

УДК 550.834

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-1-97-105

Научная статья

EDN: NNEESQ

ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОКОАЗИМУТАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОНТРАСТНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

С.А. Кириллов,
А.М. Алисолтанов,
Э.М. Халиуллин, А.В. Юрикова
АО «Центральная геофизическая
экспедиция», Москва, Российская
Федерация

Предлагается технология применения широкоазимутальной сейсмической обработки для повышения разрешенности сейсмического изображения геологического разреза с использованием анизотропной глубинно-скоростной модели на примере сейсмических 3D-данных, полученных после 5D-регуляризации с максимальным ослаблением регулярных и нерегулярных волн помех исходных сейсмограмм в различных сортировках.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: широкоазимутальная обработка, поперечно-изотропные свойства, горизонтально-поперечная изотропия, 5D-регуляризация, изотропная и анизотропная глубинно-скоростная модель, верхняя часть разреза, временная и глубинная миграция по сейсмограммам, азимутальные динамические атрибуты сейсмических данных, дифракционная сейсмограмма, разбиение данных на классы удалений азимутов

С усложнением геологических условий залегания и уменьшения размеров исследуемых залежей углеводородов возникает необходимость применения современных цифровых технологий, способных обеспечить высокую четкость сейсмического изображения геологического разреза для уверенного определения геометрии залежи и повышения достоверности прогнозирования коллекторских свойств, оценки зон трещиноватости по комплексу геофизических данных [3].

Трещиноватые коллекторы, обладающие анизотропными свойствами, демонстрируют изменения сейсмических характеристик волны в зависимости от

Original article

THE USE OF WIDE-AZIMUTH SEISMIC PROCESSING TO INCREASE THE CONTRAST OF A SEISMIC IMAGE

S.A. KIRILLOV, A.M. ALISOLTANOV,
E.M. KHALIULLIN, A.V. YURIKOVA
JSC «CENTRAL GEOPHYSICAL EXPEDITION»,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The technology of using wide-azimuth seismic processing is proposed to increase the resolution of the seismic image of a geological section using an anisotropic depth-velocity model using the example of 3D seismic data obtained after 5D regularization with maximum attenuation of regular and irregular interference waves of the original seismograms in various sorts.

KEYWORDS: wide-azimuth processing, transverse-isotropic properties, horizontal-transverse isotropy, 5D regularization, isotropic and anisotropic depth-velocity model, upper part of the section, temporal and deep migration by seismograms, azimuthal dynamic attributes of seismic data, diffraction seismogram, data division into azimuth removal classes, fracture zone

направления ее распространения, таких как амплитуда, скорость и направление поляризации сейсмических волн, и значительно влияет на результаты сейсмических исследований. Эти факторы необходимо учитывать при обработке и интерпретации сейсмических данных.

Параллельные трещины и переслаивающие тонкие слои могут создавать так называемые поперечно-изотропные свойства (ТИ). Параллельные трещины часто расположены почти вертикально, ось их симметрии горизонтальна, что объясняет название горизонтально-поперечной изотропии (НТИ).

При изучении залежей углеводородов правильное распознавание и учет анизотропных свойств коллекторов имеет решающее значение для оценки их продуктивности, для проектирования схем разработки и оптимизации методов добычи. Например, применение

технологии проведения полевой широкоазимутальной сейсморазведки МОГТ-3D и специализированных методов широкоазимутальной обработки сейсмических данных для анализа анизотропных свойств существенно улучшает оценку коллекторских свойств месторождений и повышает информативность сейсмогеологических моделей.

Таким образом, понимание анизотропии и ее влияния на распространение сейсмических волн является одним из основополагающих аспектов эффективной разведки и разработки углеводородных месторождений. Для получения оптимального геологического результата требуется применение комплексных аналитических и численных методов обработки, которые смогут учесть все специфические особенности влияния геологической среды на волновое сейсмическое поле.

В последние годы в мировой практике применения сейсмического метода разведки широкое распространение получили технологии обработки и интерпретации азимутально-зависимых характеристик геологических пластов, основанные на данных пространственных широкоазимутальных работ МОГТ-3D. Эти технологии направлены на повышение разрешенности сейсмической записи и выявление зон трещиноватых коллекторов, что существенно увеличивает возможности метода для успешной дальнейшей добычи углеводородов.

Характеристики сейсмического отклика от трещиноватых коллекторов могут изменяться в зависимости от полевых систем азимутального наблюдения, что свидетельствует об азимутальной анизотропии [8–10], которая, особенно в условиях горизонтально-поперечной изотропии (НТИ), проявляется в изменениях амплитуды, скорости и фазы сейсмических волн в зависимости от азимута линий полевой съемки [10].

Широкоазимутальная сейсморазведка эффективно используется для изучения изменения амплитуды сигнала в зависимости от смещения (AVO) [7], угла падения (AVA) и азимута (AVAZ), а также для анализа изменения скорости распространения волны в зависимости от азимута (VVA). Эти данные значительно улучшают качество сейсмической картины геологического разреза и позволяют идентифицировать разломы, трещины и изменения в литологии пласта.

Кроме того, анизотропные свойства влияют на характеристики AVO, которые могут увеличиваться или уменьшаться в зависимости от угла падения волны на отражающую границу. Эти характеристики AVO особенно важны для анализа мелких каналов и играют ключевую роль в разведке газоносных плотных коллекторов, особенно в русловых песчаных массивах. Широко известная методика AVO-анализа является частным случаем азимутального анализа амплитуд [4].

