

УДК 550.832.44 (47,57)

А. В. Шумилов

Пермский ГНИУ, ОАО "Пермнефтегеофизика"

С. В. Белов, И. В. Ташкинов

Пермский ГНИУ, ООО Предприятие "ФХС-ПНГ"

ОБРАБОТКА ДАННЫХ КРОССДИПОЛЬНОГО АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ СОНАТА

Описаны основные возможности нового модуля обработки данных кроссдипольного акустического каротажа в программном комплексе СОНАТА. Показана эффективность и технологичность разработанного модуля и предлагаемых подходов к обработке кроссдипольных данных.

Ключевые слова: кроссдипольный акустический каротаж, скважина, горная порода, упругие волны, анизотропия, программное обеспечение.

Необходимость использования скорости поперечных волн для изучения свойств горных пород привела к развитию кроссдипольного акустического каротажа (АК), который сейчас уже является отработанной технологией для нефтяной и газовой промышленности за рубежом и только набирает свою популярность на территории России.

Дипольная акустическая технология была впервые разработана в 1984 г. группой авторов [5] и нашла коммерческое применение в отрасли в 1990 г. До применения дипольных измерений поперечную волну оценивали только в высокоскоростных породах с использованием монополярной акустической системы, которая регистрирует поперечную преломленную волну вдоль скважины.

Применение многоэлементных зондов с кроссдипольными излучателями, в дополнение к перечню информации о скважине и породах, получаемой обычными зондами, позволяет получать поляризованную поперечную волну в любых геологических условиях, включая низкоскоростной разрез. С помощью кроссдипольных зондов можно изучать анизотропию упругих свойств пород, связанную с неравномерным напряженным состоянием или трещиноватостью, и оценивать ориентацию этих зон. Получаемые данные о направлении и степени открытости трещин необходимы для оптимизации разработки месторождений нефти и газа, оценки емкостных свойств коллектора,

контроля гидроразрыва пласта, анализа механических свойств пород, интерпретации данных сейсморазведки.

Одним из главных применений кроссдипольного АК является оценка анизотропии горных пород. Анизотропия может возникать из-за внутренних структурных эффектов, таких как трещиноватость и тонкослоистость пород, неравномерной напряженности внутри породы. Эти эффекты оказывают влияние на различные упругие свойства горных пород, и если эти особенности находятся в прискважинной зоне на расстоянии меньше длины волны, то параметры акустических волн можно использовать для оценки анизотропии.

Акустические волны распространяются быстрее, когда направление движения частиц (поляризация) совпадает с направлением жесткости материала. Движение частиц поперечных волн перпендикулярно плоскости распространения волны. И если порода анизотропна в этой плоскости, то есть одно направление жестче, чем другое, тогда поляризация поперечной волны, ориентированная вдоль жесткого направления, будет распространяться быстрее, чем в другом, более эластичном. В результате поперечная волна разделяется на две компоненты, быструю – поляризованную вдоль жесткой компоненты породы и медленную – поляризованную вдоль эластичной (менее жесткой) ее части. Например, в случае вертикальной густой микротрещиноватости поперечные волны, которые поляризованы параллельно направлению трещин, будут распространяться быстрее, чем поперечные волны, распространяющиеся перпендикулярно к ним. В общем случае, поперечная (или изгибная) волна, порождаемая дипольным источником, разделяется на две ортогональные компоненты, поляризованные вдоль X и Y направлений. Когда они распространяются вдоль скважины, быстрая волна будет поляризована вдоль направления параллельно направлению трещиноватости, а медленная волна – в направлении, перпендикулярном к направлению трещиноватости.

Приборы кроссдипольного АК используют два ортогонально расположенных дипольных излучателя с частотой 2–4 кГц и несколько пар приемников, расположенных в ортогональном направлении. Приборы могут измерять компоненты интервального времени поперечной волны в любом направлении в плоскости, перпендикулярной оси скважины. Измерения включают запись волновых картин приемниками в направлениях параллельных и перпендикулярных каждому источнику вдоль осей X и Y прибора.

Четыре набора волновых картин записываются на каждой глубине для одного уровня приемников. Эти измерения обычно именуется XX , YY , XY , YX . Измерения XX и YY являются основными компонентами, а XY и YX – кросс-компонентами. Первое направление ссылается на направление источника, а второе – приемника.

