



ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОКРЫВАЮЩЕЙ СРЕДЫ И КРИВИЗНЫ ГРАНИЦ НА AVO-ИНВЕРСИЮ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН

Т.В. Нефедкина¹, Н.Н. Шилов^{1,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: nefedkinatv@ipgg.sbras.ru

В статье рассматривается влияние некорректного учета структуры покрывающей толщи и кривизны границ на результаты нелинейной AVO-инверсии. Исследования проводятся на синтетических данных, рассчитанных лучевым методом для двух- и трехслойных моделей среды с выпуклыми и вогнутыми границами. Показано, что замена покрывающей среды однородной может приводить к погрешностям инверсии до 10–19 %, а пренебрежение кривизной отражающей границы – к погрешностям порядка 2 % для выпуклой и 11 % для вогнутой границ.

Нелинейная AVO-инверсия; синтетические сейсмограммы; лучевой метод; кривизна границ; геометрическое расхождение; оптимизация

THE EFFECT OF THE OVERBURDEN STRUCTURE AND INTERFACES CURVATURE ON AVO INVERSION OF PP-REFLECTIONS

T.V. Nefedkina¹, N.N. Shilov^{1,2}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

²Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: nefedkinatv@ipgg.sbras.ru

In this paper, we consider an effect of incorrect accounting of the overburden structure and interfaces curvature on results of nonlinear AVO inversion. The research is carried out on synthetic data obtained using ray method for two- and three-layer models with convex and concave interfaces. We show that neglect of the overburden heterogeneity leads to inversion errors about 10–19 % and neglect of the reflector's curvature to errors about 2 % for convex and 11 % for concave interfaces.

Nonlinear AVO inversion; synthetic seismograms; ray method; interface curvature; geometrical spreading; optimization

ВВЕДЕНИЕ

AVO-анализ и AVO-инверсия (определение упругих параметров среды по AVO-данным) являются важными инструментами интерпретации сейсмических данных при разведке и мониторинге нефтяных и газовых резервуаров. Анализ сейсмических волн по AVO (Amplitude Versus Offset) – это изучение

зависимости амплитуд отраженных волн от расстояния «источник–приемник» или от угла падения на отражающую границу (Amplitude Versus Angle или AVA). Для проведения AVO-анализа необходимо иметь сейсмические трассы с максимально сохраненной информацией об амплитудах волн, что предполагает отсутствие регуляторов типа АРУ и восстановление амплитудных потерь, обусловленных расхождением сферического фронта, поглощением, коэффициентами прохождения и др.

В основе метода лежит зависимость отражательной способности геологической границы от угла падения волны. Для проведения инверсии необходимо выделить из наблюдаемых амплитуд коэффициент отражения в чистом виде, для чего в амплитуды вводятся различные поправки. Расчет и ввод амплитудных поправок базируется на априорном знании сейсмогеологической модели и на возможностях математического обеспечения, заложенного в программные пакеты обработки сейсмических данных. От их точности зависят качество и точность инверсии.

Традиционный подход к AVO-инверсии базируется на представлениях геометрической сейсмологии. В таком приближении, помимо целевого коэффициента отражения, на амплитуду отраженных волн влияют геометрическое расхождение волнового фронта, коэффициенты прохождения в перекрывающей целевой пласт толще и геометрия лучей. Важно, что коэффициенты отражения и прохождения рассчитываются в плосковолновом приближении. Они не зависят от кривизны границ и некорректно описывают явление отражения при больших углах падения. В работе [Ayzenberg et al., 2009] было предложено обобщение плосковолновых коэффициентов – так называемых эффективных коэффициентов отражения, более точно описывающих отражение от криволинейных границ и изменение амплитуд отраженных волн в околокритической и закритической областях. В частности, сравнение эффективных и плосковолновых коэффициентов отражения с позиций AVO-инверсии представлено в работах [Skopintseva, 2011; Skopintseva et al., 2012].

На практике при подготовке данных для AVO-анализа перекрывающая толща считается однородной, геометрическое расхождение заменяется сферическим расхождением, а коэффициенты прохождения (при наличии преломляющих границ) не учитываются вовсе. В диссертационной работе Л.В. Скопинцевой [Skopintseva, 2011] было показано, к каким ошибкам инверсии приводят такие допущения в случае модели среды с непрерывно меняющимися свойствами. Здесь же будет рассматриваться класс слоистых моделей.

В настоящей работе мы используем плосковолновые коэффициенты и рассматриваем зависимость AVO-инверсии от таких факторов, как некорректный учет геометрического расхождения, пренебрежение коэффициентами прохождения волны в покрывающей целевой объект толще и погрешности в задании модели среды. Наши исследования проведены на синтетических данных, рассчитанных лучевым методом для наблюдений на докритических удалениях от источника в рамках однородно-слоистых моделей с криволинейными границами. Большое внимание будет уделено изучению влияния кривизны геологических границ на геометрическое расхождение.

Изучением влияния покрывающей среды на результаты AVO-анализа и AVO-инверсии занимались многие авторы на рубеже двадцатого и двадцать первого веков [Бинкин и др., 2000; Шалаева, 2004; Hiltermann, 2001]. С позиций традиционного подхода, основанного на линеаризованных аппроксимациях коэффициента отражения [Aki, Richards, 1980; Shuey, 1985; Hiltermann, 2001], были получены оценки

влияния некорректного учета покрывающей среды на градиент AVO и связанные с этим ошибки интерпретации. Покрывающая среда при этом считалась горизонтально-слоистой. Однако хорошо известно, что линейаризованные аппроксимации коэффициента отражения пригодны только для слабо дифференцированных сред с малыми перепадами упругих параметров на отражающих границах. Такие условия характерны для нефтеносных регионов, сложенных молодыми терригенными породами кайнозойского и мезозойского возраста. В Восточной Сибири основные запасы углеводородов связаны с карбонатными коллекторами рифейского и вендского возраста, образующими контрастные границы с терригенными породами. Для этого региона и других газонефтеносных провинций с контрастными границами необходимо использовать нелинейные методы решения обратной задачи для успешной AVO-инверсии отраженных волн [Лыхин, Нефедкина, 2017].