Широкоазимутальная сейсморазведка предлагает технологические решения различных разведочных задач, таких как выделение и визуализация мелких тек-

тонических нарушений, зон разломов, а также детальный анализ строения структур. Это особенно важно при изучении и анализе нефтегазоперспективных объектов в сложных геологических условиях, где традиционные методы могут не обеспечить полное представление о месторождении.

В ситуации, когда разведка нефтегазовых залежей смещается к изучению сложных литологических и нетрадиционных нефтегазовых коллекторов, узконаправленная азимутальная сейсморазведка все чаще заменяется широкоазимутальной, которая позволяет получать более детализированные результаты о геологических образованиях и повышает вероятность успешной разведки и разработки месторождений, что является ключевым фактором для эффективного использования ресурсов.

В современных стратегиях разведки углеводородов, которые учитывают наиболее сложные поверхностные и глубинные сейсмогеологические условия, широкоазимутальная сейсморазведка приобретает особую значимость.

Сокращение экономических затрат на проведение геологоразведочных работ для разведки нефтегазоперспективных объектов, ввода их в эксплуатацию требует значительного сокращения сроков получения конечного сейсмического результата, в том числе и сроков получения исходных полевых сейсмограмм.

Однако в условиях сложных поверхностных сейсмогеологических условий, таких как интенсивное движение транспорта на дорогах, постоянная работа промышленных предприятий, трубопроводов и линий электропередач, исходные сейсмограммы часто характеризуются небольшим соотношением сигнал/помеха, различным частотным составом с переменной амплитудой на фоне случайных и регулярных волн-помех.

В связи с этим основные проблемы, связанные с повышением соотношения сигнал/помеха с согласованием амплитудного и частотного состава для улучшения разрешенности метода, ложатся на процесс цифровой обработки сейсмических данных.

Этот процесс необходим для выделения опорных и целевых сейсмических горизонтов на волновой картине, по которым решаются основные геологические задачи по построению сейсмогеологической модели залежей углеводородов, зон трещиноватости и прогнозированию коллекторских свойств продуктивного пласта.

Предлагаемую технологию широкоазимутальной обработки продемонстрируем на исходных сейсмических данных МОГТ-3D, полученных с высокой кратностью перекрытия (более 190), которая в итоге значительно снижает влияние внешних мешающих факторов на конечный сейсмический результат.

На этапе предварительной обработки основной задачей является увеличение соотношения сигнала к

помехе, а также гармонизация частотных и фазовых характеристик сейсмического сигнала. Для достижения этой цели рекомендуется максимально ослабить исходное волновое поле от промышленных, нерегулярных и регулярных волн-помех, а затем разместить скорректированные сейсмические данные на регулярной сетке. Такой подход позволит в дальнейшем эффективно и оптимально применять пространственные процедуры обработки для согласования динамических характеристик сейсмического сигнала с целью синфазного суммирования и последующего использования в широкоазимутальной обработке.

На данном этапе осуществляется компенсация геометрического расхождения, расчет априорных статических поправок, полученных за рельеф и по первым вступлениям волн на сейсмограммах МОВ (рис. 1, 2).

Определение априорных статических поправок по первым вступлениям волн позволило учесть влияние скоростных неоднородностей верхней части разреза (ВЧР) на волновое поле отраженных волн от глубоких границ и создать глубинно-скоростную модель ВЧР, которая в дальнейшем будет дополнять ГСМ всего геологического разреза при глубинной миграции.

Далее происходит полный цикл подавления промышленных помех и случайных шумов исходных полевых сейсмограмм в сортировках ОГТ и cross-spread по технологической схеме предварительной обработки, приведенной на рис. 3. Технология SWAMI применяется для ослабления поверхностной волны, процедура «NUCNS» – для уменьшения линейных помех (рис. 4 Б).

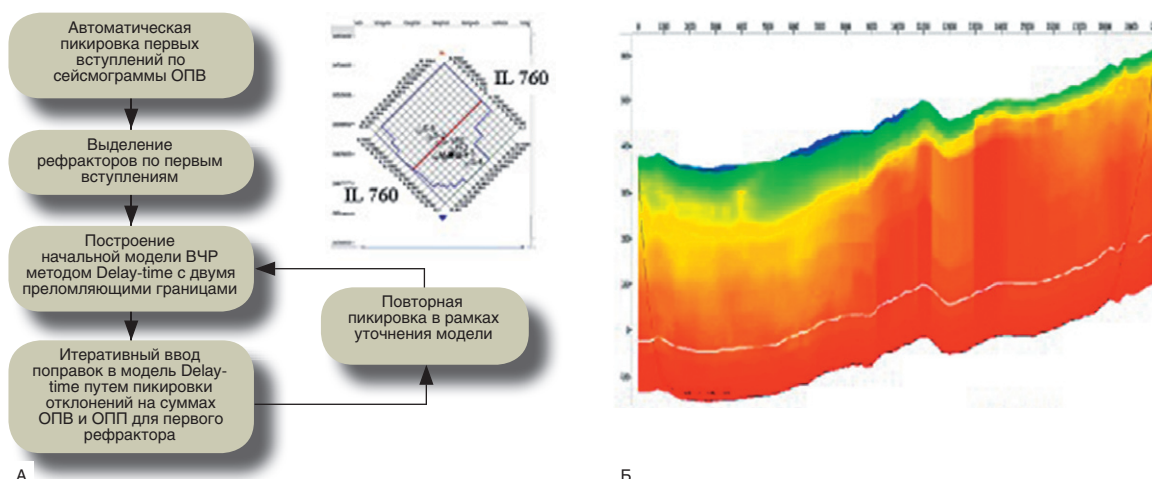


РИС. 1.

