

Определение продуктивных вертикальных трещин на газовом месторождении Нарравей с использованием огибающей градиента анизотропии.

Identifying vertical productive fractures in the Narraway gas field using the envelope of the anisotropic gradient

Практический пример применения группой специалистов в составе Dragana Todorovic-Marinic¹, Glenn Larson², David Gray¹, Scott Cheadle¹, Greg Soule² и Ye Zheng¹ нового сейсмического атрибута для определения вертикально ориентированных разломов, трещин или микротрещин в газовых коллекторах с использованием данных наземной сейсморазведки.

Разломы представляют огромный интерес для добычи углеводородов. Они могут, как мешать, так и помогать ей в зависимости от типа исследуемого коллектора. Таким образом, знание о распределении разломов и их ориентации может оказаться ключевым для успеха исследования.

Вертикально ориентированные разломы, трещины и микротрещины, как известно, являются причиной трансверсальной изотропии среды с горизонтальной осью анизотропии (Horizontal Transverse Isotropy (HTI)). Этот тип анизотропии обычно имеет горизонтальную ось, ориентированную по направлению вертикальной трещиноватости (параллельно максимальному горизонтальному напряжению и перпендикулярно минимальному горизонтальному напряжению). Широко известно (Hall et al, 2000; Gray et al, 2002), что HTI анизотропия очень сильно влияет на сейсмическую амплитуду.

Амплитуда может быть найдена перебором параметров в выражении Ругера (Ruger, 1996) для изменения амплитуд P- волны с углом и азимутом (Amplitude Versus Angle and Azimuth (AVAZ)) для данных наземной сейсморазведки. На выходе получают сейсмические атрибуты, содержащие информацию, которая может быть применена к трещиноватости. Коэффициент отражения P-волны, являющийся реакцией сейсмической волны на сжатие горных пород, дает информацию о литологии породы и содержании флюида. Коэффициент отражения S-волны, являющийся реакцией сейсмической волны на сдвиг горных пород, содержит информацию преимущественно о литологии. Градиент анизотропии описывает изменения AVO градиента с азимутом и связан с плотностью трещин, т.е. с величиной изменения горизонтальной проницаемости (Lynn et al, 1996). Азимут градиента анизотропии имеет направление оси симметрии HTI среды. В пределах коллектора с вертикальными открытыми трещинами, представленного HTI средой, азимут градиента анизотропии показывает ориентацию разломов.

