

Определение физико-механических свойств пород осадочного чехла на основе сейсмических, скважинных данных и теории упругих волн напряженных сред

© Г. Г. Кулиев, Х. Б. Агаев, 2011

Институт геологии НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан
Поступила 21 октября 2010 г.

Представлено членом редколлегии В. П. Коболевым

На основе неклассично лінеаризованої теорії механіки деформівного твердого тіла запропоновано підхід для встановлення істинних значень фундаментальних параметрів пружності порід геологічного розрізу на підставі реальних сейсмічних і свердловинних геофізичних даних з урахуванням геодинамічного стану середовища. За доповненням стандартного графа обробки сейсмічних і свердловинних геофізичних даних новими процедурами урахування геодинамічних змін (із застосуванням сейсмічної інверсії) отримано тонкошарові одно- і двовимірні моделі середовища за швидкостями поширення поздовжніх хвиль, густини порід і гірського тиску. Двовимірні моделі за швидкістю поширення поперечних хвиль визначені за результатами AVO-перетворення сейсмічних записів. Наведено конкретні результати вивчення фізико-механічних властивостей тонкошаруватого середовища в одній із структур Південнокаспійської западини. Розраховано коефіцієнти Пуассона порід середовища за класичним і запропонованим підходами, подано часовий розріз різниці їх результатів.

An approach to determine the true values of fundamental parameters of rocks elasticity of geological section on the base of real seismic and geophysical well logging data taking into account the medium geodynamic state has been proposed on the base of nonclassical linearized theory of mechanics of deformed solid body. The thin-layered 1D and 2D models have been obtained on velocities of compression waves, rocks densities and rock pressure adding standard graph of processing of seismic and well geophysical data with new procedures taking into account geodynamic changes (with application of seismic inversion). 2D models on velocities of shear waves have been defined by the results of AVO transformation of seismic records. There are some results on the study of physical properties of thin-layered medium on one of the structures located within the South-Caspian depression, where the medium has a complex geological structure and thermodynamic state. Poisson's coefficients of medium rocks have been calculated by classical and proposed methods and temporal section of difference of their results has also been given.

Введение. Различные геологические процессы, происходящие в настоящее время, в значительной мере связаны и, более того, характеризуются активной геодинамикой, т. е. вызываются и сопровождаются различными движениями (горизонтальными и вертикальными), а также деформациями натуральной и техногенной природы. Структуры земных недр в естественном залегании находятся под воздействием космогенных, экзогенных и эндогенных сил гравитационной, механической, тектонической, электромагнитной, тепловой, химической, ядерной, биологической и иной природы.

Горные породы, слагающие осадочный чехол земной коры, обладают пористостью и трещиноватостью. Они подвергаются как

внешним, так и силовым, термическим, химическим и другим воздействиям в поровом пространстве. Эти воздействия имеют различные уровни интенсивности и характера влияния в зависимости от состояния среды: сухая, насыщена газами, водой, нефтью и т. д. Пористость и трещиноватость приводят к тому, что среда становится разномодульной, т. е. ее способности сопротивления к растяжению и сжатию существенно отличаются. Перечисленные факты свидетельствуют о том, что горные породы ведут себя скорее как «конструкции», а не как материалы, т. е. их физическо-механические свойства существенно различаются для одних и тех же пород с разной пористостью, трещиноватостью, величиной размеров и концентрацией минеральных зерен. Следовательно,

соблюдение правил стандартных подходов при определении физико-механических свойств среды приводит к неверному выводу о дополнительном вкладе геометрических и объемных параметров на физико-механические свойства среды. Результаты прямого применения стандартных процедур к обработке и интерпретации сейсмических и скважинных геофизических материалов показывают, что незначительное изменение термодинамических условий оказывает заметное влияние на физико-механические свойства осадочных пород. При этом фактически определяются параметры напряженно-деформированного состояния среды, а не параметры ее физико-механических свойств. Физико-механические свойства материала характеризуют его дифференциальные свойства при соблюдении строго определенных условий и по определению должны быть инвариантными относительно изменений геометрических и силовых параметров деформируемой системы. В случае нарушения этих условий характеристики среды должны определяться другими методами. Поэтому возникает необходимость исследования динамики изменения физико-механических и петрофизических характеристик среды в различных термобарических условиях и синтеза «истинных» величин искомых параметров исходя из их «эффективных» значений. «Истинные» значения этих параметров определяются лабораторными экспериментами с использованием стандартных (общепринятых) образцов при соблюдении всех ограничений соответствующих теорий. «Эффективные» значения рассматриваемых параметров определяются геофизическими методами (предполагается выполнение требований соответствующих теорий) с учетом влияния естественных факторов, т. е. нелинейности, неупругости деформирования, неоднородности и напряженности среды и т. д. Решения задач инверсии и достоверная идентификация пластов по литологии базируются на «истинных» значениях физико-механических свойств среды, а не на их «эффективных» значениях.

Оценка влияния геодинамических факторов (уровня и характера распределения напряжений, способностей к перемещению и деформированию, гибкости и жесткости отдельных блоков, видов воздействий и т. д.) на геологические процессы позволяет разрабатывать и применять эффективные способы целенаправленного поиска и разведки полезных ископаемых.