Направление и скорость быстрой и медленной поперечных волн могут быть определены математическим вращением измеренных волновых картин через азимутальный угол, так что они выравниваются по двум осям X и Y . Это вращение, называемое методом Алфорда (R. M. Alford) [3], использует тот факт, что модель анизотропии предполагает затухание амплитуд, измеренных кросс-компонентами, когда измерительные оси X и Y совпадают с осями анизотропии X и Y . Направление быстрой поперечной волны вместе с азимутом прибора, измеряемого встроенным акселерометром или гироскопом, используется для определения азимута быстрой поперечной волны относительно географического севера.

Большинство многоэлементных приборов кроссдипольного акустического каротажа оснащены несколькими монополярными источниками различной частоты и двумя ортогональными направленными дипольными источниками, а также от восьми до тринадцати пар приемников, расположенных в тех же осях, что и источники. Примерами таких приборов являются DSI (Schlumberger), XMAC-F1 (BakerHughes), Wavesonic (Halliburton), MPAL (CPL), ВАК-8 (ООО “ТНГ-Групп”).

На российском рынке наибольшее распространение и известность приобрела аппаратура АВАК-11 (ООО “Нефтегазгеофизика”, г. Тверь) [6]. Основное отличие данной аппаратуры заключается в использовании всего двух пар приемников для регистрации волновых картин как от монополярных, так и от дипольных источников, что несколько снижает эффективность использования данной аппаратуры по сравнению с зарубежными аналогами. Кроме того, следует отметить, что современные зарубежные кроссдипольные приборы оснащаются более низкочастотными (менее 1 кГц) дипольными источниками, что позволяет получать качественную информацию в сильно разуплотненных породах, в скважинах большого диаметра, а также в больших кавернах.

ООО Предприятие “ФХС-ПНГ” разработало модуль обработки данных кроссдипольного АК, который может быть использован в составе программного комплекса СОНАТА [1, 2]. Модуль позволяет обрабатывать данные, полученные любой многоэлементной аппара-

турой кроссдипольного АК, в первую очередь наиболее распространенным в России прибором АВАК-11.

Модуль обработки данных кроссдипольного АК позволяет:

- получить волновые сигналы быстрой и медленной волны для каждого зонда;
- рассчитать интервальные времена быстрой и медленной волны;
- определить направление поляризации быстрой волны в диапазоне от 0° до 180° с учетом вращения прибора и азимута скважины;
- рассчитать коэффициент анизотропии с различной разрешающей способностью по глубине;
- построить карту коэффициента анизотропии по углу в диапазоне от 0° до 180° ;
- построить параметры, характеризующие достоверность определения наличия и направления анизотропии;
- производить обработку с различными параметрами в выделенном интервале глубин;
- вычислять кривую поворота прибора по данным акселерометра;
- производить интерактивное изменение угла направления между быстрой и медленной волной;
- вычислять доверительные интервалы анизотропии;
- отображать на планшете диаграмму “розы” анизотропии;
- сохранять отдельные диаграммы “розы” в виде картинок в BMP-формате.

Ключевой особенностью модуля является применение методики инверсной обработки кроссдипольных данных [4]. Эта методика отличается от традиционного подхода и включает в себя:

- одновременную оценку анизотропии и определение направления быстрой поперечной волны,
- оценку неопределенности при расчете быстрой и медленной поперечной волны,
- методику глобальной минимизации для реконструкции скорости поперечной волны.

Используемый подход позволяет получать более устойчивое решение и сглаженную кривую направления поляризации быстрой волны, особенно в условиях низкой анизотропии (рис. 1).

Одним из традиционных недостатков многих программ обработки кроссдипольного АК является использование только автоматического расчета, когда сама обработка используется как “черный ящик” и результаты обработки уже никак не могут быть откорректированы.