Расчет скоростной модели ВЧР по первым вступлениям. А – Блок-схема изучения модели ВЧР. Б – скоростная модель ВЧР после алгоритма томографии. InLine 160



РИС. 2.

InLine 160. Временные разрезы с априорными статическими поправками, полученными разными способами. А – предварительный временной разрез. Б – временной разрез после ввода априорной статистики, полученной за рельеф. В – временной разрез после ввода априорной статистики, полученной по первым вступлениям

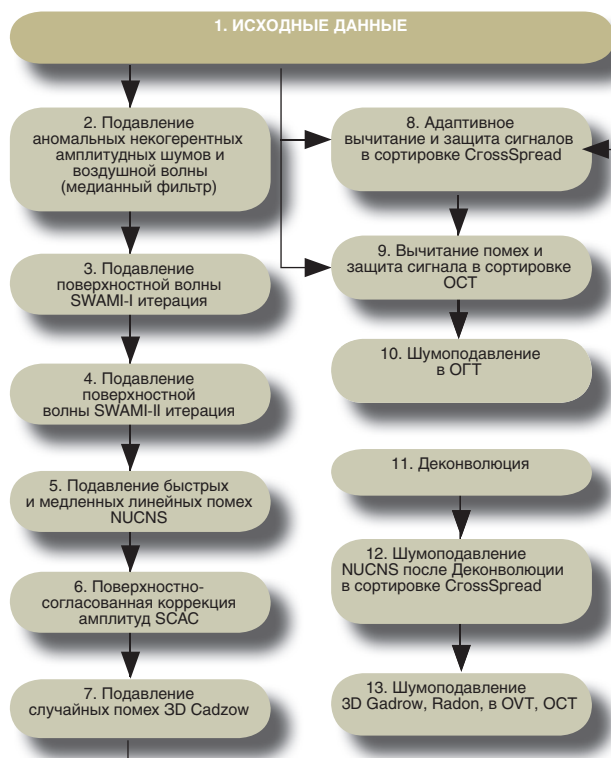


РИС. 3.
Блок-схема подавления помех

Для повышения качества исходных сейсмограмм используется линейная фильтрация Радона в различных сортировках, 3D-ФК фильтрация, Q-компенсация (рис. 4 В), поверхностно-согласованная деконволюция (рис. 4 Г) и в завершении этапа подавления волн-помех по алгоритму Radon ослабляется фон случайных и регулярных помех.

Перед 5D-регуляризацией и временной миграции по сейсмограммам проводится коррекция остаточных статических и кинематических поправок (рис. 5 А).

В результате предварительной обработки было достигнуто высокое соотношение сигнала к помехе, максимальное ослабление регулярных волн помех за счет моделирования и адаптивного вычитания этих волн из всего волнового поля, что позволило минимизировать искажения целевых волн. Адаптивное вычитание поверхностных волн значительно ослабило их фон на сейсмограммах, не исказив амплитудно-частотный состав волнового поля.

В итоге был получен высококачественный сейсмический материал в широком частотном диапазоне, готовый для анализа азимутального распределения скоростей по 3D данным, для временной и глубинной обработки.

Целью временной миграции по сейсмограммам является создание пространственного изображения геологической среды во временном масштабе [5], которое будет использоваться для визуального и инстру-

