

УДК 550.834.015.2

Н. А. Смирнов

ООО «Нефтегазгеофизика»

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ТРЕЩИН НА ИНТЕРВАЛЬНЫЕ ВРЕМЕНА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В СКВАЖИНЕ (ЗНАЧЕНИЯ ЭФФЕКТОВ АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ)

Путем проведения кросс-дипольных измерений в моделях, имитирующих скважины, показаны эффекты от одноосного сжатия и одиночной трещины. Установлено, что величины эффектов соизмеримы, а их направление перпендикулярно плоскости поляризации «быстрой» поперечной волны. Анализ измерений в реальных горизонтальных и наклонных скважинах показывает, что наблюдаемые в них эффекты, влияющие на параметры поляризованных поперечных волн, могут быть объяснены результатами модельных экспериментов.

Ключевые слова: горные породы, акустическая анизотропия, трещиноватость, кросс-дипольный акустический каротаж.

Акустическая анизотропия – различие скоростей упругих волн в зависимости от направления распространения – известна и обсуждается уже около двухсот лет [10]. Первоначально она рассматривалась касательно упругих свойств кристаллов [4] и только в последние декады двадцатого века приобрела значение в разведочной геофизике [15]. Внимание геофизиков к акустической анизотропии* горных пород, прежде всего, привлекли работы Crampin [8], в которых говорится о существенном влиянии трещиноватости на скоростные характеристики упругих волн. Также в этих работах было открыто явление «расщепления» (splitting) поперечной волны, что принципиально позволяет определить направление и плотность трещин в горной породе.

Изучение акустической анизотропии горных пород началось методами наземной сейсморазведки [6]. Появление в конце двадцатого века новой техники акустического каротажа, основанной на применении

* В начале 60-х годов прошлого века во ВНИИГРИ (сектор трещинных коллектиров, зав. сектором Е. М. Смехов) Ю. И. Кузнецовым и Б. В. Позиненко были выполнены фундаментальные исследования по анизотропии горных пород относительно их упругих свойств и влиянию трещиноватости на эти свойства. Оба исследователя тогда же успешно защитили диссертации по этой тематике. (Прим. ред.)

дипольных электроакустических преобразователей, позволило возбуждать и регистрировать в скважине поляризованные поперечные колебания [9, 12]. Таким образом, к решению задачи по изучению анизотропии стали привлекаться и каротажные данные. Однако в силу различия в системах наблюдения в сейсморазведке и в акустическом каротаже существенно различие измеряемых параметров, используемых для расчета акустической анизотропии.

1. Если в сейсморазведке измеряется разница скоростей волн, распространяющихся вдоль и поперек напластования осадочных горных пород, то есть определяются параметры Томсена [14], то при каротаже (чаще всего выполненного в вертикальной скважине) речь может идти только об азимутальной анизотропии, то есть об условленной различием скоростей поперечных колебаний вдоль различных участков стенки скважины. *Методики, основанные на использовании расчетных значений скорости поперечной волны по значениям скорости волны Стоунли [1], которая принимается как скорость вдоль напластования, явно надуманные. Во-первых, волна Стоунли – поверхностная, и ее параметры определяются прискажинной зоной в несколько сантиметров. Во-вторых, ее скорость измеряется в направлении, параллельном оси скважины, то есть в том же самом, что и других волн. И наконец эта волна по своей природе мало чем отличается от изгибной волны, возбуждаемой дипольным излучателем, как по форме движения в колебательном процессе частиц среды, так и по глубинности.*

2. В сейсморазведке используются усредненные значения скоростей и плотностей горных пород, поэтому параметры Томсена рассчитываются на основе элементов тензора напряжений, по размерности совпадающих с модулями упругости (для чаще всего встречающихся трансверсально-изотропных сред это C_{11} , C_{12} , C_{33} , C_{44} , C_{66}). В акустическом каротаже из-за большой изменчивости интервальных времен и объемных плотностей по стволу скважины в качестве показателя азимутальной анизотропии более удобно использовать относительное изменение интервального времени поперечных колебаний по самому быстрому и самому медленному направлению [2].

