

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЗРЕЗОВ С УЧЕТОМ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ

Представлены методики для обработки данных в сейсморазведке – для инверсии временных сейсмических разрезов в глубинные, позволяющие экстраполировать одномерные модели физических параметров среды, определенные по данным скважинных геофизических исследований, в околоскважинные пространства. Предусмотрена корректировка модели с учетом термодинамического состояния среды, расчет различных физических параметров среды в рамках классической и неклассической теорий деформаций, а также расчет синтетических сейсмограмм. Так, разность значений  $\mu$  и  $\lambda$  между неклассическим и классическим методами составляет соответственно 4,7 % и -1,4 %, что является существенным.

Двухмерная модель среды получается путем экстраполяции одномерной модели с учетом положения акустических границ. При переходе к близкой к реальной (3D) модели учитываются изменения значений пластовых скоростей продольных и поперечных волн и плотности по тонким пластам по глубине и по профилю, а также изменения геостатического давления среды по пластам вдоль профиля. При этом достигается значимое уточнение времен, определяющих глубины залегания сейсмических горизонтов. Разность времен достигает 0,17 с, что эквивалентно разности в глубинах до 330 м и более и важно для уточнения структурных построений, особенно касательно поиска ловушек углеводородов.

**Ключевые слова:** сейсморазведка; модель среды; физические параметры среды; сейсмический разрез; сейсмическая инверсия; синтетические сейсмограммы.

### *Введение*

Методы инверсии, основанные на детальном исследовании сейсмических записей, с применением новых возможностей сейсморазведки (изучение анизотропии, аномально высоких пластовых давлений и других подобных свойств среды по исследуемым площадям) получили большое развитие. При этом сейсмическое моделирование позволяет оценить роль влияния различных физических состояний среды на кинематические и динамические параметры сейсмических волн. Одним из основных вопросов при применении инверсии и моделирования является учет напряженного состояния реальной среды. Изучение различных типов динамических и кинематических характеристик сейсмических волн в пределах 3-мерной неклассически линеаризованной базовой модели показывает, что напряженность среды и нелинейность деформирования играют существенную роль при формировании сейсмического волнового поля.

В статье приводятся результаты разработки теоретической основы создания технологии моделирования сейсмических записей с учетом термодинамического состояния среды (оценка влияния изменения напряженного состояния среды на форму сейсмических записей, моделирование в рамках неклассической теоретической базовой модели с использованием данных лабораторных, скважинных и полевых сейсмических исследований).

### *Постановка задачи*

Напряженное состояние среды на больших глубинах определяется давлением вышележащих пород, влиянием тектонических процессов, внутри-

пластовым давлением, механическими и структурными свойствами осадочных пород и другими факторами. Соотношение горного давления в вертикальном и горизонтальном направлениях может иметь различные значения в зависимости от состава пород. При аномально высоком пластовом давлении (АВПД) отличие давлений в отдельных глинистых пластах от окружающих может составить несколько десятков процентов. АВПД – часто встречающееся явление и в Южно-Каспийской впадине. Известно, что осадочные породы характеризуются более высокой пористостью и меньшей уплотненностью, чем коренные породы. Поэтому даже незначительное изменение термодинамического состояния среды оказывает заметное влияние на физико-механические свойства осадочных пород.

Учет термодинамических условий повышает точность прогнозирования геологического строения среды по геофизическим методам. Известно, что извлечение информации о термодинамическом состоянии среды по кинематическим и динамическим параметрам сейсмических волн является основной целью сейсмической инверсии. Для повышения его эффективности необходимо проведение сейсмического моделирования с целью оценки влияния термодинамических условий на параметры сейсмических волн по исследуемой площади. Точность прогнозирования АВПД по сейсмическим скоростям существенно зависит от возможности учета напряженного состояния среды. Создание модели напряженного состояния среды, в том числе АВПД, позволяет уточнить структурные особенности разреза, более точно и деталь-

но прогнозировать флюидонасыщенность, а также избежать аварий при бурении глубоких скважин.