Анализ результатов работ по обработке и интерпретации сейсмической и скважинной геофизической информации по стандартным технологиям [Аки, Ричардс, 1983; Гогоненков, 1987; Воскресенский, 2001; Yilmaz, 2001; Veeken, Silva, 2004 и др.] показывает, что теоретические результаты, в основном, получены на основе линейной теории распространения упругих волн в недеформированных упругих средах. В то же время в сейсморазведке данные извлекаются с деформированной среды, т. е. исследуемые среды в силу объективных природных обстоятельств до возбуждения в них сейсмических волн предварительно напряжены. Перечисленные обстоятельства определяют актуальность решения задач инверсии с целью определения упругих параметров напряженных сред на базе реальных сейсмических и скважинных геофизических данных.

Неклассически линеаризованный подход. Для определения физико-механических свойств пород по результатам сейсмической инверсии предлагается в качестве теоретической базы использовать неклассически линеаризованный подход (НЛП). Основу НЛП составляет теория распространения упругих волн в предварительно напряженных средах [Biot, 1965; Гузь, 1986]. В рамках НЛП кинематические и динамические характеристики упругих волн применительно к сейсморазведочным задачам определены в работах [Кулиев, Джаббаров, 1998; Kuliyeu, 1998; 1999; Кулиев, 2000]. Исследованию линейных и нелинейных физико-механических характеристик геологической среды и применению полученных результатов при решении различных геолого-геофизических задач также посвящены работы [Никитин, 1983; Маслов и др., 1995; Продайвода и др., 1995; 2004; Маслов, Продайвода, 1998; Александров и др., 2001; Выжва и др., 2005; 2008].

С применением стандартных процедур обработки и интерпретации сейсмической информации и НЛП в работе [Кулиев, Агаев, 2008; 2010] получены сейсмогеодинамические поправки в различные тектонофизические параметры (скорости распространения упругих волн, линейные и нелинейные модули упругости изотропных и трещиноватых сред, давления, плотности и т. д.). В этих работах сейсмогеологические модели геологического разреза построены путем экстраполяции на околоскважинное пространство скважинных геофизических данных. В настоящей статье в целях повышения адекватности модели при ее

создании необходимо дополнительно привлечь сейсмические данные (в результате решения задач сейсмической инверсии). Такой подход теоретически обоснован и позволяет получить более достоверные и точные результаты в последующих интерпретационных задачах.

Разработанный подход применен к определению коэффициента Пуассона ν и модуля упругости E (то же самое — коэффициенты Ламе λ и μ) на базе реальных сейсмических и скважинных геофизических данных. Основываясь на НЛП, при моделировании формы упругих колебаний в пределах «истинных» скоростей для определения скоростей распространения упругих волн используются выражения, полученные в работе [Кулиев, 2009]:

$$\begin{aligned} \rho C_P^2 &= \lambda + 2\mu + F_P^R(P, \rho); \\ \rho C_S^2 &= \mu + F_S^R(P, \rho), \end{aligned} \quad (1)$$

где P — давление, ρ — плотность породы, C_P и C_S — «истинные» скорости продольных и поперечных упругих волн, F_P^R и F_S^R — составляющие линейных и нелинейных действий упругой среды.

Аналогичные формулы для определения действия упругой среды использовались в работе [Кулиев, 2009] при моделировании формы упругих волн с применением «натуральных» скоростей [Гузъ, 1986]. Задачи, связанные с упругим действием геологической среды, ранее также были рассмотрены [Садовский, Николаев, 1982]. В большинстве применяемых в сейсморазведке подходов [Гогоненков, 1987; Воскресенский, 2001; Veeken, Silva, 2004] упругие свойства среды определяются по формулам (1) в случае $F_P^R = F_S^R = 0$. В то же время в реальных средах $F_P^R \neq F_S^R = 0$. Расчетные значения этих величин существенно зависят от модели (упругие потенциалы) сплошных деформируемых сред, вида и уровня напряженного состояния (в частности, от давления). В теоретических моделях [Кулиев, 2009], согласно [Biot, 1965; Гузъ, 1986], можно выделить также различные варианты малых и больших предварительных деформаций.

При решении задач упругой инверсии в напряженных средах, т. е. для определения модулей λ , μ (или ν и E), в настоящей статье предлагается рассчитывать упругие параметры по формулам (1) с применением различных упругих потенциалов, учитывающих малые и большие начальные деформации. Конкретные численные результаты получены с примени-

ем упругого потенциала типа Мурнагана в случае больших начальных деформаций.

Методика определения упругих параметров среды. Известно, что применяемые в сейсморазведке процедуры инверсии в основном состоят из следующих основных этапов: подготовки по данным различных видов каротажа одномерных моделей акустических параметров среды, их коррекции, определения импульса свертки, преобразования сейсмических записей в двумерные акустические разрезы и пересчета их в различные физические и упругие свойства среды [Veeken, Silva, 2004]. Использование точных априорных данных об акустических свойствах в задаче инверсии повышает вероятность правильного и быстрого нахождения глобального экстремума сходимости итеративного процесса преобразования сейсмических записей в акустические разрезы по среде. При преобразовании сейсмических записей предполагается, что изучаемая среда горизонтально-слоистая, акустическая жесткость изменяется по глубине неравномерно, а по латерали монотонно. При этом считается, что каждую трассу временного разреза сейсмического профиля 2D можно представить в следующем виде [Гогоненков, 1987]:

$$a(t, x) = s(t - \tau, x) * r(t, x) + n(t, x), \quad (2)$$

где $s(t, x)$ — сейсмический импульс свертки, $r(t, x)$ — трасса коэффициентов однократных отражений, $n(t, x)$ — аддитивный шум, τ — временная задержка.

