

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АЛФОРДА ДЛЯ ОЦЕНКИ АНИЗОТРОПИИ ПО ЗАПИСЯМ КРОССДИПОЛЬНОГО АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

Р. Д. АХМЕТСАФИН<sup>1</sup>, Р. З. АХМЕТСАФИНА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Инжиниринговый центр МФТИ по трудноизвлекаемым полезным ископаемым,  
141700, Долгопрудный, Россия  
E-mail: akhmetsafin.rd@cet-mipt.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,  
101000, Москва, Россия  
E-mail: rakhmetsafina@hse.ru

Метод Алфорда является современным инструментом оценки анизотропии по записям кроссдипольного акустического каротажа. Азимутальный угол направления акустической анизотропии  $\theta$  оценивается по минимуму перекрестной энергии преобразованных записей. По соответствующим преобразованиям оцениваются интервальные времена (скорости) быстрой и медленной изгибной волны  $p_{fast}$ ,  $p_{slow}$  в прямом и обратном направлениях анизотропии. Рассматривается практическая реализация метода с учетом аналитического решения задачи минимизации.

**Ключевые слова:** кроссдипольный акустический каротаж, акустическая анизотропия, изгибные волны, метод Алфорда

Значение азимутальной анизотропии, называемое коэффициентом анизотропии, вычисляется по измеренным значениям интервальных времен поляризованной поперечной (изгибной) волны в двух ортогональных направлениях  $XX$  и  $YY$  (быстрая и медленная волны).

Если ось  $X$  прибора кроссдипольного волнового акустического каротажа (ВАК) [1—5] ориентирована по оси анизотропии горной породы, поляризованные изгибные волны (волна сдвига)  $XX$  и  $YY$  распространяются в „быстрых“ и „медленных“ направлениях, при этом энергия  $XX$  и  $YY$  сигналов максимальна, следовательно энергия сигналов  $XU$  и  $UX$  минимальна.

При произвольной ориентации прибора относительно оси анизотропии измеренной энергия  $XX$  и  $YY$  сигналов не будет максимальной, энергия сигналов  $XU$  и  $UX$  не будет минимальной, а коэффициент анизотропии, вычисляемый по значениям интервальных времен  $XX$  и  $YY$ , не будет отражать свойства горных пород.

Математический метод (вращения) — метод Алфорда — позволяет найти энергию сигналов в направлении осей анизотропии при любой ориентации прибора [6—8]. Несмотря на то что метод известен давно, его использование вызывает затруднения у разработчиков. Цель настоящей работы — описание реализации метода Алфорда с учетом опыта и современных аналитических решений.

Метод Алфорда в случае акустической анизотропии позволяет оценить азимутальное направление и некоторый показатель анизотропии (сначала оценивается отклонение направления анизотропии от оси  $X$  прибора, затем учитывается угол поворота прибора).

На каждой отметке глубины  $n$  на антенной решетке многоэлементного кроссдипольного прибора ВАК регистрируется четыре двумерных акустических массива  $xx(n,m)$ ,  $xu(n,m)$ ,  $ux(n,m)$ ,  $yy(n,m)$  откликов (рис. 1), где  $n$  — отметка текущего времени ( $n = 1-N$  отметок),  $m$  — номер группы приемников ( $m = 1-M$  приемников):

$$\begin{pmatrix} xx_{\theta} & ux_{\theta} \\ xy_{\theta} & yy_{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} xx & ux \\ xy & yy \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (1)$$