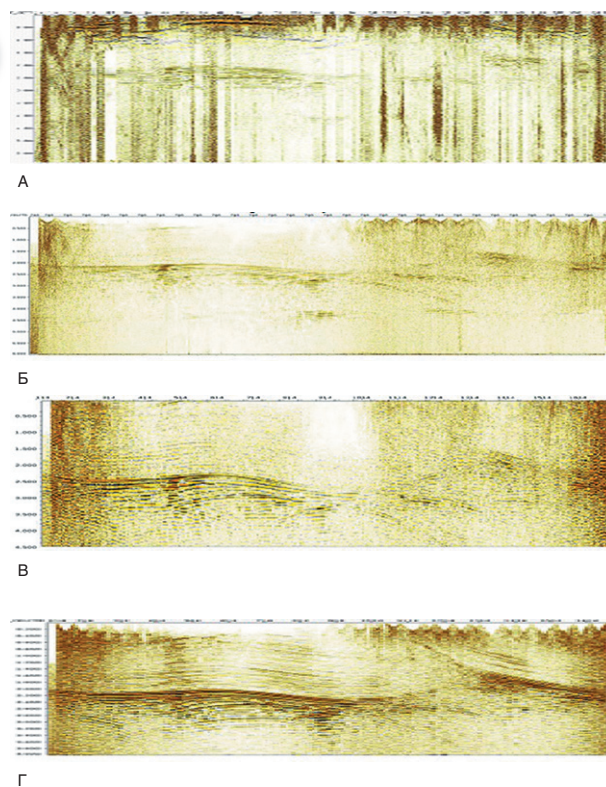


РИС. 4.
InLine 160. Подавления случайных и регулярных волн-помех в сортировках Cross-spread и ОГТ. А – временной разрез после ввода априорной статистики, определенной по первым вступлениям; Б – временной разрез после ослабления высокоамплитудных помех, поверхностной волны по алгоритму SWAMI, 3-х итераций уточнения остаточных статических поправок, с после ослабления линейных помех по алгоритму NUCNS, поверхностно-согласованной коррекции амплитуд SCAC, подавления случайных помех 3D Cadzow; В – временной разрез после применения Q-компенсации ($Q=140$); Г – временной разрез после деконволюции, шумоподавления, ослабления линейных помех

ментального анализа волновой картины для выделения и картирования опорных отражающих горизонтов и дифрагирующих объектов (рис. 5 В). Полученные горизонты используются для создания изотропной и анизотропной глубинно-скоростной модели разреза при глубинной миграции. Кроме того, сечения временного сейсмического куба будут сравниваться с аналогичными сечениями, полученными после глубинной и широкоазимутальной миграции.

На этапе глубинной обработки временные данные преобразуются в глубинные с помощью глубинной миграции до суммирования по методу Кирхгофа, который обеспечивает точное определение геометрии пластов, используя детальную изотропную или анизотропную глубинно-скоростную модель (ГСМ) среды с учетом ГСМ ВЧР и значительно повышает детализацию сейсмических исследований [7].

Последовательность построения изотропных и анизотропных глубинно-скоростных моделей показана

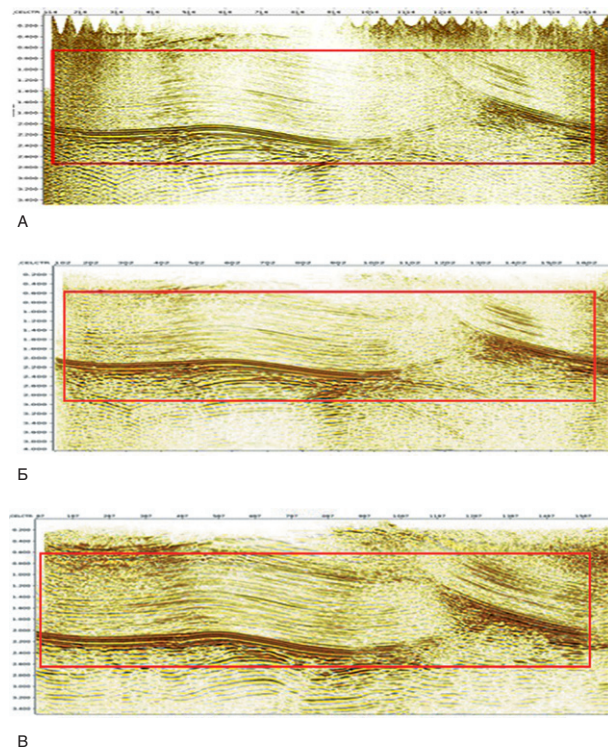


РИС. 5.

InLine 160. Временной разрез после 5D регуляризации, подавления волн-помех и изотропной временной миграции PSTM. А – временной разрез после коррекции статических и уточнения кинематических поправок; Б – временной разрез после регуляризации и подавления нерегулярных помех, SRAAC; В – временной разрез после изотропной временной миграции по сейсмограммам

на на рис. 6 с примерами сечений ГСМ (рис. 7).

Окончательная анизотропная модель (рис. 7 В, Г) обеспечивает корректное спрямление годографа как на близких, так и на дальних расстояниях.

Полное выпрямление сейсмограмм на всех этапах говорит о том, что результаты APSDM оказались наи-

лучшими (рис. 8 Б). Таким образом, окончательная глубинно-скоростная модель считается оптимальной и не требует дальнейшего улучшения.

Финальная анизотропная ГСМ используется для выполнения полноазимутальной глубинной миграции в технологии EarthStudy 360 (ES360), которая предназначена для исследования освещенности точек геологической среды 3D-сейсмической съемкой с оценкой параметров, определяющих соотношение энергий зеркально отраженной и рассеянной компонент, наличием азимутальной анизотропии скоростей и амплитуд волнового поля.

В технологию ES 360 заложены следующие три основных принципа [8]:

- трассирование лучей, начиная с точек 3D-геологической среды;
- задание каждой пары лучей «падающий – отраженный/рассеянный» четырьмя углами в Локальной Области Углов (Local Angle Domain – LAD);
- отображение и анализ освещенности точек среды по раствору данной пары лучей, уточнение скоростей и оценка их анизотропии с помощью «Рефлексионных сейсмограмм»;
- отображение освещенности точек среды по направлению данной пары лучей, локализация зон Френеля, оценка условий залегания и соотношения зеркально отраженной и рассеянной компонент волнового поля с помощью «Дирекционных сейсмограмм».

Технология ES 360 позволяет перевести все сейсмические данные в области локальных углов, описать двумя взаимодополняющими полноазимутальными наборами: дирекционными и рефлексионными [8].

