

ТЕСТИРОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННОГО АЛГОРИТМА AVAZ ИНВЕРСИИ НА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Руслан Камильевич Бекренёв

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, бакалавр геологии, инженер, тел. (914) 355-84-88, e-mail: BekrenevRK@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова 2, магистрант

Гэсэр Александрович Дугаров

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, тел. (383) 330-49-57, e-mail: DugarovGA@ipgg.sbras.ru

Татьяна Викторовна Неведкина

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.г.-м.н., старший научный сотрудник, тел. (383) 330-90-16, e-mail: NefedkinaTV@ipgg.sbras.ru

В статье исследуется оптимизационный алгоритм нелинейной AVAZ инверсии PP отражений в анизотропных средах. Алгоритм основан на точных формулах для коэффициента отражения и может быть применён в случае контрастных границ и произвольной степени анизотропии. Тестирование, проведенное на синтетических данных, рассчитанных для радиальной системы наблюдений, показало, что параметры анизотропии γ , $\delta^{(V)}$ и азимут оси симметрии НТИ среды определяются устойчиво при отношении сигнал/помеха ≥ 5 . Для определения параметра $\epsilon^{(V)}$ необходимы данные больших удалений источник-приёмник.

Ключевые слова: нелинейная AVAZ инверсия, трансверсально-изотропная (НТИ) среда, оптимизация, целевая функция, помехоустойчивость алгоритма

TESTING OF AN OPTIMIZATION ALGORITHM FOR AVAZ INVERSION ON SYNTHETIC DATASET

Ruslan K. Bekrenev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., Bachelor, tel.: (914) 355-84-88, e-mail: BekrenevRK@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st., 2, Student

Geser A. Dugarov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD., Senior Researcher, tel.: (383) 330-49-57, e-mail: DugarovGA@ipgg.sbras.ru

Tatyana V. Nefedkina

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD., Senior Researcher, tel.: (383) 330-90-16, e-mail: NefedkinaTV@ipgg.sbras.ru

In the paper, we study an optimization algorithm for a nonlinear AVAZ inversion of PP reflections from an anisotropic media. The algorithm is based on the exact formulas for PP wave reflection coefficient for an anisotropic HTI medium and could be applied in the case of strong-contrast boundary and various anisotropy degree. Algorithm testing on synthetic dataset for radial survey system shows that estimation of anisotropy parameters γ , $\delta^{(V)}$ and HTI medium symmetry axis is robust in the case of signal to noise ratio ≥ 5 . For estimation of parameter $\varepsilon^{(V)}$ far offset data is needed.

Keywords: nonlinear AVAZ inversion, transversely isotropic (HTI) media, optimization, objective function, noise robustness

AVAZ (amplitude variations with azimuth) инверсия продольных волн является инструментом интерпретации, позволяющим восстанавливать эффективные параметры трещиноватых коллекторов углеводородов, такие как, например, направление и плотность трещин. Знание этих параметров очень важно при разведке и эксплуатации месторождений нефти и газа. Данная работа посвящена тестированию модуля AVAZ инверсии на синтетических данных. Основной целью является выбор оптимального подхода к реализации модуля инверсии, а также изучение влияния параметров анизотропного слоя HTI на азимутальные вариации коэффициентов отражения.

Описание алгоритма AVAZ инверсии

Основная суть алгоритма заключается в восстановлении параметров HTI анизотропного слоя путем минимизации следующего функционала:

$$F(\mathbf{v}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (A_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m}) - A_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v}))^2} \quad (1)$$

где n – число наблюдений, l_i – расстояние от источника до i -го приёмника, φ_i – азимут линии источник–приемник; \mathbf{v} – вектор неизвестных параметров модели, \mathbf{m} – вектор материальных параметров модели, A_{obs} – наблюденные амплитуды отражения от кровли анизотропного слоя, исправленные за геометрическое расхождение; A_t – теоретическое описание амплитуд, в качестве которого используются теоретические коэффициенты отражения.