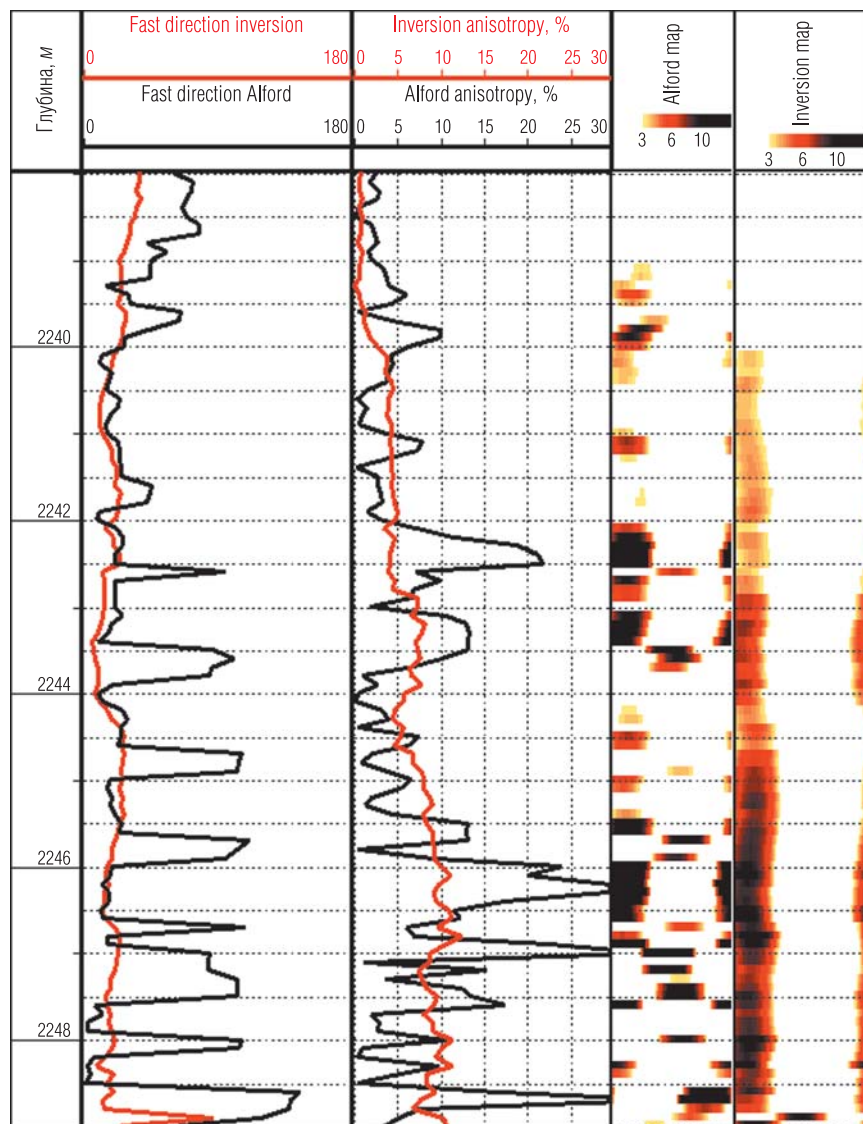


Рис. 1. Сравнение результатов обработки кроссдипольного АК по двум методам: стандартной (Alford) и инверсионной

В отличие от таких подходов в программном комплексе СОНАТА обработка может производиться как в полностью автоматическом режиме, когда задается набор входных параметров, а на выходе получают данные, включающие все необходимые результаты обработки, так и в интерактивном режиме, когда промежуточные результаты обработки могут быть получены другими способами под контролем интерпретатора.

Например, процедуры независимого построения волновых картин быстрой и медленной волн, а также расчета величины анизотропии по их интервальным временам позволяют получать карту анизотропии как по инверсионной методике, так и после ручного прослеживания поперечной волны по каналам разноразностных волн. Возможность простого интерактивного изменения направления быстрой и медленной волны, особенно в интервалах низкой анизотропии, позволяет легко исправлять ошибочную обработку и получать адекватное представление результатов (рис. 2).

Угол направления анизотропии можно вычислять сразу с учетом угла вращения прибора и азимута скважины, получая на выходе азимут ее направления и карту анизотропии с географической привязкой. В модуле реализована возможность независимого расчета угла вращения прибора по данным трех- или двухосевого акселерометра (рис. 3).