Направленная угловая декомпозиция позволяет получать отраженные и дифракционные изображения трехмерных геологических моделей, на которых одновременно выделяются непрерывные структурные поверхности и разрывные объекты.

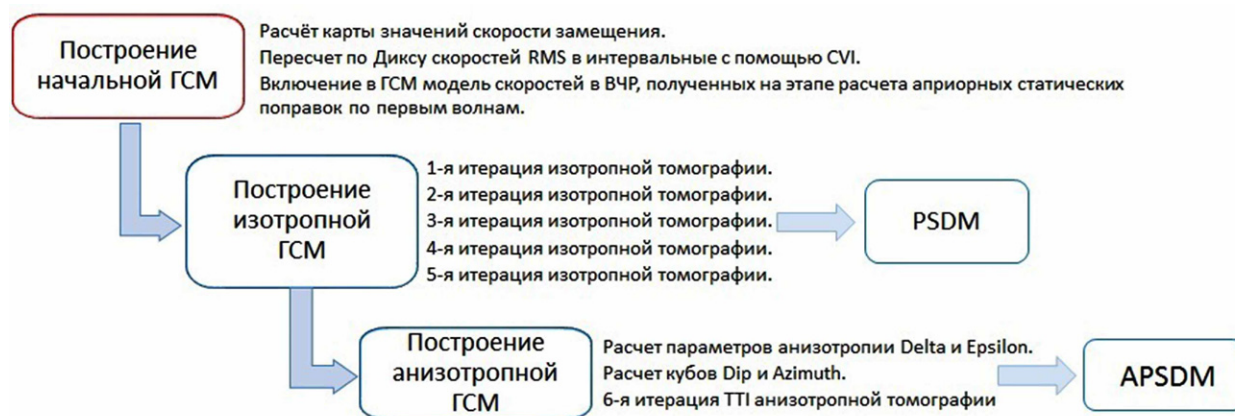


РИС. 6.

Блок-схема построения изотропной и анизотропной глубинно-скоростной модели

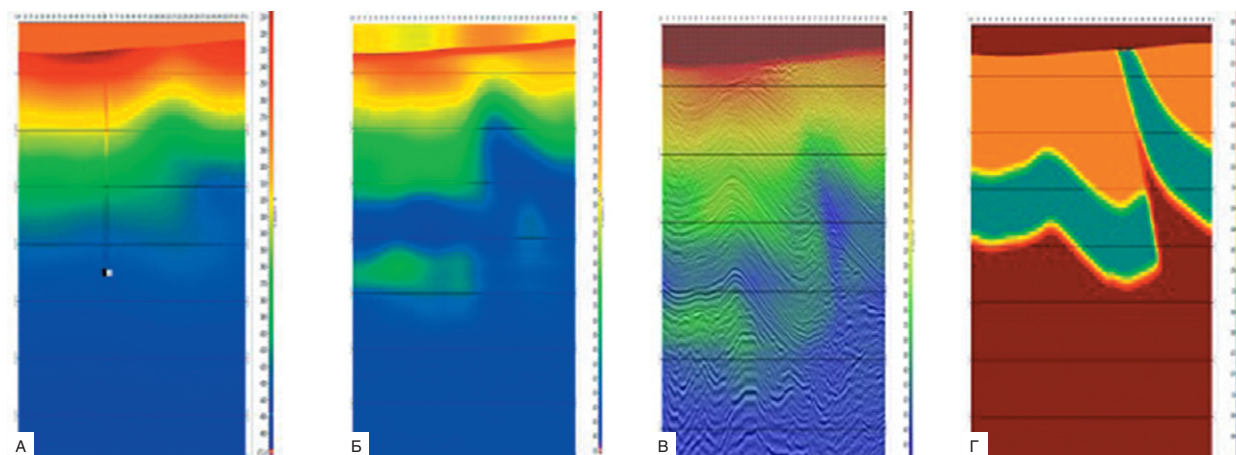


РИС. 7.

InLine 160. Глубинно-скоростные модели. А – Начальная ГСМ+ГСМ ВЧР со скоростью по данным ВСП; Б – ГСМ после 5-й итерации изотропной томографии; В – анизотропная ГСМ после 6-й итерации томографии; Г – параметр анизотропии Эпсилон

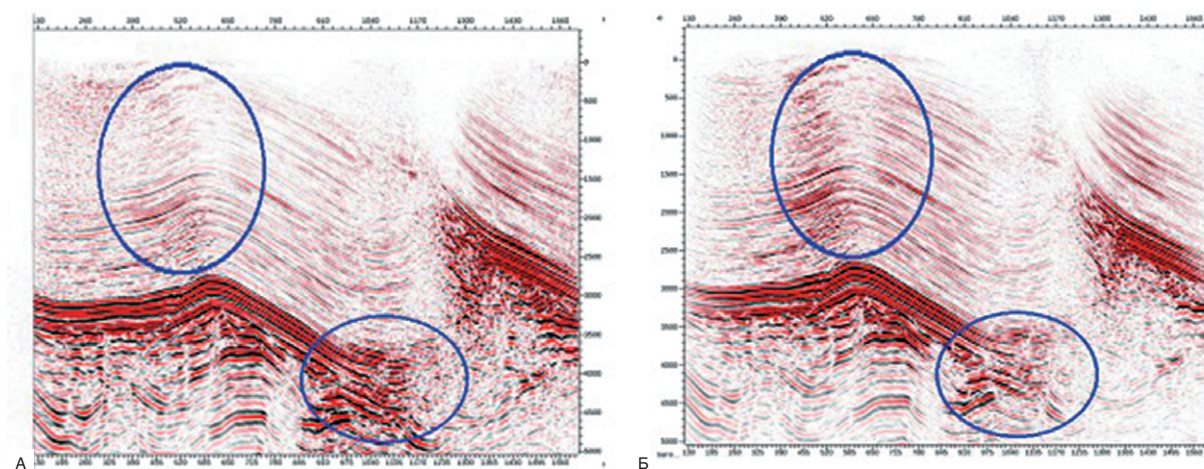


РИС. 8.