В литературе называются три главные причины азимутальной анизотропии:

1. Ориентированная слоистость некоторых видов горных пород, например сланцев.

2. Напряжение (стресс), как глобальный, имеющий место в геосинклинальных областях, так и обусловленный горным давлением в наклонных скважинах.

3. Вертикальная трещиноватость, как естественная, так и вызванная гидроразрывом при проведении работ по интенсификации притоков.

Поскольку при макроисследованиях принято, что причиной трещиноватости пород является глобальный стресс, то и при расщеплении поперечной волны наиболее высокоскоростным направлением считается совпадающее с направлением плоскостей трещин. Это предположение было автоматически перенесено в акустические каротажные измерения. Однако следует иметь в виду, что глубинность дипольных каротажных измерений – всего несколько сантиметров, особенно когда интервальное время поперечной волны определяется через интервальное время поверхностной волны [3]. С самого начала промышленного внедрения дипольного акустического каротажа было принято при обработке данных использовать волновой пакет изгибной волны и вычислять ее скорость методом STC [11] (метод максимального подобия волнового пакета волны в волновых картинах нескольких точек приема), доминировавшим в то время. Хотя почти сразу выяснилось, что изгибная волна, как всякая поверхностная волна, обладает существенной частотной дисперсией, и поэтому метод STC дает неверный результат. Исправление метода обработки привело к появлению дисперсионных методов, позволяющих улучшить результат [5, 13]. В дисперсионных методах вместо распределения интервальное время = f (время распространения) строится распределение интервальное время = f (частота). Утверждается, что при нулевой частоте интервальное время изгибной волны равно интервальному времени волны поперечной (объемной). Так как для упругих колебаний скважина является механическим полосовым фильтром, то в спектре акустических сигналов на частотах ниже 2 кГц нет гармоник с амплитудами, соизмеримыми с гармониками, имеющими место в диапазоне частот максимальных значений функции возбуждения (3–6 кГц). При вычислении дисперсионной кривой ее значение при частотах ниже 2 кГц экстраполируется, что всегда связано с большими ошибками. И вот уже один из основоположников методов обработки дипольных данных задается вопросом: «А можем ли мы доверять значениям скорости поперечной волны?» [7]. Речь идет о способе пересчета скорости изгибной волны в скорость объемной поперечной волны.

Как правило, такой способ определения скорости (интервального времени) поперечной волны связан с большими ошибками, о чем можно судить по рассчитанным значениям коэффициента Пуассона.

Более того, в некоторых теоретических публикациях [12] утверждается, что по мере удаления от стенки скважины быстрая волна становится медленной, и наоборот, то есть происходит переход дисперсионных кривых. Переход дисперсионных кривых изгибной волны предлагается использовать для идентификации наличия стресса, но это означает, что направление действия напряжений в породе трудно определяемо. По мере удаления от стенки скважины оно изменяется минимум на 90°.

Экспериментальные работы на предмет связи деформаций в горной породе с параметрами поляризованных поперечных волн в скважине немногочисленны и не дают однозначного ответа на вопрос величины эффектов от стресса и трещин на параметры волн. Чтобы выяснить величину эффектов от одностороннего сжатия и единичной трещины, автором настоящей статьи были выполнены эксперименты на моделях в контролируемых лабораторных условиях.