Данные 2D/3D сейсмических и различных геофизических исследований (ГИС в глубоких скважинах), в том числе акустического каротажа (АК) и вертикального сейсмического профилирования (ВСП), используются при инверсии. Дополнительное использование данных 2D/3D, АК и ВСП по поперечным волнам существенно повышает точность результатов инверсии.

В результате сейсмической инверсии можно получить разрезы скоростей продольных, поперечных волн и плотности пород, по которым рассчитываются различные упругие параметры. В пределах общепринятых стандартных процедур обработки и интерпретации сейсмической информации из-за различия геодинамического состояния среды получаются различные значения упругих параметров для одного и того же литологического пласта. Это существенно затрудняет геологическую интерпретацию полученных результатов. Отличительные особенности предлагаемого в статье

метода сейсмической инверсии заключаются в учете напряжений и деформаций в процессах построения одномерных моделей акустических параметров среды, преобразовании сейсмических записей в двумерные акустические разрезы и пересчете их в различные физические и упругие свойства среды. Более конкретно, в граф стандартной обработки и интерпретации исходной геофизической информации дополнительно вводятся следующие процедуры:

- учет эффективного давления при сейсмической инверсии;
- построение с использованием скважинных и сейсмических данных двумерных акустических моделей с учетом действий упругой среды;
- определение эффективных значений коэффициента Пуассона ν и модуля Юнга E с учетом геодинамического состояния среды по формулам [Кулиев, 2000; 2009; Guliyev, 2010]

$$\nu = \frac{C_P^2 - 2C_S^2 - \rho^{-1}(F_P^R - 2F_S^R)}{2[C_P^2 - C_S^2 - \rho^{-1}(F_P^R - F_S^R)]};$$

$$E = 2(1 + \nu)(\rho C_S^2 - F_S^R); \quad (3)$$

- определение истинных значений линейных и нелинейных физико-механических свойств пород;
- определение разрезов разности упругих характеристик геологической среды.

Геологические особенности строения исследуемого объекта. Описанный метод применен для определения физико-механических свойств пород среды в одной из структур, расположенной в Южно-Каспийской впадине (ЮКВ). Рассматриваемый район имеет сложное геологическое строение и богат нефтегазовыми месторождениями. В ЮКВ много потухших и действующих грязевых вулканов. Диопириновые структуры характеризуются крутыми углами наклона и наличием разломов [Бабаев, Гаджиев, 2006]. Грязевой вулканизм, разломы, аномально высокое пластовое давление (АВПД) и землетрясения являются частыми встречающимися явлениями и структурными осложнениями в этой сейсмоактивной зоне. В ЮКВ терригенный литологический разрез состоит, в основном, из прослаивания глин, алевролитов, песков и песчаников. Максимальная мощность осадочного чехла в ЮКВ достигает 30 км. Предполагается, что отложения, залегающие глубже в более высоких термодинамиче-

ских условиях, могут быть перспективными на нефть и газ. Сообщение нефтяной компании «British Petroleum» об открытии крупного углеводородного месторождения в Мексиканском Заливе на глубинах 10—12 км также указывает на актуальность данной тематики.

В ЮКВ в настоящее время добывают нефть и газ на глубинах 5—6 км из пластов продуктивной толщи, давление и температура в которых соответственно достигают примерно 120—140 МПа и 100—130 °С. Вертикальная и горизонтальная составляющие напряжений различаются на 40—50 МПа. В зонах АВПД поровое давление в отдельных глинистых пластах может быть выше, чем в окружающих пластах, на несколько десятков процентов. Основная причина возникновения АВПД обусловлена, в основном, высокой скоростью осадконакопления в бассейне и быстрым погружением самого бассейна. Геологические структуры имеют сложную форму. Обычно интерес с точки зрения нефтегазоносности здесь представляют антиклинальные структуры с высокой амплитудой. Глубины залегания одного и того же пласта в сводовой и синклинали частях различаются более, чем на 1000 м. В связи с этим один и тот же пласт на небольшом участке исследуемой площади находится в разных термобарических условиях. Более того, из-за разломов значение АВПД в одном и том же пласте может существенно изменяться по латерали. Разлом приводит к тому, что отдельные участки одного и того же пласта в геологическом разрезе расположены на различных уровнях, которые разнесены на несколько сот метров. Это обуславливает в них разные термодинамические условия и физико-механические свойства. В связи с этим применение стандартных процедур при расчете упругих параметров литологически однородного пласта приводит к результатам, относящимся к литологически разнородной среде.

