

Applying EarthStudy 360 Full-azimuth Angle Domain Imaging and AVAZ Inversion

to Study Fractures in Carbonate Reservoirs in the Middle Volga Region (Russia)

Применение системы получения и интерпретации полноазимутальных сейсмических изображений EarthStudy 360 и AVAZ инверсии для изучения трещин и разломов карбонатных коллекторов Средневолжского региона России

Stepanov Igor, Galkin Alexander, Inozemtsev Alexander, Erchenkov Mikhail

Степанов Игорь, Галкин Александр, Иноземцев Александр, Ерченков Михаил

In onshore seismic exploration, standard migration technologies have traditionally been unable to provide sufficient detail and accuracy when imaging subsurface carbonate reservoirs. A new method was required to provide higher-quality depth images and reservoir characteristics, to both enable a more correct placement of exploration and production wells, and to improve production flow.

The Solution

A project was performed in carbonate reservoirs in the Middle Volga region of Russia using the Paradigm EarthStudy 360® full-azimuth angle domain imaging system (Koren and Ravve, 2011), including tomography and anisotropic AVAZ inversion (Canning and Malkin, 2009). 3D seismic data from onshore surveys was first processed with careful amplitude preservation. The seismic dataset was characterized by an average fold of 90 with sparse

При наземной сейсморазведке стандартные технологии миграции обычно не в состоянии обеспечить достаточную точность и детализацию изображений подземных карбонатных коллекторов. Для более точного определения мест бурения разведочных и эксплуатационных скважин, а также для улучшения производственного процесса требовался новый метод получения высококачественных изображений пластов-коллекторов и определения их параметров.

Решение

Описываемый ниже метод с использованием системы получения и интерпретации полноазимутальных сейсмических изображений Paradigm EarthStudy 360® (Koren and Ravve, 2011), включая томографию и анизотропную инверсию AVAZ (Canning and Malkin, 2009), был применен для исследования карбонатных коллекторов Средневолжского региона России. Трехмерные сейсмические данные,

Sintez Petroleum, JSC: Stepanov Igor Viktorovich, Chief Seismic Exploration Specialist/Principle Seismic Consultant; Galkin Alexander Vasilyevich, Chief Specialist, JSC Zapprrikaspiygeofizika.

Paradigm Moscow: Dr. Inozemtsev Alexander Nickolaevich, Business Development Manager & Chief Advisor for Processing and Inversion Technologies; Erchenkov Mikhail Viktorovich, Director.

ЗАО «Синтез Петролеум»: Степанов Игорь Викторович, главный специалист в области сейсморазведки и ведущий консультант по сейсмическим вопросам; Галкин Александр Васильевич, главный специалист АО «Запприкаспийгеофизика».

Отделение компании Paradigm в Москве: Иноземцев Александр Николаевич, к.т.н., менеджер по развитию бизнеса и главный советник по технологиям обработки и инверсии; Ерченков Михаил Викторович, директор.

full-azimuth distribution and a maximum offset of 3,900 meters. The maximum target depth was 4,000 meters.

The workflow included:

- 3D ray tracing to better understand subsurface angle domain illumination, taking into account velocity model anisotropy/heterogeneity and the seismic acquisition pattern of the data.
- Derivation of initial anisotropic velocity model parameters (VTI).
- Generation of full-azimuth directional angle gathers, extraction of dip, azimuth and continuity (DAC), and performance of both specular weighted and diffraction weighted energy stacks to enhance the image quality of subsurface continuous and discontinuous objects, respectively.
- Generation of full-azimuth reflection angle gathers in the specular direction, using residual moveouts (RMO) measured along the gathers for anisotropic tomographic velocity model updating.
- Re-generation of the full-azimuth reflection angle gathers, followed by azimuthal (HTI) residual moveout analysis and inversion to obtain optimal HTI effective parameters: Azimuth of axial HTI symmetry; HTI anisotropy intensity (Delta2); and relative residual velocity along fractures (Alpha).
- Performance of amplitude AVAZ inversion to obtain volumes of AVAZ attributes: Anisotropic and isotropic gradients, and volumes of fracture density and fracture orientation.

Detailed Analysis

A comparison was made between the quality of the seismic depth image obtained using the EarthStudy 360 Imager and that of a Kirchhoff migration. The depth velocity model, migration aperture and other parameters in both cases were the same.