Модели и оборудование

В качестве модели скважины использован цементный (цемент марки 500) блок цилиндрической формы с отверстием диаметром 25 мм, проходящим вдоль оси. В экспериментах использованы два блока с внешним диаметром 150 мм и высотой 600 мм (рис. 1). Блоки получены заливкой чистого цементного раствора в тонкостенную пластмассовую трубу с установленным на оси трубы фторопластовым стержнем, который вынимался из модели после затвердения цементного раствора. Блоки после затвердевания на несколько недель помещались в водяную ванну, в которой и проводились дальнейшие измерения. С одного (нижнего) торца модели установлены монопольный и кросс-дипольный излучатели, а с другого помещены монопольный и кросс-дипольный приемники. Приемники имеют возможность перемещаться в отверстии вдоль оси модели. Видимая частота излучения – около 60 кГц, таким образом, длина излучаемой поперечной волны больше диаметра отверстия и меньше толщины стенки модели, что соответствует соотношениям для дипольного акустического каротажа в скважине, «пробуренной» в бесконечно

упругой среде. Интервальные времена продольной и поперечной волн определены профильными измерениями с шагом 25 м.м. Измерения проведены по волновым картинам, зарегистрированным на точках наблюдения цифровым осциллографом Tektronix TDS 3034C (рис. 2). Волновые картины загружались в компьютерную программу обработки данных аппаратуры АВАК, что обеспечило более-менее точное измерение интервальных времен. Точность измерений не являлась в данном эксперименте главной целью, поэтому достигались погрешности на уровне 3–5%, то есть обычные значения погрешностей при акустическом каротаже. Главной задачей являлась оценка величины эффектов, превышающих погрешность измерений по крайней мере в два раза, поскольку более мелкие эффекты однозначно не распознаются при реальных каротажных измерениях. Одна модель использована для оценки эффекта одноосного сдавливания, другая – единичной трещины на интервальное время поляризованной поперечной волны.

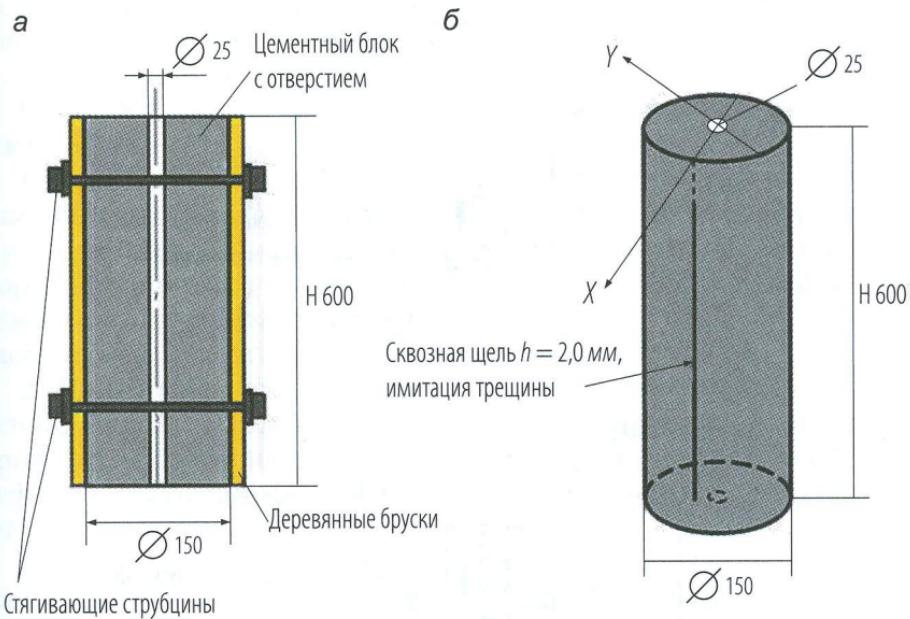


Рис. 1. Схематичное изображение моделей для изучения влияния горизонтальных напряжений (а) и одиночной вертикальной трещины (б) на параметры распространения поляризованной поперечной волны

Оценка влияния одноосных горизонтальных напряжений производилась при сдавливании блока двумя деревянными брусками, сжимаемыми двумя струбцинами (рис. 1, а). Усилие сдавливания было ниже усилия разрушения модели (около 500 кгс), что примерно соответствует дифференциальному давлению на глубине около 3000 м.

Одиночная трещина имитировалась вертикальным пропилом шириной 2 мм. Пропил выполнен отрезным кругом от внешней поверхности модели до отверстия (скважины), с двух противоположных сторон (рис. 1, б).