В ЮКВ сейсмические методы исследований широко применяются также при мониторинге месторождений нефти и газа с целью изучения изменений в среде в процессе эксплуатации месторождений. Примерно через каждые 5—7 лет проводят сейсмические работы 3D. Изучают изменения амплитуд, частот сейсмических сигналов, скоростей распространения продольных и поперечных волн в среде, расчетных значений упругих параметров. Строят разрезы и карты изменения значений указанных параметров и по ним оценивают изменения флюидонасыщенности и напряженного

состояния среды, происходящие со временем. В месторождениях, расположенных на море, мониторинг проводится также по верхней части разреза с целью оценки безопасности положения буровой платформы. Результаты мониторинга позволяют определить изменения, происходящие в геологической среде со временем. Эффективность геофизических исследований в скважинах и сейсморазведки существенно зависит от точности учета влияния геодинамического состояния исследуемой среды при определении ее упругих параметров.

Определение физических свойств среды.

Для изучения физических свойств тонкослоистой среды в рассматриваемой структуре, расположенной в ЮКВ, построены тонкослоистые одномерные (1D) модели среды по скоростям продольных, поперечных волн и плотностям пород на основе данных ГИС глубокой скважины. С использованием этих моделей, временного разреза сейсмического профиля (рис. 1, а), толстослоистой модели скоростей и положения сейсмических горизонтов по сейсмическому профилю 2D проведена сейсмическая инверсия. В результате получены тонкослоистые двумерные (2D) модели скоростей продольных волн и плотностей пород в виде обычного сейсмического временного разреза общей глубинной точки (ОГТ). С целью проверки достоверности построенных моделей рассчитан соответствующий синтетический временной разрез (рис. 1, б). Для наглядности сопоставления реального и синтетического разрезов на них указаны опорные сейсмические горизонты. На частях реального разреза, где прослеживаются оси синфазности отраженных волн, формы реальной и синтетической записей практически идентичны, что указывает на высокую достоверность результатов сейсмической инверсии.

На рис. 2, а приведен временной разрез пластовых скоростей продольных волн. Видно, что скорости волн по глубине и вдоль профиля существенно изменяются.

Для вычисления разрезов упругих параметров среды построен также разрез тонкослоистой модели скоростей поперечных волн. При морских сейсмических наблюдениях (за исключением наблюдений на дне моря) не регистрируются поперечные волны. Здесь скорости поперечных волн определяются с помощью метода AVO (Amplitude Variation with Offset — изучение изменений амплитуд с удалением) [Spratt et al., 1993; Castagna, Milo, 1995; Cambouis, 2000; Воскресенский, 2001; Stewart et al.,

2003]. Получен разрез AVO атрибута — отношение скоростей продольных и поперечных волн. С использованием разрезов AVO атрибута и пластовых скоростей продольных волн построена двумерная тонкослоистая модель среды по скоростям поперечных волн. Модель калибрована по скоростям поперечных волн, определенных из акустического каротажа.

С целью оценки влияния давления на изменение пластовых скоростей построена также модель горного давления. Для изучения геодинамического состояния среды по составленным моделям рассчитываются составляющие напряжений в вертикальном и горизонтальном направлениях. В рассматриваемом случае оказалось, что разность величин сжимающих напряжений в вертикальном и горизонтальном направлениях в антиклинальной части структуры существенно выше, чем в синклинальной. На рис. 3, а представлена модель геостатического давления геологического разреза.

С использованием моделей скоростей продольных и поперечных волн, плотностей пород и давления рассчитаны разрезы коэффициентов Пуассона по классическим (формула (3) при $F_P^R = F_S^R = 0$) и неклассическим методам (по формуле (3)). На разрезе значений коэффициента Пуассона, рассчитанного по классическому методу (рис. 4, а), видно, что в пределах одного и того же пласта по мере приближения от синклинальной к сводовой части структуры значение коэффициента растет. Наверное это, в основном, связано с разуплотнением пород.

На рис. 2, б, 3, б и 4, б приведены разностные временные разрезы скоростей, давлений и коэффициента Пуассона соответственно. Они получены путем вычитания одноименных величин, соответствующих каждой ОГТ точке в пределах одного и того же пласта и точке пересечения профиля со скважиной. Данные в разностных разрезах указаны в процентах и вычислены относительно точки пересечения профиля со скважинной. Такая процедура выполняется для всех пластов. Разность между величинами скоростей, соответствующих сводовой и синклинальной частям профиля, согласно приведенной на рис. 2, б шкале, достигает 78 %. В сводовой части структуры получены отрицательные значения разности, достигающие 20 %. Разность между величинами давлений, соответствующих сводовой и синклинальной частям профиля согласно приведенной на рис. 3, б шкале, достигает 366 %. Разность между величинами коэффициентов Пуассона, соответствующих сводовой и синклиналь-

