Компьютерная математика

УДК 004.4, 004.9, 004.42, 004.67, 004.915, 004.427

П.Г. ТУЛЬЧИНСКИЙ, В.Ю. РОГАНОВ,
А.Н. ЛАВРЕНЮК, С.И. ЛАВРЕНЮК

ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АЗИМУТОВ ТРЕЩИНОВАТОСТЕЙ В ВОЛНОВОМ АКУСТИЧЕСКОМ КАРОТАЖЕ СКВАЖИН

Предложен оптимизированный метод обработки данных при определении азимутов трещиноватостей в волновом акустическом каротаже скважин. Этот подход дает возможность получать точный результат и уменьшить время работы программы. Приведены теоретические расчеты и результаты обработки реальных данных волнового акустического каротажа, проведенного прибором АВАК-11.

Введение. Определение параметров трещиноватых зон – это важный этап при выполнении разведочных работ и изучении свойств резервуаров. Наличие трещиноватых зон приводит к появлению азимутально-зависимой анизотропии и изменению свойств сейсмических волн (поляризации, амплитуды и времени распространения), проходящих через эти зоны [1]. При наличии одной вертикальной системы трещин, размещенной в изотропной среде, возникает горизонтальная трансверсально-изотропная (ГТИ) среда. Квазипоперечная волна, распространяющаяся вертикально, расщепляется на быструю $S1$ и медленную $S2$ волны. Скорость этих волн зависит от их поляризации. Быстрая волна имеет поляризацию вдоль системы трещин, а медленная – вдоль нормалей к плоскостям трещин [2]. Используя эти волны, можно определить азимут трещиноватости [3 – 8]. Поскольку, медленная волна отстает от быстрой, вектор поляризации волнового поля будет отличным от нуля на кросс компонентах XY и YX во всех случаях кроме случая, когда источник генерирует волну с поляризацией в плоскости трещиноватости или ей перпендикулярной. Прямоугольная система координат, для которой ось OX расположена в плоскости трещиноватости или ей перпендикулярна, называется натуральной системой координат.

Для определения направления трещин рассчитываются сигналы при различных поворотах системы координат вокруг вертикальной оси *OZ* и среди них выбирается тот поворот, для которого на кросс компонентах находится минимальная энергия. Повороты системы координат выполняются преобразованием Алфорда [4].

Для возбуждения квазипоперечных волн при волновом акустическом каротаже (ВАК) используются источники типа силы, направленные вдоль горизонтальных осей *OX* и *OY*. Два приемника располагаются на некотором расстоянии по оси *OZ* от источников и регистрируют колебания вдоль направлений *OX* и *OY*. В результате, для каждого положения прибора в скважине, регистрируются 4 трассы, *XX*, *XY*, *YX* и *YY*, которые содержат два типа квазипоперечных волн, распространяющихся с разными скоростями в околоскважинном пространстве.

В данной работе представлен метод определения азимута трещиноватостей на основе поворотов Алфорда, адаптированный для зондов ВАК. Метод позволяет синтезировать сигналы в натуральной системе координат и определять азимут трещиноватости.

Обработка данных обменных волн для определения азимутов вертикальных трещиноватостей. Обработка данных основана на одномерной модели, в которой источниками являются силы, направленные вдоль осей *OX* и *OY*, а синтезированные поперечные волны распространяются вертикально вниз. Единичные векторы вдоль осей *OX* и *OY* обозначим соответственно $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}$. Источники генерируют сигналы $\mathbf{s}_x = s(t)\hat{\mathbf{x}}$ и $\mathbf{s}_y = s(t)\hat{\mathbf{y}}$, которые распространяются в вертикальном направлении и регистрируются приемниками, находящимися на глубине z и направленными вдоль осей *OX* и *OY*. Предполагается, что среда содержит одну вертикальную систему трещин с азимутом θ, который требуется определить.