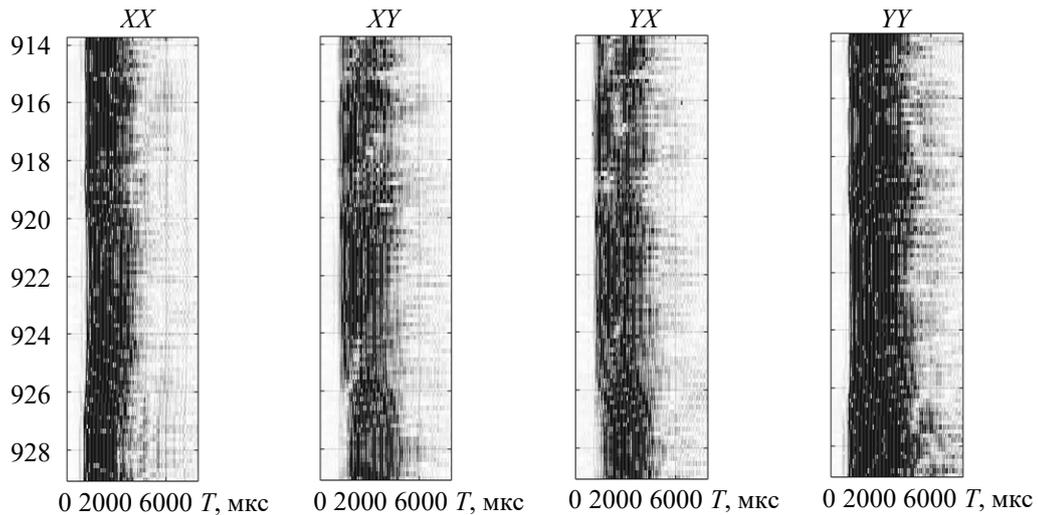


Рис. 1

Угол направления анизотропии оценивается минимизацией суммы перекрестных энергий [9—13]:

$$I_1(\theta) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left\{ |xy_{\theta}(n, m)|^2 + |yx_{\theta}(n, m)|^2 \right\} = E_{xy}(\theta) + E_{yx}(\theta) \quad (2)$$

либо минимизацией разностей перекрестных и прямых энергий [14]

$$I_2(\theta) = E_{xy}(\theta) + E_{yx}(\theta) - E_{xx}(\theta) - E_{yy}(\theta).$$

Однако сумма всех энергий постоянна

$$E_{xy}(\theta) + E_{yx}(\theta) + E_{xx}(\theta) + E_{yy}(\theta) \equiv \text{const}$$

и не зависит от угла поворота. При этом функция

$$I_2(\theta) = 2[E_{xy}(\theta) + E_{yx}(\theta)] - \text{const}$$

имеет те же экстремумы, что и  $I_1(\theta)$  (2) (рис. 2).

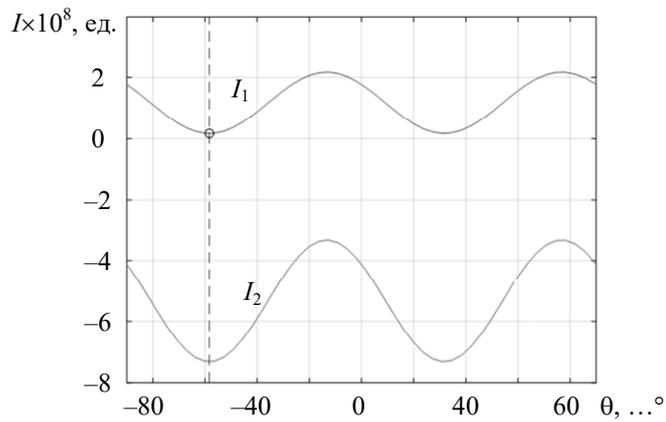


Рис. 2

Задача минимизации (2) имеет аналитическое решение для угла  $\theta$  [11, 15]. Решение [10] можно представить как

$$\theta_0 = \frac{1}{4} \text{atan2}(2C, B), \quad (3)$$

где

$$A = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left\{ xy(n, m)^2 + yx(n, m)^2 \right\};$$

$$B = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left\{ [xx(n, m) - yy(n, m)]^2 - [xy(n, m) + yx(n, m)]^2 \right\};$$

$$C = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left\{ [xx(n, m) - yy(n, m)] [xy(n, m) + yx(n, m)] \right\}.$$