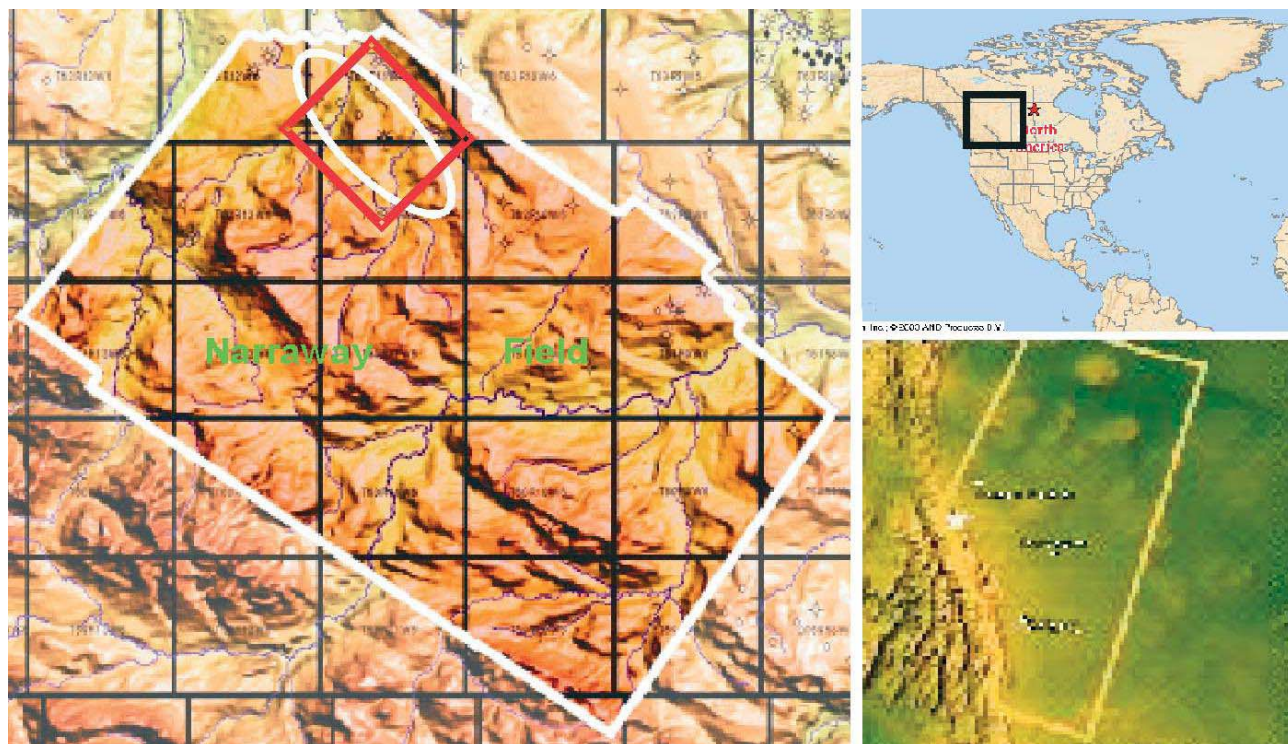


Рисунок 1 Обзорная карта месторождения Нарравей (Narraway). Жирными линиями показана площадь сейсмических работ Copton 3D (Альберта, Канада), выполненная Time Seismic.

¹Veritas DGC, 715 Fifth Ave SW, Calgary, Alberta, Canada, T2P 5A2

²Devon Canada Corp., 3000, 400 Third Ave SW, Calgary, Alberta, Canada, T2P 4H2

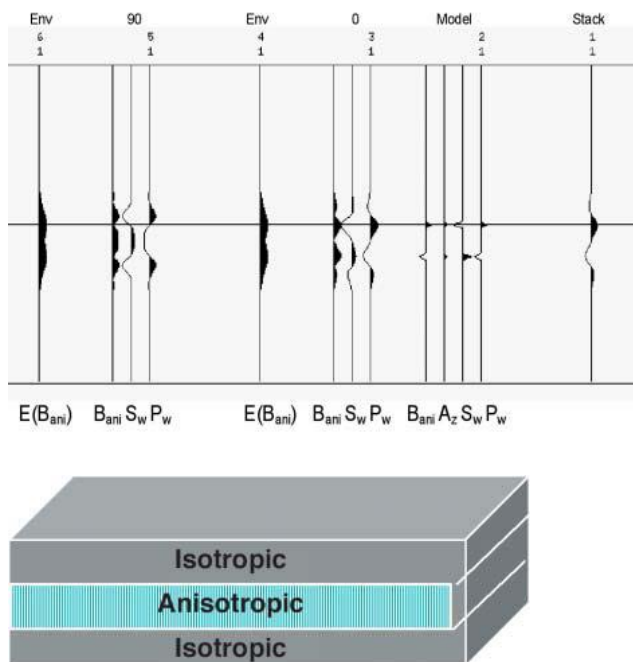


Рисунок 2 а) Тестирование синтетической модели б) Трехслойная модель

Было отмечено, что атрибут градиента анизотропии имеет небольшие значения при переходе через ноль в сейсмограмме, что создает видимость высокочастотных разрывов непрерывности по вертикали. Огибающая сейсмического атрибута часто используется для выделения его характерных особенностей, которые непросто обнаружить на необработанных данных; в этой статье мы хотим представить новый сейсмический атрибут: огибающая градиента анизотропии. Наши результаты демонстрируют, что новый сейсмический атрибут, в частности, содержит информацию, которая может обеспечить более подробную в отношении интерпретации оценку сейсмической анизотропии, как характеристики резервуара.

