

масс являются метеорные потоки. Данный вопрос будет рассмотрен дополнительно.

Заключение

Связь между пульсациями гравитационного и сейсмического полей однозначна и носит глобальный характер на земном шаре. Дальнейшее изучение пульсаций позволит установить более чётко их

физическую природу, чтобы использовать их для глубинного изучения Земли. В прикладном плане изучение пульсаций внесёт определенные коррективы в методику высокоточных измерений силы тяжести. Подобные гравиметрические (по аналогии с магнитными) «бури», которые произошли в январе — феврале 2015 г. (рис. 2, 4) могут в интервале в несколько суток свести на нет результаты высокоточных гравиметрических измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Ю.В. Пульсации неприливных вариаций силы тяжести // Изв. вузов. Геология и разведка. 2014. № 5. С. 54–57.
2. Антонов Ю.В. Структура и морфология неприливных вариаций силы тяжести // Геофизика. 2015. №1. С. 67–71.
3. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Сравнение приливных вариаций силы тяжести и вертикальной составляющей сейсмографа // Геофизика. 2013. №2. С. 27–31.
4. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Запаздывание приливной волны на суше // Геофизика, 2013., №6. С. 48–51.
5. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Особенности морфологии неприливных вариаций силы тяжести // Вестник ВГУ. 2014. Серия Геология. Вып.4. С. 129–133.
6. Антонов Ю.В., Воронцова Е.В. Предварительная обработка наблюдений лунно-солнечных вариаций силы тяжести // Геология и разведка. Изв. вузов. 2012. № 3. С. 63–67.
7. Богачёв С.А., Кириченко А.С. Солнечные вспышки // Земля и Вселенная. 2013. № 5. С. 3–15.
8. Дикий Л.А. Теория колебаний земной атмосферы Л.: Гидрометеиздат, 1969. 195 с.
9. Howard, Timothy A.; Harrison, Richard A. Stealth Coronal Mass Ejections: A Perspective // Solar Physics. July 2013. Volume 285. Issue 1. pp 269–280.

УДК 550.832.2

АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИПОЛЬНЫХ ВОЛН В СКВАЖИНАХ НЕКРУГОВОГО СЕЧЕНИЯ В АНИЗОТРОПНОЙ ПОРОДЕ

Г.С. ЩЕЛИК

Московский физико-технический институт
141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Московский научный центр Шлюмберже
119285, Россия, г. Москва, ул. Пудовкина, 13; e-mail: german.schelik@phystech.edu,

Исследован вопрос определения главных направлений анизотропной породы в скважинах с нарушением цилиндрической геометрии с помощью численного моделирования измерений акустического каротажа. Модель используемых на практике алгоритмов обработки предполагает распространение вдоль скважины двух ортогонально поляризованных волн, которые в рассматриваемых задачах соответствуют дипольным модам. На примере эллиптических скважин показано, что направления колебаний мод могут быть существенно неортогональными и зависеть от частотного спектра сигнала источника, что приводит к некорректному определению главных направлений трансверсально-изотропной породы. Полученные после обработки направления сопоставлены с независимым расчётом собственных векторов дипольных мод полуаналитическим методом конечных элементов (SAFE). Результаты сравнения свидетельствуют об эффективности применения частотных фильтров и «неортогональных» алгоритмов для проверки корректности найденных направлений и повышения точности значений углов.

Ключевые слова: акустический каротаж; эллиптическая скважина; анизотропия; Alford rotation.

ANALYSIS OF POLARIZATION OF DIPOLE MODES IN NON-CIRCULAR BOREHOLES IN ANISOTROPIC FORMATION

G.S. SCHELIK

Moscow Institute of Physics and Technology
141700, Russia, Moscow Region, Dolgoprudniy, Institutskiy per., 9;

Schlumberger Moscow Research
119285, Russia, Moscow, Pudovkinastr, 13; e-mail: german.schelik@phystech.edu,

The problem of determination of principle axes in anisotropic formation in non-circular boreholes is studied with numerical simulation of acoustic logging measurements. The processing algorithms for acoustic logging data used in practice involve propagation of two orthogonally polarized waves along borehole axis that correspond to dipole modes. However, the oscillation directions of dipole modes in elliptical boreholes are shown to be substantially non-orthogonal and depend on frequency spectrum of the source signal. This leads to incorrect determination of principle directions in the considered transversely-isotropic media. The results for principle directions obtained after processing are compared with eigenvectors for dipole modes calculated independently with semi-analytical finite element method (SAFE). The application of frequency filters and «non-orthogonal» processing algorithms is proved to be effective for validation and accuracy improvement of the obtained directions.

Key words: acoustic logging; elliptical borehole; anisotropy; Alford rotation.