InLine 160. Временные разрезы после изотропной и анизотропной глубинной миграции Кирхгофа. А – PSDM; Б – APSDM

Рефлекционные угловые сейсмограммы показывают амплитуды отражений в зависимости от углов раскрытия и азимутов и используются для автоматического прослеживания полноазимутальной угловой остаточной кинематики. Полноазимутальные угловые изменения амплитуд используются для исследования зависимостей амплитуды отражения от угла и азимута (для AVAZ-анализа).

Т.е., основное преимущество технологии ES360 перед традиционной глубинной миграцией Кирхгофа заключается в обеспечении максимальной освещенности точек изображения со всех направлений в геологической среде и с учетом расположения источников и приемников на поверхности.

Широкоазимутальная миграция позволяет оптимизировать обработку данных и получить более вы-

соко разрешенную и детальную информацию о геологических структурах. Использование широкой базы данных в азимутальных направлениях дает возможность учитывать сложные анизотропные эффекты.

На рис. 9 представлены результаты оценки сейсмических изображений, полученных с помощью различных методов: PSTM, APSDM (Кирхгофа) и ES360 [1, 3, 5, 6].

На рис. 9 стрелой и двумя прямоугольниками (синим и зеленым) отмечены одинаковые зоны на сечении InLine 160 кубов различных миграций. Как видно, общая картина не меняется, но на сечении рис. 9 Г появляются детали и четкость изображения сейсмических горизонтов и зон нарушений.

На рис. 10 показаны амплитудно-частотные спектры сейсмических кубов после разных видов

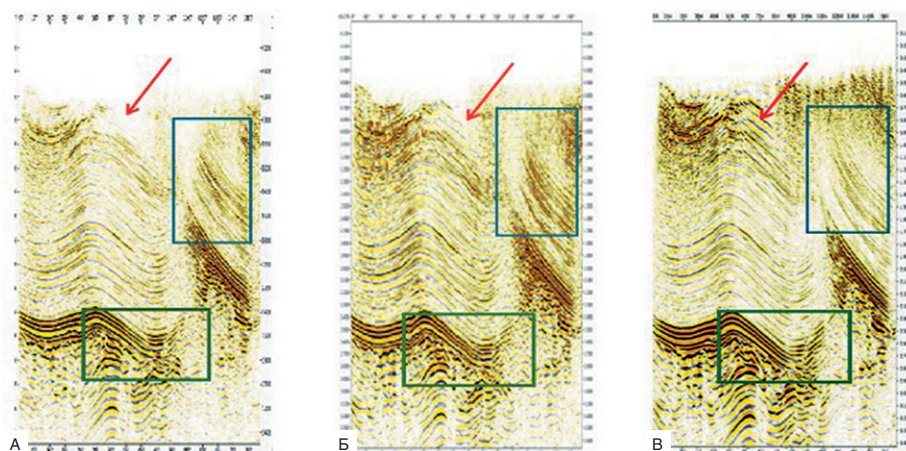


Рис. 9.

InLine 160. Сопоставление временных разрезов после применения миграций. А – PSTM; Б – APSDM; Г – PSDM ES360

миграции, на которых наблюдается расширение амплитудного спектра в области высоких частот при широкоазимутальной миграции по сравнению с глубинной миграцией с анизотропной скоростью.

На первоначальном этапе динамической и структурной интерпретации данных после глубинной миграции до суммирования (PSDM) и полноазимутальной глубинной миграции в системе ES360 была выполнена сейсмостратиграфическая увязка скважинных и сейсмических кубов после APSDM и ES360 для идентификации в волновом поле отражающих горизонтов, соответствующих основным стратиграфическим границам, контроля качества скважинных и сейсмических данных, создания основы для преобразований из временного масштаба в глубинный и обратно.

Для скважинной привязки глубинных разрезов PSDM и ES360 используются данные акустического и плотностного каротажа, годографы двойных времен ВСП и импульс, описывающий амплитудно-частотный состав сейсмических данных, а качество привязки глубинных разрезов контролируется путем оценки коэффициента взаимной корреляции между синтетической и реальной трассой во временном окне, охватывающем целевые интервалы разреза.

Анализ сопоставления результатов одномерного моделирования, рассчитанных в точках скважин, и трасс кубов ES360 и PSDM показал, что коэффициенты корреляции полноазимутальной обработки составляет $K_{кор}=0,82$, а анизотропной глубинной миграции – $K_{кор}=0,77$.