В данной работе рассматривается нелинейная AVO-инверсия, реализованная оптимизационными методами и основанная на точном решении для коэффициентов отражения/преломления [Zoeppritz, 1919; Сейсморазведка, 1981]. Применяются алгоритмы динамического лучевого трассирования для модели однородно-слоистой среды с наклонными и криволинейными границами. Получены численные оценки погрешностей упругих параметров среды при AVO-инверсии с некорректным учетом структуры покрывающей толщи и кривизны границ.

МЕТОДОЛОГИЯ

Схема наблюдений и методика инверсии

Рассматривается схема наблюдений по методике ОСТ, состоящая из N источников и N приемников, расположенных вдоль профиля с одной общей средней точкой (рис. 1). Координаты приемников обозначаются x_i , начало координат совпадает с положением средней точки. Луч, идущий из i -го источника в i -й приемник, падает на отражающую границу под углом α_i . Каждому приемнику соответствует снятая с сейсмограмм амплитуда отраженной волны $A(x_i)$.

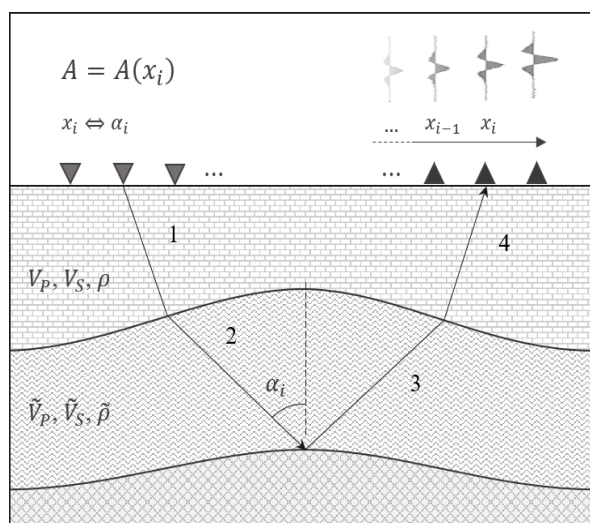


Рис. 1. Примерная лучевая схема. Луч разделен на несколько пронумерованных сегментов

В изотропных моделях с однородными слоями геометрическое расхождение, коэффициенты прохождения и коэффициент отражения входят в лучевую амплитуду в виде множителей:

$$A \sim \frac{1}{\sqrt{J}} \cdot \prod \sqrt{\frac{J^+}{J^-}} \prod K^{tr} \cdot K^{refl}. \quad (1)$$

Здесь J – геометрическое расхождение в точке записи, J^- и J^+ – значения геометрического расхождения в моменты непосредственно перед и после пересечения лучом очередной границы соответственно, K^{tr} – коэффициенты прохождения, K^{refl} – целевой коэффициент отражения. Все величины в правой части зависят от геометрии лучей и меняются в зависимости от удаления «источник–приемник» (и, следовательно, от координаты приемника): $J = J(x_i)$ и т. д. Чтобы выделить из наблюдаемых амплитуд величину, пропорциональную целевому коэффициенту отражения, в них вводят поправки за геометрическое расхождение и коэффициенты прохождения. Исправленная таким образом амплитуда имеет вид:

$$A(x_i) = A(x_i) \cdot \frac{\sqrt{J}}{\prod \sqrt{\frac{J^+}{J^-}}} \cdot \frac{1}{\prod K^{tr}}. \quad (2)$$

В процессе инверсии минимизируется квадратичный функционал невязки между наблюдаемыми нормированными амплитудами и нормированными теоретическими коэффициентами отражения:

$$\sum_{i=0}^N \left\{ \frac{A(x_i)}{A(0)} - \frac{K^{refl}(\vec{v}, \alpha_i)}{K^{refl}(\vec{v}, 0)} \right\}^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $\vec{v} = \{V_p, V_s, \rho\}$ – вектор неизвестных параметров среды ниже точки отражения. При минимизации варьируется вектор $\vec{v}$. Суммирование производится по всем трассам. В данной работе для минимизации использовался оптимизационный метод Нелдера-Мида.

Расчет геометрического расхождения

Геометрическое расхождение является основным фактором, влияющим на амплитуду сейсмических волн в лучевом приближении. Физически оно означает относительное изменение площади поперечного сечения элементарной лучевой трубки. Соответствующая поправка была рассчитана по формулам динамического лучевого трассирования, представленным в [Červený, Hron, 1980]. В указанной

работе приводится выражение геометрического расхождения через матрицу вторых производных функции эйконала, записанную в лучецентрических координатах (q_1, q_2, s) , где s – длина пути до заданной точки вдоль луча, а q_1 и q_2 задают координаты в плоскости, перпендикулярной лучу:

$$\mathbf{M}(s) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \tau}{\partial q_1^2} & \frac{\partial^2 \tau}{\partial q_1 \partial q_2} \\ \frac{\partial^2 \tau}{\partial q_1 \partial q_2} & \frac{\partial^2 \tau}{\partial q_2^2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Физически эта матрица задает кривизну волнового фронта в любой точке луча, где она определена. Геометрическое расхождение на луче, исходящем из точечного источника и отразившемся/преломившемся в K -точках пересечений луча с границами, выражается формулой:

$$J(s) = \left\{ s_1^{*2} \prod_{j=2}^K \frac{\det \mathbf{M}_j(s_{j-1}^*)}{\det \mathbf{M}_j(s_j^*)} \cdot \frac{\det \mathbf{M}_{K+1}(s_K^*)}{\det \mathbf{M}_{K+1}(s_{K+1}^*)} \right\} \cdot \prod_{j=1}^K \frac{J^+(s_j^*)}{J^-(s_j^*)}. \quad (5)$$

Индексация в этой формуле связана с сегментами луча, пронумерованными, как показано на рис. 1. $\mathbf{M}_j$ есть матрица вторых производных эйконала на j -м сегменте; за s_j^* обозначена длина пути вдоль луча до конца j -го сегмента, в частности, s_1^* – длина отрезка, соединяющего источник и первую точку пересечения с границей, а s_{K+1}^* – длина всего луча от источника до приемника.