Независимое определение величины анизотропии с различной разрешающей способностью (на длине прибора и базе приемников) позволяет, с одной стороны, выделять более мелкие аномалии и трещины, с другой – позволяет снижать восприимчивость к шуму и резким изменениям (например, границы пласта), а также реагировать на более масштабные характеристики, в том числе касающиеся напряжений горных пород (рис. 4).

Кроме обычной величины анизотропии, определяемой по соотношению скоростей быстрой и медленной волны, в данном модуле можно рассчитать анизотропию энергии и построить азимутальную развертку этой величины. Анизотропия энергии – это качественная характеристика величины количества анизотропии. В отличие от анизотропии скоростей, анизотропия энергии – это оценка совокупности различий быстрой и медленной поперечной волны как по динамическим, так и по кинематическим характеристикам. Большие различия между максимальными и минимальными значениями, особенно когда минимальная энергия мала, показывают зоны существенной анизотропии.

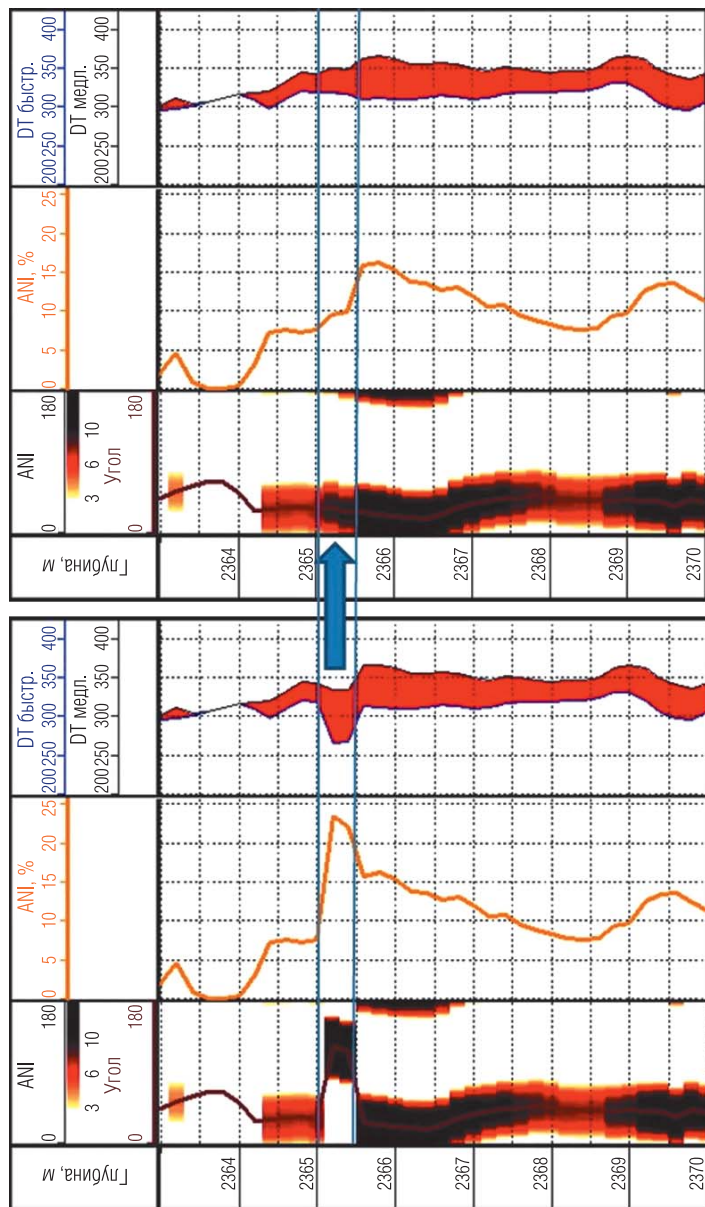


Рис. 2. Интерактивное изменение направления поляризации «быстрой» и «медленной» волны