Осциллограф Tektronix TDS3034C

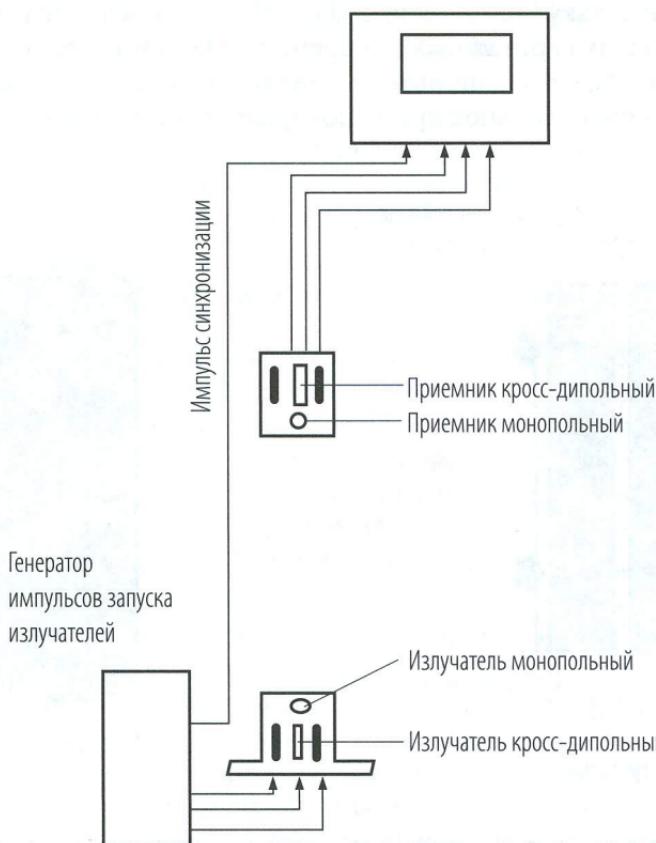


Рис. 2. Схема оборудования для проведения измерений в моделях, показанных на рис. 1

Результаты измерений в моделях

Измерения интервальных времен поперечной волны выполнены при такой ориентации диполей, когда один из дипольных зондов (излучатель-приемник) находился в плоскости сдавливающего усилия или имитации трещины (XX), а второй, соответственно, в плоскости, ортогональной первой (YY). Таким образом, один профиль дипольных измерений позволяет определить интервальные времена поперечной волны по двум принципиальным направлениям (XX и YY), причем направление XX соответствует плоскости создаваемого дефекта, а YY – перпендикулярной ей плоскости. Результаты измерений приведены в таблице. Вид волновых картин показан на рис. 3 и 4. Первоначально производились измерения в моделях до внесения дефектов.

Волновые картины продольной волны, зарегистрированные монопольным зондом, при всех измерениях идентичны, и различия интервальных времен продольной волны не выходят за пределы погрешности измерений, поэтому внимание сосредоточено на поведении только поляризованной поперечной волны.

Результаты измерений в моделях позволяют сделать следующие заключения.

1. Полученные значения ΔT_s соответствуют интервальным временам объемных поперечных волн, поскольку значение коэффициента Пуассона 0,33–0,34 находится в пределах, характерных для неметаморфизованного известняка, то есть типичных значений затвердевшего цементного раствора. Следовательно, имеет место оценка влияния рассматриваемых дефектов именно на объемные волны.

2. По отношению к исходным значениям ΔT_s эффекты от однозначного сжатия и трещины существенно различаются. Если сжатие приводит к изменению интервального времени в пределах 5%, то дефект в виде одиночной трещины существенной ширины изменил интервальное время более чем на 20%.

3. Относительные различия интервальных времен по двум принципиальным направлениям XX и YY, которые в реальных каротажных измерениях будут фиксироваться как интервальные времена «быстрой» и «медленной» волн, не столь различны и составляют 6 и 9% соответственно.