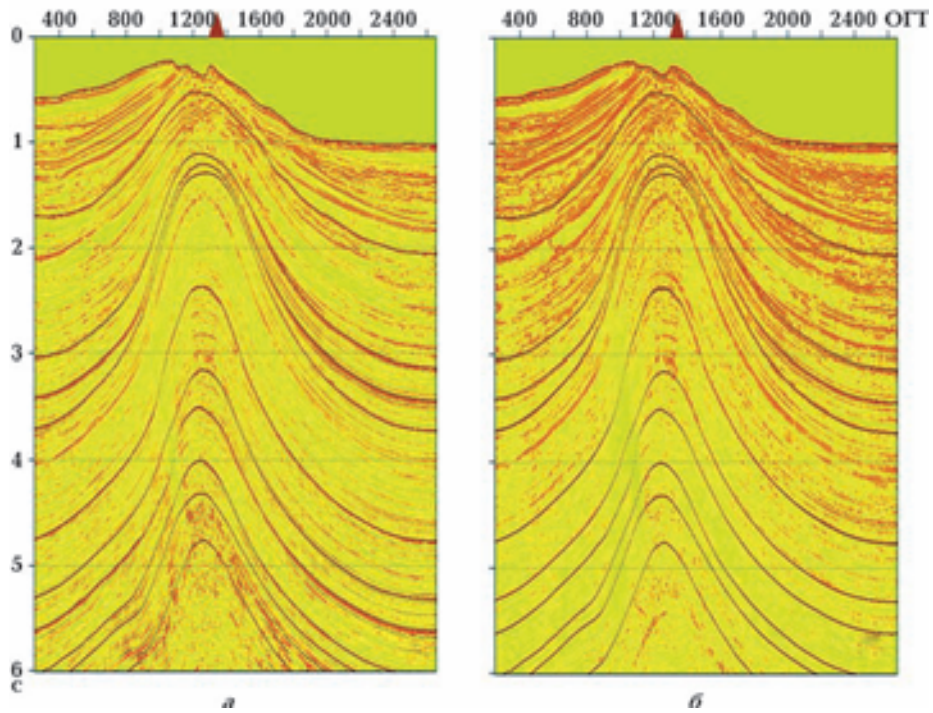


Рис. 1. Фрагменты реального (а) и синтетического (б) временных разрезов сейсмического профиля 2D.

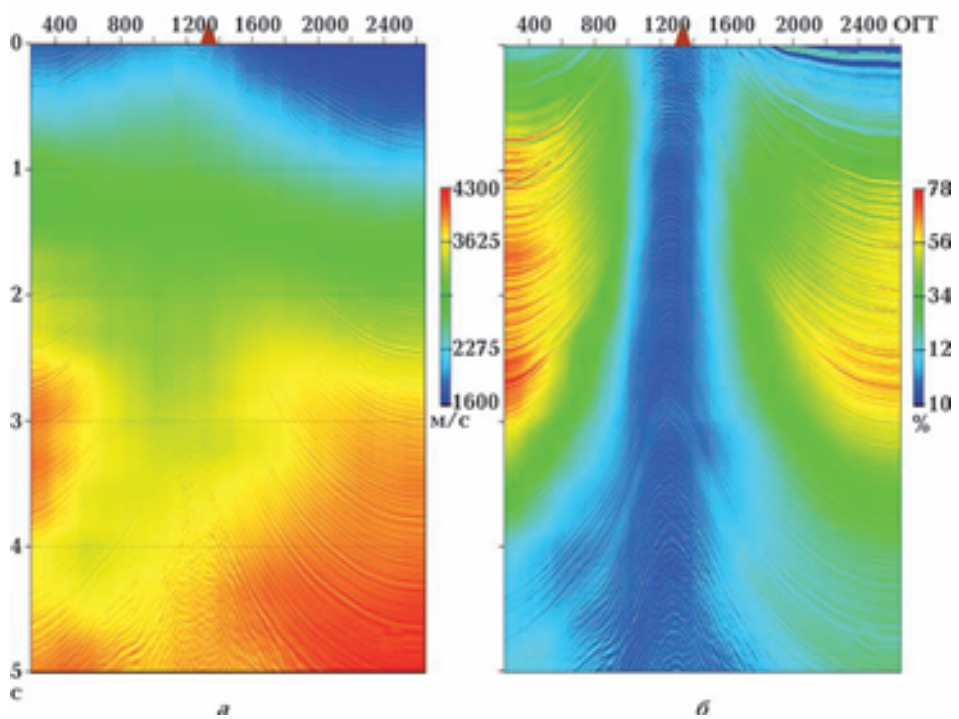


Рис. 2. Временные разрезы пластовых скоростей продольных волн (а) и разности скоростей, соответствующих каждой ОГТ точке и точке пересечения профиля со скважиной (б).