Введение

Последние несколько десятилетий в акустическом каротаже широко и достаточно успешно практикуются методики кросс-дипольных измерений. Современные решения в технике и обработке полученных данных позволяют производить количественную оценку азимутальной и аксиальной (по отношению к стволу скважины) анизотропии для широкой группы горных пород. Кросс-дипольные измерения также могут быть использованы для определения ориентации крупных трещин и обнаружения анизотропии, индуцированной подземными горизонтальными напряжениями и трещиноватостью [9].

Как известно, в процессе измерений в трансверсально-изотропной (ТИ) породе наблюдается поляризация распространяющихся по стволу скважины поперечных волн. При наличии измерений от двух направленных ортогонально-ориентированных источников в скважине возможно определить направления главных осей ТИ модели и скорости распространения поперечных волн. В основе классического метода определения лежит допущение о симметричности матрицы измерений (составленной из данных четырёх измерений с различной ориентацией источников и приёмников), которая может быть приведена к диагональному виду ортогональным преобразованием [1].

Однако зачастую ортогональность направлений поляризации поперечных волн отсутствует. Во многих случаях, например, при распространении волн в анизотропной породе с орторомбическим типом симметрии [5] или в случае анизотропии вызванной наличием трещин [8], известно, что поляризация волн может быть существенно неортогональной. Чтобы учесть возможную неортогональность поперечных волн в однородной породе в [4] был рассмотрен способ диагонализации матрицы измерений некоторым неортогональным преобразованием, обобщающим [1] на этот случай.

В скважинах с деформированным стволом, в частности эллиптического сечения, дипольные моды распространяются с разными скоростями [10]. Для таких скважин в анизотропной породе предположения классического метода, а также его неортогонального обобщения, о независимом распространении волн также не выполняются (кроме случая, когда главные направления анизотропной

породы совпадают с осями эллипса). Сильное нарушение симметрии задачи не позволяет выделить направления поляризации мод и определить главные направления анизотропной породы.

Автором с помощью численного моделирования исследуется вопрос оценки погрешности определения главных направлений ТИ породы по измерениям в скважинах нецилиндрического сечения. Целями исследования являются: 1) выявление признаков, свидетельствующих о наличии большой ошибки в результатах определения главных направлений анизотропии при обработке методом Alford rotation, 2) изучение возможностей частотной фильтрации и «неортогональных» алгоритмов обработки для получения наиболее достоверных результатов по определению главных направлений, 3) разработка методики применения полуаналитического метода конечных элементов (SAFE) [2] для моделирования рассматриваемых задач и анализа структуры волнового поля в скважинах.

Ортогональный и неортогональный алгоритмы Alford rotation

В устройство классического прибора акустического дипольного каротажа входят два источника и массива приёмников направленного действия, ортогонально ориентированных один относительно другого. Свяжем с ориентацией источников и приёмников оси X и Y локальной системы координат прибора. В ходе работы прибора на выходе получают четыре разных массива значений акустического сигнала от времени, обозначаемых XX , XY , YX и YY , где первая буква — активный в момент проведения источник, а вторая — массив приёмников. Данные, полученные с приёмников на определённом расстоянии от источника, принято записывать в форме матрицы:

$$\mathbf{R} \begin{bmatrix} XX & YX \\ XY & YY \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Известно, что в однородной недисперсионной среде с ТИ типом симметрии в произвольном направлении могут распространяться три вида плоских волн (квазипродольная, поперечная и квазипоперечная) с ортогональными векторами поляризации. Дипольные излучатели в скважине возбуждают преимущественно моды с поперечным харак-

тером колебаний, которые распространяются вдоль скважины независимо один от другого. В рамках классического подхода для описания их распространения используется модель плоских волн. В данных предположениях исходную матрицу измерений (1) возможно приближённо представить в виде [4]:

$$\mathbf{R} = \mathbf{P} \mathbf{D} \mathbf{P}^T, \quad (2)$$

где $\mathbf{D}$ — диагональная матрица, содержащая чистые сигнатуры двух дипольных мод; матрица $\mathbf{P}$ проецирует сигналы отдельных мод на оси локальной системы координат прибора. Поскольку поляризации плоских волн ортогональны, то матрица преобразования $\mathbf{P}$ сводится к повороту на некоторый угол:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}.$$

Алгоритм поиска этого угла был представлен в [1] и получил название Alford rotation.