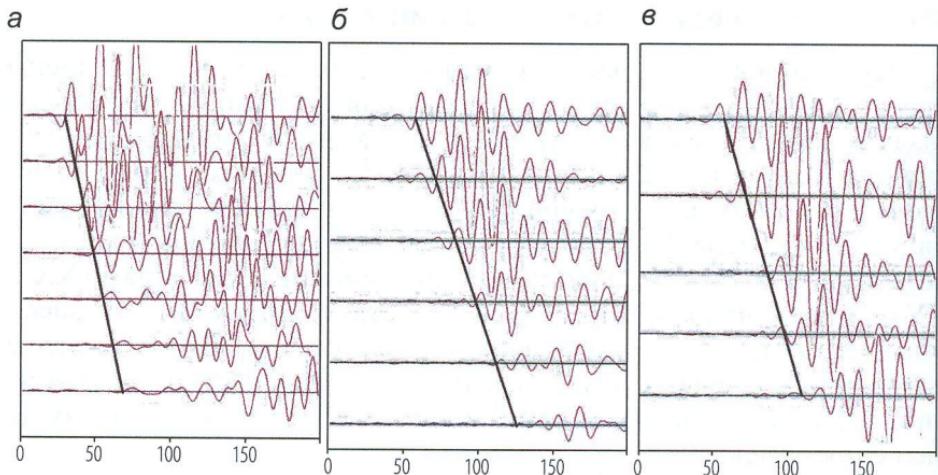


Рис. 3. Волновые картины монопольного (а) и дипольных (б, в) зондов в модели 1, использованной для оценки влияния стресса: б – ХХ зонд, в – YY зонд; шаг между волновыми картинами – 25 мм; сила одноосного сдавливания – 500 кгс; ΔT_p – 266 мкс/м, ΔT_{sxx} – 560 мкс/м, ΔT_{syy} – 525 мкс/м

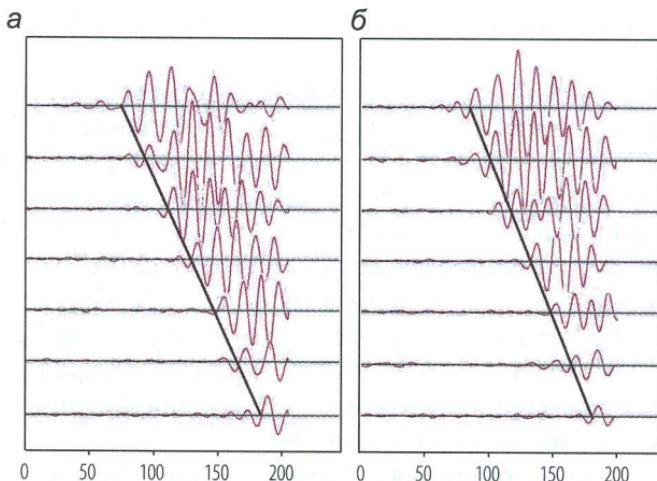


Рис. 4. Волновые картины дипольных зондов в модели 2, использованной для оценки эффекта одиночной трещины: а – волновые картины зонда ХХ, оси дипольных преобразователей находятся в одной плоскости с «трещиной» в цементном блоке; б – ВК зонда YY, измерение в плоскости, ортогональной «трещине»

Важным и несколько неожиданным является факт совпадения направления поляризации не «быстрой», а «медленной» волны с направлением плоскости трещины и направлением стресса. Это указывает на то, что нельзя переносить общие теоретические выкладки, предназначенные для глобальных оценок, на конкретные каротажные измерения.