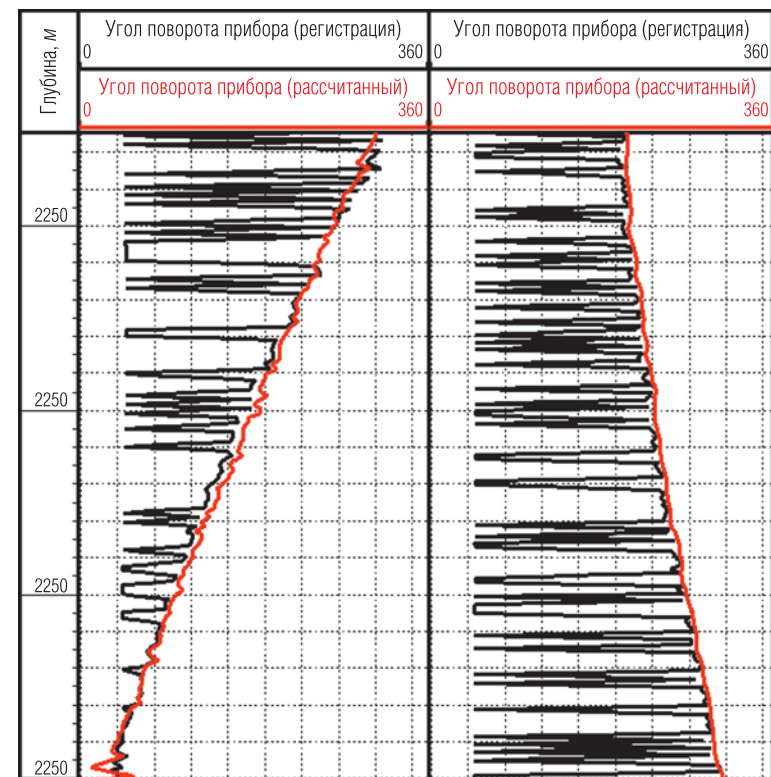


Рис. 3. Сравнение кривой угла поворота, полученной при регистрации и после расчета в программе

Анизотропия энергии, хотя и является качественной оценкой и зависит от методов обработки, вместе с тем является основным методом измерения (рис. 4).

Поскольку указанный модуль интегрирован в программный комплекс SONATA, то при обработке данных кроссдипольного АК можно использовать все его функциональные возможности, включая различные способы прослеживания и выделения быстрой и медленной поперечной волны, фильтрацию исходных волновых сигналов, редактирование, сглаживание результатов обработки, увязки данных по глубине и т. д.