Сигналы $\mathbf{s}_X$ и $\mathbf{s}_Y$ порождают быстрые и медленные волны с поляризациями $(\cos\theta, \sin\theta, 0)$ и $(-\sin\theta, \cos\theta, 0)$, которые распространяются в вертикальном направлении со скоростями v_{S1} и v_{S2}. Следовательно, на расстоянии z от источника будут зарегистрированы волны, описанные соотношениями (1):

$$\mathbf{s}_{XX}(t) = \left(s\left(t - \frac{z}{v_{S1}}\right)\cos^2\theta + s\left(t - \frac{z}{v_{S2}}\right)\sin^2\theta \right)\hat{\mathbf{x}},$$

$$\mathbf{s}_{XY}(t) = \left(s\left(t - \frac{z}{v_{S1}}\right) - s\left(t - \frac{z}{v_{S2}}\right) \right)\hat{\mathbf{y}}\sin\theta\cos\theta,$$

$$\mathbf{s}_{YX}(t) = \left(s\left(t - \frac{z}{v_{S1}}\right) - s\left(t - \frac{z}{v_{S2}}\right) \right)\hat{\mathbf{x}}\sin\theta\cos\theta,$$

$$\mathbf{s}_{YY}(t) = \left(s\left(t - \frac{z}{v_{S1}}\right)\sin^2\theta + s\left(t - \frac{z}{v_{S2}}\right)\cos^2\theta \right)\hat{\mathbf{y}}. \quad (1)$$

После прохождения расстояния z, между быстрой и медленной волнами возникает временной сдвиг $\Delta t = z / v_{S1} - z / v_{S2}$ и на кросс компонентах *XY* и *YX* при $v_{S1} \neq v_{S2}$ и $\theta \neq \pi k / 2$ появляется ненулевая энергия. Сигналы на этих компонентах должны быть одинаковы. Их отличие между собой свидетельствует о наличии помех или неприменимости одномерной модели. Если время Δt мало, что может произойти при маленьких расстояниях источник-приемник z, либо при слабой анизотропии, когда $v_{S1} \approx v_{S2}$, сигналы на компонентах *XX* и *YY* становятся одинаковыми. В этом случае азимут трещиноватостей восстанавливается со значительными погрешностями.

Имея сигналы $\mathbf{s}_{XX}(t), \mathbf{s}_{XY}(t), \mathbf{s}_{YX}(t), \mathbf{s}_{YY}(t)$, возбужденные и зарегистрированные вдоль осей *OX* и *OY*, можно рассчитать аналогичные сигналы $\mathbf{s}^{\varphi}_{XX}(t), \mathbf{s}^{\varphi}_{XY}(t), \mathbf{s}^{\varphi}_{YX}(t), \mathbf{s}^{\varphi}_{YY}(t)$ для источников и приемников, расположенных вдоль осей системы координат, повернутой на угол φ вокруг вертикальной оси. Очевидно, это будут сигналы, описываемые формулой (2), с заменами угла θ на угол $\theta - \varphi$ и ортов $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}$ на орты $\hat{\mathbf{x}}_{\varphi} = (\cos\varphi, \sin\varphi, 0)$, $\hat{\mathbf{y}}_{\varphi} = (-\sin\varphi, \cos\varphi, 0)$. Следовательно,

$$\begin{pmatrix} s_{XX} & s_{XY} \\ s_{YX} & s_{YY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s(t - z / v_{S1}) & 0 \\ 0 & s(t - z / v_{S2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} s^{\varphi}_{XX} & s^{\varphi}_{XY} \\ s^{\varphi}_{YX} & s^{\varphi}_{YY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s^{\varphi}_{XX} & s^{\varphi}_{XY} \\ s^{\varphi}_{YX} & s^{\varphi}_{YY} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(\theta-\varphi) & -\sin(\theta-\varphi) \\ \sin(\theta-\varphi) & \cos(\theta-\varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s(t - z / v_{S1}) & 0 \\ 0 & s(t - z / v_{S2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta-\varphi) & \sin(\theta-\varphi) \\ -\sin(\theta-\varphi) & \cos(\theta-\varphi) \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} s^{\varphi}_{XX} & s^{\varphi}_{XY} \\ s^{\varphi}_{YX} & s^{\varphi}_{YY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_{XX} & s_{XY} \\ s_{YX} & s_{YY} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Выполняя умножения матриц, находим искомые соотношения, которые называются вращением Алфорда [4]:

$$s^{\varphi}_{XX} = s_{XX}\cos^2\varphi + (s_{XY} + s_{YX})\sin\varphi\cos\varphi + s_{YY}\sin^2\varphi,$$

$$s^{\varphi}_{YY} = s_{XX}\sin^2\varphi - (s_{XY} + s_{YX})\sin\varphi\cos\varphi + s_{YY}\cos^2\varphi,$$

$$s^{\varphi}_{XY} = s_{XY}\cos^2\varphi - s_{YX}\sin^2\varphi + (s_{YY} - s_{XX})\sin\varphi\cos\varphi,$$

$$s^{\varphi}_{YX} = s_{YX}\cos^2\varphi - s_{XY}\sin^2\varphi + (s_{YY} - s_{XX})\sin\varphi\cos\varphi. \quad (4)$$

Значению азимута θ трещиноватости соответствует угол поворота φ, при котором достигается минимум энергии на компонентах $s_{XY}^{\varphi}, s_{YX}^{\varphi}$. Если минимум энергии на этих компонентах достигается при разных углах, то исходные данные не соответствуют принятой модели и требуется детально разбираться с причиной такого расхождения.

$$E_{XY} = \min_{\varphi} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \left(s_{XY}^{\varphi} \right)^2 dt, \quad E_{YX} = \min_{\varphi} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \left(s_{YX}^{\varphi} \right)^2 dt. \qquad (5)$$

Предложенный подход определения направлений трещин проверен на модельных данных, полученных 2.5*D* моделированием [9]. Затем откорректированные и оптимизированные алгоритмы с программной реализаций были применены для обработки данных, полученных при волновом акустическом каротаже скважин.

Оптимизированный метод обработки данных, полученных при волновом акустическом каротаже скважин прибором АВАК-11. В отличие от обычного акустического каротажа, волновой акустический каротаж – это метод, оперирующий с параметрами не только продольной волны, но и других упругих волн, распространяющихся в скважине.

Скважинный прибор АВАК-11 предназначен для исследования акустическим методом нефтяных и газовых скважин, с открытым стволом и обсаженных, для определения акустической анизотропии и модулей упругости пород.

Скважинный прибор АВАК-11 является цифровым, т. е. волновые картины от приемников зонда оцифровываются в скважинном приборе и передаются на поверхность кодами. Прибор содержит 4 дипольных зонда: 2 длинных и 2 коротких, которые генерируют и принимают сигналы вдоль взаимноперпендикулярных осей *OX* и *OY*.

В процессе каротажа на жесткий диск регистратора записываются оцифрованные волновые картины, синхронизированные с моментом излучения.

Для решения приведенных в статье задач используются волновые поля с компонентами *XX*, *XY*, *YX*, *YY* по коротким и длинным зондам. На рис. 1 показан пример каротажных данных по коротким зондам.

Сигнал имеет незначительные шумы, которые убираются предварительной обработкой.

Описанные далее приемы обработки и алгоритмы реализованы в программном комплексе «ГЕОПОИСК» [10].

В настоящее время, в практике волнового каротажа информативными волнами, т. е. нашедшими практическое применение при решении геолого-технических задач, являются три типа волн:

– *P* – продольная волна;
– *S* – поперечная волна;
– *L* – волна Лемба – Стоунли.