Другим преимуществом этого подхода является фазовая устойчивость нового атрибута. Этот факт позволяет анализировать данные с неопределенной фазой по разломам. Огибающая рассчитывается с помощью преобразования Гильберта (Taner et al, 1979). Метод с огибающей протестирован как на синтетических данных, так и на реальной сейсмической съемке, проведенной на антиклиналь Нарравей (Рисунок 1). Для характеристики трещинного коллектора Нарравей были совместно проинтерпретированы стандартные сейсмические атрибуты, огибающая градиента анизотропии, дебит скважины, каротаж, и информация по керну.

Применение метода к синтетическим данным

Массив синтетических данных был создан для тестирования результатов, полученных с помощью градиента анизотропии вблизи переходов через ноль на сейсмограмме и определения причин появления высокочастотных разрывов непрерывности по вертикали. Массив синтетических данных моделируется с помощью выражения (1), Ругер (Ruger (1996)).

$$R(\theta, \varphi) = A + [B^{iso} + B^{ani} \cos^2(\varphi - \varphi_{sym})] \sin^2 \theta \quad (1)$$

где R - коэффициент отражения (амплитуда) P- волны,
 A - интерсепт AVO,
 B^{iso} - AVO градиент изотропии и B^{ani} - градиент анизотропии (плотность разломов).
 θ - угол подхода сейсмической волны,
 φ - азимут траектории луча,
 φ_{sym} - азимут направления перпендикулярного направлению трещины.

Модель содержит три слоя: анизотропный и расположенные над и под ним два изотропных слоя. Таким образом, мы получаем два анизотропных контакта, как показано на рисунке 2b. С помощью выражения (1) была создана синтетическая сейсмограмма с начальным нуль-фазовым импульсом Рикера. Затем фаза была изменена на 90° и записаны новые сейсмограммы. Рисунок 2a показывает суммированную трассу, трассу коэффициентов отражений, результирующие коэффициенты отражения P и S-волны, градиент анизотропии в случае 0° и 90° и результирующую огибающую градиента анизотропии для обоих случаев. Из тестирования синтетики можно наблюдать малые значения атрибута градиента анизотропии вблизи и на переходах через ноль сейсмотрассы а также то, что атрибут не зависит фазы исходного импульса. Сравнивая результирующие огибающие градиента анизотропии в обоих случаях, можно видеть, что они идентичны, что доказывает, что новый сейсмический атрибут более четко определяет направление сейсмической анизотропии.

Применение метода к реальным данным

Метод AVAZ был применен к массиву данных Copton 3D на месторождении Нарравей. Devon выдала лицензию на проведение 1500 км^2 сейсмической съемки Copton 3D компании Time Seismic, а обработка производилась Veritas GeoServices в 2001, и с тех пор широко использовалась для исследования и разработки проектов.

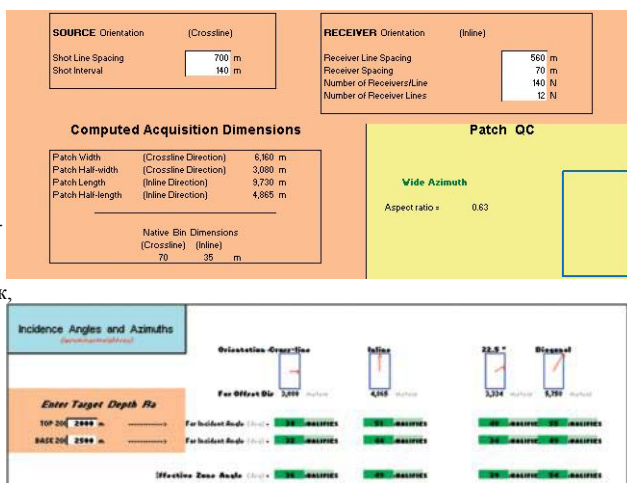


Рисунок 3 а) Геометрия измерений; б) Распределение азимутов и углов падения луча на заданной глубине