Минимум и максимум суммы перекрестных энергий определяются как

$$\text{MinEne} = \min_{\theta} (I_1(\theta)) = I_1(\theta_0) = A + \frac{B}{2} \sin^2 2\theta_0 - \frac{C}{2} \sin 4\theta_0,$$

$$\text{MaxEne} = \max_{\theta} (I_1(\theta)) = A + \frac{B}{2} \cos^2 2\theta_0 + \frac{C}{2} \sin 4\theta_0.$$

В результате использования метода Алфорда при минимизации (2) получаем:

- 1) значение угла  $\theta_0$ ;
- 2)  $xx_{\theta}(n, m)$ ,  $yy_{\theta}(n, m)$  — два двумерных акустических массива  $N \times M$ , соответствующих углу  $\theta_0$ ;
- 3)  $E_{xx}(\theta_0)$ ,  $E_{xy}(\theta_0)$ ,  $E_{yx}(\theta_0)$ ,  $E_{yy}(\theta_0)$  — четыре оценки энергии.

Здесь отметим важную деталь — угол направления акустической анизотропии  $\theta_a$  должен быть определен в секторе  $-\pi/2 \leq \theta_a < \pi/4$  (или  $0 \leq \theta_a < \pi$ ), а  $\theta_0$  — в интервале  $-\pi/2 \leq \theta_0 < \pi/4$ . В полукруге сумма перекрестных энергий (2) (рис. 2) имеет два одинаковых минимума — один соответствует  $\theta_0$ , второй сдвинут на  $\pi/2$ .

С помощью метода Алфорда можно оценить следующие показатели анизотропии:

— анизотропия интервального времени. По реконструированным с помощью метода Алфорда двум двумерным массивам  $xx_{\theta}(n, m)$ ,  $yy_{\theta}(n, m)$  путем обработки методом сембланс [6] рассчитываются „быстрое“ и „медленное“ интервальные времена  $p_{\text{fast}}$  и  $p_{\text{slow}}$

$$\text{Ani}_p = 2 \frac{p_{\text{slow}} - p_{\text{fast}}}{p_{\text{slow}} + p_{\text{fast}}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

При этом если значение  $p_{\text{fast}}$  определено по  $xx_{\theta}(n, m)$ , то угол направления акустической анизотропии  $\theta_a$  совпадает с  $\theta_0$  ( $\theta_a = \theta_0$ ). Иначе выбирается второй минимум в полукруге  $\theta_a = \theta_0 \pm \pi/2$ ;

— анизотропия времени пробега. Учитывается разница во времени прибытия быстрой и медленной изгибных волн по двум двумерным массивам  $xx_{\theta}(n, m)$ ,  $yy_{\theta}(n, m)$ :

$$\text{Ani}_{\tau} = 2 \frac{\tau_{\text{slow}} - \tau_{\text{fast}}}{\tau_{\text{slow}} + \tau_{\text{fast}}} \cdot 100 \%;$$

— анизотропия энергии. Соотношение максимальной и минимальной перекрестной энергии также является мерой анизотропии, менее чувствительной к помехам измерений:

$$\text{Ani}_E = \frac{\text{MaxEne} - I_1(\theta_0)}{\text{MaxEne}} \cdot 100 \% \quad \text{или} \quad \text{Ani}_E = \frac{I_1(\theta_0)}{\text{const}} \cdot 100 \%.$$

Значения угла анизотропии, отмеченные пунктиром, получены по (4), точка на пересечении кривой  $I_1$  и пунктира — по (3).