Для случаев, когда поляризация изгибных мод не является ортогональной, один из возможных вариантов обобщения Alford rotation был предложен в [4] и заключается в введении дополнительного угла β , характеризующего ориентацию главных направлений. Для приближенного представления (2) матрица преобразования будет иметь вид:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin(\alpha + \beta) \\ -\sin \alpha & \cos(\alpha + \beta) \end{pmatrix},$$

где α — угол, отсчитываемый против часовой стрелки между осью X и направлением поляризации первой моды, а $\alpha + \beta$ — угол между направлением поляризации второй моды и осью Y . При методе сводится к классическому Alford rotation. При обработке данных моделирования в данной работе используются следующие обозначения для найденных углов: ортогональный Alford rotation: $\alpha = 90^\circ$; неортогональный Alford rotation: $\alpha = \alpha_1, \beta = \beta_1$. Поиск значений углов производится через минимизацию энергии недиагональных компонент матрицы $\mathbf{D}$ по двум параметрам.

Вычислительные методы

В качестве исходных данных каротажных измерений используются результаты прямого моделирования распространения волн методом спектральных элементов (SEM). Ранее данный метод успешно применялся для расчёта задач геофизики [7] и моделирования акустического каротажа [3]. Численный алгоритм производит решение нестационарных уравнений колебаний линейно-упругой анизотропной породы и уравнений акустики для невязкой жидкости внутри скважины с соотве-

тствующими условиями на границе раздела фаз. Подробное описание и формулировка метода приведены в [7].

Основная обработка и анализ данных, в том числе и Alford rotation, проводились средствами MATLAB. Для построения дисперсионных кривых нормальных мод использовался алгоритм, основанный на модифицированном методе Прони [6]. При обработке данных измерений в некоторых случаях применялись низкочастотные и высокочастотные фильтры сигнала, реализованные в MATLAB.

Для анализа решения в частотной области в предположении однородности среды и геометрии по оси z был выбран более простой и быстрый по сравнению с SEM полуаналитический метод конечных элементов (SAFE) [2]. Формулировка метода основана на Фурье разложении искомой функции вдоль направления оси скважины, что позволяет свести задачу к набору двумерных постановок. Приведём краткое описание метода. Из предположения, что зависимость от времени является гармонической вида $e^{-i\omega t}$ для смещений $\mathbf{u}$, деформаций $\boldsymbol{\epsilon}$ и напряжений $\boldsymbol{\sigma}$, уравнения движения твёрдого тела в вариационной форме можно представить в виде:

$$\int_V \rho \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} \cdot \mathbf{u}^* dv + \int_V \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\epsilon}^* dv = \int_V \mathbf{f} \cdot \mathbf{u}^* dv + \int_V \mathbf{t} \cdot \mathbf{u}^* d\Gamma, \quad (3)$$

здесь $\mathbf{f}$, $\mathbf{t}$ — векторы объёмных и поверхностных сил, ρ — плотность, тензор напряжений $\boldsymbol{\sigma}$ связан с тензором деформаций $\boldsymbol{\epsilon}$ для упругого тела через закон Гука:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\epsilon}$$

При описании движения невязкой жидкости будем пользоваться формулировкой уравнений в терминах потенциала скорости ϕ : $\mathbf{u}_f = \nabla \phi$. Тогда давление в жидкости определяется выражением $p = -i \rho_f \phi$, а уравнения движения для жидкой среды в вариационной форме имеют вид:

$$\int_V \rho_f \frac{d^2 \phi}{dt^2} dv + \int_V c^2 \nabla^2 \phi dv = \int_V \mathbf{f} \cdot \nabla \phi dv + \int_V \mathbf{t} \cdot \nabla \phi d\Gamma, \quad (4)$$

где c — скорость звука в жидкости.

Свяжем вертикальную ось скважины с направлением оси z системы координат и применим преобразование Фурье по z к исходным уравнениям. Для каждого элемента из сетки конечных элементов в плоскости поперечного сечения скважины значения искоемых величин аппроксимируем системой базисных функций $N_j(x, y)$:

$$u^{(e)}(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^n N_j(x, y) U_x^{(j)} e^{i(kz - t)} + \sum_{j=1}^n N_j(x, y) U_y^{(j)} e^{i(kz - t)} + \sum_{j=1}^n N_j(x, y) U_z^{(j)} e^{i(kz - t)}, \quad (5)$$

$$u^{(e)}(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^n N_j(x, y) U^{(j)} e^{i(kz - t)},$$

где n — число узлов в элементе с номером e .

С учётом условий на границе раздела жидкости и твёрдого тела при подстановке неизвестных (5) в уравнения (3) и (4) задача сводится к системе линейных уравнений [2]:

$$(K_1 + ikK_2 + k^2K_3 - iP)\hat{U} = \hat{F}, \quad (6)$$

где матрицы K_1 , K_2 , K_3 , M , P формируются из значений объёмных и поверхностных интегралов в уравнениях (3) и (4) на элементах, а $\hat{U}$ состоит из значений искомых величин $U^{(j)}$ и $U^{(j)}$ в узлах каждого элемента.