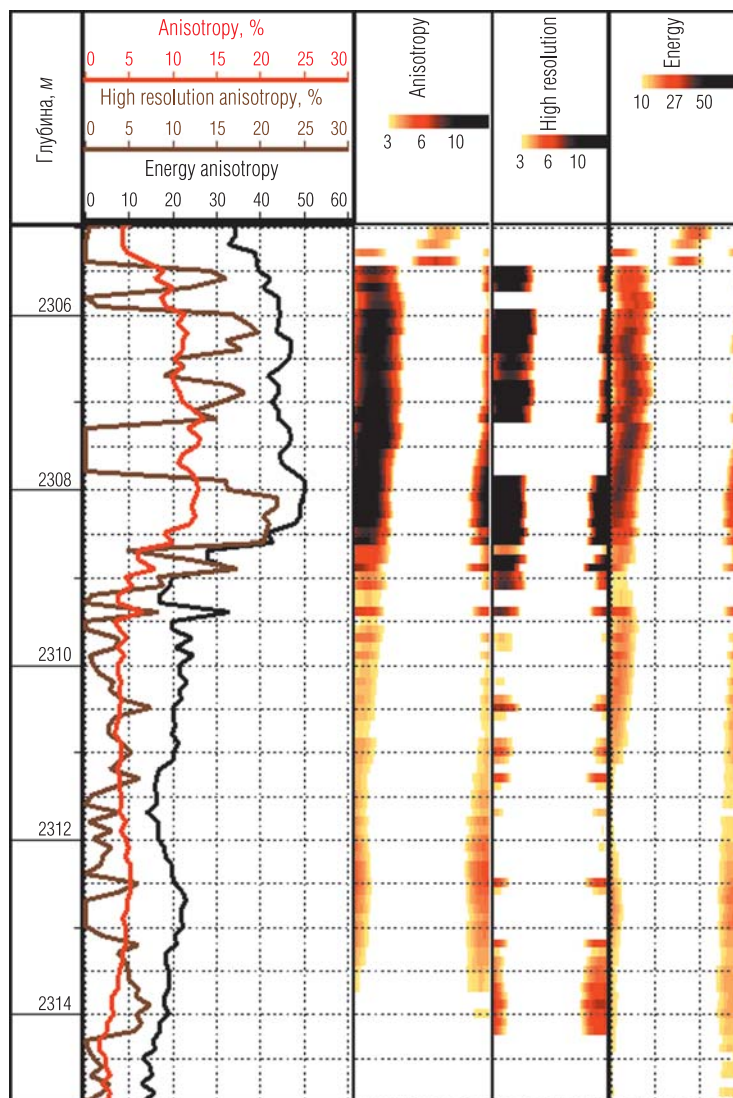


Рис. 4. Величина и азимутальная карта анизотропии: anisotropy – анизотропия на длине прибора; high resolution anisotropy – анизотропия на базе приемников; energy anisotropy – анизотропия энергии

Большое значение при обработке кроссдипольного АК имеет достоверность получаемых результатов, особенно когда эти результаты рассчитываются автоматически по предлагаемой методике. На достоверность и качество результатов могут влиять много факторов, таких как идентичность дипольных источников и приемников, геометрическое положение прибора в скважине, уровень сигнала, качество регистрируемых волновых картин, частота излучателей и др.

Стандартными индикаторами качества обработки являются минимальная и максимальная относительные энергии кросс-компонент. Известно, что в случае анизотропии, когда направление диполей совпадает с направлением анизотропии или ортогонально ему, энергия кросс-компонент стремится к нулю. Дисперсия энергии кросс-компонент показывает зоны существенной анизотропии.

В отличие от традиционного подхода, используемая инверсионная методика глобальной минимизации для реконструкции скорости поперечной волны позволяет получить дополнительные важные индикаторы качества. В первую очередь это оценка неопределенности между направлениями быстрой и медленной волны. Данный критерий особенно важен в условиях низкой анизотропии, когда разделить направления только по скоростям волн представляется затруднительным. Другим важным критерием качества обработки является кривая – показатель, характеризующий соответствие преимущественно анизотропной или изотропной модели среды в некотором интервале глубин.

По комплексу рассчитываемых параметров – индикаторов качества обработки можно выделить доверительные интервалы анизотропии. Доверительные интервалы – это интервалы, в которых результаты обработки данных кроссдипольного АК можно считать достаточно достоверными при выдаче заключения о наличии анизотропных интервалов (рис. 5).

Немаловажным значением при любой обработке и интерпретации геофизических данных является возможность качественного и наглядного представления результатов обработки. Кроме возможности представления результатов обработки в виде кривых и азимутальных разверток анизотропии, возможно отображение на планшете направления азимута анизотропии вместе с величиной анизотропии в виде “розы”-диаграммы, показывающей преимущественное направление анизотропии на заданных интервалах глубин.