Понятие геометрического расхождения в формуле (5) относится к энергии волны, и при переходе к амплитудам из этой величины берется корень. После подстановки геометрического расхождения (5) в формулу (2) произведение $\prod \sqrt{\frac{J^+}{J^-}}$ сократится. Если s – длина пути по лучу до некоторого приемника, то поправка за геометрическое расхождение примет вид:

$$\frac{\sqrt{J}}{\prod \sqrt{\frac{J^+}{J^-}}} = \sqrt{s_1^{*2} \prod_{j=2}^K \frac{\det \mathbf{M}_j(s_{j-1}^*)}{\det \mathbf{M}_j(s_j^*)} \cdot \frac{\det \mathbf{M}_{K+1}(s_K^*)}{\det \mathbf{M}_{K+1}(s_{K+1}^*)}}. \quad (6)$$

Коэффициенты отражения–прохождения

В общем случае на границе двух упругих сред коэффициенты отражения и прохождения плоских волн через плоскую границу определяются из решения системы 6 линейных уравнений, полученных из условий непрерывности вектора смещений и непрерывности вектора напряжений [Петрашень и др., 1984].

В изотропных средах в системе остается 4 уравнения, и ее решение может быть записано в явном виде [Zoeppritz, 1919]. В данной статье мы использовали точные формулы для коэффициентов отражения и прохождения из работы [Сейсморазведка, 1981].

СИНТЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данной работе производится численная оценка погрешностей, к которым приводят те или иные допущения о перекрывающей целевой пласт толще. Было проведено тестирование на трехмерных двухслойных и трехслойных моделях с криволинейными границами. Синтетические 3D данные отраженных продольных волн рассчитывались по лучевому методу. Моделировались наблюдения по схеме методики ОСТ, описанной в предыдущем разделе. Шаг между источниками/приемниками составлял 25 м, кратность расстановки зависела от размера области докритического падения. Использовался точечный источник колебаний типа центра расширения с формой волны в виде импульса Риккера.

Эффект от пренебрежения кривизной отражающей границы на результаты AVO-инверсии был рассмотрен в работе [Skopintseva et al., 2012]. При этом моделировались простые двухслойные среды с выпуклой границей, в которых кривизна отражающей границы увеличивала рост геометрического расхождения, не меняя при этом общий вид функции. В этой работе рассматриваются более сложные модели, в том числе трехслойные, с антиклинальной и синклинальной формой границ. Общая форма границ задавалась гауссианом по аналогии с упомянутой выше статьей:

$$z(x, y) = A + B \cdot e^{-\left(\frac{(x-x_0)^2}{10^6} + \frac{y^2}{10^6}\right)C}. \quad (7)$$

Константы A, B, C и x_0 имеют физический смысл. A и B измеряются в метрах и задают общую глубину поверхности и амплитуду экстремума соответственно. Величина x_0 также имеет размерность метров и определяет смещение «макушки» по оси X . Параметр C определяет крутизну крыльев структуры, связан с главными кривизнами границы в точке экстремума и формально измеряется в м^{-2} . Все границы задавались дискретно на сетке с шагом 2 м по обеим координатам. Между узлами сетки применялась бикубическая интерполяция.

Двухслойные модели

Было рассмотрено два типа двухслойных изометричных моделей – антиклинальные и синклинальные (рис. 2). Их параметры занесены в табл. 1. Величина R есть радиус кривизны в точке экстремума. Радиусу кривизны 2500 м соответствует кривизна 0.0004 м^{-1} , а радиусу кривизны 1250 м – кривизна 0.0008 м^{-1} . Числа 0.0004 и 0.0008 далее будут использоваться в подписях к иллюстрациям и таблицам. В случае синклинальной модели радиус кривизны, как и сама кривизна, отрицательны. В этой модели радиус кривизны не варьировался, т. к. при меньших (по модулю) его значениях в докритической области возникала каустика, что нарушало корректность использования «простого» лучевого метода.

Параметры отражающей границы в двухслойных моделях

Параметр	Модель 1		Модель 2
A, м	700	700	700
B, м	-200	-200	200
C, м ²	1	2	1
x ₀ , м	0	0	0
R, м	2500	1250	-2500

В Модели 1 размеры докритической области позволили промоделировать линию наблюдения длиной 500 м. В Модели 2 точка отражения расположена глубже, и поэтому длина линии наблюдений составила 900 м.