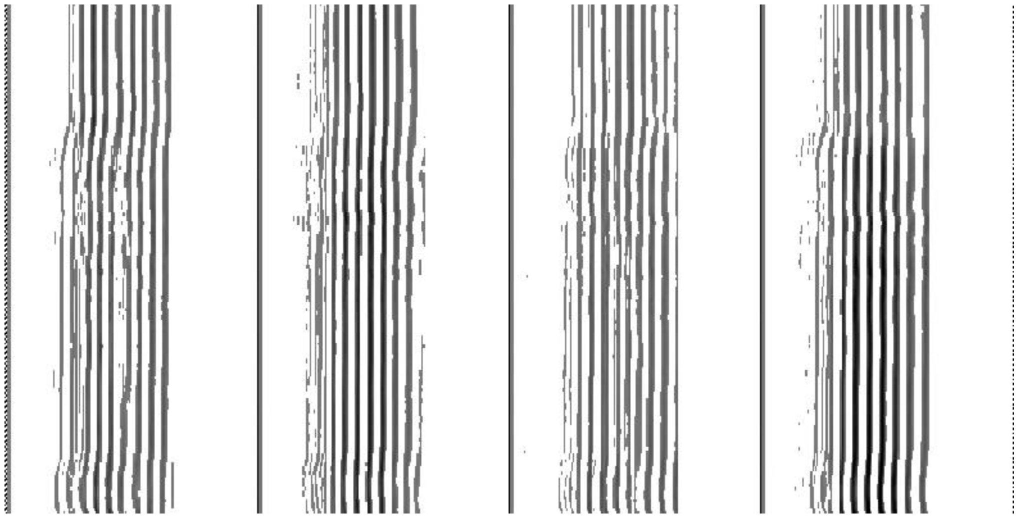

РИС. 1. Файлы с компонентами XX, XY, YX, YY по коротким дипольным зондам прибора АВАК-11

Эти волны, при проведении измерений АВАК-11, регистрируются на компонентах *XX*, *XY*, *YX*, *YY*. Сигналы *P* – продольная волна, *S* – поперечная волна и *L* – волны Лемба – Стоунли показаны на рис. 2 и 3.

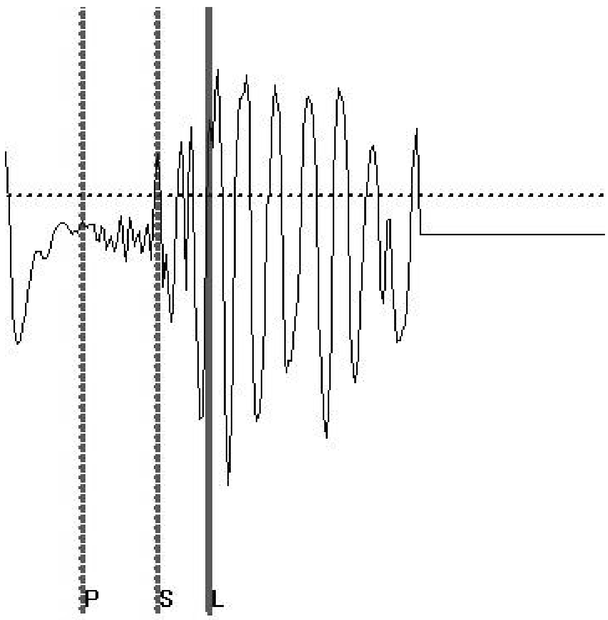

РИС. 2. Первые вступления волн, зарегистрированные приемником: *P* – продольной, *S* – поперечной и *L* – Лемба – Стоунли

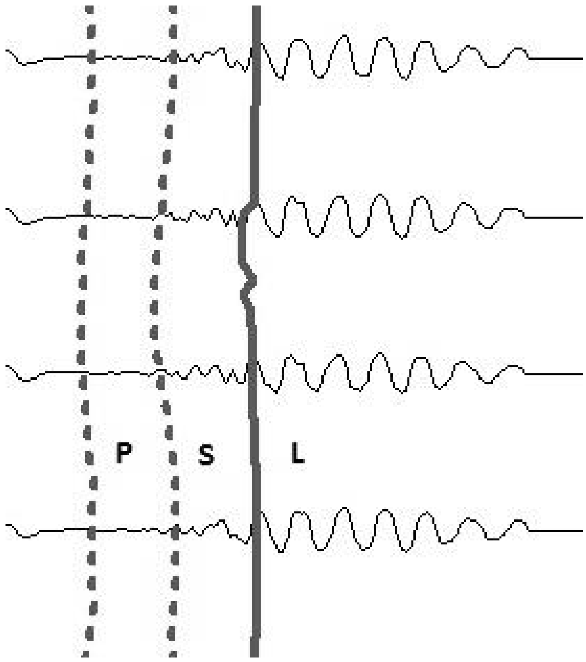

РИС. 3. Первые вступления волн на временном срезе:
P – продольной, *S* – поперечной и *L* – Лемба – Стоунли