Геофизическое исследование коллекторов

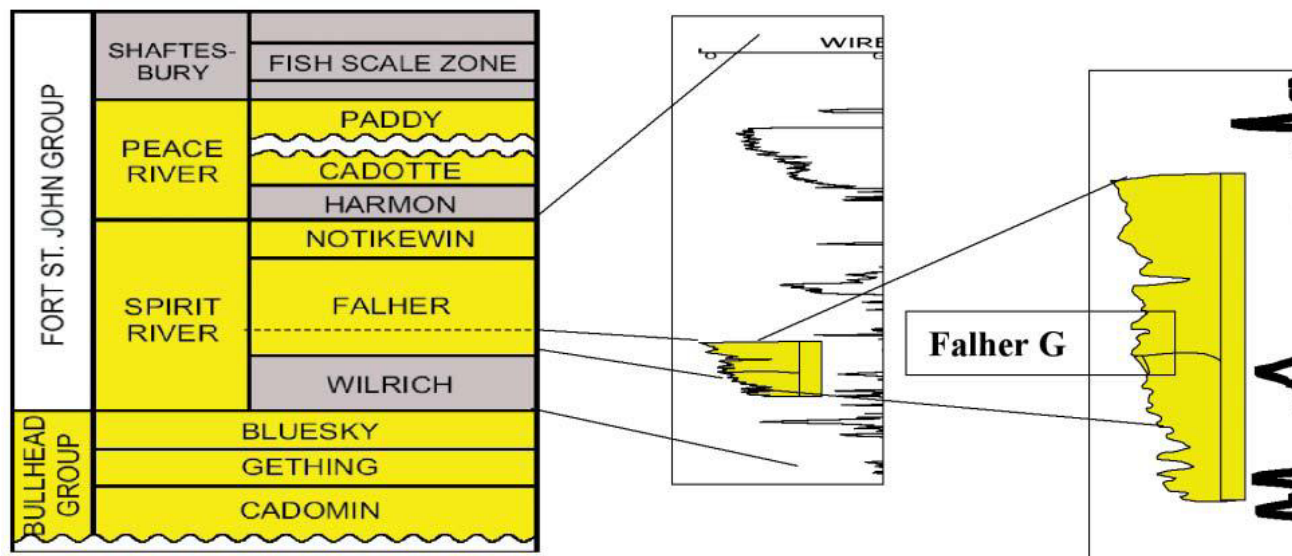


Рисунок 4 Обзорная стратиграфия для района Нарравей с выделенным пластом Falher. Продуктивная толща - 'G' песок расположенная в основании пласта Falher. На каротажной диаграмме изображен гамма-картаж скважины 11-24-62-11W6. Нефтегазоносный комплекс пород расположен в кровле толщи Falher 'G'. Породы представлены плотным песчаником (пористость <5%) и обладают проницаемостью, обусловленной естественными разломами на антиклинали.

Съемка Copton 3D была запланирована, как широкоазимутальная, с максимально большими выносами (Рисунок 3), что облегчит изучение изменения амплитуды отражения с изменением азимута и удаления. Целью изучения было выяснение устойчивости технологии AVAZ к нахождению разломов внутри антиклинали. Так как роль разломов в добыче на Нарравей очень высока, ожидалось, что метод AVAZ мог бы помочь в характеристике трещин в коллекторе для будущей разработки месторождения.

Задачей исследования являлся анализ системы AVAZ, в районе съемки площадью 190 км² (красный полигона на рисунке 1), расположенном в центре антиклинали Нарравей. Была проведена соответствующая обработка исходных данных, необходимая для AVAZ, которая заключала в себя поправку за сферическое расхождение (экспоненциальный закон), поверхностно-согласованное масштабирование, деконволюцию, ввод остаточной статистики, коррекция NMO и азимутально-переменные статические поправки в оконном режиме. Был применен 30° мьютинг к сейсмограммам, что дало возможность получить одинаковое распределение выносов для всех азимутов. Этот шаг позволил объективно проводить измерения изменения отраженной амплитуды для всех удалений и азимутов. После того, как искомым атрибутом был рассчитан, была проведена миграция после суммирования с использованием метода Зенга и Грея (Zheng and Gray, 2002).