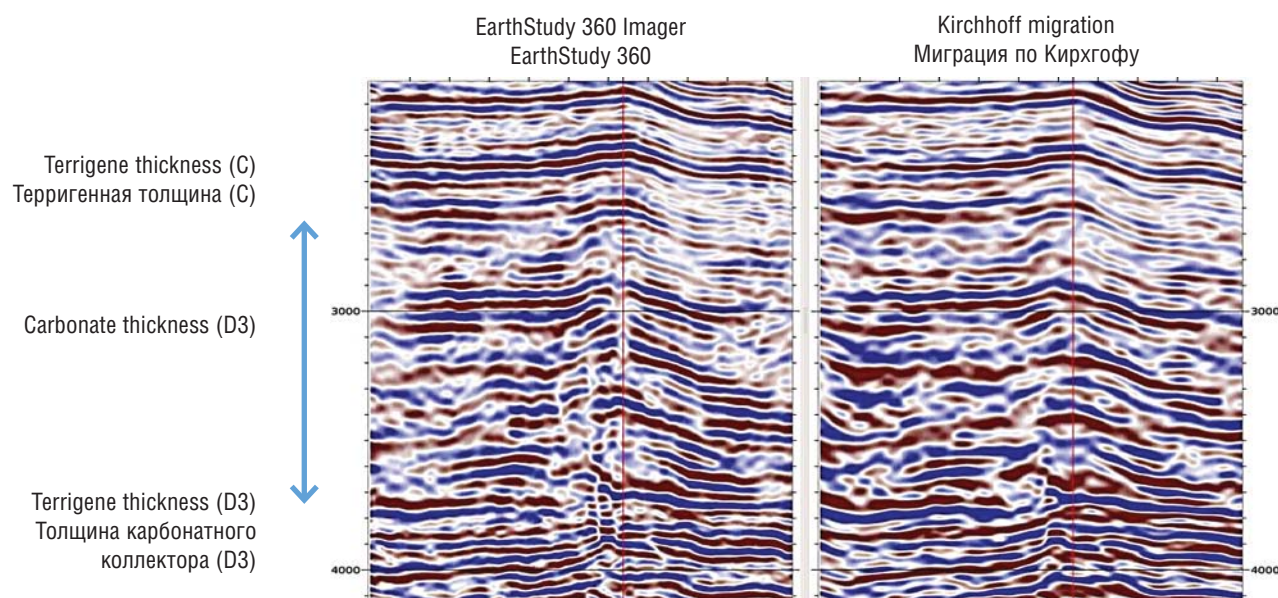
полученные на основе наземной разведки, были сперва обработаны при тщательном сохранении амплитуды. Сейсмограммы характеризовались средней кратностью – 90, относительно равномерным полно-азимутальным распределением лучей и равномерным распределением удалений при максимальном значении – 3 900 м. Максимальная целевая глубина исследований составляла 4 000 м.

Технологический процесс включал следующие стадии:

- 3D-трассирование лучей для лучшего понимания углового распределения освещенности пластов с учетом анизотропии/неоднородности скоростной модели и общей конфигурации данных сейсморазведки.
- Определение начальных параметров анизотропной скоростной модели (VTI).
- Получение полно-азимутальных дирекционных угловых сейсмограмм, определение наклона, азимута и непрерывности (DAC), проведение взвешенного рефлексивного и дифракционного суммирования для улучшения качества изображения подземных непрерывных и неоднородных объектов, соответственно.
- Получение полно-азимутальных рефлексивных угловых сейсмограмм по зеркальной компоненте, оценка параметров остаточной кинематики (RMO), измеренных вдоль сейсмических трасс, для корректировки анизотропной томографической скоростной модели.
- Повторное получение полно-азимутальных рефлексивных угловых сейсмограмм с последующим проведением азимутального анализа остаточной кинематики для определения горизонтальной поперечной изотропии (HTI) и анализа по методике Swan для получения оптимальных эффективных параметров HTI: азимута оси симметрии HTI, интенсивности анизотропии HTI (Delta2) и относительной остаточной скорости вдоль трещин (Alpha).
- Проведение амплитудной инверсии AVAZ для расчета кубов параметров AVAZ: анизотропных и изотропных градиентов, кубов плотности трещин и их ориентации, включая разломы.