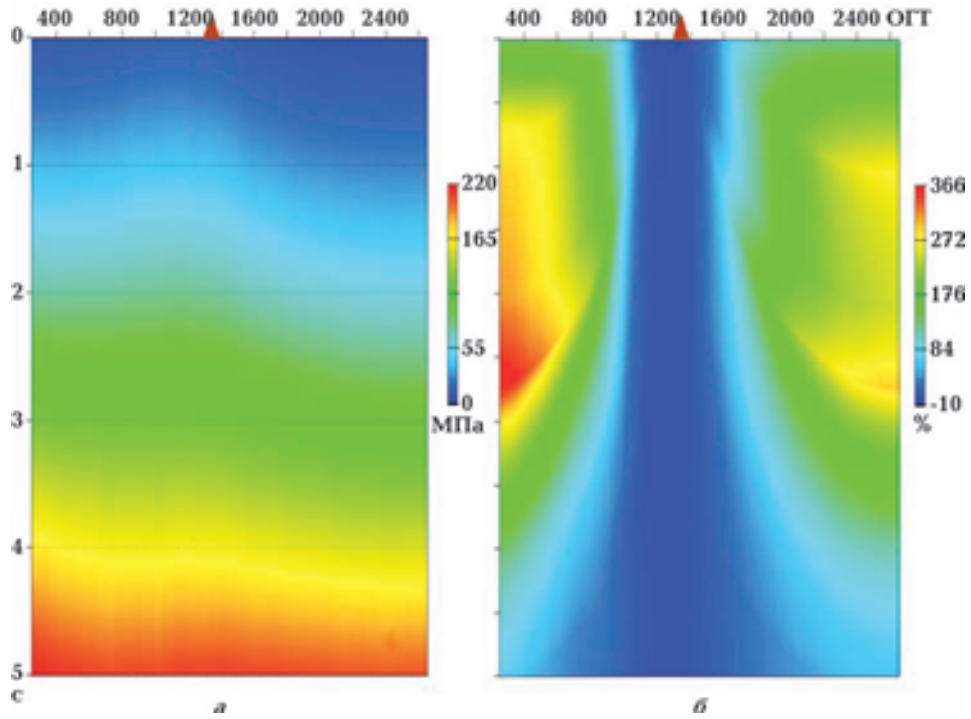


Рис. 3. Временные разрезы геостатического давления (а) и разности давления, соответствующих каждой ОГТ точке и точке пересечения профиля со скважиной (б).

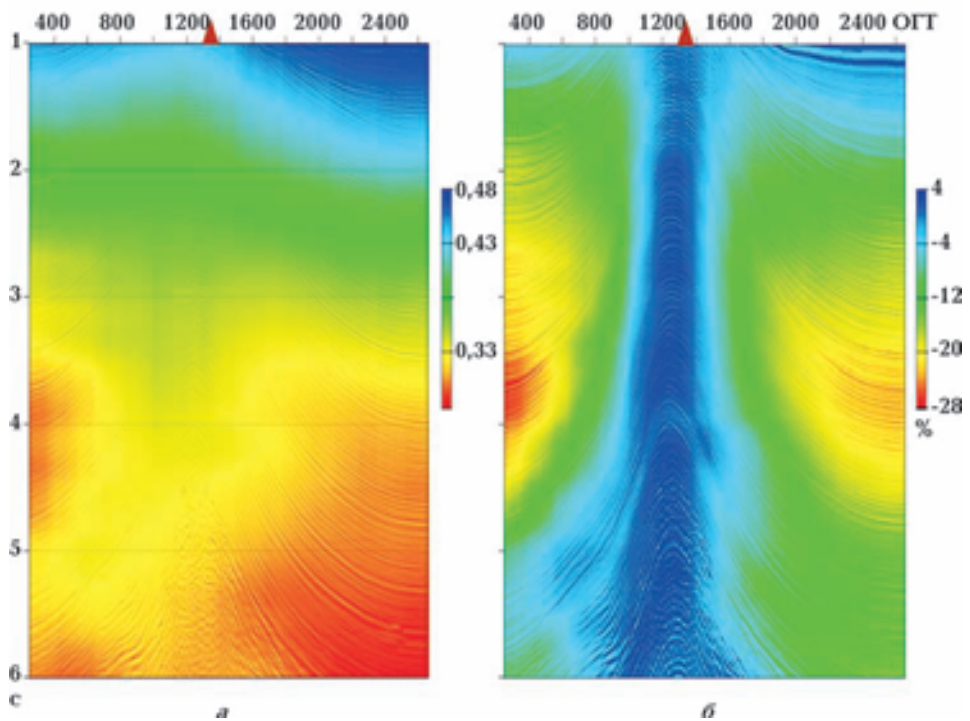


Рис. 4. Временные разрезы коэффициента Пуассона (а) и разность коэффициента, соответствующих каждой ОГТ точке и точке пересечения профиля со скважиной (б). Классический подход.

ной частям профиля согласно указанной на рис. 4, б шкале, достигает 29 %. Отрицательные значения для рассматриваемых характеристик связаны с меньшей глубиной залегания пластов в этих точках профиля по сравнению с точкой пересечения сейсмического профиля со скважиной. Из анализа геологического строения исследуемой структуры следует, что такие большие различия не связаны с изменением литологии или насыщения пород. Повидимому, эти различия, в основном, связаны с воздействиями геостатического давления и АВПД на пористость осадочных пород. Так как в классической расчетной модели не учтены давления и нелинейности деформаций, однозначная геологическая интерпретация изменений коэффициента Пуассона в данном случае затруднена. Литологически один и тот же пласт в различных частях профиля характеризуется существенно различными коэффициентами Пуассона. Это наглядно видно на примере глинистых пластов основного литологического состава пород.