Для каждого заданного значения частоты формулируется обобщённая задача на собственные значения для матрицы уравнения (6), решением которой являются пары собственных значений и векторов $[k_m, \hat{U}_m]$, соответствующие различным волновым модам системы. Специальный отбор собственных векторов позволяет выделить компоненты волнового поля, соответствующие дипольным модам в скважине. Градиент значений выбранного собственного вектора внутри скважины указывает направление колебаний частиц для конкретной моды. Если на некотором диапазоне частот эти направления меняются незначительно, будем говорить о поляризации такой локализованной в частотной области волны. Сравнение таких модельных направлений поляризации с результатами, полученными прямой обработкой временных сигналов с приёмников, рассчитанных методом спектральных элементов, приведены ниже.

Результаты обработки алгоритмом Alford rotation

Для имитации результатов измерений в численных расчётах использовалась типичная для акустических каротажных приборов схема (рис. 1). Шестнадцать групп приёмников сигнала, фиксирующих давление, расположены вдоль оси скважины и равноудалены один от другого. Каждая группа содер-



Рис. 1. Схема модельных измерений

жит по восемь приёмников равномерно распределённых по азимуту. Дипольный источник излучает колебания в одном из двух ортогональных направлений (во всех приведённых в работе расчётах направления дипольного источника не совпадают с осями симметрии анизотропной породы или поперечного сечения скважины). В качестве сигнала по времени дипольного акустического источника в скважине была взята производная вейвлета Блэкмана-Харриса с центральной частотой 4 кГц.

Матрица измерений R , полученная при моделировании, не является строго симметричной из-за наличия шума в сигналах. Чем меньше отношение E_{rel} суммы квадратов значений недиагональных компонент матрицы D , полученной после преобразования матрицы измерений, тем лучше работает алгоритм диагонализации и тем достовернее значения полученных углов. При обработке эталонных имитируемых измерений в цилиндрической скважине величина E_{rel} имеет значения порядка 10^{-7} ; угол совпадает с заданным модельным значением до десятых долей градуса. Эти значения имеют порядок погрешности численного метода и алгоритма обработки.

Для оценки влияния несимметричности формы скважины на результат работы Alford rotation и его неортогонального обобщения были рассмотрены примеры эллиптических скважин в ТИ породах Bakken Shale [12] и Cotton Valey Shale [11]. Обе породы относятся к сланцам и имеют скорость распространения поперечных волн, превышающую скорость звука в жидкости в скважине («быстрые породы»). Значение упругих постоянных материалов приведены в табл. 1. Ось симметрии ТИ породы наклонена по отношению к оси скважины под углом 90° (горизонтальная трансверсальная изотропия), искомый угол поворота оси симметрии в плоскости поперечного сечения скважины равен 45° . В расчётах использовались скважины с размерами полуосей 12,70 10,16 см и 15 10 см. Модельные осредненные сигнатуры давления с приёмников для измерения XX представлены на рис. 2, а, б.

Таблица 1

Параметры упругих анизотропных материалов

Название	Плотность, кг/м ³	Модули упругости, ГПа					
		C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{33}	C_{44}	C_{66}
Cotton Valey Shale	2640	74,73	14,75	25,29	58,84	22,05	29,99
Bakken Shale	2230	40,9	10,3	8,5	26,9	10,5	15,3

Примечание. Порода Cotton Valey Shale отобрана с глубины 3000 м с месторождения в восточном Техасе, США, относится к глинистым сланцам [11]; порода Bakken Shale — с глубины 3000 м в бассейне Виллистона в Монтане, США, относится к илистым сланцам, насыщенным керогенами [12].