Одна из первоочередных задач обработки данных волнового каротажа – это определение первых вступлений волн *S* и *L*, так как эта обработка ведется в пределах временного окна [*S*..*L*]. Если это окно определить непра-вильно, то возникнут значительные погрешности в результате обработки. Временные окна [*S*..*L*] определяются отдельно для длинных [*S*1..*L*1] и коротких зондов [*S*2..*L*2]. Временные окна в программе Геопоиск можно найти в полуавтоматическом режиме, когда программа по одному из выбранных алгоритмов (режим слежения за интервалом, пороговый, режим слежения за фазами, упрощенный пороговый), выполняет расчет первых вступлений для указанных типов волн. Имеется возможность проанализировать полученные кривые *S*, *L* и, при необходимости, внести исправления. Затем, по откорректиро-ванным данным, выполняются вычисления параметров трещиноватых зон.

Рассмотрим численный пример обработки данных дипольного зондирова-ния прибором АВАК-11 на конкретной глубине.

На рис. 4 показаны графики зарегистрированных волн на компонентах *XX*, *YY* и *YX*.

Из рис. 4 видно, что на компоненте *YX* содержится достаточно большой сигнал, что свидетельствует о наличии анизотропии на глубине размещения прибора $z = 1456$ метров.

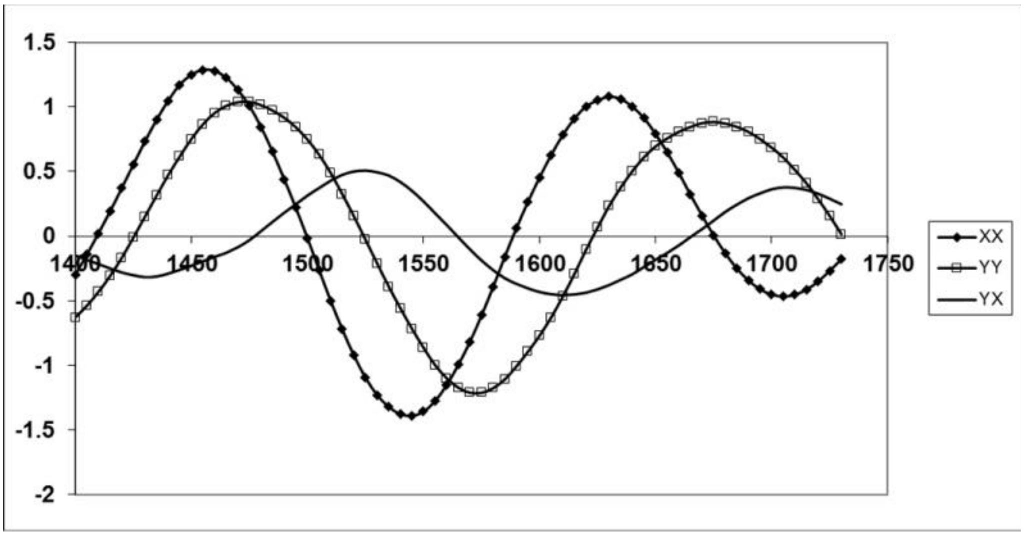

РИС. 4. Компоненты зарегистрированного волнового поля, содержащие квазипоперечные волны

Временной интервал обработки $(1400,\ 1750)$ мс выбран таким, чтобы в нем на всех компонентах присутствовали сигналы одинаковой формы и относились только к квазипоперечным волнам. Энергия на *YX*-компоненте, вычисленная для разных азимутов системы координат, показана на рис. 5.