#### **Модель среды**

В данном исследовании при моделировании в качестве теоретической основы принята неклассическая теоретическая базовая модель [Абасов и др., 2000; Кулиев, 2005], которая разработана на основе теоретических исследований [Александров и др., 2001; Гузь, 1986; Маслов и др., 2000]. Широко применяемые в сейсморазведке параметры – модули упругости второго порядка (постоянные Ламе  $I$  и  $m$ ) при отсутствии давления (при малых деформациях) рассчитываются с применением известных классических формул:

$$m_0 = r V_{0s}^2; \quad I_0 = r V_{0p}^2 - 2 r V_{0s}^2; \\ n_0 = \frac{V_{0p}^2 - 2V_{0s}^2}{2(V_{0p}^2 - V_{0s}^2)}; \quad (1)$$

где,  $V_{0p}$ ,  $V_{0s}$  – соответственно “натуральные” скорости продольных и поперечных волн в ненапряженных изотропных упругих средах,  $r$  – плотность пород при атмосферном давлении.

При условии неравномерного однородного напряженного состояния в изотропной среде

$$m = r C_s^2 + P \left( 2a - \frac{I_0}{3K_0} (a + b + g) \right); \\ I = r C_l^2 - 2 r C_s^2 + \\ + P \left( a \left( 1 - \frac{I_0}{m_0} \right) + \frac{I_0^2}{3m_0 K_0} (a + b + g) \right) \quad (2)$$

В формулах  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $C_l$ ,  $C_s$  – соответственно “натуральные” и “истинные” скорости продольных и поперечных волн при данном уровне нагружения изотропной упругой среды;  $P$  – параметр нагружения;  $r$  – плотность пород при данном уровне нагружения;  $a$ ,  $b$ ,  $g$  – значения коэффициента сжатия в направлениях осей  $Z$ ,  $X$  и  $Y$ .

Приведенные формулы соответствуют второму варианту теории малых начальных деформаций по терминологии [Гузь, 1986]. В работе [Кулиев, Ширинов, 2005] приводятся аналогичные формулы и для других вариантов теории начальных деформаций.

#### **Программное обеспечение**

В сейсморазведке используются высокоэффективные программные пакеты по обработке и интерпретации сейсмических материалов с использованием данных различных геофизических исследований, проводимых на поверхности и в глубоких скважинах. Одним из путей повышения эф-

фективности прогнозирования геологического разреза по геофизическим данным является более широкое использование данных лабораторных исследований по определению физико-механических свойств среды в различных термобарических условиях. В существующих программных продуктах недостаточно развиты методы моделирования сейсмических записей с учетом термобарических условий в среде с привлечением результатов лабораторных измерений. Нами составлены компьютерные программы, позволяющие экстраполировать физические параметры модели среды, определенные по данным скважинных геофизических исследований, в окоскваженные пространства; корректировать модель с учетом геодинамического и термодинамического состояния среды; рассчитывать различные физические параметры среды в рамках классической и неклассической теорий деформаций, а также рассчитывать синтетические сейсмограммы. Составление программ и различные расчеты выполнены на основе геофизического программного пакета Денверского Университета (Colorado School of mines). Программное обеспечение может применяться на персональных компьютерах и на рабочих станциях.