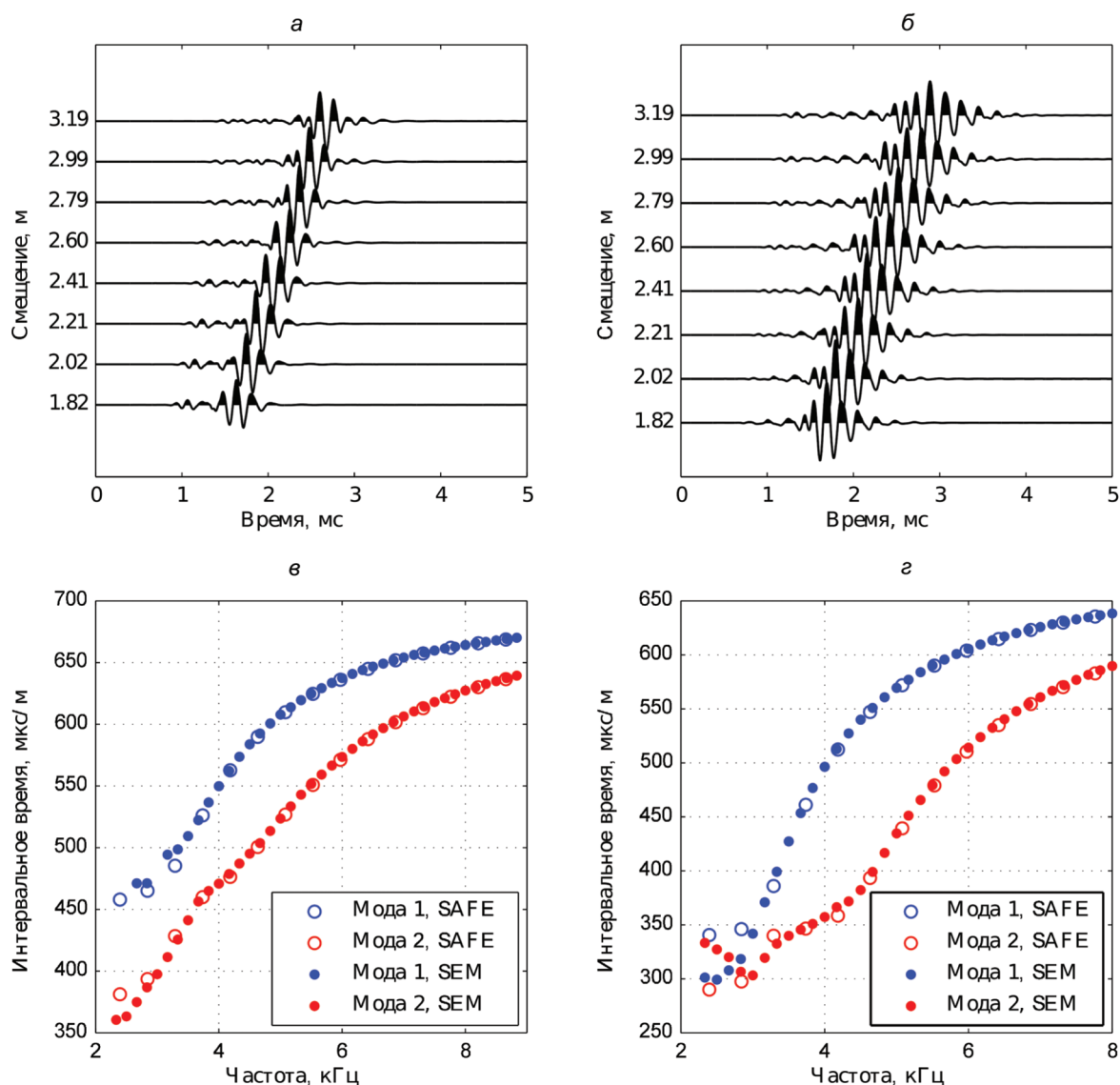


Рис. 2. Исходные сигнатуры давления для измерения XX, смоделированные в SEM, а также дисперсионные кривые для двух дипольных мод в эллиптических скважинах (15 10 см) в породах BakkenShale [12] (а, в) и CottonValeShale [11] (б, з); дисперсионные кривые на графиках независимо получены модифицированным методом Прони (на основе данных моделирования SEM) и методом SAFE

Оба алгоритма на исходных модельных данных дают примерно одинаковые результаты для углов поворота (табл. 2). Полученные главные направле-

ния почти ортогональны, но значительно отличаются от заданных в модели значений 45° и -45° . При этом в недиагональных компонентах преобразованных матриц измерений остаётся достаточно мало энергии — от 1 до 3 %. Такой результат для матрицы из полевых данных можно считать достаточно хорошим с практической точки зрения, но при этом вычисленные направления главных осей анизотропной породы не совпадают с физическими.

В [10] было показано, что в эллиптических скважинах на низких частотах форма поперечного сечения почти не оказывает влияния на распространение волн, а определяется свойствами породы. Рассмотрим, как результат обработки зависит от частотного спектра входящего сигнала. Особенностью распространения дипольных колебаний в скважине является большая дисперсия. С по-

Таблица 2

Результаты обработки исходных данных алгоритмами Alford rotation

Модель	α_1	α_2	β_1	β_2	n	$E_{rel}^o, \%$	$E_{rel}^n, \%$
Bakken Shale (12,70 10,16)	15,6	14,7	-74,4	-73,9	1,4	3,0	3,0
Bakken Shale (15,00 10,00)	8,4	8,1	-81,6	-81,6	0,3	1,7	1,7

Примечание. Здесь α_1 , α_2 и β_1 , β_2 соответствуют результатам в градусах, полученным ортогональной и неортогональной версией алгоритма; величина E_{rel} обозначает отношение энергии недиагональных компонент матрицы измерений к полной энергии.