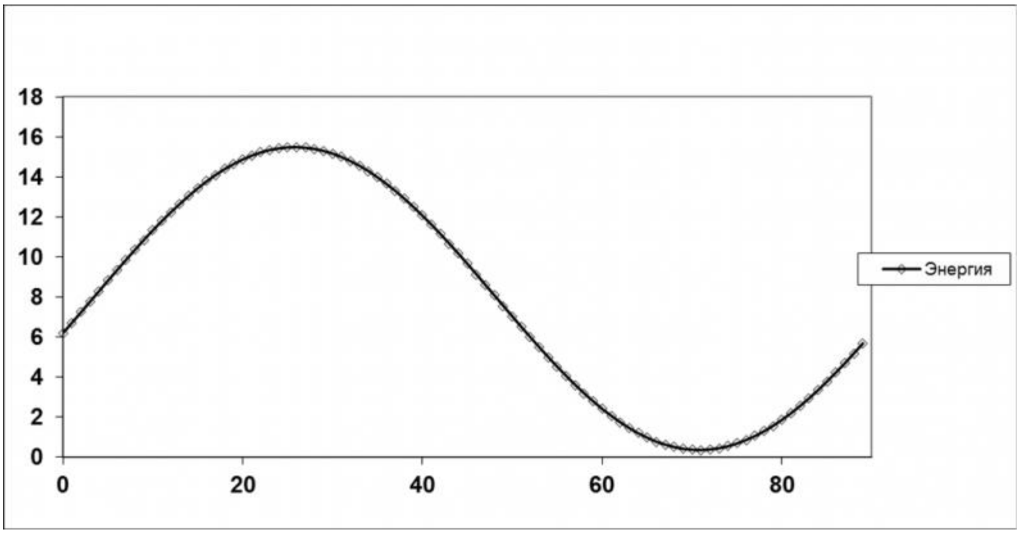

РИС. 5. Энергия на кросс-компоненте *YX* при различных азимутах системы координат

Минимум энергии достигается при $\varphi = 71^0$. Применяя поворот Алфорда для найденного угла $\varphi = 71^0$, мы добиваемся минимума энергии на кросс-компоненте *YX*. В результате, получаем волновое поле, показанное на рис. 6.

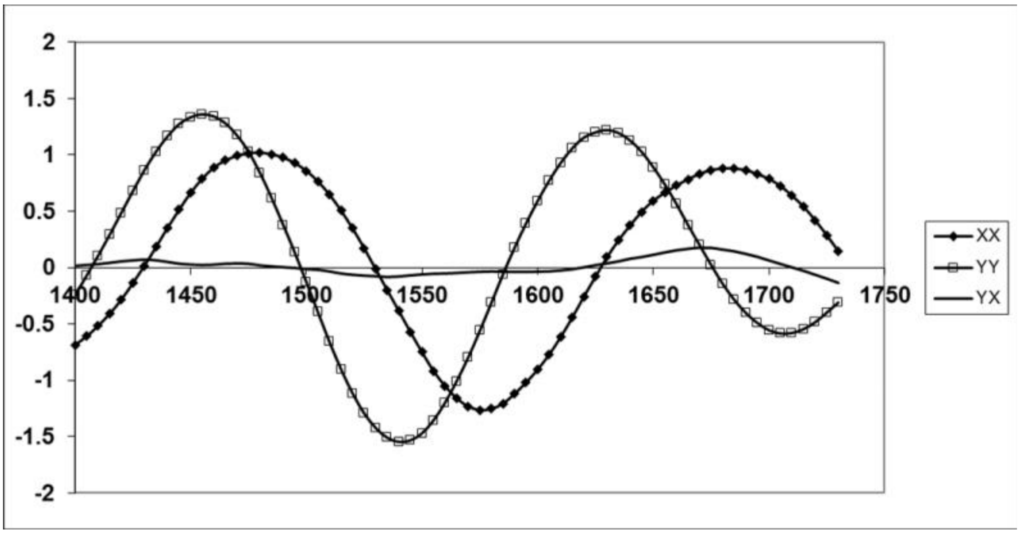

РИС. 6. Компоненты волнового поля после поворота на угол $\varphi = 71^0$

На *XX* компоненте находится медленная квазипопречная волна, а на *YY*-компоненте – быстрая квазипоперечная волна. Следовательно, азимут трещиноватости, в данном случае, равен $\theta = \varphi + 90^0 = 161^0$. На кросс-компоненте *YX* сигнал имеет небольшую амплитуду, что свидетельствует о том, что найденная система координат является натуральной, т. е. в ней ось *OY* расположена вдоль трещин, а ось *OX* ей перпендикулярна. Оценивая время регистрации по второй фазе (времени смены положительной фазы сигнала на отрицательную), находим время 1500 мс для быстрой квазипоперечной волны и 1530 мс – для медленной квазипоперечной волны.