Месторождение Нарравей является основным для компании Devon и ее партнеров. Оно представлено широкой антиклиналью и расположено на восточном крае Футхилского складчатого пояса на северо-западе провинции Альберта, Канада. Текущей уровень добычи на антиклинали, которая ведется из образований мелового и пенсильванского периодов, составляет 100 миллионов футов³/день. Объектом изучения AVAZ являются трещины на хребте структуры имеют между скважинами 8-4 и 11-24 (Рисунок 4),

на что приходится 20% современной добычи. Большая часть из нее осуществляется из двух скважин. Обе они обладают схожим дебитом, составляющим более 20 млн футов³/день. Все скважины на антиклинали изучены AVAZ.

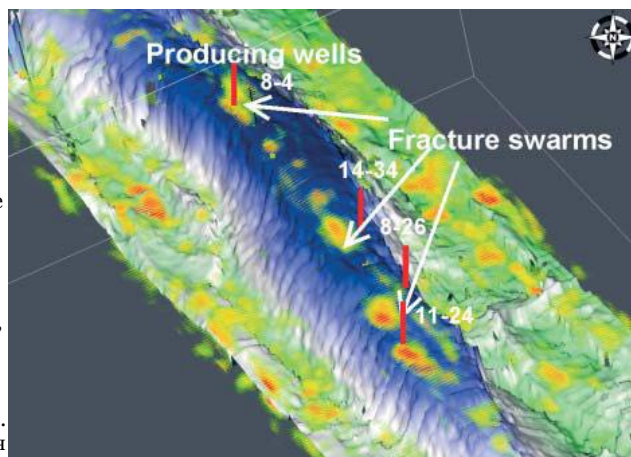


Рисунок 5 Временная структура дна коллектора (голубой и белый) с наложением системы разломов (красный и желтый) и известных добывающих скважин. Север находится сверху рисунка. Изначальный уровень добычи скважин с севера на юг составлял 24 млн футов³/день на скважине 8-4, 3 млн футов³/день на 14-34, 2 млн футов³/день на 8-26, и 35 млн футов³/день на скважине 11-24. Структура представляет собой надвиг пластов незначительной мощности с ведущим краем надвига направленным на северо-восток (вверх - вправо). Обратите внимание, что аномалии плотности трещин на хребте структуры имеют между скважинами 8-4 и 11-24.

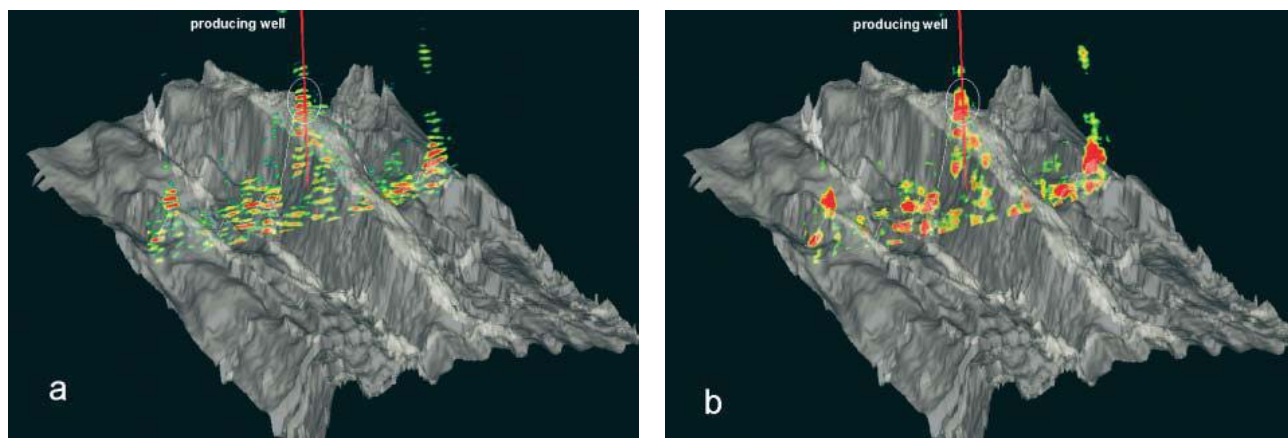


Рисунок 6 а) Градиент анизотропии (плотность разломов) в добывающей скважине, расположенной на профиле; б) Огибающая градиента анизотропии в той же добывающей скважине.

