым временным интервалом (среднеквадратическая амплитуда). Наш подход может быть расширен для трехмерного исследования прямым использованием азимутальных сейсмических разрезов. На рис. 11 приводится интенсивность анизотропии (справа), вычисленная по набору из четырех азимутальных разрезов (слева приведен разрез для одного азимутального сектора). Интенсивность анизотропии получена независимо для каждого сейсмического дискрета, путем вычисления эллиптической вариации сейсмической амплитуды, используя метод подбора эллипса, представленный на рис. 5. Высокая интенсивность анизотропии наблюдается на уровне целевого горизонта, где ожидается большая трещиноватость, в то время как для подстилающей толщи наблюдается более слабая анизотропия.

Преимущество рассмотрения еще и сейсмических амплитуд кроме карт скоростей и среднеквадратических амплитуд состоит в том, что они обеспечивают хорошую разрешенность по вертикали и помогают обнаружить малые азимутальные вариации по большим временным интервалам. Горизонтальная модель малой анизотропии, приведенная на рис. 11 обоснована пересечением нуля сейсмическими трассами, где невозможна оценка анизотропии. Эту проблему можно решить использованием огибающей градиента анизотропии, которая дает лучшую визуализацию и, таким образом, более интерпретируемую сейсмическую анизотропию (Todorovic-Marinic и др., 2004). Главное ограничение в использовании граничных атрибутов, таких как амплитуды, заключается в том, что невозможно отличить ось симметрии от оси изотропии. Предполагается, что всегда можно прибавить или вычесть  $90^\circ$  к оцененному направлению анизотропии. Эта неоднозначность не проявляется при использовании интервальных атрибутов, таких как интервальные скорости. Акустические жесткости также хорошо подходят для анализа анизотропии, так как они устраняют резонансный эффект и дают стратиграфические модели с высокой разрешающей способностью. Мы ожидаем, что в будущем будет большой интерес к акустической жесткости и



**Рис. 8.** Результат подсчета разломов по диаграммам микроэлектрического каротажа. Разломы разделены на 5 классов: проводящие непрерывные (показаны темно-синим), проводящие разрывные (показаны светло-голубым), резистивные непрерывные (показаны оранжевым), резистивные разрывные (показаны желтым) и смешанного типа (показаны коричневым).

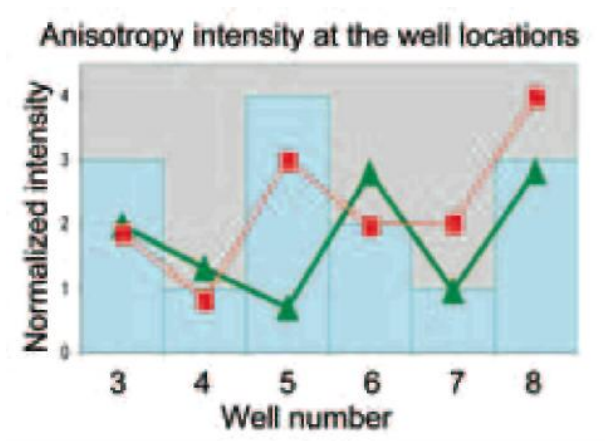


**Рис. 9.** Сравнение ориентаций разломов, вычисленных по скважинным данным (синие ромбы) с оцененными ориентациями анизотропии по среднеквадратическим амплитудам (зеленые треугольники) и по интервальным скоростям (красные квадраты) показывает, что амплитудные данные дают более точные ориентации, чем интервальные скорости.

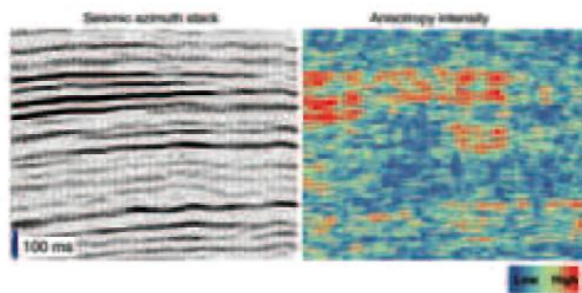
другим упругим атрибутам для азимутального анализа, так как они могут дать точную оценку атрибутов анизотропии, вместе с полной характеристикой упругих свойств резервуаров.

## Заключение

Понимание природы и распределения разломов существенно для качественной разработки резервуара. Хотя прямая информация о разломах в региональном масштабе доступна по данным сейсмической интерпретации, а в масштабе резервуара по скважинным данным, точное моделирование роли разломов в движении флюидов может быть недостаточным. Для комплексного моделирования движения флюида в трещиноватых резервуарах необходимо точное картирование разломов в субсейсмическом масштабе, и по последним азимутальным исследованиям было установлено, что такие карты могут быть получены в результате азимутального анализа данных сейсмозаписки на отраженных волнах. Здесь мы описали эффективный подход, который объединяет сохраняющий азимутальную информацию граф обработки с собственным геостатистическим методом фильтрации и приводит к



**Рис. 10.** Сравнение нормализованных интенсивностей разломов, вычисленных по скважинным данным (синие прямоугольники) с оцененными значениями интенсивности анизотропии по среднеквадратическим амплитудам (зеленые треугольники) и по интервальным скоростям (красные квадратики) показывает высокую степень корреляции.