Коэффициент сдвиговой анизотропии оценивается соотношением:

$$a = \frac{2\left(t_{S2} - t_{S1}\right)}{t_{S2} + t_{S1}}, \qquad (6)$$

где t_{s1}, t_{s2} – времена распространения быстрой и медленной волн, соответственно.

В приведенном примере, коэффициент сдвиговой анизотропии, рассчитанной по формуле (6), равен 0.02.

Аналогичные вычисления проводятся для всех глубин. Для вычисления сдвиговой анизотропии, при известном угле поворота θ, выполняется вращение Алфорда для получения компонент быстрой (*S*1) и медленной волн (*S*2).

Значения компонент быстрой и медленной поперечных волн рассчитываются по формулам:

$$S1_i = XX_i * \cos^2(\theta) + (XY_i + YX_i) * \sin(\theta) * \cos(\theta) + YY_i * \sin^2(\theta),$$

$$S2_i = XX_i * \sin^2(\theta) - (XY_i + YX_i) * \sin(\theta) * \cos(\theta) + YY_i * \cos^2(\theta), \quad (7)$$

где $i = 1..n$, n – количество отсчетов волновой картины.

По полученным данным $S1$ и $S2$, рассчитываются времена первых вступлений всех типов волн и времена t_{s1} и t_{s2} для формулы (6).

Временное окно волновой картины имеет w = 768 точек, длина каротажа h > 1500 точек. Так как современные рабочие станции имеют несколько процессоров (CPU) и процессорных ядер (CORE), обработку нескольких компонент данных оптимально проводить параллельно. Используя подходы по определению оптимального метода распараллеливания, аналогично приведенным в [11], было определено, что распараллеливание целесообразно выполнять по w в рамках временного окна обработки для получения промежуточного результата – файла после преобразования Алфорда, в котором разделены быстрая и медленная волны.

Для оптимизации расчета и получения ускорения использованы директивы OpenMP [12] для языка C++. OpenMP (MP – сокращение «multiprocessing») – это кросс-языковый, кросс-платформенный интерфейс прикладного программирования (API) для организации параллелизма на CPU. Он существует с 1997 года, поддерживает языки Fortran, C и C++ , реализован в Windows и на ряде других платформ. Директивы OpenMP позволяют выполнить распараллеливание части программного модуля для получения ускорения вычислений за счет распределения вычислений на имеющиеся процессоры и процессорные ядра. Данный механизм является универсальным для разных платформ. Также отметим, что не требуется дополнительное программирование при использовании данного подхода на компьютерах с одним процессором и одним процессорным ядром. В таблице приведены результаты ускорения в зависимости от количества процессорных ядер для численного примера, описанного выше.

ТАБЛИЦА. Ускорение счета в зависимости от ядер процессора

Количество ядер	Ускорение счета, раз
2	1.08
4	1.20

Результатом вычислений является угол между направлением поляризации быстрой волны и осью *OX*. Этот угол необходимо скорректировать на угол между осью *OX* и вертикальной плоскостью, проходящей через скважину. В результате получим угол азимутальной трещиноватости, т. е. угол между направлением поляризации быстрой волны и вертикальной плоскостью в диапазоне (0 – 180)°, по часовой стрелке, при виде сверху. Также результатом вычислений является коэффициент сдвиговой анизотропии. Результат можно отобразить, как в виде кривых, так и в виде диаграмм Шмидта (рис. 7).

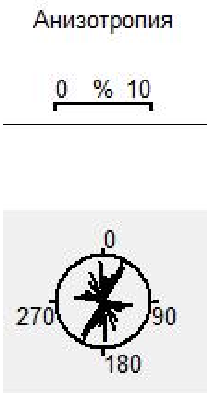

РИС. 7. Отображение результата вычислений в программе «ГЕОПОИСК»

Полученные данные – это один из важных параметров трещиноватых зон.

Выводы.

1. Разработан эффективный и устойчивый метод определения азимута вертикальной системы трещин по данным волнового акустического каротажа. Метод позволяет разделить зарегистрированное волновое поле на быстрые и медленные квазипоперечные волны.
2. Выполнена программная реализация предложенного метода для обработки реальных данных волнового акустического каротажа.
3. Выполнена оптимизация вычислений на многоядерных или многопроцессорных компьютерах.