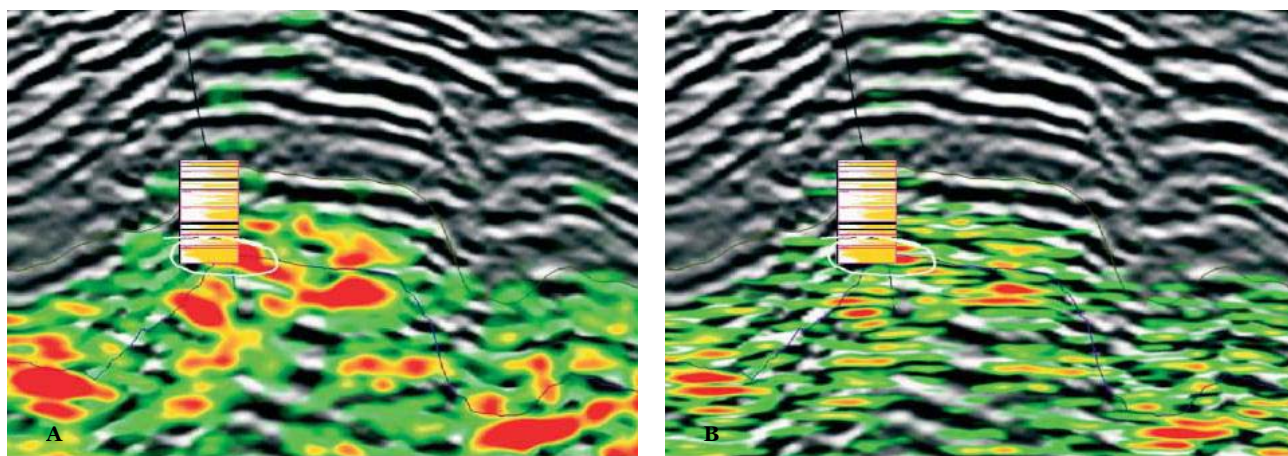


Рисунок 7. Корреляция между плотностью разломов и относительным содержанием песка: белый цвет соответствует глине, желтый – пескам и черный – углю. (а) Огибающая градиента анизотропии (б) Градиент анизотропии

При движении дальше на восток в недеформированных слоях долин Альберты песчаные фации горизонта Falher-G не продуктивны, и добыча ведется здесь из фаций конгломератов, что неочевидно, на антиклиналях. На месторождении Нарравей продуктивны только фации плотных песчаников и, следовательно, продуктивность скважин предполагает сильную зависимость от повышенной проницаемости, связанной с естественными разломами, образованными структурными деформациями на антиклиналях. Как результат, пересекающиеся разломы в песчаных образованиях – ключевой фактор для выгодной эксплуатационной скважины.

Результаты

Анализ AVAZ на месторождении устанавливает наличие разломов, с которыми связана продуктивность скважин. Рисунок 5 показывает поверхностную временную структуру Falher с наложенной системой разломов, которая была установлена с помощью огибающей градиента анизотропии. Две продуктивные скважины, 8-4 и 11-24, пересекают или находятся в непосредственной близости от этой системы разломов. Анализ предполагает, что вдоль структуры существуют другие области с видимой высокой интенсивностью разломов и, следовательно, расположения потенциальных скважин.

На Рисунке 6а градиент анизотропии имеет высокочастотную вертикальную неоднородность, что вызвано небольшими значениями при переходах через ноль на сейсмограммах. Огибающая градиента анизотропии (Рисунок 6б) подчеркивает эту вертикальную неоднородность и устанавливает ее местонахождение в разломах. В результате, наблюдается обилие разломов.

Рисунок 7а показывает, что система разломов, найденная с помощью огибающей градиента анизотропии, коррелируется с относительным содержанием песка. Эта корреляция может быть вызвана более хрупкими песками, чем окружающая их глина, и, следовательно, более склонных к возникновению в них трещин. На Рисунке 7б корреляция между системой разломов, найденных с помощью градиента анизотропии, и относительное содержание песка менее очевидно. Огибающая градиента анизотропии позволяет более точно определять системы разломов, что в свою очередь очень хорошо коррелируется с относительным содержанием песка.