В качестве теоретических коэффициентов отражения могут использоваться различные аппроксимации. Одной из самых известных является аппроксимация Рюге [1] для коэффициента отражения продольной (P) волны от границы изотропного и анизотропного (HTI) пространств. В двухчленном представлении она имеет вид:

$$R(\theta, \varphi) \approx A + (B^{iso} + B^{ani} \cos^2(\varphi - \varphi_0)) \sin^2 \theta \quad (2)$$

где θ – угол падения волны на границу; φ – азимут линии источник–приемник; φ_0 – азимут оси симметрии относительно оси X; коэффициент A равен коэффи-

циенту отражения при нормальном падении; B^{iso} – изотропная часть градиента, равная градиенту AVO в изотропной среде; B^{ani} – анизотропная добавка к градиенту, зависящая от параметров анизотропии среды.

Теоретические коэффициенты отражения также могут быть рассчитаны по точным формулам. Этот способ подразумевает решение системы 6 линейных уравнений вида [2]:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (3)$$

где \mathbf{A} – это матрица, составленная из векторов смещений и напряжений для отраженных и преломленных волн, \mathbf{b} – вектор-столбец, составленный из векторов смещений и напряжений для падающей волны, \mathbf{x} – вектор-столбец, состоящий из коэффициентов отражения и преломления всех типов волн.

Расчет коэффициентов отражения по точным формулам не имеет ограничений на степень анизотропии и на величину перепада упругих свойств на границе, присущих аппроксимации Рюге, а также применим и в случае больших удалений [3, 4]. Основным минусом данного подхода являются большие вычислительные затраты.

В реализованном нами алгоритме AVAZ инверсии используется как двухчленная аппроксимация Рюге, так и расчет коэффициентов отражения по точным формулам. Разработанный модуль представляет из себя оптимизационный алгоритм, состоящий из следующих двух этапов.

1 этап. Минимизация функционала (1) с использованием двухчленной аппроксимации Рюге (2), с последующим восстановлением азимута оси симметрии φ_0 и скорости Р-волны (на вертикали) в анизотропном слое (по значениям параметра A , полагая упругие параметры верхнего изотропного слоя и плотность анизотропного слоя известными).

2 этап. Минимизация функционала (1) с использованием точных формул. В результате оптимизации по точным формулам, имея V_P и φ_0 целевого слоя из предыдущего этапа оптимизации, восстанавливаем 4 неизвестных упругих параметра этого слоя: V_S – скорость поперечной (S) волны, $\varepsilon^{(V)}$, $\delta^{(V)}$, γ – параметры анизотропии Томсена [5].

Уменьшение числа неизвестных параметров с шести до четырёх позволяет значительно сократить время работы инверсионного алгоритма, а также повысить устойчивость. Точность восстановления азимута оси симметрии с использованием аппроксимации Рюге и по точным формулам практически совпадает. В качестве метода минимизации для двух этапов используется градиентный метод BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno algorithm).

Тестирование модуля AVAZ инверсии на синтетических данных

В качестве входных данных используются снятые в заданном окне амплитуды целевого сигнала. При расчете целевой функции (1) мы сравниваем наблюдаемые амплитуды с коэффициентами отражения. Следовательно, для первого и

второго этапа необходимо привести наблюдаемые амплитуды и теоретические коэффициенты отражения к единой размерности. Поэтому существует два способа задания целевого функционала: через относительные (нормированные) величины:

$$F(\mathbf{v}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\tilde{A}_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m}) - r_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v}) \right)^2}, \quad (4)$$

$$\tilde{A}_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m}) = \frac{A_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m})}{A_{obs}(0, \varphi_i, \mathbf{m})}, \quad r_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v}) = \frac{R_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v})}{R_t(0, \varphi_i, \mathbf{v})},$$

и абсолютные величины:

$$F(\mathbf{v}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(R_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m}) - R_t(l_i, \varphi_i, \mathbf{v}) \right)^2}, \quad (5)$$

$$R_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m}) = C_{conv} A_{obs}(l_i, \varphi_i, \mathbf{m}),$$