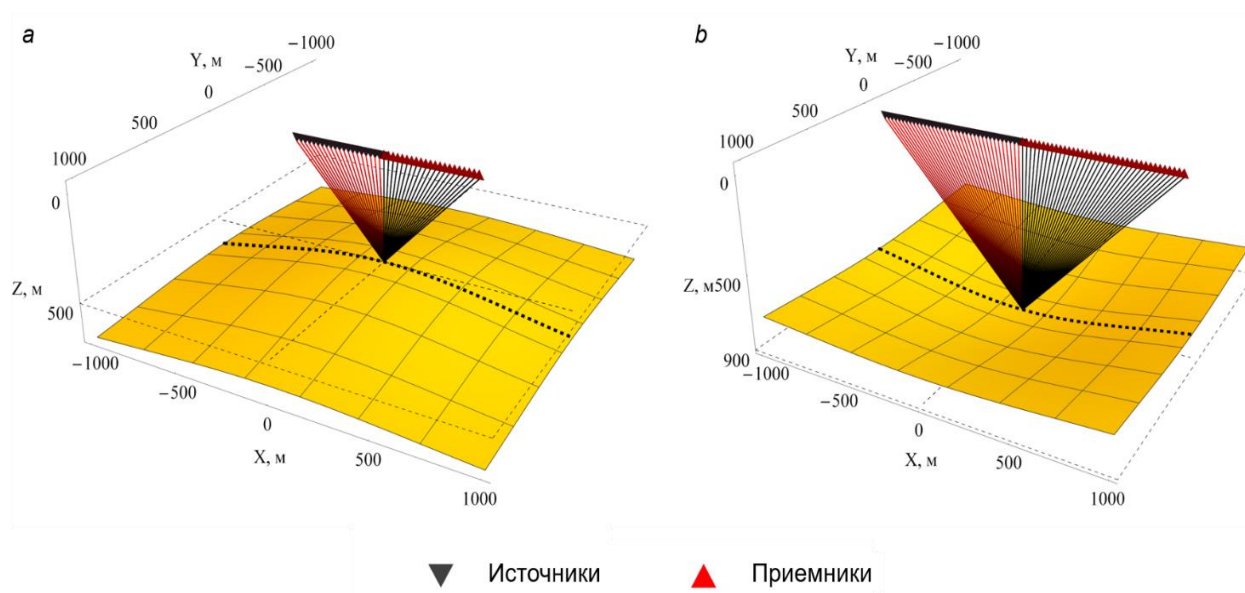


Рис. 2. Двухслойные модели: а – Модель 1 (антиклинальная) и б – Модель 2 (синклиальная)

Трехслойные модели

Здесь также было рассмотрено два типа моделей: симметричные и асимметричные (Модели 3а и 3б на рис. 3). В обоих случаях было возможным увеличение кривизны в точке экстремума. Данные трехслойных моделей занесены в табл. 2. Все трехслойные модели – антиклинальные.

В асимметричной Модели 3а отражение происходило не от одной точки, а от площадки шириной примерно 25 м при $R=2500$ м и примерно 35 м при радиусе кривизны $R=1250$ м. Соответственно, несколько менялись углы падения, и длина линии наблюдений в докритической области при большем R составила 925 м, а при меньшем – 900 м. В симметричной модели длина линии наблюдений была неизменной и составляла 975 м.

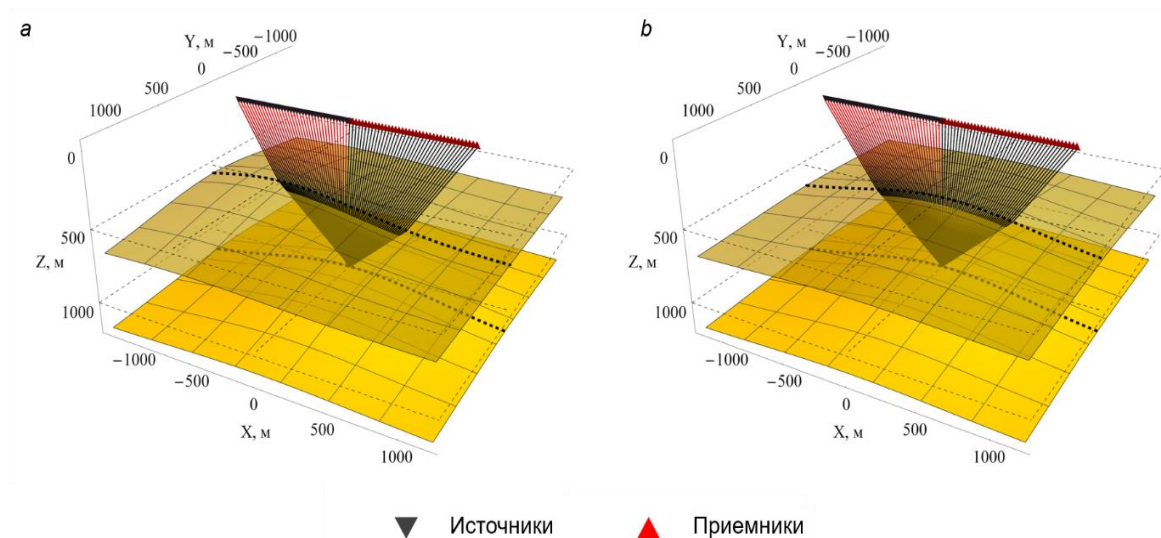


Рис. 3. Трехслойные модели: а – Модель 3а (асимметричная) и б – Модель 3б (симметричная)

Таблица 2

Параметры границ в трехслойных моделях

№ границы	Параметр	Модель 3а		Модель 3б	
1	A, м	700	700	700	700
	B, м	–200	–200	–200	–200
	C, м ⁻²	1	2	1	2
	x ₀ , м	–816	–816	0	0
	R, м	2500	1250	2500	1250
2	A, м	1200	1200	1200	1200
	B, м	–200	–200	–200	–200
	C, м ⁻²	1	2	1	2
	x ₀ , м	0	0	0	0
	R, м	2500	1250	2500	1250

Значения скоростей волн и плотностей в слоях даны в табл. 3. При работе с двухслойными моделями из нее брались только первые две строки, при работе с трехслойными – все три.

Таблица 3

Упругие параметры слоев

№ слоя	v _p , м/с	v _s , м/с	ρ, кг/м ³
1	2000	1100	1800
2	2800	1600	2100
3	3600	2100	2400

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Поскольку в лучевом методе используются плоско-волновые коэффициенты отражения/преломления, не зависящие от кривизны границ, применяемый нами математический аппарат не позволил нам в полной мере изучить физику явления отражения/преломления сейсмической волны на криволинейной границе. В связи с этим целью наших исследований являлась численная оценка погрешностей, к которым приводят некорректный расчет поправок за геометрическое расхождение и пренебрежение коэффициентами преломления в покрывающей толще, содержащей криволинейные границы. Исследования проводились по следующей схеме. В снятые с синтетических сейсмограмм амплитуды продольной отраженной волны вносились поправки тремя различными способами:

- а) учитывая кривизну границ и коэффициенты преломления в покрывающей толще;
- б) учитывая коэффициенты преломления в покрывающей толще, но пренебрегая кривизной границ;
- в) заменяя слоистую среду однородным слоем.

Исправленные таким образом амплитуды подавались на вход алгоритма AVO-инверсии и полученные результаты сравнивались с модельными данными.

Геометрическое расхождение

В используемом алгоритме инверсии все амплитуды нормируются на амплитуду нормального отражения, поэтому абсолютное значение геометрического расхождения не играет в нем роли. Ниже будет приведено только его относительное изменение вдоль профиля.