Результаты полноазимутальной глубинной миграции в сравнении с кубом PSDM иллюстрируют значительное улучшение фокусировки сигнала в целевых отложениях и прослеживаемости отражающих горизонтов. Куб ES360 характеризуется более высоким со-

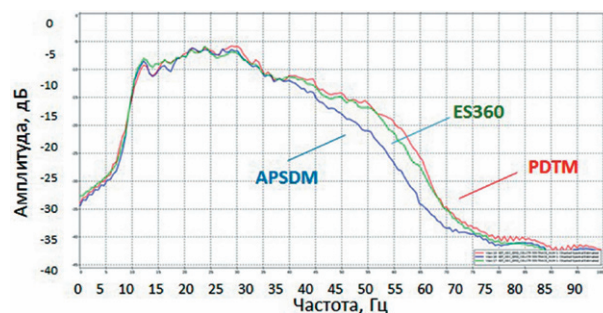


Рис. 10.

Амплитудно-частотные спектры кубов после различных миграций

отношением сигнал/шум и более высокой разрешающей способностью (рис. 9, 10). Одним из основных преимуществ обработки ES360 является более высокая степень достоверности полученного структурного плана изучаемого разреза.

Использование анизотропных моделей в сочетании с данными AVO, AVAZ (рис. 11) и другими сейсмическими атрибутами позволяет создавать комплексные и информативные модели геологической среды.

Важную информацию о положении разломов и зон трещиноватости предоставляет рассеянная или дифракционная компонента волнового поля.

Применение анизотропных моделей, сопоставление атрибутов анизотропии, энергии рассеянных волн, относительной проницаемости со скважинной информацией показывает, что привлечение дополнительной сейсмической информации может помочь в более глубоком понимании геологического строения интервала, способствует лучшему пониманию структуры и поведения коллекторов.

Представленные этапы графа широкоазимутальной обработки сейсморазведочных МОГТ-3D-дан-

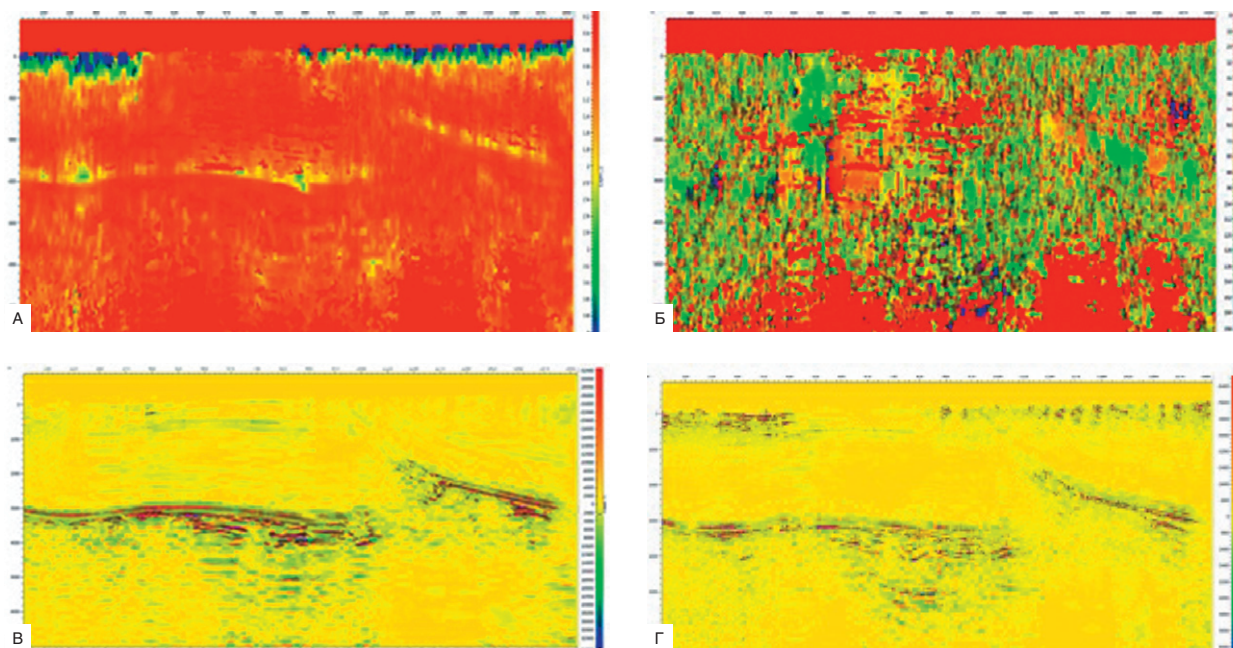


Рис. 11.

InLine 160. Сечения кубов атрибутов AVAZ. А – атрибут интенсивности; Б – атрибут ориентации анизотропии; В – атрибут изотропного градиента; Г – атрибут анизотропного градиента