#### **Оценка влияния напряженного состояния среды**

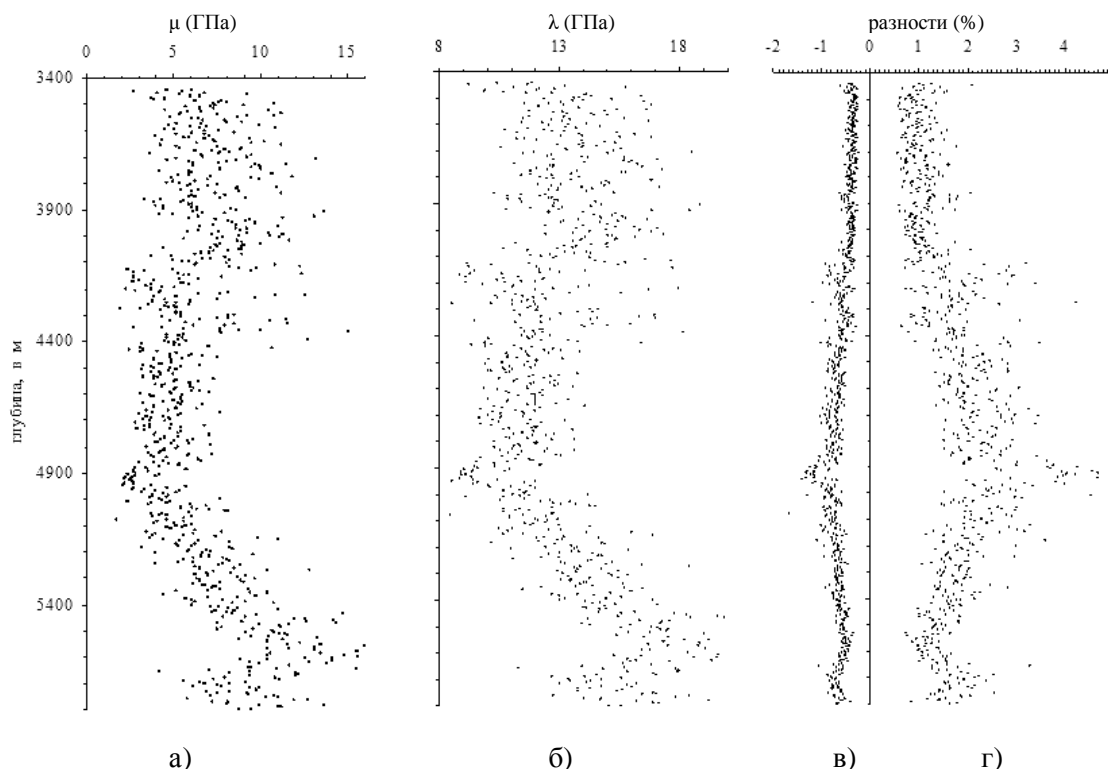
Для оценки влияния напряженного состояния среды на форму сейсмических записей сначала была подготовлена одномерная модель среды. В качестве входных данных используются результаты лабораторных исследований физико-механических параметров конкретных осадочных пород при различных термобарических условиях, различные аналитические зависимости между разными физическими параметрами, данные геофизических исследований в глубоких скважинах и сейсмических работ 2D в пределах Южно-Каспийской впадины. Для этого первоначально были изучены результаты лабораторных измерений физических свойств осадочных пород (в основном глин, песчаников, мергелей, известняков), отобранных в Азербайджане. Использованы данные из различных литературных источников и построены графики изменения скоростей продольных и поперечных волн, а также плотности в зависимости от глубины и давления. Аналитическая зависимость между параметрами (скоростями, плотностью) и давлением была аппроксимирована в виде полинома 3-й степени. Далее для создания двумерной физической модели среды одномерная модель, составленная в одной точке сейсмического профиля (на скважине), была экстраполирована в остальные точки профиля с учетом положения сейсмических границ и геостатического давления среды вдоль профиля.

Далее проведен расчет упругих параметров по формулам (1) и (2). Для этого сначала реальные данные экстраполируются на лабораторные усло-

вия, т.е. на давление 0.000098 ГПа (1 атм.) и температуру 22 °С.

При известных значениях давления, скоростей продольных и поперечных волн и плотности пород для лабораторных и реальных условий были рассчитаны постоянные Ламе в рамках классической

и неклассической теорий (рис. 1). Как видно из рисунка, по мере увеличения глубины и, соответственно давления, значения  $\mu$  и  $I$  увеличиваются. В интервалах глубин, например 4200-5000 м, где более низкие значения пластовых скоростей, происходит уменьшение значений  $\mu$  и  $I$ .