Таблица 3

Результаты обработки данных после применения фильтров

Модель	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_3	$E_{rel}^o, \%$	$E_{rel}^n, \%$
Bakken Shale (12,70 10,16)	15,6	14,7	-74,4	-73,9	1,4	3,0	3,0
Bakken Shale с НЧФ	49,4	40,5	-40,6	-35,4	14,1	2,0	1,2
Bakken Shale с ВЧФ	14,0	13,3	-76,0	-75,6	1,2	0,4	0,4
Bakken Shale (15,00 10,00)	8,4	8,1	-81,6	-81,6	0,3	1,7	1,7
Bakken Shale с НЧФ	41,2	25,7	-48,8	-32,0	32,3	22,1	12,0
Bakken Shale с ВЧФ	7,5	10,2	-82,5	-82,6	2,8	1,1	1,0
Cotton Valey Shale (12,70 10,16)	3,3	3,0	-86,7	-86,7	0,3	0,8	0,8
Cotton Valey Shale с НЧФ	48,4	39,7	-41,6	-35,5	14,8	9,7	7,0
Cotton Valey Shale с ВЧФ	2,8	3,3	-87,2	-87,4	0,7	0,5	0,5
Cotton Valey Shale (15,00 10,00)	1,6	1,8	-88,4	-88,4	0,0	0,6	0,6
Cotton Valey Shale с НЧФ	6,0	7,7	-84,0	-56,6	25,7	7,9	7,3
Cotton Valey Shale с ВЧФ	1,5	2,0	-88,5	-88,7	0,7	1,8	1,8

Примечание. Здесь σ_1 , σ_2 и σ_1 , σ_2 соответствуют результатам, полученным ортогональной и неортогональной версиями алгоритма; величина E_{rel} обозначает отношение энергии недиагональных компонент матрицы измерений к полной энергии. НЧФ и ВЧФ соответствуют низкочастотной (НЧФ) и высокочастотной (ВЧФ) фильтрации, применённой к исходным данным.

мощью модифицированного метода Прони [6], были построены дисперсионные кривые для гармоник исходного сигнала с наиболее высокой амплитудой (рис. 2, в, г). В моделируемых задачах они соответствуют двум главным дипольным модам.

По этим кривым для каждой породы выделен диапазон низких частот, где скорость распространения волны почти постоянна и близка к одной из скоростей поперечных волн, а также диапазон высоких частот с достаточно постоянной скоростью распространения.

Для выделенных таким образом частотных диапазонов сконструированы низкочастотные и высокочастотные фильтры с конечной импульсной характеристикой, которые были применены к исходным матрицам измерений перед обработкой. Полученные на основе фильтрованных данных оценки углов гораздо ближе к модельным значениям, чем значения от нефильтрованного сигнала (табл. 3). На низких частотах при обработке фильтрованных данных наблюдается заметная неортогональность между направлениями поляризации дипольных мод. Применение высокочастотных фильтров, напротив приводит к почти полностью ортогональному результату, близкому к направлениям осей эллипса.

Сравнение решений SAFE с результатами обработки решений SEM

Полуаналитический метод конечных элементов использует представление решения для волнового поля в скважине волн в виде суммы мод. Основная энергия в волне, возбуждаемой дипольным источником, содержится в дипольных модах, поэтому из

всего набора собственных векторов выбраны те, которые соответствуют именно этим колебаниям. Градиент значений собственного вектора в скважине позволяет получить направление преимущественного колебания частиц на некоторой частоте. В породах, выбранных для моделирования, эти направления существенно меняются от 4 до 6 кГц [13]. Но в зонах пропускания используемых низкочастотных и высокочастотных фильтров изменения направлений градиентов собственных векторов невелики. Для сравнения с результатами обработки Alford rotation (табл. 3) выбраны собственные вектора для дипольных мод на частоте, соответствующей максимумам энергии в спектре фильтрованных данных (рис. 3).

На представленных изображениях хорошо видна неортогональность градиентов собственных векторов дипольных мод на низких частотах. Заметим также, что в этом частотном диапазоне результат практически не отличается для двух выбранных геометрий скважин. Если сопоставить направления градиентов с углами, полученными с помощью Alford rotation, то наиболее близкими к ним окажутся результаты, полученные неортогональным алгоритмом. Отсутствие точного соответствия объясняется более широким спектром исследуемого сигнала, в котором характер колебаний может быть лишь приближен собственными векторами дипольных мод на одной частоте. Тем не менее представленное сравнение объясняет, почему полученные алгоритмом Alford rotation направления не совпадают с заданной в изначальной модели ориентацией оси симметрии трансверсально-изотропной породы. Этот пример демонстрирует ограниченность применения классического подхода оценки главных направлений ТИ породы в задачах такого типа.