Двухслойные модели

В случае двухслойных моделей пренебрежение кривизной границы в точке отражения эквивалентно расчету сферического расхождения. Относительное изменение геометрического расхождения в Моделях 1 и 2 представлено на рис. 4. В случае антиклинальной модели пренебрежение кривизной границы приводит лишь к незначительному замедлению роста геометрического расхождения. В синклинальной модели оно ведет к качественному изменению вида функции расхождения.

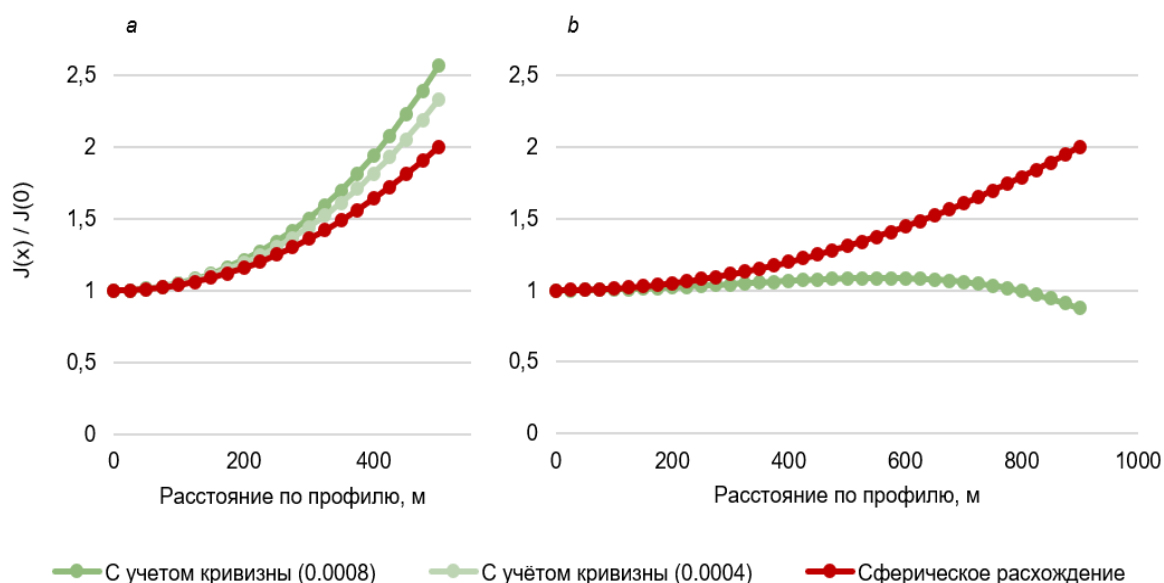


Рис. 4. Относительное изменение геометрического расхождения: а – Модель 1 и б – Модель 2

Трехслойные модели

В трехслойных моделях понятия «сферическое расхождение» и «расхождение без учета кривизны» не совпадают. Кроме того, кривизна преломляющей и отражающей границ могут по-разному влиять на геометрическое расхождение. Относительное изменение геометрического расхождения в Моделях 3а и 3б изображено на рис. 5 и 6.

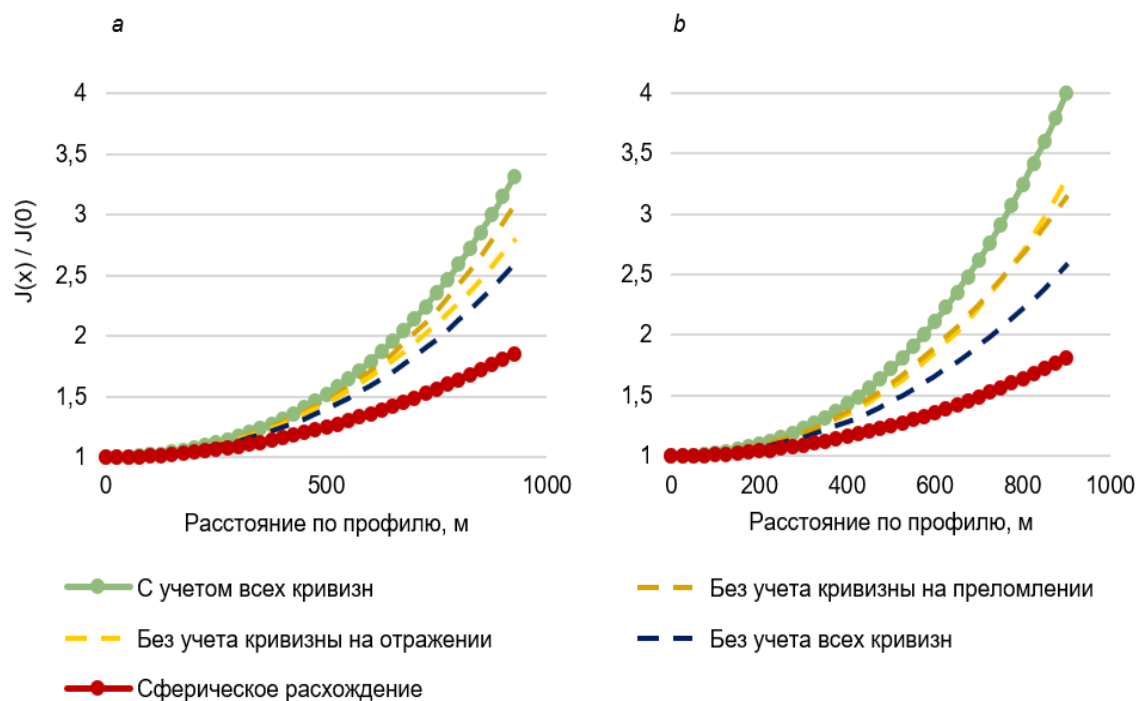


Рис. 5. Относительное изменение геометрического расхождения в Модели 3а при кривизне в точке отражения: $a - 0.0004 \text{ м}^{-1}$ и $b - 0.0008 \text{ м}^{-1}$