где \tilde{A}_{obs} – наблюдаемые относительные амплитуды; $A_{obs}(0, \varphi_i, \mathbf{m})$ – наблюдаемая амплитуда при нулевом удалении; C_{conv} – масштабный множитель для перехода от амплитуд к коэффициентам отражения (amplitude scaling factor); R_{obs} – коэффициенты отражения, полученные из наблюдаемых амплитуд; r_t , R_t – теоретические относительные и абсолютные коэффициенты отражения; $R_t(0, \varphi_i, \mathbf{v})$ – теоретический коэффициент отражения при нулевом удалении. C_{conv} вычисляется как отношение $R_t(0, \varphi_i, \mathbf{m}) / A_{obs}(0, \varphi_i, \mathbf{m})$. При этом для модельных исследований $R_t(0, \varphi_i, \mathbf{m})$ можно вычислить по параметрам модели; при обработке реальных наблюдений необходимо иметь данные акустического и плотностного коротажей в скважине в диапазоне глубин целевой границы и значение амплитуды на ближайшей к скважине сейсмической трассе.

Принципиальное отличие подходов заключается в том, что реализация (5) в качестве априорной информации требует коэффициент перехода C_{conv} для перевода наблюдаемых амплитуд в коэффициенты отражения. При использовании подхода (4) переходный коэффициент не требуется, так как нормировка на амплитуду и на коэффициент отражения при нулевом удалении приводит наблюдаемые амплитуды и теоретические коэффициенты отражения соответственно в относительные величины, близкие к 1.

Для выбора подхода к реализации целевого функционала для двух этапов алгоритма было проведено тестирование модуля AVAZ инверсии на синтетических данных, рассчитанных для радиальной системы наблюдений в интервале азимутов от 0° до 360° , с шагом 30° , и для углов падения от 0° до 30° , с шагом 3° . В качестве модельных данных были взяты упругие параметры двухслойной

горизонтально слоистой модели (№6 в таблице 5.2) из монографии Rüger [1], см. табл. 1. На рис. 1 показаны азимутальные зависимости коэффициентов отражения для этой модели, рассчитанные по точным формулам (3).

Таблица 1

Параметры модели

№ слоя	ρ , г/см ³	V_P , км/с	V_S , км/с	$\varepsilon^{(V)}$	$\delta^{(V)}$	γ	φ_0
1	2.7	2.26	1.43	0	0	0	–
2	2.7	2.50	1.50	-0.1	-0.1	0.1	60