Система разломов, установленная с помощью огибающей градиента анизотропии, встречается вдоль гребня складчатой структуры, но ее нет ни на шарнире ни на переднем крае надвига. (Рисунок 5)

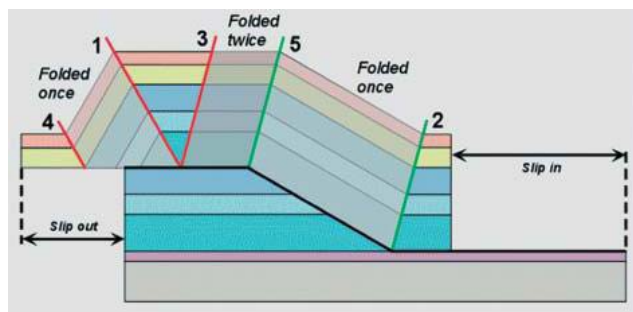


Рисунок 8. Эта диаграмма показывает как хребет поднятия, образованного при надвиге пластов незначительной мощности, мог дважды подвергаться смятию, что вело к еще большему увеличению давления и таким образом, большему разломообразованию, чем вдоль передней кромки, (Lacazette, 2004b).

Ее интенсивность не постоянна вдоль простирания, следствием чего является изменение закономерностей механических напряжений, вызванное разломами, в пространстве. Эти изменения могут быть связаны с развитием структуры и, возможно, более чем с одной стадией деформации. Наблюдая эти результаты, Lacazette (2004) предложил структурную модель, показанную на рисунке 8, которая предполагает возможное объяснение развития трещинообразования, которое наблюдается на хребте структуры с помощью атрибута AVAZ (Lacazette, 2004b). Это модель допускает, что, возможно, было два этапа развития трещиноватости на протяжении развития структуры, объясняющих, почему наибольшее распространение трещины получили именно на хребте. Дальнейшее изучение требует подтверждения этой модели и объяснения, почему эти разломные зоны встречаются в виде отдельных областей вдоль простирания структуры.

Выводы

Цель работы заключалась в поиске атрибута, который более четко определял бы границы разломных зон внутри резервуара. Новый сейсмический атрибут, огибающая градиента анизотропии, удовлетворяет этому критерию, улучшая расчет и визуализацию плотности расположения трещин. Он устраняет высокочастотное горизонтальное распределение градиента анизотропии, подавляя эффекты, вызванные небольшими амплитудами вблизи переходов через ноль в разрезе, и более четко обозначает зоны высокой плотности разломов. Zheng и другие (2004) показали, что изменения фазы влияют на расчет по методу AVAZ, однако новый атрибут не зависит от фазы. Этот факт позволяет проводить анализ данных, для которых фаза не определена.

Экспериментальные результаты доказывают существование корреляции аномалий плотности расположения разломов, полученной из метода AVAZ, начальной продуктивности скважин. Огибающая градиента анизотропии также показывает, что плотность расположения трещин на хребте антиклинали больше, чем вдоль шарнирной части или передней оконечности. Эта информация может помочь в описании резервуара и предсказывании продуктивности новых потенциальных скважин до бурения. Бурение новых скважин на месторождении будет зависеть от многих других факторов: экономических, факторов управления добычей,

в ближайшем будущем одна скважина будет пробурена в том месте, где была обнаружена система трещин с помощью анализа методом AVAZ.

Будущие работы

Наблюдая закономерности взаимосвязи между разломами, связанными с анизотропией, и добычей на месторождении Нарравей, можно судить о полезности и применимости метода. Эти и более ранние результаты (Gray et al, 2003, Gray et al, 2004) способствуют продолжению использования этой технологии и в дальнейшем, однако остается неразрешенными еще целый ряд вопросов. К примеру, с каким свойством коллектора соотносить градиент анизотропии, являющийся функцией плотности трещин? Это может быть апертура разломов, сама плотность разломов, направленная проницаемость, какая-то комбинация этих параметров или что-то другое. Другой вопрос заключается в неясности поведения разломов на сейсмических данных по отношению к измерениям в различных масштабах, таких как FMI каротажи, керн и случай крупномасштабных разломов?