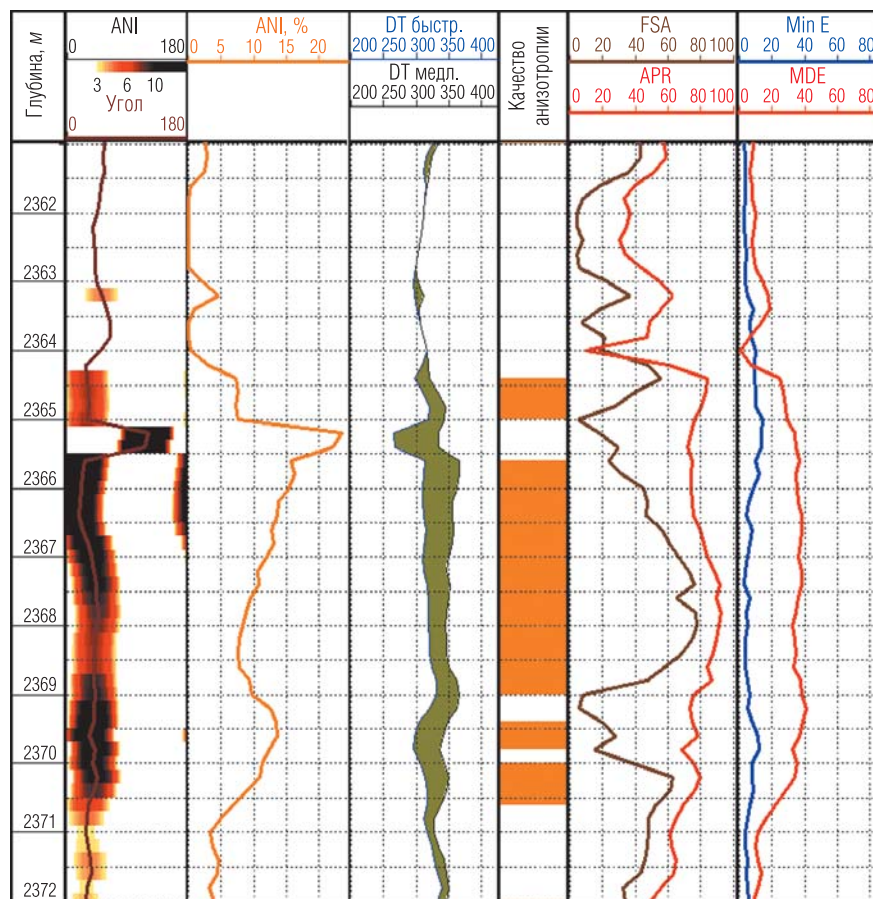


Рис. 5. Доверительные интервалы анизотропии (качество анизотропии). FSA – неопределенность между направлениями быстрой и медленной волны; APR – показатель, характеризующий преимущественно анизотропную или изотропную модели среды; Min E – минимальная относительная энергия; MDE – дисперсия относительной энергии

Для построения отчетов возможно сохранение отдельных диаграмм в графический файл в виде полярной диаграммы, “розы”-диаграммы или гистограммы (рис. 6).