Временной разрез коэффициента Пуассона, рассчитанный по предложенному подходу, приведен на рис. 5. Видно, что численные значения коэффициента в пределах пласта

вдоль профиля постоянны. Значения, рассчитанные по неклассическому методу, оказываются по величине большими, чем по классическому. Распределение разности между коэффициентами Пуассона, рассчитанными по классическому и неклассическому методам, представлено на рис. 6. По мере удаления от свода структуры величины этих разностей по одному и тому же пласту увеличиваются. Согласно приведенной здесь шкале по некоторым пластам величина данной разности достигает 38 %. В сводовой части структуры получены отрицательные значения для разности (возможная причина этого эффекта приведена выше).

Таким образом, применение разработанного метода к обработке данных исследуемого объекта позволило оценить влияние горного давления и нелинейного деформирования на скоростные и упругие свойства среды, более достоверно интерпретировать сейсмические данные и получить конкретные результаты о физико-механических свойствах пород среды, свободные от геодинамических вкладов.

Выводы. Предложен подход для определения величин фундаментальных параметров упругости пород на базе реальных сейсмических и скважинных геофизических данных,

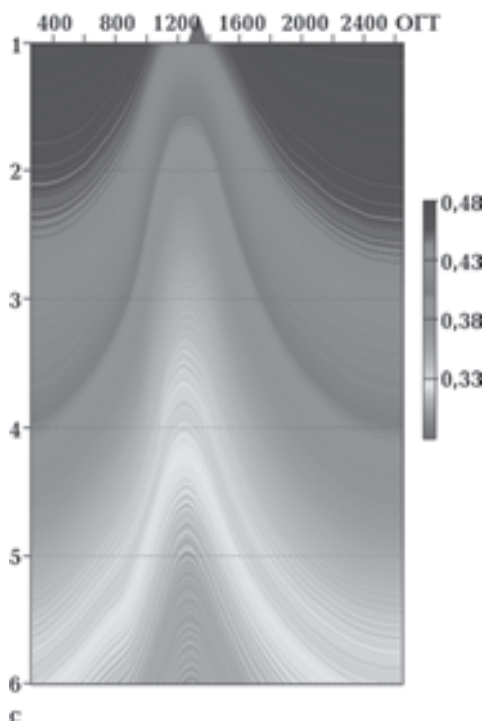


Рис. 5. Временной разрез коэффициента Пуассона, рассчитанный по неклассическому подходу.

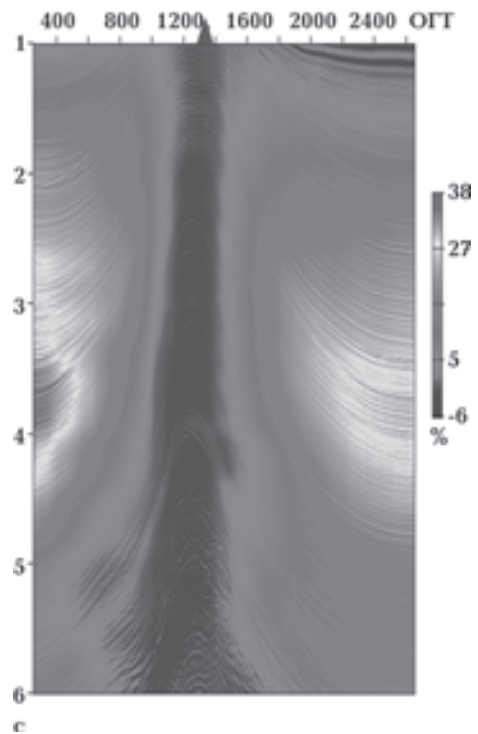


Рис. 6. Временной разрез разности коэффициентов Пуассона, определенный по классическому и неклассическому методам.

свободных от влияния геодинамического состояния среды.

На основе реальных сейсмических и ГИС данных с применением сейсмической инверсии и AVO преобразования получены тонкослоистые 2D модели физических параметров среды конкретной площади в ЮКВ. На основе этих моделей по классическому и неклассическому

линеаризованному подходу рассчитаны коэффициенты Пуассона пород геологического разреза и выполнен анализ их сопоставления.

Статья подготовлена по материалам проекта 3647, поддержанного грантовым проектом Украинского научно-технологического центра (УНТЦ).