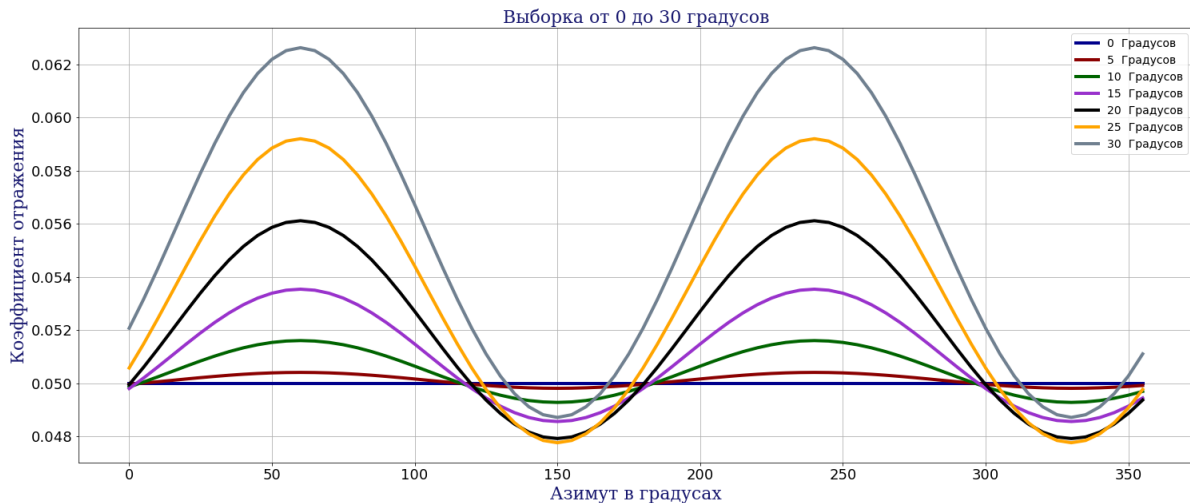


Рис. 1. Азимутальные зависимости коэффициентов отражения

Синтетические сейсмограммы были получены путем свертки теоретических коэффициентов отражения с импульсом Рикера, имеющим видимую частоту 25 Гц и шаг дискретизации 2 мс. Среднеквадратичные амплитуды отражения снимались в окне 1.5 периода и использовались в качестве входных данных для инверсии с целевым функционалом в двух приведенных выше вариантах реализации (4) и (5). В отсутствии помех оба подхода обеспечивают сходимость итерационного алгоритма к точным значениям параметров модели.

Для оценки устойчивости восстановления параметров анизотропного слоя в обоих подходах на синтетический сигнал Рикера был наложен «белый» шум с уровнем 10% и 20% от среднеквадратичной (RMS) амплитуды сигнала при нормальном падении. Полосовая фильтрация шума не проводилась ввиду равномерного его распределения во всей частотной области.

Сечения целевой функции с варьированием пар параметров анизотропного слоя НТИ (при закрепленных значениях остальных параметров): $V_{P2} - V_{S2}$, $V_{P2} - \varepsilon^{(V)}$, $V_{S2} - \varphi_0$, $V_{S2} - \gamma$, $\varepsilon^{(V)} - \gamma$, $\delta^{(V)} - \gamma$, при наложении шума 10% приведены на рис. 2. Сечения по параметрам $V_{P2} - V_{S2}$, $V_{S2} - \varphi_0$, $V_{S2} - \gamma$ имеют ярко выраженный минимум целевой функции в случае применения целевой функции в реализации (5) (по абсолютным значениям).