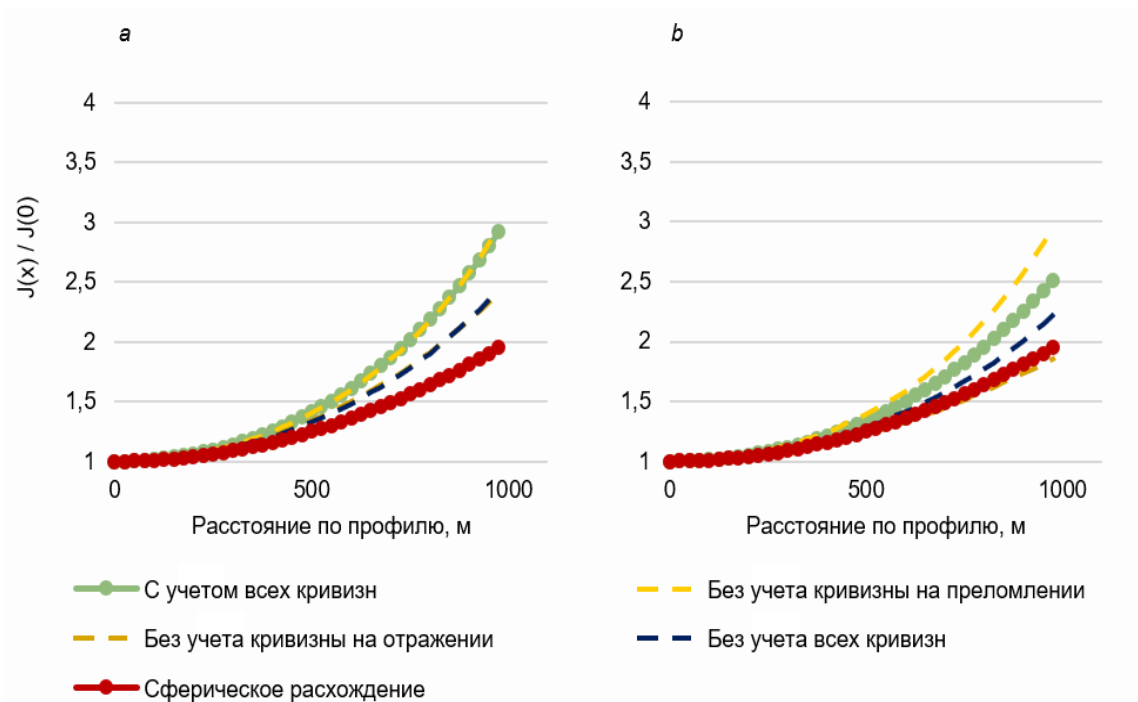


Рис. 6. Относительное изменение геометрического расхождения в Модели 3б при кривизне в точке отражения: $a - 0.0004 \text{ м}^{-1}$ и $b - 0.0008 \text{ м}^{-1}$

На этих графиках видно, что кривизны отражающей и преломляющей границ по-разному влияют на скорость роста геометрического расхождения, и нельзя заранее утверждать о большем влиянии той или иной границы на результаты инверсии. Во всех случаях геометрическое расхождение является монотонно возрастающей функцией координаты приемника.

РЕЗУЛЬТАТЫ AVO-ИНВЕРСИИ

В этом разделе будут представлены результаты AVO-инверсии по данным моделирования без наложения случайных помех. Для инверсии применялся оптимизационный метод Нелдера-Мида. Начальное приближение для упругих параметров моделей равнялось примерно 15 % от истинных значений. При таком условии алгоритм сходил к главному минимуму целевой функции. Ниже приводятся относительные ошибки инверсии при *некорректном* вводе поправок.

Двухслойные модели

В отсутствие преломляющих границ результат инверсии зависит только от поправки за геометрическое расхождение. В табл. 4 приведены значения относительных ошибок инверсии по Моделям 1 и 2, к которым привело пренебрежение кривизной границы при расчете геометрического расхождения.

Таблица 4

Относительные погрешности инверсии в двухслойных моделях

Параметр	Ошибки инверсии, %		
	Модель 1		Модель 2
	Кривизна 0.0004	Кривизна 0.0008	Кривизна -0.0004
v_p	-0.1	-0.3	0.5
v_s	0.8	1.3	-2.0
ρ	1.3	1.8	-11.2

Видно, что в антиклинальной модели, в которой кривизна границы лишь ускоряла рост геометрического расхождения, не изменяя в целом вида этой функции, пренебрежение кривизной не привело к значительным ошибкам восстановления параметров отражающего слоя, которые не превышают 1–2 %. Причем, как можно было ожидать из рис. 4а, пренебрежение большей кривизной привело к большим ошибкам инверсии.

В синклинальной модели геометрическое расхождение сильно зависело от кривизны границы (рис. 4b), и поэтому ошибки инверсии в разы превышают (в наибольшей степени по плотности) полученные в антиклинальной модели при той же (по модулю) кривизне. Важно отметить, что скорость продольных волн восстанавливается с высокой точностью в обоих случаях.

Трехслойные модели

В трехслойных моделях можно пронаблюдать не только эффект от пренебрежения кривизной границ «в целом», но и рассмотреть роль преломляющей и отражающей границ по отдельности. Соответствующие относительные ошибки инверсии по Моделям 3а и 3б представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Относительные погрешности инверсии в Модели 3а

Параметр	Ошибки инверсии, %							
	Без учета кривизны на преломлении		Без учета кривизны на отражении		Без учета всех кривизн		Сферическое расхождение	
Кривизна, m^{-1}	0.0004	0.0008	0.0004	0.0008	0.0004	0.0008	0.0004	0.0008
v_P	−0.1	−0.2	−0.1	−0.2	−0.2	−0.5	12.3	12.4
v_S	0.3	0.8	0.4	0.6	0.8	1.4	18.2	18.8
ρ	0.5	1.1	1.6	2.1	2.0	2.5	−15.4	−19.5