**Рис. 1.** Значения постоянных Ламе  $\mu$  (а) и  $\lambda$  (б) по классическому методу, разностные значения  $\lambda$  (в) и  $\mu$  (г) по классическому и неклассическому методам

Постоянные Ламе были рассчитаны для различных значений геостатического давления и изменения сжатия в  $Z$ ,  $X$  и  $Y$  направлениях. Сопоставление результатов показывает, что при увеличении значений давления в  $X$ , а затем и в  $Y$  направлениях, различие между результатами классических и неклассических методов увеличивается. Различие увеличивается по мере увеличения глубин и уменьшения скоростей и плотностей. Например, при увеличении сжатия по  $X$  и  $Y$  направлениях на 30% разность значений  $\mu$  и  $\lambda$  между неклассическим и классическим методами составляет соответственно 4.7 % и -1.4 % (рис. 1, г) и в)). Незначительное различие объясняется тем, что использованный квадратичный упругий потенциал при выводе формулы (2) является достаточно грубым приближением в моделировании процесса деформирования реальной геологической среды. Для повышения точности полученных результатов необходимо привлечь более адекватные упругие потенциалы. Но поскольку целью данной работы являлась разработка методической основы нового подхода к исследованию влияния напряженного состояния на физико-механические свой-

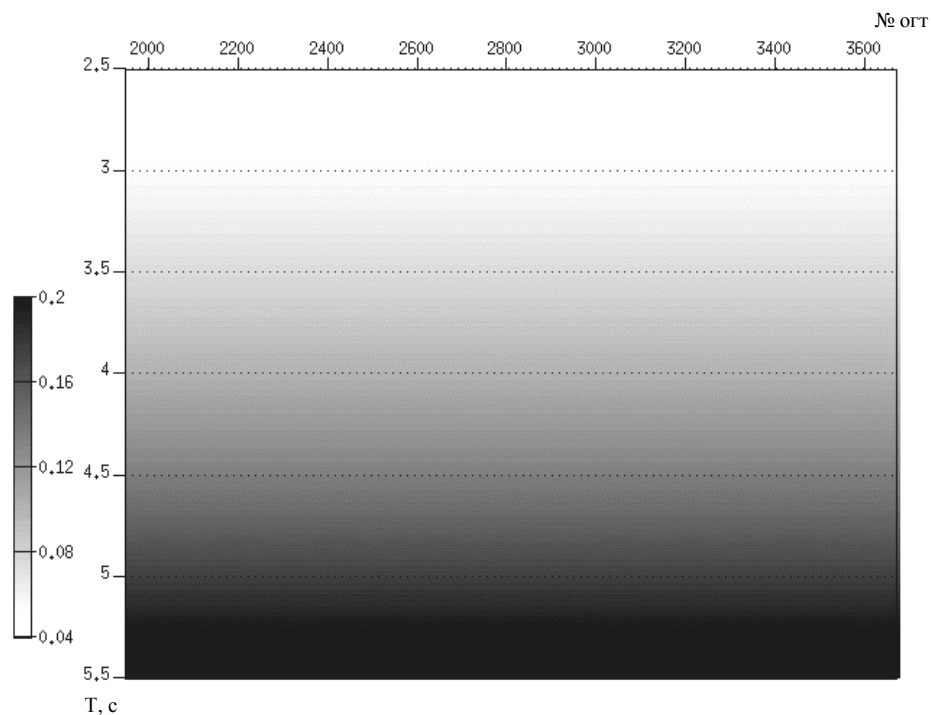
ства среды, выбор пал на самый простой вид упругого потенциала.