Реализация метода Алфорда при обработке записей многоэлементного кроссдипольного волнового акустического каротажа не будет вызывать затруднений и не потребует больших вычислительных затрат, если:

- 1) вычисления начинать с расчета  $\theta_0$  по формуле (3);
- 2) далее по формуле (1) рассчитать для  $\theta = \theta_0$  два двумерных массива:  $xx_{\theta}(n, m)$ ,  $yy_{\theta}(n, m)$ ;
- 3) вычислить (методом сембланс [6] или оценкой первого вступления) для обоих массивов  $xx_{\theta}(n, m)$  и  $yy_{\theta}(n, m)$  два значения интервального времени изгибной волны. Учет или коррекцию дисперсии изгибных волн при оценке их интервальных времен можно выполнить с

помощью дисперсионного семблansa [17]. Минимальное (из двух значений) интервальное время обозначить как „быстрое“, максимальное — как „медленное“;

4) если „быстрое“ было определено по  $xx_0(n, m)$ , то принимаем  $\theta_a = \theta_0$ , если  $\theta_0 < 0$ , то  $\theta_a = \theta_0 + \pi/2$ , иначе  $\theta_a = \theta_0 - \pi/2$ .

5) на геофизический планшет целесообразно выводить „быстрое“ и „медленное“ интервальные времена, показатель анизотропии (4) и угол  $\theta_a$  (после поправки на угол поворота самого прибора), если разность распространения „быстрой“ и „медленной“ волны ( $\Delta T$ ) превышает 10—15 мкс/м (рис. 3).

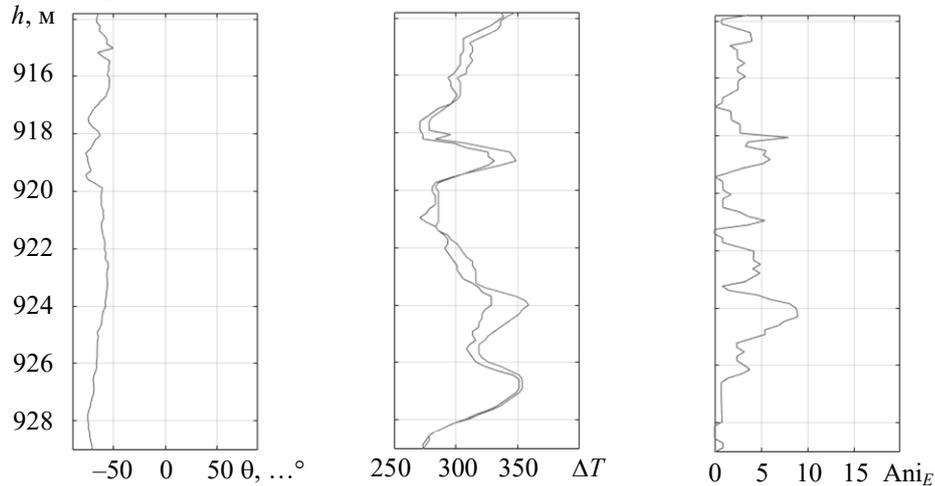


Рис. 3

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вершинин А. Г., Вершинин С. А., Добрынин С. В. Разработка современной аппаратуры волнового кроссдипольного акустического каротажа с применением компьютерного моделирования // Технологии сейсморазведки. 2013. № 1. С. 87—95.
2. Шумилов А. В., Белов С. В., Ташкинов И. В. Обработка данных кроссдипольного акустического каротажа в программном комплексе СОНАТА // НТВ „Каротажник“. 2014. № 10. С. 114—126.
3. Oshima A., Syresin D., Blyth M., Schmitt D. P. Advanced Dipole Shear Measurements with a New Logging while Drilling Sonic Tool // SPWLA 59th Annual Logging Symposium, Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, London, UK, 2—6 June 2018.
4. Tao G., Cheng A. C. H., Toksoz M. N. Measurements of Shear-Wave Azimuthal Anisotropy with Cross-Dipole Logs. Massachusetts Institute of Technology, Earth Resources Laboratory, 1997.
5. Wang P., Bose S., Sinha B. K., Lei T., Blyth M. LWD-DATC: Logging-While-Drilling Dipole Shear Anisotropy Estimation from Two-Component Waveform Rotation // The Journal of the Acoustical Society of America. 2017. Vol. 141, N 5. P. 3649—3649.
6. Alford R. M. Shear data in the presence of azimuthal anisotropy: Dilley, Texas // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1986. Society of Exploration Geophysicists, 1986. P. 476—479.
7. Patent US 10197691B2, Acoustic anisotropy and imaging by means of high resolution azimuthal sampling / J. A. Market, G. D. Althoff. Publ. 05.02.2019.
8. Nolte B., Cheng A. C. H. Estimation of Nonorthogonal Shear Wave Polarizations and Shear Wave Velocities from Four-Component Dipole Logs. Massachusetts Institute of Technology, Earth Resources Laboratory, 1996.
9. Коротков И. П., Кузнецов В. М., Шехтман Г. А., Череповский А. В. Особенности обработки данных многоволновой сейсморазведки // Технологии сейсморазведки. 2014. № 2. С. 51—69.
10. Briggs V., Rao R. V. N., Burns D. R. Simultaneous Inversion of cross-dipole acoustic waveforms in anisotropic media for azimuthal angle and dispersion of fast and slow shear waves. Massachusetts Institute of Technology, Earth Resources Laboratory, 2003.