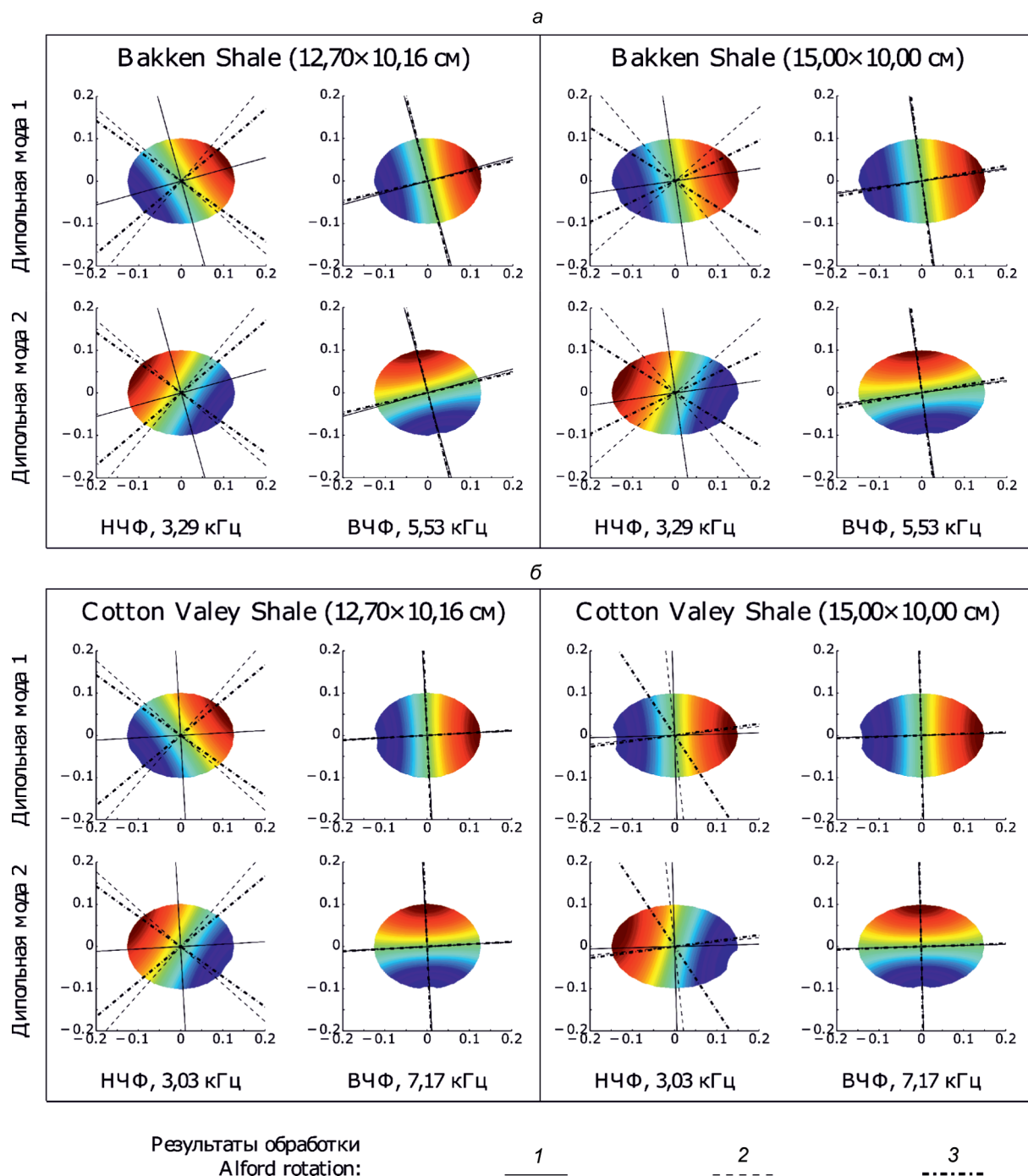


Рис. 3. Сравнение результатов обработки фильтрованных данных измерений и значений собственных векторов дипольных мод на частоте, соответствующей максимуму энергии в спектре сигнала, в породе Bakken Shale [12] (а) и Cotton Valey Shale [11] (б). Распределение давления (собственный вектор) в сечении скважины показано цветом, синие и красные участки соответствуют минимальному и максимальному значениям соответственно. НЧФ и ВЧФ — низкочастотная и высокочастотная фильтрации, применённые к исходным данным; 1 — ортогональная обработка без фильтрации, 2 — ортогональная обработка с фильтрацией, 3 — неортогональная обработка с фильтрацией

Результаты обработки нефильрованного сигнала в рассмотренных задачах, как следует из данных таблиц, в целом дают близкие значения к результатам обработки сигнала после применения высокочастотного фильтра. Интересно, что при этом поляризация мод почти ортогональна, но не совпадает с направлениями полуосей эллипса поперечного сечения скважины. При увеличении

степени эллиптичности ствола это различие уменьшается. Таким образом, даже при корректной (с точки зрения диагонализации матрицы измерений) работе алгоритма полученное значение угла на направление главной оси анизотропного материала может не отвечать ни физическим свойствам породы, ни геометрической ориентации скважины.