Таблица 6

Относительные погрешности инверсии в Модели 3б

Параметр	Ошибки инверсии, %							
	Без учета кривизны на преломлении		Без учета кривизны на отражении		Без учета всех кривизн		Сферическое расхождение	
Кривизна, m^{-1}	0.0004	0.0008	0.0004	0.0008	0.0004	0.0008	0.0004	0.0008
v_P	0.0	0.1	−0.1	−0.3	−0.1	−0.1	10.9	10.2
v_S	0.1	−0.3	0.5	0.8	0.6	0.5	15.8	14.1
ρ	−0.3	−1.5	2.5	2.1	2.1	0.8	−9.5	−8.5

Первые три колонки под шапкой «Ошибки инверсии» соответствуют случаю, когда при построении лучей учитывалась неоднородность перекрывающей толщи, и в амплитуды, кроме поправки за геометрическое расхождение, вводилась поправка за коэффициенты прохождения. Видно, что в этом случае погрешности инверсии малы (0.1–2.5 %), причем нельзя сказать, что кривизна какой-то границы оказывает принципиально большее или меньшее влияние на результат инверсии. Такой вывод можно было ожидать из рис. 5 и 6.

Последний столбец соответствует случаю замены слоистой перекрывающей толщи однородным пластом с эффективными параметрами. При этом в наблюдаемые амплитуды не вносится поправка за коэффициенты прохождения, а также некорректно рассчитываются углы падения. Все это приводит к

резкому ухудшению результатов инверсии, причем падает точность определения всех параметров, в том числе и скорости продольных волн, которая в остальных случаях восстанавливалась с точностью до долей процента. Погрешности по всем параметрам больше в асимметричной Модели 3а. Для наглядности погрешности инверсии по Модели 3b показаны на рис. 7.

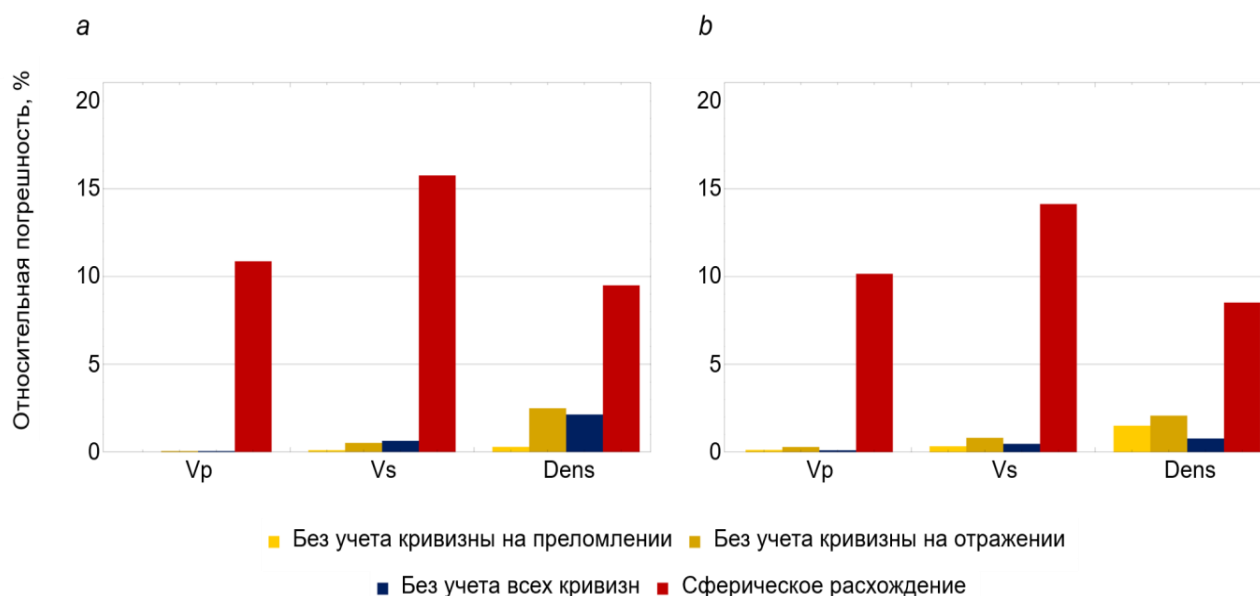


Рис. 7. Результаты инверсии по Модели 3b при кривизне отражающей границы: а – 0.0004 м⁻¹ и б – 0.0008 м⁻¹

Влияние неточной геометрии границ в модели

Как было показано выше, неточная геометрия лучей оказывает большое влияние на результаты инверсии, пренебрежение кривизной границ лишь в некоторых случаях приводит к сравнимым погрешностям. Все результаты до сих пор были получены в предположении, что глубины границ известны точно. На практике это условие выполняется редко. Неточное задание модели приведет к искажению геометрии лучей, и нельзя по приведенным выше результатам сказать, будет ли учет кривизны границы хоть как-то сказываться на результатах инверсии в этом случае.

Чтобы ответить на этот вопрос, был проведен численный эксперимент на двухслойных моделях. В модель вносилась погрешность в виде завышения глубины границы на 10 м. После этого производилась вся процедура лучевого моделирования и инверсии по неточной модели (см. «Анализ данных»). Относительные погрешности инверсии представлены в табл. 7.

Из сравнения табл. 4 и 7 видно, что ошибка в глубине границы на 10 м не приводит к существенным изменениям в результатах инверсии. В антиклинальной Модели 1 небольшая погрешность в глубине границы (10 м) и пренебрежение кривизной границы приводят к близким по величине ошибкам инверсии порядка 1–2 %. В синклинальной Модели 2 ошибка восстановления плотности при некорректном расчете геометрического расхождения без учета кривизны границы остается на порядок выше (около 12 %).

Дополнительные вычисления показали, что значительное ухудшение результатов инверсии наблюдается, если ошибки задания глубины границы достигают 50–100 м.