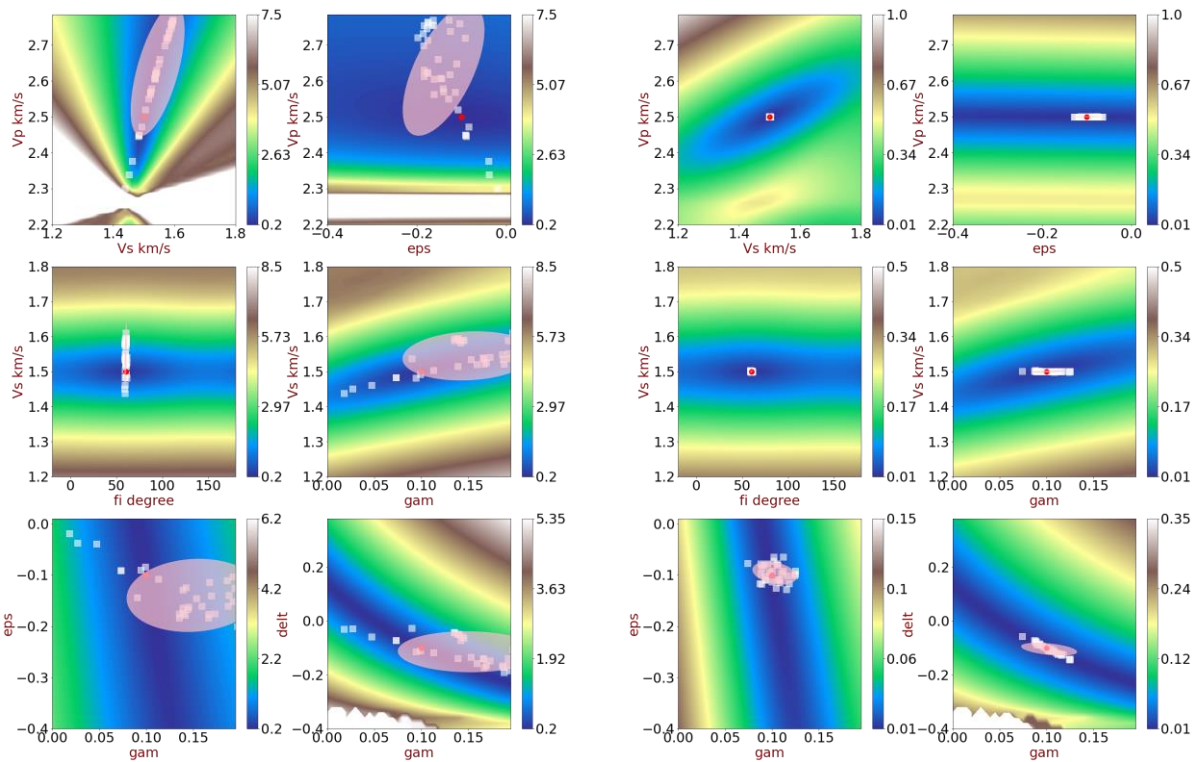


Рис. 2. Сечения целевых функций в реализации (4), относительные значения, (слева) и (5), абсолютные значения, (справа) при наложении шума 10%. Красные кружочки – точные значения параметров, белые квадраты и эллипсы – результаты оптимизации с областью их разброса.

Параметры V_{P2} , V_{S2} , φ_0 могут быть определены с бóльшей точностью, чем параметр $\varepsilon^{(V)}$, для которого наблюдается овражный характер целевой функции в диапазоне углов падения до 30° . Функционал имеет примерно одинаковую чувствительность к изменению параметров $\delta^{(V)}$ и γ .

Результаты AVAZ инверсии для тридцати реализаций зашумленных сейсмограмм представлены в таблицах 2 и 3. В таблице 2 приведены оценки параметров V_P и φ_0 , полученные на первом этапе оптимизации, в таблице 3 – оценки параметров V_S и $\varepsilon^{(V)}$, $\delta^{(V)}$, γ на втором этапе оптимизации.

Таблица 1

Оценки параметров НТИ среды, этап 1

	Применение относительных коэффициентов отражения (4)				Применение абсолютных коэффициентов отражения (5)			
	V_{P2}		φ_0		V_{P2}		φ_0	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Шум 10%	2.62	13%	60°	0.6°	2.5	< 1%	60°	0.5°
Шум 20%	2.72	15%	60°	0.6°	2.5	< 1%	60°	0.8°

Примечание. μ – математическое ожидание, σ – среднеквадратическое отклонение.

Оценки параметров НТИ среды, этап 2

	V_{S2}		$\varepsilon^{(V)}$		$\delta^{(V)}$		γ	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Реализация целевой функции через относительные коэффициенты отражения (4)								
Шум 10%	1.56	5%	-0.14	0.04	-0.12	0.04	0.15	0.04
Шум 20%	1.57	8%	-0.15	0.04	-0.09	0.04	0.16	0.04
Реализация целевой функции через абсолютные коэффициенты отражения (5)								
Шум 10%	1.5	< 1%	-0.1	0.02	-0.1	0.02	0.1	0.01
Шум 20%	1.5	< 1%	-0.12	0.02	-0.1	0.03	0.11	0.02

Примечание. μ – математическое ожидание, σ – среднеквадратическое отклонение.

По результатам первого этапа AVAZ инверсии (см. таблицу 2) для двух реализаций целевой функции на синтетических данных с 10% и 20% уровнем шума было выявлено, что подход (4), основанный на нормировке коэффициентов отражения, приводит к неустойчивому восстановлению скорости Р-волны (погрешности составляют 13-15%). Это связано с тем, что при делении амплитуд на их значения в нуле, даже при небольшом уровне шума, теряется вся информация о скорости Р-волны, заложенная в реальных коэффициентах отражения. Неверно восстановив скорость Р-волны, мы неверно восстанавливаем остальные упругие параметры (см. таблицу 3). Исключением является азимут оси симметрии, так как он не зависит от перепада упругих свойств на границе.