11. Patent US 2017/0115421 A1. Method and System for Processing Dipole Anisotropy / *T. Endo, H. P. Valero, D. Syresin*. 2017.
12. *Kozak M., Kozak M., Williams J.* Azimuthal Shear wave Anisotropy Analysis, Guided in Time Domain // SPWLA 55th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. 18—22 May 2014.
13. Patent US 8102732. Anisotropy measurement while drilling / *J. Pabon, C. J. Hsu, B. K. Sinha*. 2012.
14. *Cataldo O. E. D., Kwiatkowski T. J., Marfurt K. J., Roche S. L., Thomas J. W.* 3D Alford rotation analysis for the Diamond M Field, Midland Basin, Texas // Interpretation. 2014. Vol. 2, N 2. P. SE63—SE75.
15. Patent US 9772420. Estimation of fast shear azimuth, methods and apparatus / *M. V. Collins*. 2017.
16. *Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З.* Сембланс — инструмент оценки скоростей составляющих пакета волнового акустического каротажа // НТВ „Каротажник“. 2016. № 8(266). С. 98—118.
17. *Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З.* Вычисление дисперсионного сембланса для волнового акустического каротажа // Геофизические исследования. 2017. Т. 18, № 4. С. 57—70.

#### Сведения об авторах

**Раис Дахиевич Ахметсафин**

— д-р техн. наук, доцент; Инжиниринговый центр МФТИ по трудноизвлекаемым полезным ископаемым, департамент цифровых технологий в индустрии; главный инженер проектов;  
E-mail: akhmetsafin.rd@cet-mipt.ru

**Римма Закиевна Ахметсафина**

— канд. техн. наук, доцент; Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, департамент программной инженерии факультета компьютерных наук; E-mail: rakhmetsafina@hse.ru

Поступила в редакцию  
04.10.19 г.

**Ссылка для цитирования:** *Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З.* Практическое применение метода Алфорда для оценки анизотропии по записям кроссдипольного акустического каротажа // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 2. С. 120—125.

### PRACTICAL APPLICATION OF THE ALFORD METHOD FOR ESTIMATING ANISOTROPY FROM CROSS-DIPOLE ACOUSTIC LOGGING RECORDS

R. D. Akhmetsafin<sup>1</sup>, R. Z. Akhmetsafina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MIPT Center for Engineering and Technology  
141700, Dolgoprudnyy, Moscow region, Russia  
E-mail: akhmetsafin.rd@cet-mipt.ru

<sup>2</sup>National Research University Higher School of Economics,  
101000, Moscow, Russia  
E-mail: rakhmetsafina@hse.ru

The Alford method is a modern tool for estimating anisotropy from cross-dipole acoustic logging records. The azimuthal angle of the acoustic anisotropy direction  $\theta$  is estimated by the minimum cross energy of the converted records. The interval times (speeds) of the fast and slow bending wave  $p_{fast}$ ,  $p_{slow}$  in the forward and reverse directions of anisotropy are estimated using the corresponding transformations. Practical implementation of the method is considered, using the analytical solution of the minimization problem.