Таблица 7

Относительные погрешности инверсии для Моделей 1 и 2 при неточном задании глубины границы

<i>Параметр</i>	<i>Ошибки инверсии, %</i>			
	<i>Модель 1 (кривизна 0.0004 м^{-1})</i>		<i>Модель 2 (кривизна -0.0004 м^{-1})</i>	
	<i>Корректный учет кривизны</i>	<i>Без учета кривизны</i>	<i>Корректный учет кривизны</i>	<i>Без учета кривизны</i>
$v_p, \text{ м/с}$	0.906	0.750	0.510	1.014
$v_s, \text{ м/с}$	1.402	2.129	0.760	1.307
$\rho, \text{ кг/м}^3$	2.332	1.284	1.378	11.986

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрено влияние некорректного учета структуры покрывающей толщи и кривизны границ на результаты нелинейной AVO-инверсии. Исследования проведены на синтетических данных, рассчитанных лучевым методом для двух- и трехслойных моделей среды с выпуклыми и вогнутыми границами. Показано, что пренебрежение кривизной границ при расчете геометрического расхождения дает ошибки в параметрах целевого слоя порядка 1–2 % для выпуклой границы и до 11 % для вогнутой. В то же время замена слоистой покрывающей толщи однородным слоем с эффективными параметрами (в трехслойных моделях) заметно искажает параметры отражающего слоя (погрешности составляют 10–19 %), даже если при этом не изменяется общий вид функции расхождения. Это связано с пренебрежением коэффициентами прохождения и некорректно рассчитанными углами падения. Было показано также, что пренебрежение кривизной границ может приводить к более существенным ошибкам в AVO-инверсии, чем неточное задание глубины отражающей границы, хотя в случае очень больших ошибок в глубине (порядка 50–100 м) влияние последних будет превалировать.

На основании численных экспериментов, проведенных на сравнительно простых моделях, можно дать несколько рекомендаций по улучшению стандартной методики AVO-инверсии. Во-первых, основной вклад в ее точность вносит корректный учет геометрии лучей (в частности, преломлений), поэтому целесообразно производить лучевое трассирование в моделях без упрощений. Во-вторых, даже при корректном построении лучей ввод неточной поправки за геометрическое расхождение, рассчитанной без учета кривизны преломляющих и отражающих границ, приводит к значительным погрешностям в результатах AVO-инверсии. В связи с этим рекомендуется учитывать кривизну всех границ при расчете геометрического расхождения вдоль лучей.

Следует также заметить, что в районах со сложной тектоникой, для которых характерны большие углы наклона и значительные кривизны целевых границ, необходимо проводить AVO-инверсию не по

сейсмограммам ОСТ, а по сейсмограммам общей точки отражения ОТО. Такие сейсмограммы могут быть получены в результате глубинной миграции до суммирования ГМДС [Воскресенский, 2001; Huang et al., 2000].

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят А.А. Дучкова и Г.А. Дугарова за помощь и советы при проведении исследований и отладке вычислительных алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

- Бинкин И.Г., Мосякин А.Ю., Бусыгин И.Н.** AVO и многоволновая сейсморазведка при прогнозе залежей углеводородов в терригенном разрезе западного Предкавказья // Геофизика. – 2000. – № 3. – С. 18–20.
- Воскресенский Ю.Н.** Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. Учебное пособие для вузов. – М.: РГУ нефти и газа, 2001. – 68 с.
- Лыхин П.А., Нефедкина Т.В.** Потенциал нелинейной AVOA-инверсии отраженных продольных волн для изучения трещиноватых карбонатных коллекторов нефти и газа // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 2. – С. 59–68.
- Петрашень Г.И., Каштан Б.М., Ковтун А.А.** Распространение объемных волн и методы расчета волновых полей в анизотропных упругих средах / Сборник научных трудов под ред. Г.И. Петрашеня. – Л.: Наука, 1984. – 282 с.
- Сейсморазведка.** Справочник геофизика / Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. – М.: Недра, 1981. – 464 с.
- Шалаева Н.В.** AVO-анализ: физические основы, возможности и ограничения (краткий курс). – Геленджик: Геомодель, 2004. – 51 с.
- Aki K., Richards P.G.** Quantitative Seismology, theory and methods. Vol. I. – San Francisco: W.H. Freeman & Co, 1980. – 557 p.
- Ayzenberg M., Tsvankin I., Aizenberg A.M., Ursin B.** Effective reflection coefficients for curved interfaces in transversally isotropic media // Geophysics. – 2009. – Vol. 74. – P. WB33–WB53.
- Červený V., Hron F.** The ray series method and dynamic ray tracing system for three-dimensional inhomogeneous media // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1980. – Vol. 70, No. 1. – P. 47–77.
- Hilterman F.J.** Seismic amplitude interpretation. Distinguished instructor series. – SEG, 2001. – No. 4. – 244 p.
- Huang S., Chose S., Sengupta M.K., Moldoveanu N.** Improvements in 3D AVO analysis using depth imaging of dipping events against salt // 70th Annual SEG International meeting: Expanded abstracts. – Calgary: SEG, 2000. – P. 0198 (4 p.)
- Skopintseva L.V., Aizenberg A.M., Ayzenberg M.A., Landrø M., Nefedkina T.V.** The effect of interface curvature on AVO inversion of near-critical and postcritical PP-reflections // Geophysics. – 2012. – Vol. 77, No 5. – P. N1–N16.
- Skopintseva L.** Exploring the potential of long offset reflections in AVO inversion and AVO analysis. Thesis for the degree of Ph. D. – Trondheim, 2011. – 200 p.

Shuey P.T. A simplification of the Zoeppritz equation // Geophysics. – 1985. – Vol. 50. – P. 609–614.

Zoeppritz K. Über reflexion und durchgang seismischer wellen durch unstetigkeitsflächen // Über Erdbebenwellen VII. Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, mathematisch-physikalische Klasse. – 1919. – P. 57–84.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

НЕФЕДКИНА Татьяна Викторовна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Область научных интересов: многоволновая сейсморазведка, обменные отраженные волны, AVO-анализ и инверсия.

ШИЛОВ Николай Николаевич – магистрант ГГФ НГУ, инженер лаборатории динамических проблем сейсмики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: асимптотические методы в сейсмике, в частности, лучевой метод и метод гауссовых пучков.