#### Обсуждение результатов

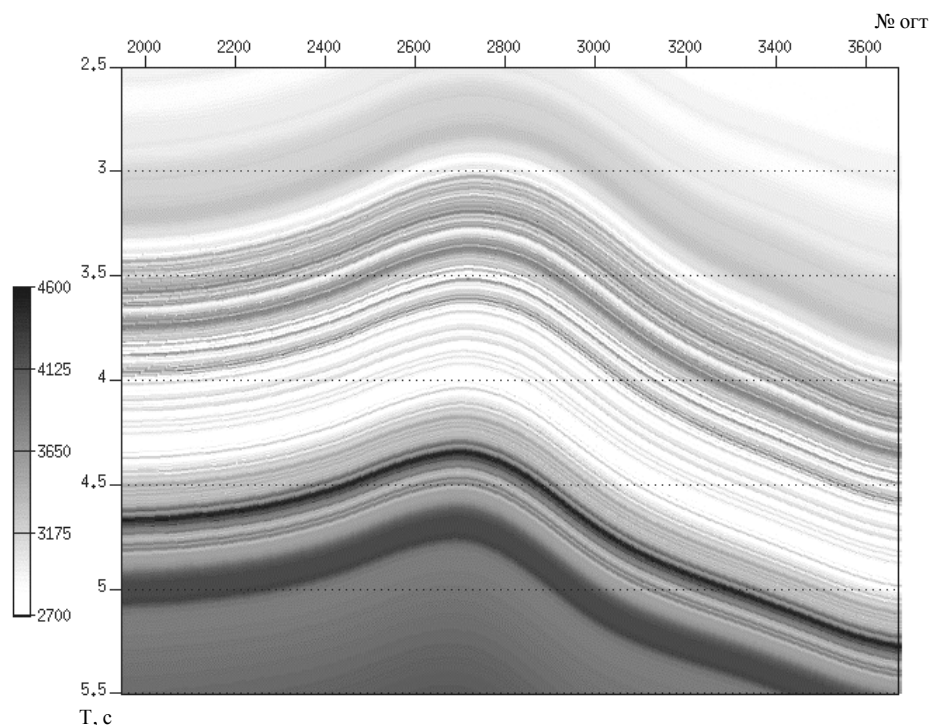
Для расчета синтетических сейсмограмм по сейсмическому профилю были рассчитаны двухмерные модели геостатических давлений (рис. 2), тонкослоистые модели пластовых скоростей продольных (рис. 3) и поперечных волн и плотности. Двухмерная модель рассчитывалась путем экстраполяции одномерной модели, заданной в сводовой части структуры, на остальные общие глубинные точки (ОГТ) сейсмического профиля. На основании акустической модели были рассчитаны временные разрезы продольных волн без учета (рис. 4) и с учетом (рис. 5) различий геостатического давления в точке модели и в текущей точке профиля по всем заданным пластам геологической среды. На временных разрезах прослеживаются сейсмические горизонты, соответствующие определенным акустическим границам среды. Сопоставление временных разрезов показывает, что при учете различий давлений происходит значимое уменьшение времени, определяющего положение

сейсмического горизонта. Разница времен увеличивается по мере удаления от одномерной модели,

а также с увеличением времени, определяющим сейсмические горизонты.