Заключение

Приведённые в работе расчёты показывают, что деформация ствола скважины может значительно влиять на результат работы алгоритмов определения главных направлений анизотропной породы в случаях, когда характерные направления деформации и анизотропии не совпадают. Изменение формы приводит к появлению неортогональности направлений поляризации дипольных мод, а также к зависимости этих направлений от частотного спектра распространяющейся волны. Таким образом, неортогональная модификация алгоритма Alford rotation позволяет выявить на этапе обработки данных признаки возможного несоответствия результата физическим свойствам породы.

Применение частотных фильтров, сужающих спектр исходных данных измерений в низкочастотную область, позволяет получить более точные оценки главных направлений. Рассмотренные в работе примеры демонстрируют, что ортогональность направлений, полученных в ходе обработки, не является критерием корректности результата — необходимо отсутствие значительной зависимости получаемого ответа от параметров фильтра и ширины временного окна. Недостатком обработки измерений в низкочастотной области является, очевидно, резкое падение

энергии приходящего сигнала по сравнению с естественными шумами.

Результаты обработки каротажных измерений в быстрых породах ортогональным и неортогональным методами, основанными на диагонализации матрицы измерений, определяются поляризацией нормальных мод на высоких частотах. Данный вывод является достаточно интересным, так как, несмотря на продемонстрированную сильную частотную зависимость направлений собственных векторов дипольных мод, поперечная поляризация волн всего сигнала в целом существует и хорошо согласуется с высокочастотными решениями, полученными SAFE.

Приведённый материал демонстрирует возможности спектральных алгоритмов, построенных на основе полуаналитического метода конечных элементов, для анализа и интерпретации особенностей волнового поля в скважинах. Высокая скорость расчётов, а также возможность распространения метода на среды с более общим типом анизотропии, затуханием и начальными напряжениями открывает широкие перспективы применения рассмотренной методики для улучшения качества обработки каротажных измерений.

Работа выполнена на базе Московского научно-го центра Шлюмберже при финансовой и экспертной поддержке Лаборатории флюидодинамики и сейсмоакустики МФТИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alford R.M. Shear data in the presence of azimuthal anisotropy: Dilley Texas // SEG Technical Program Expanded Abstracts. Society of Exploration Geophysicists, 1986. P. 476–479.
2. Bartoli I., Marzani A., L. di Scalea F., Viola E. Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary cross-section // Journal of Sound and Vibration. 2006. V. 295, N. 3–5. P. 685–707.
3. Charara M., Vershinin A., Deger E. et al. 3D spectral element method simulation of sonic logging in anisotropic viscoelastic media // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2011. P. 432–437.
4. Dellinger J., Etgen J., Nolte B. Symmetric alford diagonalization // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 1998. P. 1673–1676.
5. Dellinger J., Nolte B., Etgen J.T. Alford rotation, ray theory, and crossed-dipole geometry // Geophysics. 2001. V. 66, N. 2. P. 637–647.
6. Ekstrom M.P. Dispersion estimation from borehole acoustic arrays using a modified matrix pencil algorithm // Proceedings of ASIOMAR-29. 1995. P. 449–453.
7. Komatitsch D., Tromp J. Introduction to the spectral element method for three dimensional seismic wave propagation // Geophysical Journal International. 1999. V. 139, N. 3. P. 806–822.
8. Nolte B., Cheng A.C.H. Estimation Of Nonorthogonal Shear Wave Polarizations And Shear Wave Velocities From Four-Component Dipole Logs // Technical report, Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory. 1996. 20 p.
9. Patterson D., Tang X.M. Shear wave anisotropy measurement using cross-dipole acoustic logging: An overview // Petrophysics. 2001. V. 42, N. 2. P. 107–117.
10. Randall C.J. Modes of noncircular fluid-filled boreholes in elastic formations // The Journal of the Acoustical Society of America. 1991. V. 89, N. 3. P. 1002–1016.
11. Tosaya C.A. Acoustical properties of clay-bearing rocks. // Ph.D. thesis. Stanford University. 1982. 147 p.
12. Vernik L., Nur A. (1990). Ultrasonic velocity and anisotropy of petroleum source rocks: The bakken formation. // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 1990. P. 845–848.
13. Zharnikov T.V., Syresin D.E. Repulsion of dispersion curves of quasidipole modes of anisotropic waveguides studied by finite element method. // The Journal of the Acoustical Society of America. 2015. V. 137, N. 6. P. EL396–EL402.