Из всего вышесказанного следует, что применение нормировок в целевом функционале AVAZ инверсии нецелесообразно. Поэтому разработанный модуль AVAZ инверсии использует второй подход (5) к реализации целевого функционала, основанный на абсолютных значениях коэффициентов отражения. Он обеспечивает высокую точность определения коэффициентов анизотропии $\delta^{(V)}$, γ с погрешностью не более 0.02-0.03 по абсолютной величине, точность определения параметра $\varepsilon^{(V)}$ несколько ниже. В данном подходе требуется априорная информация о масштабном множителе перехода от амплитуд к коэффициентам отражения.

Заключение

В работе проведено исследование оптимизационного алгоритма нелинейной AVAZ инверсии продольных отраженных волн в анизотропной НТИ среде. В алгоритме используется точное решение для коэффициентов отражения РР

волн. Тестирование алгоритма проведено на синтетических сейсмограммах. Анализ целевых функций, полученных в процедуре оптимизации, позволил изучить чувствительность метода к определению различных параметров анизотропной модели. Показано, что использование аппроксимации Рюге в качестве первого этапа оптимизационного алгоритма, является наиболее оптимальным подходом, так как позволяет уменьшить число восстанавливаемых параметров по точным формулам. Для корректного восстановления упругих параметров анизотропного слоя требуется масштабный множитель перехода от наблюдаемых амплитуд к коэффициентам отражения в качестве априорной информации. Тестирование алгоритма показало, что при отношении сигнал/помеха ≥ 5 упругие параметры анизотропного слоя определяются с высокой точностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rüger A. Reflection Coefficients and Azimuthal AVO Analysis in Anisotropic Media. Society of Exploration Geophysics. 2002. 185 p.
2. Schoenberg M., Protazio J. “Zoeppritz” rationalized and generalized to anisotropy // J. Seism. Explor. 1992. N 1. P. 125– 144.
3. Нефедкина Т.В., Лыхин П.А. Применимость линеаризованных аппроксимаций коэффициента отражения продольных волн для азимутального анализа амплитуд РР отражений в анизотропных средах // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 4. – С. 21–32.
4. Лыхин П.А., Нефедкина Т.В. Потенциал нелинейной AVOA-инверсии отраженных продольных волн для изучения трещиноватых карбонатных коллекторов нефти и газа // Технологии сейсморазведки, № 2, 2017, С. 59– 68.
5. Tsvankin I. Reflection moveout and parameter estimation for horizontal transverse isotropy // Geophysics. 1997. V. 62, N 2. P. 614–629.

REFERENCES

1. Rüger A. Reflection Coefficients and Azimuthal AVO Analysis in Anisotropic Media. Society of Exploration Geophysics. 2002. 185 p.
2. Schoenberg M., Protazio J. “Zoeppritz” rationalized and generalized to anisotropy // J. Seism. Explor. 1992. N 1. P. 125– 144.
3. Nefedkina T.V., Lyhin P.A. Primenimost' linearizovannyh approksimacij koeficienta otrazhenija prodol'nyh voln dlja azimutal'nogo analiza amplitud PP otrazhenij v anizotropnyh sredah // Tehnologijejsmorazvedki. – 2016. – № 4. – S. 21–32.
4. Lykhin P.A., Nefedkina T.V. Potencial nelineinoi AVOA-inversii otrazhennuh prodol'nyh voln dlya izucheniya treschinovatux kollektorov nefti I gaza // Tehnologii seisemorazvedki, № 2, 2017, S. 59– 68.
5. Tsvankin I. Reflection moveout and parameter estimation for horizontal transverse isotropy // Geophysics. 1997. V. 62, N 2. P. 614–629.

© Р. К. Бекренёв, Г. А. Дугаров, Т. В. Нефедкина, 2021