**Keywords:** cross-dipole acoustic logging, acoustic anisotropy, bending waves, Alford method

#### REFERENCES

1. Vershinin A.G., Vershinin S.A., Dobrynin S.V. *Tekhnologii seismorazvedki* (Seismic Technologies), 2013, no. 1, pp. 87–95. (in Russ.)
2. Shumilov A.V., Belov S.V., Tashkinov I.V. *Science and technology bulletin "Karotazhnik"*, 2014, no. 10, pp. 114–126. (in Russ.)
3. Oshima A., Syresin D., Blyth M., Schmitt D.P. *SPWLA 59th Annual Logging Symposium*, Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, London, UK, 2–6 June 2018.
4. Tao G., Cheng A. C. H., Toksoz M. N. *Measurements of Shear-Wave Azimuthal Anisotropy with*

- Cross-Dipole Logs*, Massachusetts Institute of Technology, Earth Resources Laboratory, 1997.
5. Wang P., Bose S., Sinha B. K., Lei T., Blyth M. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, no. 5(141), pp. 3649–3649.
  6. Alford R.M. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1986*, Society of Exploration Geophysicists, 1986, pp. 476–479.
  7. Patent US 10197691, *Acoustic Anisotropy and Imaging by Means of High Resolution Azimuthal Sampling*, J.A. Market, G.D. Althoff, 2019.
  8. Nolte B., Cheng A.C.H. *Estimation of Nonorthogonal Shear Wave Polarizations and Shear Wave Velocities from Four-Component Dipole Logs*, Massachusetts Institute of Technology, Earth Resources Laboratory, 1996.
  9. Korotkov I.P., Kuznetsov V.M., Shekhtman G.A., Cherepovskiy A.V. *Tekhnologii seismorazvedki* (Seismic Technologies), 2014, no. 2, pp. 51–69. (in Russ.)
  10. Briggs V., Rao R. V. N., Burns D. R. *Simultaneous Inversion of cross-dipole acoustic waveforms in anisotropic media for azimuthal angle and dispersion of fast and slow shear waves*, Massachusetts Institute of Technology, Earth Resources Laboratory, 2003.
  11. Patent US 15333199, *Method and System for Processing Dipole Anisotropy*, T. Endo, H.P. Valero, D. Syresin, Pub. No. US 2017/0115421 A1, 2017.
  12. Kozak M., Kozak M., Williams J. *SPWLA 55th Annual Logging Symposium*, Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 18–22 May 2014.
  13. Patent US 8102732, *Anisotropy Measurement while Drilling*, J. Pabon, C.J. Hsu, B.K. Sinha, 2012.
  14. Cataldo O.E.D., Kwiatkowski T.J., Marfurt K.J., Roche S.L., Thomas J.W. *Interpretation*, 2014, no. 2(2), pp. SE63–SE75.
  15. Patent US 9772420, *Estimation of Fast Shear Azimuth, Methods and Apparatus*, M.V. Collins, 2017.
  16. Akhmetsafin R.D., Akhmetsafina R.Z. *Science and technology bulletin "Karotazhnik"*, 2016, no. 8, pp. 98–118. (in Russ.)
  17. Akhmetsafin R.D., Akhmetsafina R.Z. *Geophysical Research*, 2017, no. 4(18), pp. 57–70. (in Russ.)

#### Data on authors

- Rais D. Akhmetsafin** — Dr. Sci., Associate Professor; MIPT Center for Engineering and Technology, Department of Digital Technologies in Industry; Chief Project Engineer; E-mail: akhmetsafin.rd@cet-mipt.ru
- Rimma Z. Akhmetsafina** — PhD, Associate Professor; National Research University Higher School of Economics, Faculty of Computer Science, School of Software Engineering; E-mail: rakhmetsafina@hse.ru

**For citation:** Akhmetsafin R. D., Akhmetsafina R. Z. Practical application of the Alford method for estimating anisotropy from cross-dipole acoustic logging records. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 2. P. 120–125 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-2-120-125