Из двух скважин на Нарравей с наибольшим уровнем добычи, одна проходит сквозь явную систему трещин, не обнаруженную ни FMI каротажем, ни другими методами, которые используются для обнаружения аномалий, связанных с трещиноватостью не высокой плотности. Означает ли это, что технология сейсмики обнаруживает нечто в масштабах, аналогичных шкале FMI каротажа? Зависит ли добыча от высокой плотности трещин или только лишь от нескольких широкоапертурных разломов. Все эти вопросы необходимо подвергать дальнейшему изучению.

Структурные геологи могут использовать информацию, собранную из интерпретации результатов градиента анизотропии AVO. После использования этих результатов, на хребте антиклинали появились дополнительные области трещиноватости, и была усложнена кинематическая история структуры. Модель, предложенная Lacazette (2004b) обеспечила одно возможное объяснение этих наблюдений, однако могут быть также и другие, еще не исследованные аспекты. Совместное использование анизотропии AVO и традиционных методов структурной геологии может помочь разрешить эти проблемы. Кроме того, дополнительные области внутри 3D объема и другие перспективные пласты месторождения будут оценены на практичность использования анизотропии AVO для предсказания потенциальной добычи.

Мы хотим сделать попытку объединить характеристики трещинного коллектора, рассчитанные с использованием нейронных сетей, и информацию, полученную из азимутального AVO, с данными по бурению, историей заканчивания скважин, пористостью, литологией и структурой (e.g. Boerner et al, 2003). В случае успеха у нас будет возможность предсказывать наличие разломов в коллекторе. Информация о них может быть импортирована в модель резервуара наряду с историей добычи по всем доступным скважинам. Таким образом, мы сможем лучше описать резервуар и понять строение схемы дренирования, связанной с разломами, для создания итоговой технологической схемы разработки коллектора.

Благодарности

Мы хотели бы поблагодарить Devon Canada Corporation, Time Seismic и Veritas GeoServices за разрешение на публикацию этих результатов.

Ссылки

- Hall, S., Kendall, J.M., Barkved, O. and Mueller, M. [2000] Fracture characterization using P-wave AVOA in 3-D OBS data. *SEG 70th Annual International Meeting*, Session: RC 1.3, 1409-1412.
- Gray, F.D., Roberts, G. and Head, K.J. [2002] Recent Advances in Determination of Fracture Strike and Crack Density from P-Wave Seismic Data. *The Leading Edge*, **21**, 3, 280-285.
- Ruger, A. [1996] *Reflection Coefficients and Azimuthal AVO Analysis in Anisotropic Media*. Doctoral Thesis, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- Lynn, H.B., Simon, K.M. and Bates, C.R. [1996] Correlation between P-wave AVOA and S-wave traveltime anisotropy in a naturally fractured gas reservoir. *The Leading Edge*, **15**, 8, 931-935.
- Taner, M.T., Koehler, F. and Sheriff, R.T. [1979] Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, **44**, 6, 1044-1063.
- Zheng, Y. and Gray, D. [2002] Integrating seismic fracture analysis with migration. Presented at the *SEG 72nd Annual International Meeting*.
- Lacazette, A. [2004a] Personal communication.
- Lacazette, A. [2004b] <http://www.naturalfractures.com/> Gray, F.D., Boerner, S., Todorovic-Marinic, D. and Zheng, Y. [2003] Analyzing fractures from seismic for improved drilling success. *World Oil*, **224**, 10.
- Gray, D. and Todorovic-Marinic, D. [2004] Fracture detection using 3D Seismic. Presented at the *AAPG Reservoir Deformation Research Group*. ([http://infosystems.aapg.org/committees/research/Gray 3Frac 2004.doc](http://infosystems.aapg.org/committees/research/Gray%203Frac%202004.doc)).
- Zheng, Y., Todorovic-Marinic, D. and Larson, G. [2004] Fracture detection (AVAZ): ambiguity and practical solution. Presented at *CSEG convention 2004*.
- Boerner, S., Gray, D., Zellou, A., Todorovic-Marinic, D. and Schnerk, G. [2003] Employing neural networks to integrate seismic and other data for the prediction of fractures intensity. Abstract submitted to *2003 SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.