**Рис. 2.** Модель распределения геостатического давления по сейсмическому профилю



**Рис. 3.** Тонкослоистая модель распределения пластовых скоростей по сейсмическому профилю

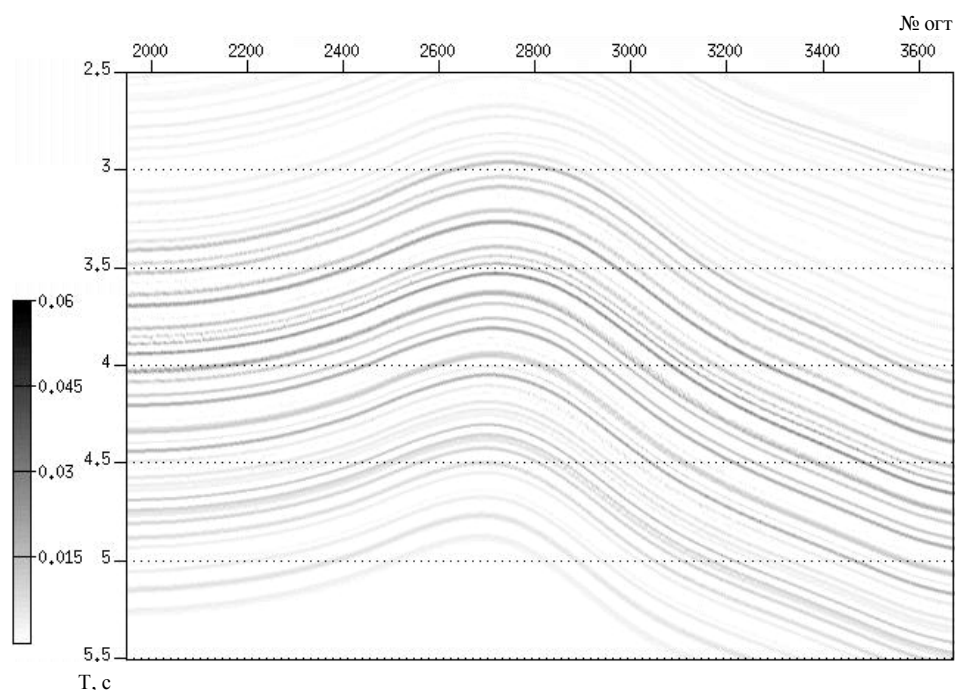
### Выводы

Таким образом, улучшение моделирования сейсмических разрезов, подкрепленное результатами

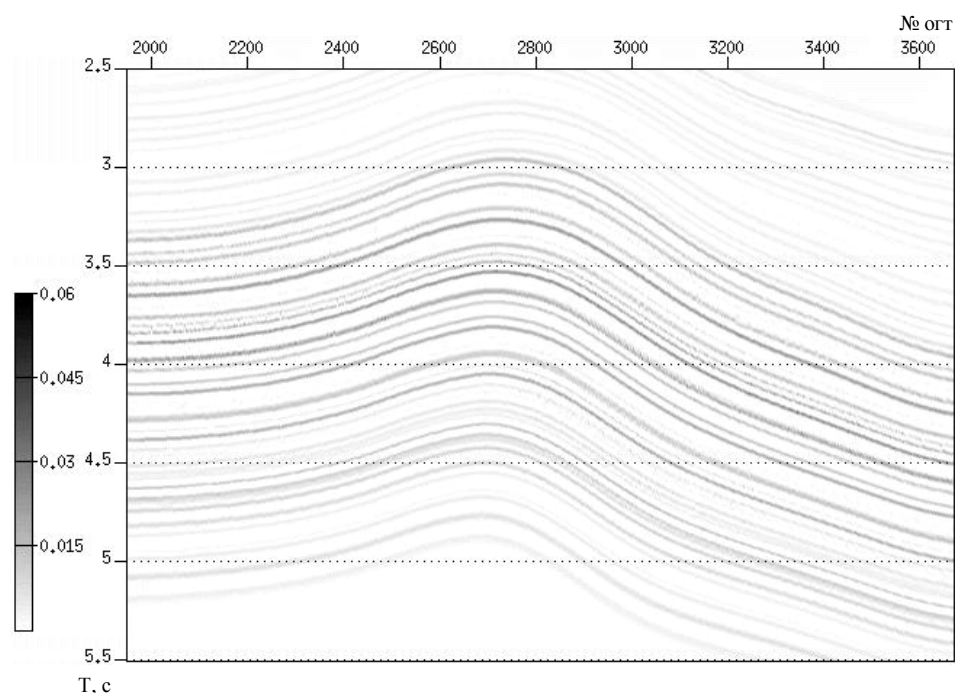
более точных теоретических исследований, позволило разработать основу современной технологии обработки и интерпретации сейсмической инфор-

мации с учетом термодинамических условий в среде и получить новые практические результаты.

Работа выполнена в рамках гранта № 3647 Украинского Научно и Технологического Центра.



**Рис. 4.** Синтетический временной разрез по сейсмическому профилю без учета изменения давления.



**Рис. 5.** Синтетический временной разрез по сейсмическому профилю после коррекции пластовых скоростей с учетом изменения давления

#### Литература

Абасов М.Т., Кулиев Г.Г., Джеваншир Р.Д. Модель развития литосферы // Вестник Российской Академии Наук. – 2000. – 70, № 2. – С. 129–135.

Александров К.С., Продайвода Г.Т., Маслов Б.П. Метод определения нелинейных упругих свойств горных пород // Докл. РАН. – 2001. – 380, № 1. – С. 109–112.