● Fig. 1. A comparison of the results of EarthStudy 360 Imager vs. Kirchhoff.

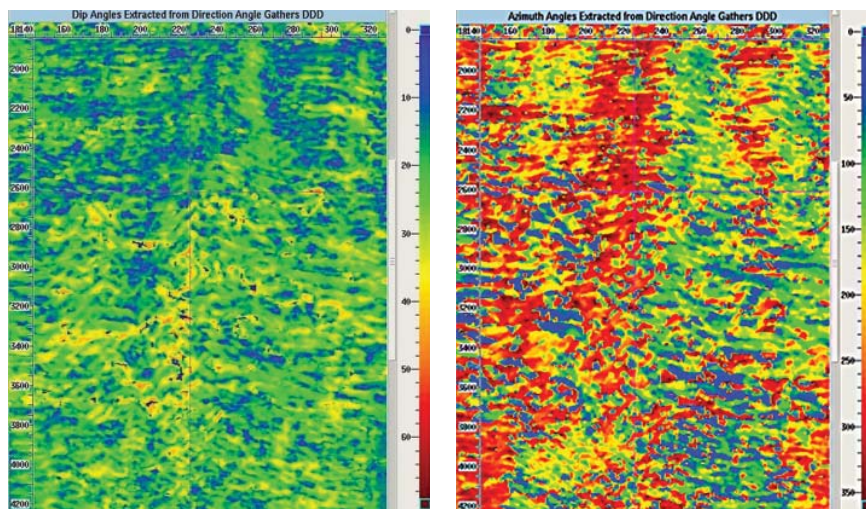
● Рис. 1. Сравнение результатов, полученных с использованием EarthStudy 360 Imager и на основе миграции по Кирхгофу.



Dip Volume / Наклон

Azimuth Volume / Азимут

Детальный анализ



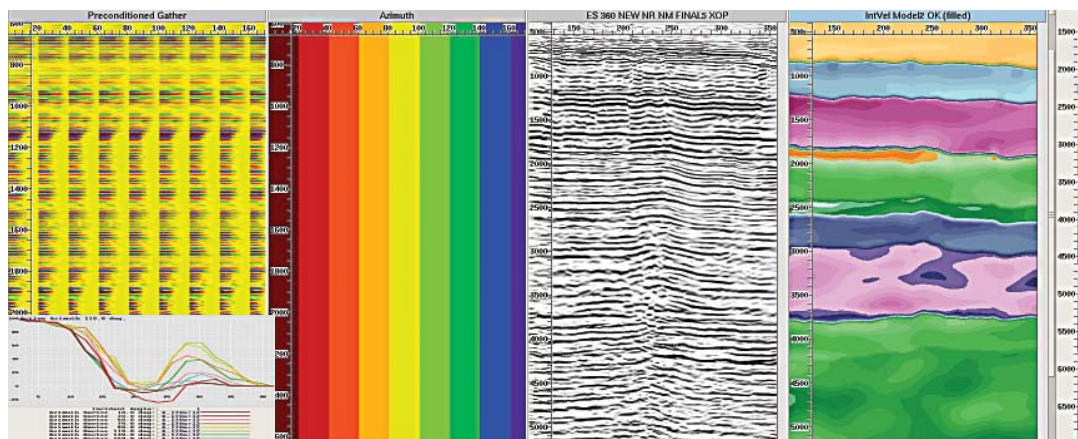
● Fig. 2. Dip (left) and azimuth (right) volumes automatically extracted from directional angle gathers – it is possible to see that the complex reef is characterized by 50° dips.
 ● Рис. 2. Наклон (слева) и азимут (справа), автоматически полученные из дирекционных угловых сейсмограмм; можно видеть, что система пластов характеризуется 50° наклонами.

Fig. 1 shows two seismic images after applying the different migrations. The image on the left (EarthStudy 360) shows greater detail in the vertical and lateral directions, and improved depth image quality, including complex reef constructions and faults. There are also signs of a global fault in the center of the reef complex. With the Kirchhoff migration, only separate and indistinct signs are discernible.