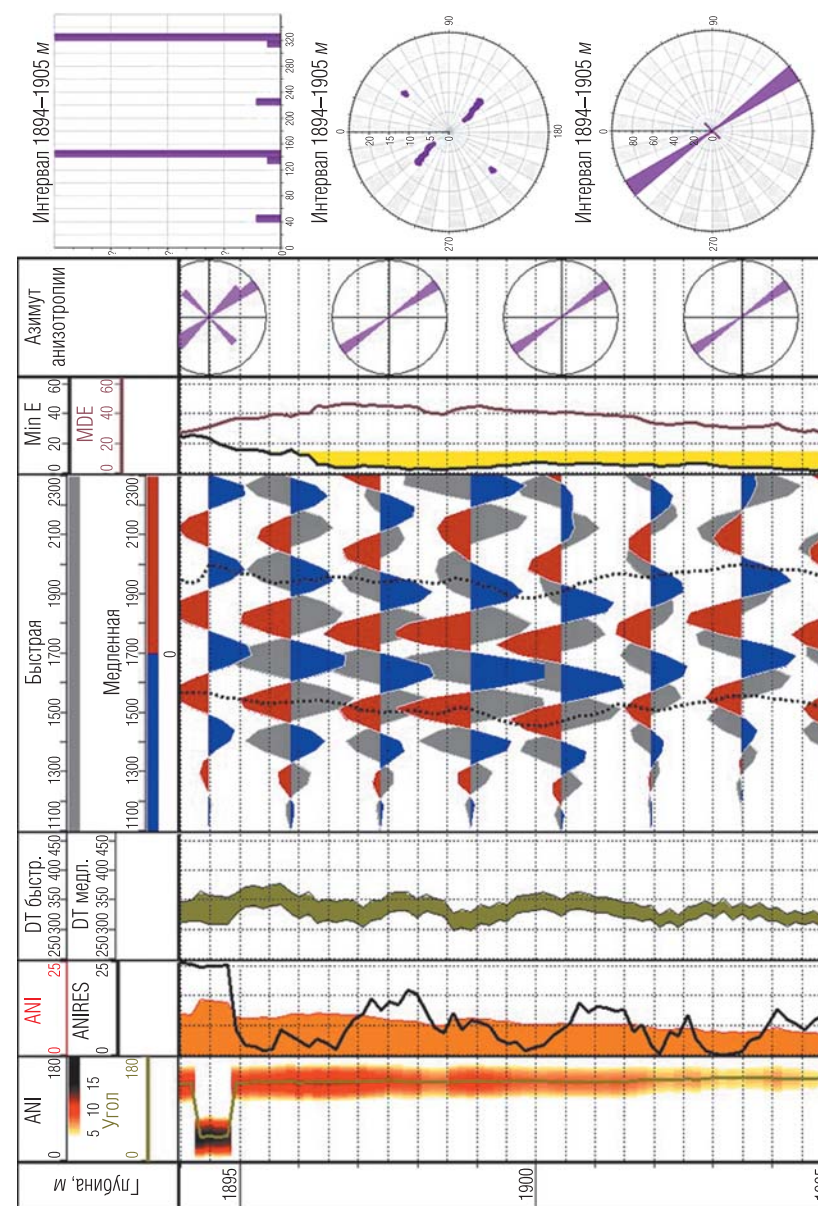


Рис. 6. Пример представления результатов обработки кроссдипольного АК на планшете и в отчете

Выводы

Использование программного комплекса СОНАТА вместе с модулем обработки данных кроссдипольного АК позволяет проводить полную обработку любых многоэлементных монополюсных и кроссдипольных акустических приборов и решать сложные геолого-геофизические задачи, включая контроль гидроразрыва пласта, определение физико-механических свойств горных пород, оценку азимутальной акустической анизотропии, определение и ориентацию зон трещиноватости и напряженности горных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов С. В., Заичкин Е. В., Наугольных О. В., Ташинов И. В., Шумилов А. В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ “Модульная система обработки и интерпретации данных геофизических исследований скважин (Соната)” № 2004610273 от 22.01.2004. М.: Роспатент.
2. Белов С. В., Заичкин Е. В., Ташинов И. В., Шумилов А. В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ “Модуль обработки данных кроссдипольного акустического каротажа” № 2014610980 от 22.01.2014. М.: Роспатент.
3. Alford R. M. Shear Data in the Presence of Azimuthal Anisotropy. 56th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts. 1986.
4. Tang X., Chunduru R. K. Simultaneous Inversion of Formation Shear-Wave Anisotropy Parameters from Cross-Dipole Acoustic-array Waveform Data. Geophysics. 1999. 64 (5).
5. Zemanek J., Angona F. A., Williams D. M., Caldwell R. L. Continuous Shear Wave Logging. In 25th Annual Logging Symposium Transactions: Society of Professional Well Log Analysts. 1984. Paper U.
6. www.karotazh.ru
7. http://www.fxc-png.ru

Рукопись статьи рассмотрена на заседании кафедры геофизики ПГНИУ и рекомендована к публикации

УДК 550.34:534.22

А. В. Шумилов, Д. Ф. Нигматуллин
Пермский ГНИУ,
ОАО “Пермнефтегеофизика”

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ВЫБОРА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТОВ

Рассмотрены возможности использования базы данных “Методы работ в скважинах по повышению текущей и конечной нефтеотдачи пластов” и программы “Методы ПНП”, предназначенных для выбора методов и проектирования работ в скважинах.

Ключевые слова: геолого-технические мероприятия, текущая и конечная нефтеотдача пластов, физико-механические методы обработки призабойной зоны пласта, слабодренлируемые интервалы пластов, асфальто-смоло-парафиновые отложения, гидрофилизация, ограничения водонефтяного фактора и водопритоков.

Введение

В настоящее время как в России, так и в мировом масштабе происходит все большее усложнение условий разработки и рост доли трудноизвлекаемых запасов. В связи с этим увеличивается роль выбора оптимальных методов повышения нефтеотдачи пластов (ПНП).

Разработка проектов работ ПНП может осуществляться тремя путями:

- проектирование специальной системы для каждого участка;
- разработка типового решения для класса участков и приспособление его к конкретным условиям;
- создание системы, генерирующей проект согласно исходным параметрам (технологические процессы, объемные планы, ограничения, условия и критерии, оборудование, оснастка и др.).

Подготовка индивидуальных проектов требует больших трудовых и временных затрат. Типовые решения позволяют существенно сократить сроки проектирования, но не дают оптимальных решений для каждого конкретного участка, так как не учитывают его специфики и дополнительных затрат на привязку проекта. В связи с этим развиваются направления, связанные с автоматизированным генери-