Гузь А.Н. Упругие волны в телах с начальными

напряжениями. I. Общие вопросы. II. Закономерности распространения. – К.: Наук. думка, 1986. – 376 с., 536 с.

Кулиев Г.Г. Неклассическая линеаризованная теория деформаций в геофизике // Известия НАН Азербайджана. Науки о Земле, 2005. – № 2. – С. 41–51.

Кулиев Г.Г., Ширинов Н.М. К определению модулей

упругости второго порядка напряженных нелинейных изотропных сред // Изв. НАН Азербайджана, Науки о Земле. – 2005. – № 3. – С. 10–16.

Маслов Б.П., Продайвода Г.Т., Выжва С.А. Математичне моделювання впливу тиску у тріщинуватих гірських породах // Геофіз. журн. – 2000. – 22, № 3. – С. 113–118.

### МОДЕЛЮВАННЯ СЕЙСМІЧНИХ РОЗРІЗІВ З УРАХУВАННЯМ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ СЕРЕДОВИЩА

Г.Г. Кулієв, Х.Б. Агаєв

Наведено методики для оброблення даних у сейсморозвідці – для інверсії часових сейсмічних розрізів в глибинні, що дають змогу екстраполювати одновимірні моделі фізичних параметрів середовища, визначені за даними свердловинних геофізичних досліджень, у навколосвердловинний простір. Передбачено коригування моделі з урахуванням термодинамічного стану середовища, розрахунок різних фізичних параметрів середовища в межах класичної та некласичної теорій деформацій, а також розрахунок синтетичних сейсмограм. Так, різниця значень  $\mu$  і  $\lambda$  між некласичним і класичним методами становить відповідно 4,7% і -1,4%, що є істотним.

Двовимірна модель середовища отримується екстраполяцією одновимірної моделі з урахуванням положення акустичних границь. У разі переходу до близької до реальної (3D) моделі враховуються зміни значень пластових швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль та густини по тонких пластах вздовж профілю та з глибиною, а також зміни геостатичного тиску по пластах вздовж профілю. До того ж досягається істотне уточнення часів, що визначають глибини залягання сейсмічних горизонтів. Різниця часів досягає 0,17 с, що еквівалентно різниці в глибинах до 330 м і більше і є важливим для уточнення структурних побудов, особливо щодо пошуку пасток вуглеводнів.

**Ключові слова:** сейсморозвідка; модель середовища; фізичні параметри середовища; сейсмічний розріз; сейсмічна інверсія; синтетичні сейсмограми.

### THE SEISMIC SECTIONS MODELING ACCOUNTING THE STRESSED STATE OF THE MEDIUM

H.H. Kuliyeв, Kh.B. Agayev

The paper presents the techniques for processing of seismic prospecting data – for inversion of time seismic sections to depth ones. This makes it possible to extrapolate defined by wells' geophysical investigations one-dimensional models of medium's physical properties into the borehole environment. Correcting of the model taking into account the thermodynamic state of the medium and calculation of various physical properties of medium within the classical and non-classical theories of deformation as well as calculation of synthetic seismograms is provided. Thus, the differences between the classical and non-classical theories for values  $\mu$  and  $\lambda$  are correspondingly 4.7 % and -1.4 %, which is substantial.

2D model of the medium is composed by extrapolating of one-dimensional model accounting the location of acoustic borders. At passing to close to the real (3D) model the changes of values of formation velocities of longitudinal and transverse waves and densities of thin layers in depth and profile takes into account as well as the changes of geostatic pressure on layers along the profile. At thus the substantial refinement of time which define the depth of the seismic horizons is reached. Time difference reaches 0.17 s, which is equivalent to the difference in depths up to 330 m or more and it is important for specifying of structural models, especially concerning the hydrocarbon traps prospecting.

**Key words:** seismic prospecting; model of the medium; medium's physical properties; seismic section; seismic inversion; synthetic seismograms.

<sup>1</sup> *Институт геологии НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан*

<sup>2</sup> *Управление разведочной геофизики УГиГ ГНК РАЗ, г. Баку, Азербайджан*