Directional angle gathers were created, and dip, azimuth and continuity (DAC) of the subsurface reflectors were automatically extracted. This information is very important for geologists, as it provides quantitative knowledge about the dip and azimuth of the geological interfaces at each local subsurface point. The results are much more precise than those obtained using standard techniques

● Fig. 3. An example of the input data for the analysis of HTI anisotropic 3D reflection gathers.
 ● Рис. 3. Пример анализа рефлексионных угловых 3D сейсмограмм, регистрирующих HTI-анизотропию.

3D Reflection Gathers (9 sectors at 40° each)	Azimuth Sectors (9 sectors at 40° each)	Amplitude Volume	Depth Velocity Model
Рефлексионные 3D-сейсмограммы (9 секторов по 40°)	Азимутальные секторы (9 секторов по 40°)	Куб амплитуд	Глубинная скоростная модель

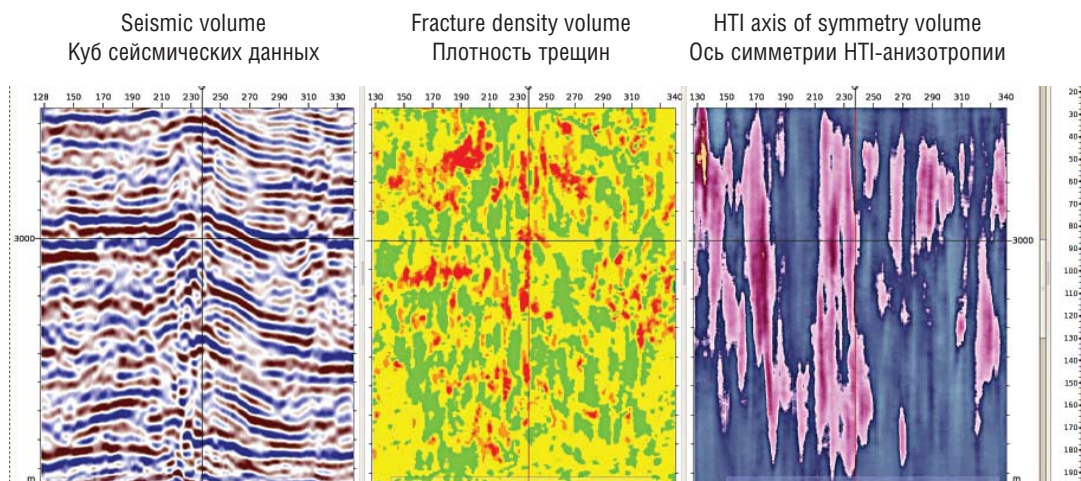


Был проведен сравнение качества сейсмических изображений, полученных с помощью EarthStudy 360 и на основе миграции по Кирхгофу. Глубинная скоростная модель, апертура миграции и другие параметры в обоих случаях были одинаковыми. На рис. 1 приведены два сейсмических изображения, полученных с помощью разных методов миграции. Изображение слева (полученное с помощью EarthStudy 360) демонстрирует больше деталей в вертикальном и поперечном направлениях, а также улучшенное качество глубинного изображения, в том числе тонкую структуру пластов и сдвигов. В центре системы пластов усматриваются также признаки глобального разлома. При миграции Кирхгофа видны только отдельные и нечеткие признаки. Были получены дирекционные угловые сейсмограммы, в также автоматически определены наклон, азимут и непрерывность (DAC) глубинных отражающих горизонтов. Эта информация очень важна для геологов, поскольку содержит количественные данные о наклоне и азимуте геологических границ в каждой точке пласта. Эта информация является гораздо более точной, чем результаты вычисления различных структурных параметров с помощью стандартных методов обработки данных после суммирования. Эта информация также играет существенную роль при выполнении миграций, учитывающих анизотропию ТТ1.

С помощью модели фоновых скоростей были получены полно-азимутальные рефлексионные угловые сейсмограммы, показанные на рис. 3. Результаты демонстрируют как кинематические, так и динамические азимутальные отклонения. Были проанализированы рефлексионные угловые

3D сейсмограммы, регистрирующие HTI-анизотропию. Кривые изменения амплитуды вдоль отражающих горизонтов карбонатного пласта демонстрируют значительные азимутальные вариации, что свидетельствует о наличии разломов или одностороннего давления.