**Рис. 11.** Детальная трехмерная характеристика анизотропии может быть получена по сейсмическим данным P-волн и может привести к точному картированию системы разломов.

надежной двумерной или трехмерной оценке атрибутов анизотропии (направление и интенсивность). Мы в частности показали, что использование оптимизированного графа обработки до азимутального анализа анизотропии является важным, если планируется получение надежных количественных оценок интенсивности и ориентации анизотропии. Сильная корреляция между данными сейсмической анизотропии и данными о разломах по скважинным данным указывает на то, что для оценки сетей разломов могут использоваться различные сейсмические атрибуты. Мы показали, что, хотя карты интервальных скоростей и среднеквадратических амплитуд могут обеспечить лучшим представлением о сети разломов, амплитудные данные или кубы акустической жесткости могут быть более подходящими для точного трехмерного анализа разломов. Азимутальная анизотропия не всегда вызвана присутствием разломов, поэтому важно вовлекать другие признаки разломных нарушений, такие как когерентность и сейсмический наклон, так же как и геомеханические модели и динамические данные (включая утечки бурового раствора и обводненность) для построения комплексной модели разломов.

### Благодарности

Мы бы хотели поблагодарить компанию CGG за разрешение опубликовать эти результаты.

### Ссылки на литературу

- Angerer, E., Lanfranchi, P., and Rogers, S. [2003a] Fracture reservoir modeling from seismic to simulator: a reality? *The Leading Edge*, **22**, 7, 684-689.
- Angerer, E., Lanfranchi, P., and Rogers, S. [2003b] Integrated fracture characterization from seismic processing to reservoir modeling. *73<sup>th</sup> SEG Annual Meeting*.
- Coléou, T. [2002] Time-lapse filtering and improved repeatability with automatic factorial co-kriging (AFACK). *64<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition*, A-18.
- Crampin, S. [2000] The potential of shear-wave splitting in a stress-sensitive compliant crust: a new understanding of pre-fracturing deformation from time-lapse studies. *70<sup>th</sup> SEG Annual Meeting*, Expanded Abstracts.
- Crampin, S. [1985a] Evidence for aligned cracks in the Earth's crust. *First Break*, **3**, 12-15.
- Crampin, S. [1985b] Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting. *Geophysics*, **50**, 142-152.
- Crampin, S., McGonigle, R., and Ando, M. [1986] Extensive dilatancy anisotropy beneath Mount Hood: Origin and the effect of aspect ratio on seismic velocities through aligned cracks. *J. Geophys. Res.*, **91**, 12703-12710.
- Jenner, E. [2002] Azimuthal AVO: Methodology and data examples. *The Leading Edge*, **21**, 8, 782-786.
- Lynn, H.B., Simon, K.M., Layman, M., Schneider, R., Bates, C.R., and Jones, M. [1995] The use of anisotropy in P-wave and S-wave data for fracture characterization in a naturally fractured gas reservoir. *The Leading Edge*, **14**, 8, 887-893.
- Lynn, H.B., Simon, K.M., and Bates, C.R. [1996] Correlation between P-wave AVOA and S-wave traveltimes anisotropy in a naturally fractured gas reservoir. *The Leading Edge*, **15**, 931-935.
- Rüger, A. [1998] Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media. *Geophysics*, **63**, 3, 935-947.
- Rüger, A., Tvanskin, I. [1997] Using AVO for fracture detection: Analytic basis and practical solution. *The Leading Edge*, **16**, 10, 1429-1434.
- Siliqi, R., Le Meur, D., Gamar, F., Smith, L., Toue, J-P., and Herrmann, P. [2003] High density moveout parameter fields V and T]. Part one: Simultaneous automatic picking. *73<sup>rd</sup> SEG Annual International Meeting*, Expanded Abstracts.
- Thomsen, L. [1988] Reflection seismology over azimuthally anisotropic media. *Geophysics*, **53**, 304-313.
- Thomsen, L. [1995] Elastic anisotropy due to aligned cracks in porous rock. *Geophysical Prospecting*, **43**, 805-829.
- Todorovic-Marinic, D., Larsen, G., Gray, D., Cheadle, S., Soule, G., and Zheng, Z. [2004] Identifying vertical productive fractures in the Naraway gas field using the envelope of the anisotropic gradient. *First Break*, **22**, 45-50.
- Williams, M., Jenner, E. [2002] Interpreting seismic data in the presence of azimuthal anisotropy or azimuthal anisotropy in the presence of seismic interpretation. *The Leading Edge*, **21**, 8, 771-774.