ных полевых систем азимутального наблюдения позволяют дополнительно повысить разрешенность волновой картины и информативность сейсмической разведки нефтегазоперспективных объектов в сложных поверхностных и глубинных геологических условиях и позволяют при комплексной геологической интерпретации сейсмических атрибутов и скважинной параметров свойств горных пород создавать более детальные и информативные пространственные модели залежей углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ВОСКРЕСЕНСКИЙ Ю.Н. Построение сейсмических изображений. Учебное пособие для вузов. М.: РГУ нефти и газа, 2006. 116 с.
2. ИНОЗЕМЦЕВ А.Н., ГАЛКИН А.В., СТЕПАНОВ И.В., ЕРЧЕНКОВ М.В. Применение системы получения и интерпретации полно-азимутальных сейсмических изображений EarthStudy 360 и AVAZ инверсии для изучения трещин и разломов карбонатных коллекторов Средневолжского региона России // Oil&Gas, EURASIA-2012. 2013. №12, декабрь–январь.
3. КОБРУНОВ А.И., КИРИЛЛОВ С.А. К задаче повышения контрастности сейсмических изображений. Научная мысль, Доклады АН УССР. Киев. 1979. Серия Б. №4. С. 256–259.
4. КИРИЛЛОВ С.А., ЛАВРИК А.С., САМОЙЛОВ А.В. Обнаружение зон трещиноватости пород в отложениях баженовской свиты по данным сейсморазведки 3D // ОЕНТЖ «Приборы и системы разведочной геофизики». Саратов, 2015. №3(53). С. 40–44.
5. КОЗЛОВ Е.А. Недр, миграционные преобразования в сейсморазведке. М., 1986. 247 с.
6. СОРОКИН А.С., ЛЮБИМОВ Е.В., ДИДЕНКО П.В., ИНОЗЕМЦЕВ А.Н. Построение анизотропной глубинно-скоростной модели для проведения миграционных преобразований по данным одного из месторождений Восточной Сибири // Нефтяное хозяйство. М., 2016. Апрель. С. 44–47.
7. CANNING A., MALKIN A. Paradigm-Emerson, Azimuthal AVA Analysis Using Full-Azimuth 3D Angle Gathers: SEG, Houston, International Exposition and Annual Meeting, 2009.
8. INOZEMTSEV A., STEPANOV I., GALKIN A., KOREN Z. Applying full-azimuth angle domain prestack migration and AVAZ inversion to study fractures in carbonate reservoirs in the Russian Middle Volga region, First Break, volume 31, February 2013.
9. JONES I.F., BRIDSON M.L., BERNITSAS N. Anisotropy ambiguities in a transversely isotropic medium.
10. KOREN Z., RAVVE I. Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging, Geophysics, 2011, Vol. 76. N1, January-February. P. S1-S13.

REFERENCES

1. VOSKRESENSKY Y.N. Construction of seismic images. Textbook for universities. Moscow: RGU nefti i gaza. 2006:116. (In Russian).
2. INOZEMTSEV A.N., GALKIN A.V., STEPANOV I.V., YERCHENKOV M.V., Application of the system for obtaining and interpreting full-azimuthal seismic images of EarthStudy 360 and AVAZ inversion for studying cracks and faults of carbonate reservoirs of the Middle Volga region of Russia, *Oil&Gas, EURASIA*-2012. 2013;(12). December–January. (In Russian).
3. KOBRUNOV A.I., KIRILLOV S.A. On the problem of increasing the contrast of seismic images. Scientific Thought, Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Kiev, 1979; series B;(4):256–259. (In Russian).
4. KIRILLOV S.A., LAVRIK A.S., SAMOILOV A.V. Detection of rock fracture zones in sediments of the Bazhenov formation according to 3D seismic data. *OENTZH "Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki"* Saratov, 2015;3;(53):40–44. (In Russian).
5. KOZLOV E.A., Subsoil, Migration transformations in seismic exploration. Moscow, 1986:247. (In Russian).
6. SOROKIN A.S., LYUBIMOV E.V., DIDENKO P.V., INOZEMTSEV A.N. Construction of an anisotropic depth-velocity model for migration transformations based on data from one of the deposits in Eastern Siberia. *Neftyanoye khozyaystvo*, Moscow, April, 2016:44–47. (In Russian).
7. CANNING A., MALKIN A. Paradigm-Emerson, Azimuthal AVA Analysis Using Full-Azimuth 3D Angle Gathers: SEG, Houston, International Exposition and Annual Meeting, 2009.
8. INOZEMTSEV A., STEPANOV I., GALKIN A., KOREN Z. Applying full-azimuth angle domain pre-stack migration and AVAZ inversion to study fractures in carbonate reservoirs in the Russian Middle Volga region, First Break, February 2013;(31).
9. JONES I.F., BRIDSON M.L., BERNITSAS N. Anisotropy ambiguities in a transversely isotropic medium.
10. KOREN Z., RAVVE I. Full-azimuth subsurface angle domain wavefield decomposition and imaging, Geophysics, January-February. 2011;76(1):S1–S13.

Кириллов Сергей Александрович,
д.т.н., к.ф.-м.н., доцент, советник АО «Центральная геофизическая экспедиция»

✉ e-mail: sakirillov@cge.ru

Алисолтанов Алибек Магомедмуратович,
управляющий директор АО «Центральная геофизическая экспедиция»

✉ e-mail: AlisoltanovAM@rusgeology.ru

Халиуллин Эдуард Марсович,
главный специалист АО «Центральная геофизическая экспедиция»

✉ e-mail: KhaliullinEM@rusgeology.ru

Юрикова Анна Владимировна,
главный специалист АО «Центральная геофизическая экспедиция»

✉ 123298, г. Москва, ул. Народного Ополчения, 38/3
123298, Moscow, 38/3 Narodnaya Opolcheniya str.,
e-mail: geomsu@mail.ru