Рис. 4 показывает четкую корреляцию между сейсмическим изображением и параметрами AVAZ инверсии: Плотность трещин и ось симметрии HTI, связанные с почти вертикальным разломом. Азимут



● Fig. 4. The results of AVAZ inversion at the vertical section level, along the reef.
 ● Рис. 4. Результаты инверсии AVAZ на вертикальном срезе вдоль пласта.

performed over post-stack data, normally obtained by computing different structural attributes. This information is also essential when performing migrations that consider TTI anisotropy.

Full-azimuth reflection angle gathers were generated using the background velocity model shown in Fig. 3 below. The results showed both kinematic and dynamic azimuthal variations. HTI anisotropic 3D reflection angle gathers were analyzed. The curves of amplitude variations obtained along the carbonate reef reflectors showed considerable azimuthal changes, indicating the existence of fractures or preferred stress orientation.

Fig. 4 shows a clear correlation between the seismic image and the AVAZ inverted attributes: Fracture density and HTI axis of symmetry along a near vertical fault within the reef. The azimuth of the HTI axis of symmetry is oriented at an azimuthal range of 110-140°.

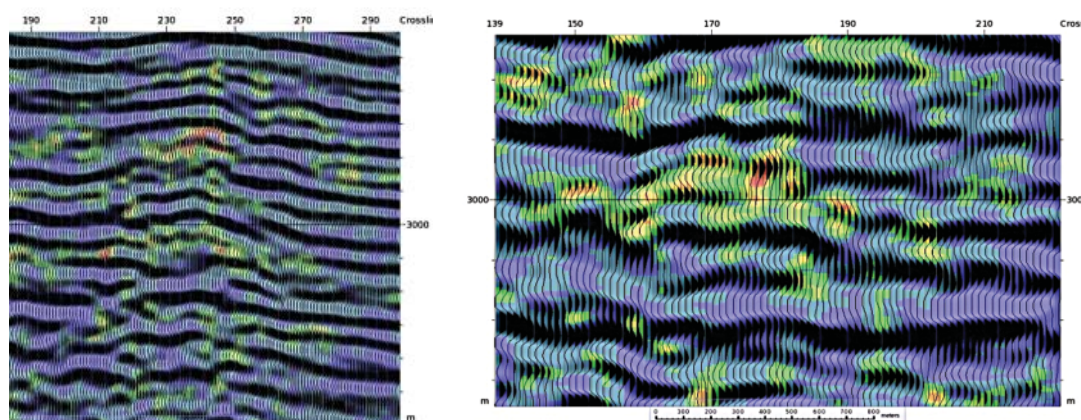
Integrated interpretation was performed by combining volumes of seismic amplitudes and fracture density. This combination enabled a direct assessment of which parts of the reef contained fractures. It was ascertained that the main fracture density anomalies were concentrated in

в структуре рифов и распределены в его контуре неравномерно.

Сравнение полученных с помощью EarthStudy 360 результатов на уровне карт амплитуд привело к интересным данным. Поперечное сечение пласта на изображениях, созданных с помощью EarthStudy 360, демонстрирует более высокое горизонтальное разрешение, чем поперечное сечение, полученное на основе миграции по Кирхгофу. В этом же районе геологи обнаружили барьерный палеориф (на аэрофотоснимке показан современный Большой барьерный риф в Австралии). Современный риф имеет аналогичную палеоструктуру, состоящую из многих связанных (и несвязанных) сегментов, и расположен вдоль крупного разлома. Можно с уверенностью предположить, что палеориф и современный риф имеют одно и то же происхождение, что вносит дополнительный вклад в наше понимание механизмов образования рифов.

С помощью EarthStudy 360 из дирекционных сейсмограмм, за счет фильтрации энергии отражения в первой зоне Френеля и сохранения только энергии дифрагированно-отраженной волны, было получено дифракционное преобразование. Это было сделано с помощью специального

Seismic Amplitude Volume Overlaid on Fracture Density Volume
 Куб сейсмических амплитуд, наложенный на куб плотности трещин



● Fig. 5. Integrated interpretation of AVAZ inversion results: A reef complex and separate reef are circled.
 ● Рис. 5. Комплексная интерпретация результатов инверсии AVAZ. Кружками обведены рифогенный комплекс и отдельный рифовый объект.

оси симметрии HTI ориентирован под азимутальным углом 110-140°.