Таблица

Значения интервальных времен продольной
и поперечных волн в моделях скважины

Порядок получения	Интервальное время, мкс/м	Модель 1. Влияние стресса		Модель 2. Влияние одиночной трещины	
Исходные значения параметров	ΔT_p	266		268	
	ΔT_s	XX 552	YY 550	XX 560	YY 558
Значения параметров после деформации модели	ΔT_s	XX 560	YY 525	XX 731	YY 663

Сопоставление результатов экспериментов с измерениями в реальных наклонных и горизонтальных скважинах

Результаты вышеописанных экспериментов в основном не противоречат данным, полученным автономными приборами АВАК в наклонных и горизонтальных скважинах, а именно: направление поляризации «быстрой» волны в большинстве скважин, имеющихся в распоряжении для анализа, имеет значение, близкое к 90° (угол ANGA – угол между направлением поляризации «быстрой» волны и вертикальной плоскостью). Это указывает на тот факт, что горное давление, сжимая породу в вертикальной плоскости, увеличивает ее упругость в направлении, перпендикулярном вертикальной плоскости, проходящей через ось скважины. Сама же скважина частично снимает горное давление. Характерные примеры приведены на рис. 5 и 6. Первая колонка – глубины, вторая – значения интервальных времен продольной и поперечной волн, третья – значения коэффициента Пуассона, четвертая – коэффициент азимутальной анизотропии ANI и пятая – угол анизотропии ANGA.

Рис. 5 соответствует записи в горизонтальном участке скважины; значения коэффициента Пуассона, наряду со значениями интер-

вальных времен, указывают на литологический состав пород – это песчаник глинистый, то есть порода, обычно не имеющая сильно развитой трещиноватости. В то же время коэффициент анизотропии от 0,05 до 0,15 достаточно изменчив, что указывает на неоднородность пород, хотя угол вектора анизотропии имеет достаточно выдержанное значение ($90\text{--}100^\circ$), что говорит о наиболее вероятной причине азимутальной анизотропии – горном давлении.



Рис. 5. Планшет материалов АВАК в горизонтальной скважине. Стабильное значение угла анизотропии указывает на влияние несбалансированного горного давления как на причину азимутальной анизотропии в горных породах

Пример, показанный на рис. 6, призван объяснить наличие больших значений коэффициента анизотропии в участке наклонной (с углом девиации до 50°) скважины при слабой изменчивости интервальных времен. В то же время имеются пропластки (1–4) с высокими значениями коэффициента анизотропии, но с аномально низкими значениями коэффициента Пуассона (менее 0,25) для данного типа пород – известковистые песчаники (интервалы 2–3). Именно в таких интервалах угол анизотропии сильно отличается от 90° , что можно объяснить наличием трещин, направление которых не совпадает с направлением действия горного давления. Конечно, трещиноватость горных пород достаточно сложный объект для идентификации, и

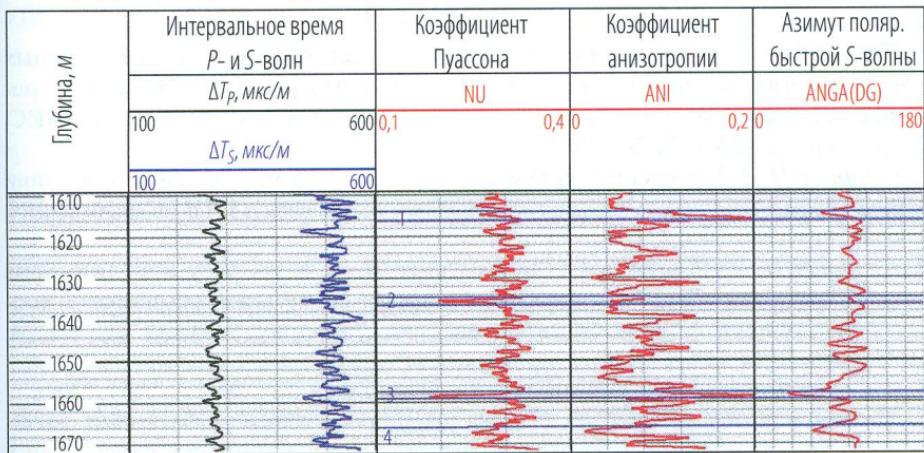


Рис. 6. Планшет материалов АВАК в наклонной скважине, вскрывшей породы с вероятной трещиноватостью в интервалах 1, 2, 3, 4

волновой акустический каротаж лишь служит одним из методов, позволяющих подтвердить наличие трещин, а не с уверенностью констатировать их присутствие. Тем более когда требуется решить задачу о гидропроводности системы трещин.