Список литературы

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 1. — Москва: Мир, 1983. — С. 519.
- Александров К. С., Прогайвога Г. Т., Маслов Б. П. Метод определения нелинейных упругих свойств горных пород // Докл. РАН. — 2001. — **380**, № 1. — С. 109—112.
- Бабаев Д. Х., Гагжиев А. Н. Глубинное строение и перспективы нефтегазаносности бассейна Каспийского моря. — Баку: Nafta-Press, 2006. — 305 с.
- Воскресенский Ю. Н. Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов. — Москва: Изд-во Ун-та нефти и газа, 2001. — 69 с.
- Вижва С. А., Винниченко О. Б., Кензера О. В. Вплив природних та техногенних процесів на потенціально небезпечні об'єкти. — Київ: Вид-во Київ. ун-та, 2008. — 239 с.
- Выжва С. А., Маслов Б. П., Прогайвога Г. Т. Эффективные упругие свойства нелинейных многокомпонентных геологических сред // Геофиз. журн. — 2005. — **27**, № 6. — С. 1012—1022.
- Гогоненков Г. Н. Изучение детального строения осадочных толщ сейсморазведкой. — Москва: Недра, 1987. — 221 с.
- Гузь А. Н. Упругие волны в телах с начальными напряжениями. Т. 2. Закономерности распространения. — Киев: Наук. думка, 1986. — 536 с.
- Кулиев Г. Г., Агаев Х. Б. Моделирование сейсмических записей с учетом напряженного состояния среды // Матер. науч. конф. «Геофизические технологии прогнозирования и мониторинга геологической среды» (6—10 октября, 2008). — Львов: Изд-во ЛП, 2010. — С. 150—151.
- Кулиев Г. Г., Агаев Х. Б. Моделирование упругих параметров среды с учетом его геодинамического состояния // Тез. Азербайдж. междунар. геофиз. конф. «Пути повышения эффективности геофизических исследований в активных геодинамических условиях на примере Южно-Каспийского впадины» (11—13 Май, 2010, Баку). — Баку: Nafta Press, 2010. — 37 с.
- Кулиев Г. Г., Джаббаров М. Д. О распространении упругих волн в напряженных анизотропных средах // Изв. АН Азербайджана. Сер. Науки о Земле. — 1998. — № 2. — С. 103—112.
- Кулиев Г. Г. Нелинейные действия упругой среды и их влияния на скорость распространения упругих волн // Изв. НАН Азербайджана. Сер. Науки о Земле. — № 2. — 2009. — С. 31—39.
- Кулиев Г. Г. Определение коэффициента Пуассона в напряженных средах // Докл. РАН. — 2000. — **370**, № 4. — С. 634—537.
- Маслов Б. П., Прогайвога Г. Т., Выжва С. А. Математичне моделювання впливу тиску і температури на швидкість розповсюдження пружних хвиль у тріщинуватих гірських породах // Геофиз. журн. — 1995. — **22**, № 3. — С. 113—118.
- Маслов Б. П., Прогайвога Г. Т. Дисперсия и рассеяние упругих волн в трещиноватой геологической среде // Геофиз. журн. — 1998. — **20**, № 2. — С. 47—55.
- Никитин Л. В. Об анизотропии упругой среды с начальными напряжениями // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1983. — № 12. — С. 29—33.
- Прогайвога Г. Т., Маслов Б. П., Король В. В. Определение спектра распределения параметров структуры трещинно-порового пространства горных пород по данным инверсии зависимости скорости упругих волн от давления // Геофиз. журн. — 1995. — **17**, № 5. — С. 75—80.
- Прогайвога Г. Т., Омельченко В. Д., Маслов Б. П. Сейсмоминералогическая модель земной коры Украинского щита // Геофиз. журн. — 2004. — **26**, № 4. — С. 100—107.
- Саговский М. А., Николаев А. В. Новые методы сейсмической разведки. Перспективы развития // Вестн. АН СССР. — 1982. — **1**. — С. 57—64.
- Biot M. A. Mechanics of incremental deformations. — New-York: Willey, 1965. — P. 504.

- Cambois G.* AVO inversion and elastic impedance // SEG. Expanded Abstracts. — 2000.
- Castagna J. P., Milo M. B.* Offset-Dependent Reflectivity-Theory and Practice of AVO Analysis // SEG. — 1995. — P. 348.
- Guliyev H. H., Aghayev Kh. B.* Estimation the Influence of the Strength State of the Real Medium on the Elastic Parameters of the Sedimentary Rocks // Intern. Conf. Petroleum Geology and the Hydrocarbon Potential of the Caspian and Black Sea Regions (6—8 October 2008). — Baku: Nafta Press, 2008.
- Guliyev H. H., Aghayev Kh. B.* Method of definition of the linear physical-mechanical properties of the geological media in their natural state // Sci. Report. Azerbaijan, Science and Technology Center in Ukraine. — 2009. — P. 19.
- Guliyev H. H.* A new theoretical conception concerning the tectonic processes of the Earth // New Concepts in Global Tectonics Newsletter, 2010. — № 56. — P. 49—73.
- Kuliev G. G.* Elastic waves propagation velocities in stressed nonlinear anisotropic medium // Geophys. News in Azerbaijan Sci. Techn. J. — 1999. — **3**. — P. 12—14.
- Kuliev G. G.* To physical-mechanical properties of strained slightly anisotropic media // Proc. Sci. Earth Academy Sciences Azerbaijan. — 1998. — **4**. — P. 134—140.
- Spratt R. S., Goins N. R., Fitch T. J.* Pseudo-Shear — The analysis of AVO / Eds. J. P. Castagna, M. M. Backus. Offset-dependent reflectivity — Theory and practice of AVO analysis // Soc. Expl. Geophys. — 1993. — P. 37—56.
- Stewart R. R., Gaiser J. E., Brown R., Lawton D. C.* Converted-wave seismic exploration: applications // Geophysics. — 2003. — **68**, № 1. — P. 40—57.
- Veeken P. C. H., Silva M. Da.* Seismic inversion methods and some of their constraints // First break, EAGE, 2004. — **22**. — P. 47—70.
- Yilmaz O.* Seismic data analysis // Soc. Exploration Geophysicists, Investigations in geophysics // Tulsa SEG. — 2001. — **1, 2**. — P 2027.