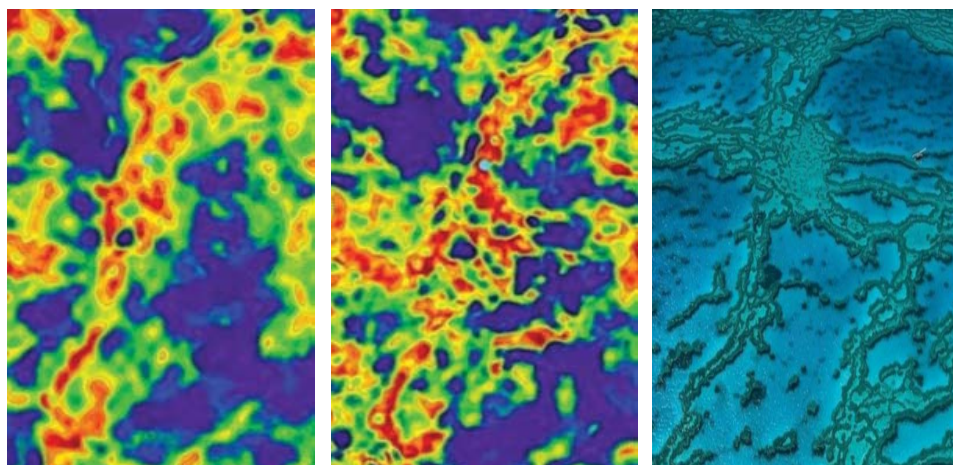
На основе комбинации кубов сейсмических амплитуд и плотности трещин была проведена комплексная интерпретация. Эта комбинация позволила провести прямую оценку наличия трещин в различных фрагментах пластов. Было установлено, что главные аномалии плотности трещин сосредоточены

процессора, включенного в модуль «Навигатор скоростей» (Velocity Navigator module) системы построения скоростных моделей Paradigm GeoDepth®. Куб сейсмических данных, полученных с помощью дифракционного преобразования, дает гораздо более высокое разрешение характеристик нарушений и неоднородностей по сравнению с традиционным анализом на основе кубов когерентно-

Kirchhoff Migration
Миграция по Кирхгофу

EarthStudy 360 Migration
Миграция на основе
EarthStudy 360

Fragment of the Great Barrier Reef,
Australia / фрагмент Большого
барьерного рифа, Австралия



● Fig. 6. Amplitude slices following Kirchhoff and EarthStudy 360 migrations. For comparison, a fragment of the Great Barrier Reef is shown.
● Рис. 6. Карты амплитуда поперечного сечения, полученные с помощью миграции по Кирхгофу и миграции на основе EarthStudy 360. Для сравнения показан фрагмент Большого барьерного рифа.

the structure of the reef, and were distributed non-uniformly in the reef layers.

Interesting information was obtained when comparing the results received using EarthStudy 360 at the amplitude map level. The depth slice in the reef after EarthStudy 360 imaging shows higher lateral resolution and detail than the Kirchhoff depth slice. In this same area, geologists have detected a barrier paleo-reef (the modern Great Barrier Reef in Australia, shown in an aerial photograph). The modern reef has a similar paleo-reef structure consisting of many connected (or unconnected) segments, and it is located along a major fault. We may confidently assume that the paleo-reef and the modern reef had the same origin, which further contributes to our understanding of the reef mechanism.

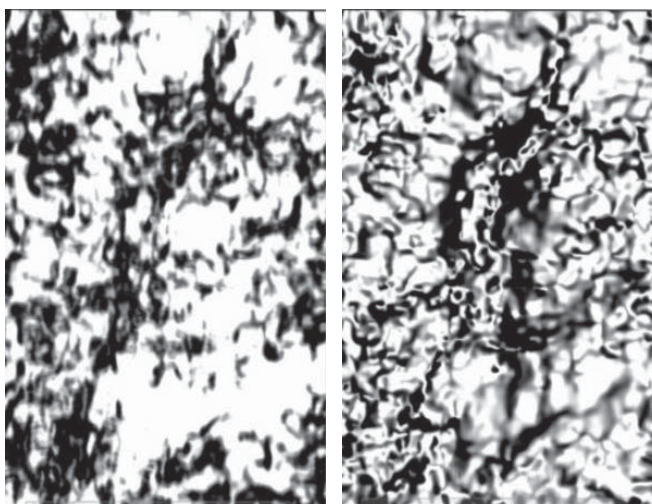
Using EarthStudy 360, a diffraction weighted stack was obtained from directional gathers by filtering specular energy in Fresnel's first zone and conserving only the energy of the diffracted reflections. This was done by means of a special processor in the Paradigm GeoDepth® Velocity Navigator module. The seismic volume of the diffraction weighted stack has a much higher resolution of discontinuous features than the traditional Coherence Cube, as the coherence attribute is calculated along post-stack data (averaging), and the diffraction weighted stack is performed on pre-stack directional angle gathers. The quality of the slice extracted from a discontinuous cube is far better than the lateral resolution quality of the slice obtained using the

определение плотности и азимутальной ориентации трещин исследуемого карбонатного коллектора. На рис. 8 приведены фрагменты двух таких карт изученного объекта. Слева приведена карта плотности трещин (желто-красный цвет указывает на более высокую плотность трещин), на которую наложено векторное изображение, показывающее ориентацию и интенсивность трещин. Справа приведена карта азимутальной ориентации трещин. Направление вектора совпадает с направлением трещин в азимутальном диапазоне 37-55°.

Coherence Cube EarthStudy 360
Результаты расчета куба
когерентности EarthStudy 360

Diffraction weighted stack
EarthStudy 360
Результаты дифракционного
преобразования EarthStudy 360

Ring-shaped fragment -
a "black hole" (view
from Earth's surface)
/ Кольцеобразный
фрагмент -
«черная дыра» (вид с
поверхности Земли)



Ring-shaped fragment -
a "black hole" (aerial
view) / Кольцеобразный
фрагмент - «черная
дыра» (аэроснимок)



● Fig. 7. Depth slices extracted from Coherence Cube and diffraction weighted stack.
● Рис. 7. Поперечные сечения, полученные из расчета куба когерентности и на основе дифракционного преобразования.

сти, поскольку параметры когерентности вычисляются после суммирования, а взвешенный дифракционный куб – на основе данных дирекционных угловых сейсмограмм до суммирования. Качество поперечного сечения, полученного на основе изучения дифракционного куба в деталях гораздо выше качества горизонтального разрешения на поперечном сечении, полученном с использованием куба когерентности (рис. 7), и на первом можно увидеть гораздо больше деталей, связанных с разломами разного масштаба. На нем можно даже заметить кольцеобразный объект (риф), аналогичный тем, которые присутствуют в современных барьерных рифах.

Результаты

Наиболее важным результатом данного проекта явилось

● Fig. 8. Comparison of results of AVAZ inversion at the map level.

● Рис. 8. Сравнение результатов инверсии AVAZ на уровне карты амплитуд.

Coherence Cube (Fig. 7), and many more details relating to fractures of different sizes are visible. It is even possible to see a local ring-shaped object (reef) similar to the objects in a modern barrier reef.

Results

The most important results obtained in this project were the identification of fracture density and fracture azimuthal orientation within the target carbonate reef. Fig. 8 shows fragments of two such maps in that area: At left – a fracture density map (the yellow-red color indicates increased fracture density) with a vector image imposed on it that shows the direction of minimum horizontal stress and stress intensity. At right – a map of azimuthal orientation of the minimum horizontal stress direction. The vector direction coincides with the fracture direction in a range of 37-55°.

The evidence showed that the use of EarthStudy 360 in onshore seismic exploration resulted in a higher resolution and more informative depth image than any traditional migration technology. The data provided more information about structural attributes such as dip and azimuth of the subsurface reflectors, and about reservoir properties characterized by fracture density and their azimuthal orientation. Furthermore, the seismic volume of the diffraction weighted stack had a much higher resolution of discontinuous features than that obtained using the traditional Coherence Cube technology. Together, this new information enabled a more certain identification of reef objects in carbonate thicknesses, and a reliable estimation of the distribution and orientation of fractures.

Based on that information, a new well was drilled, and for the first time in this region, oil was found in the Paleozoic zone. In addition, a large oil inflow was received from a Devonian reef.

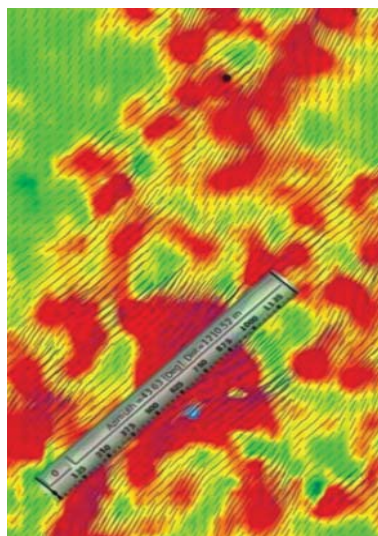
Benefit

The volumes and maps obtained using the EarthStudy 360 full-azimuth imaging technology provide essential information for drilling and for improving production flow, as they give a full description of the subsurface parameters, including information about the distribution of large faults and fracture properties. This information ensures optimal horizontal drilling as well as the correct placement of exploration wells. ●

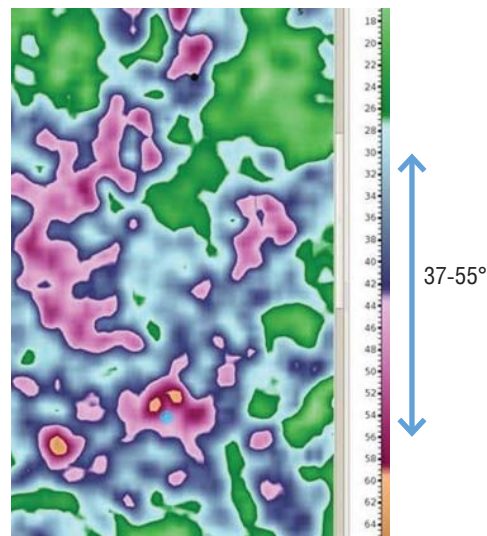
References

1. Koren, Z., I. Ravve, Full-azimuth Subsurface Angle Domain Wavefield Decomposition and Imaging, Geophysics, Vol. 76, No. 1, January-February 2011, pp. S1-S13.
2. Anat Canning and Alex Malkin, Paradigm, Azimuthal AVA Analysis Using Full-Azimuth 3D Angle Gathers: SEG, Houston, 2009, International Exposition and Annual Meeting.

Fracture Density + Vector Image
Плотность трещин + векторное
изображение



Fracture Azimuth Orientation
Азимутальная ориентация трещин



Данные свидетельствуют о том, что использование EarthStudy 360 в наземной сейсморазведке привело к более высокому разрешению и более информативным глубинным изображениям, чем при использовании любой традиционной технологии миграции. Полученные данные дают больше информации о структурных параметрах, таких как наклон и азимут глубинных отражающих горизонтов, а также о свойствах коллектора, выраженных в плотности трещин и их азимутальной ориентации. Кроме того куб сейсмических данных, полученный на основе дифракционного преобразования, имеет гораздо более высокое разрешение, чем результаты, полученные на основе традиционной технологии расчета куба когерентности. В совокупности эти новые данные позволяют более точно идентифицировать рифовые объекты в карбонатных пластах и надежно оценивать распределение и ориентацию трещин и разломов.

С учетом новой информации пробурена новая скважина, в которой впервые в этом регионе обнаружено нефтепроявление в Палеозойских отложениях на небольшой глубине, а в девонских отложениях вскрыт риф, где после испытания получен большой приток нефти.

Кубы данных и карты, полученные с помощью системы построения и интерпретации полно-азимутальных сейсмических изображений EarthStudy 360, дают существенную информацию, необходимую для бурения и улучшения производственных процессов, поскольку эти данные и карты предоставляют полное описание параметров пластов, включая информацию о распределении масштабных сдвигов и о свойствах трещин и разломов. Эта информация обеспечивает оптимальное горизонтальное бурение, а также правильное размещение разведочных скважин. ●

Библиография

1. Koren, Z., I. Ravve, Full-azimuth Subsurface Angle Domain Wavefield Decomposition and Imaging («Полноазимутальное разложение волнового поля и получение изображений подземных пластов»), Geophysics, том 76, № 1, январь-февраль 2011 год, стр. S1-S13.
2. Anat Canning и Alex Malkin, компания Paradigm, Azimuthal AVA Analysis Using Full-Azimuth 3D Angle Gathers («Азимутальный анализ на основе изменения амплитуд в зависимости от угла падения с использованием полноазимутальных угловых 3D-сейсмограмм»). Международная выставка и ежегодная конференция Общества геофизиков-разведчиков (SEG), Хьюстон, 2009 год.