Выводы

1. Лабораторные измерения в моделях, имитирующих влияние горного давления и одиночной трещины, показали, что в поле поляризованных поперечных колебаний, создаваемых дипольными преобразователями, эффекты горного давления и одиночной трещины сопоставимы по величине. Причем направление поляризации «быстрой» волны перпендикулярно направлению действия силы, создающей эффект.

2. Лабораторные эксперименты также подтверждают, что волновой акустический каротаж в наклонных и горизонтальных скважинах дает достоверные результаты, которые могут быть оценены и объяснены проведенными измерениями на моделях.

Благодарность. Автор статьи выражает признательность со-трудникам отдела АК ООО «Нефтегазгеофизика» А. И. Журавлеву и Н. Е. Пивоваровой за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еремеев А. А., Михальцева И. В. Влияние и оценка упругих свойств горных пород с вертикальной осью анизотропии (TIV-анизотропии) по данным широкополосного акустического каротажа // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып. 12 (234). С. 20–32.
2. Смирнов Н. А. Измерение параметров сдвиговой азимутальной анизотропии горных пород относительно упругих свойств в скважинах // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып. 3 (225). С. 164–176.
3. Смирнов Н. А., Крауклис Л. А., Крауклис П. В. К вопросу использования волны Лэмба для определения фильтрационных свойств горных пород // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л.: Недра. 1987. Вып. 9. С. 159–170.
4. Федоров Ф. И. Теория упругих волн в кристаллах. М.: Наука, 1965. 386 с.
5. Чистяков Н. Ю., Белов С. В. Оценка неоднородности и анизотропии околоскважинного пространства приборами мультипольного акустического каротажа // Геофизика. 2019. № 5. С. 81–85.
6. Berryman J. G. Long-Wave Elastic Anisotropy in Transversely Isotropic Media // Geophysics. 1979. V. 44. № 5. P. 896–917.
7. Cheng C. H. Can We Ever Trust the Shear-Wave Log? // The Leading Edge. March 2015. P. 278–284.
8. Crampin S. Evaluation of Anisotropy by Shear-Wave Splitting // Geophysics. 1985. V. 50. № 1. P. 142–152.
9. Fang X. et al. An Approach for Predicting Stress-Induced Anisotropy around a Borehole // Geophysics. 2013. V. 78. № 3. P. D143–D150.
10. Helbig K., Thomsen L. 75-plus Years of Anisotropy in Exploration and Reservoir Seismics: a Historical Review of Concepts and Methods // Geophysics. 2005. V. 70. № 6. P. 9ND–23LND.
11. Kimball C. V., Marzetta T. L. Semblance Processing of Borehole Acoustic Array Data // Geophysics. 1984. V. 49. № 3. P. 274–281.
12. Kostek S. and Sinha B. K. Stress-Induced Azimuthal Anisotropy in Borehole Flexural Waves // Geophysics. 1996. V. 61. № 6. P. 1899–1907.
13. Tang Xiao-Ming. Mapping Formation Radial Shear-Wave Velocity Variation by a Constrained Inversion of Flexural-Wave Dispersion Data // Geophysics. 2010. V. 75. № 6. P. E183–E190.
14. Thomsen L. Weak Elastic Anisotropy // Geophysics. 1986. V. 51. № 10. P. 1954–1966.
15. Walsh J., Sinha B. and Donald A. Formation Anisotropy Parameters Using Borehole Sonic Data // SPWLA 47th Annual Logging Simp. 2006. P. TT.

Рецензент доктор геол.-минер. наук, проф. Ю. И. Кузнецов