П.Г. Тульчинський, В.Ю. Роганов, А.М. Лавренюк, С.І. Лавренюк

ОПТИМІЗОВАНИЙ МЕТОД ОБРОБКИ ДАНИХ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ АЗИМУТІВ ТРІЩИНУВАТОСТІ У ХВИЛЬОВОМУ АКУСТИЧНОМУ КАРОТАЖІ СВЕРДЛОВИН

Запропоновано оптимізований метод обробки даних при визначенні азимутів тріщинуватості у хвильовому акустичному каротажі свердловин. Цей підхід дає можливість отримувати точний результат і зменшити час роботи програми. Наведено теоретичні розрахунки та результати обробки реальних даних хвильового акустичного каротажу, проведеного приладом АВАК-11.

P. Tulchinsky, V. Roganov, A. Lavreniuk, S. Lavreniuk

OPTIMIZED DATA PROCESSING METHOD IN THE AZIMUTH FRACTURING DETERMINATION IN THE WAVE ACOUSTIC BOREHOLE LOGGING

Optimized data processing method in the azimuth fracturing determination in the wave acoustic borehole logging is presented. This approach provides obtaining accurate results and decreases the program runtime. Theoretical calculations and results of the real wave acoustic borehole logging data processing conducted by the «АВАК-11» device are presented.

1. *Bakulin A., Grechka V., Tsvankin I.* Estimation of fracture parameters from reflection seismic data. – Part 1: HTI model due to a single fracture set // Geophysics. – 2000. – 65, N 6. – P. 1788 – 1802.
2. *Schoenberg M., Helbig K.* Orthorhomic media: Modeling elastic wave behavior in a vertically fractured eath // Geophysics. – 1997. – 62, N 6. – P. 1954 – 1974.
3. *Роганов В.Ю., Роганов Ю.В.* Моделирование и использование полей обменных волн для определения азимутов трещиноватостей // Геофиз. журн. – 2011. – 33, № 2. – С. 64 – 79.
4. *Alford R.* Shear data in the presence of azimuthal anisotropy // 56th Ann. Internal. Mtg., Soc. Expl. Geophys. Expanded Abstracts. – 1986. – P. 476 – 479.
5. *Carcione J.M.* Wave fields in real media. Wave propagation in anisotropic, anelastic, porous and electromagnetic media. Vol. 38. – Amsterdam: Elsevier, 2007. – 515 p.
6. *Dellinger J., Nolte B., Etgen J.* Alford rotation, ray theory, and crossed-dipole geometry // Geophysics. – 2001. – **66**, N 2. – P. 637 – 647.
7. *Gaiser J.* Application for vector coordinate system of 3-D converter-wave data // The Leading Edge. – 1999. – **18**, N 11. – P. 1290 – 1300.
8. *Winterstein D.* Velocity anisotropy terminology for geophysicist // Geophysics. – 1990. – **55**, N 8. – P. 1070 – 1088.
9. *Tulchinsky V.G., Roganov Y.V.* Acceleration of 2.5D elastic anisotropic modelling // Copenhagen, Denmark: Society of Petroleum Engineers – 74th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition, 2012/
10. *Красножон М.Д., Косаченко В.Д., Тульчинський В.Г.* Комплексна інтерпретація матеріалів ГДС з використанням комп'ютерної технології «Геопошук» // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Прикладна геологічна наука сьогодні: здобутки та проблеми». – К.: УкрДГРІ, 2007. – С. 104 – 105.
11. *Лавренюк А.Н., Лавренюк С.И., Назаренко Е.В.* Подход к оптимизации программы обработки больших объемов сейсмических данных на примере 3D миграции дуплексных волн // Компьютерная математика. – 2014. – № 1. – С. 69 – 75.
12. *OpenMP* //[Электронный ресурс] – http://openmp.org/.

Получено 06.05.2015

Об авторах:

Тульчинский Петр Григорьевич,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Института кибернетики имени В. М.Глушкова НАН Украины,

Роганов Вячеслав Юрьевич,
младший научный сотрудник
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,

Лавренюк Алла Николаевна,
кандидат технических наук, доцент
Физико-технического института НТУ Украины «КПИ»,

Лавренюк Сергей Иванович,
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины.