

УДК 550.834

Ірина Николаевна Безродная,

к. геол. н., ст. науч. сотрудник, зам. директора УНИ «Институт геологии»,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина,
e-mail: bezin3@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6835-5276>;

Дмитрий Анатолиевич Безродный,

к. геол. н., доцент, доцент кафедры геофизики УНИ «Институт геологии»,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
e-mail: manific2@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7463-7133>;

Олеся Александровна Козионова,

ведущий инженер НИЧ УНИ «Институт геологии»,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
e-mail: rapakivi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2563-8719>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ И УПРУГОЙ АНИЗОТРОПИИ СЛАНЦЕВЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОЙ ВПАДИНЫ

Цель работы – анализ параметров упругой и акустической анизотропии при исследовании многокомпонентной модели породы-коллектора, которая представлена сланцем. Для решения поставленной задачи использовались методы условных моментных функций с использованием расчётной схемы Мори-Танака, а также метод наименьших квадратов. Разработана методика математического моделирования эффективных упругих постоянных нетрадиционных сланцевых пород-коллекторов.

Обосновано и разработано 8 разновидностей математических моделей, характеризующих минеральный состав, структуру пустотного пространства и упругие свойства, которые характерны для сланцевых пород-коллекторов Днепровско-Донецкой впадины Украины. В основу моделей взяты предыдущие публикации авторов и результаты петрографических исследований в УНИ «Институт геологии». Авторами впервые проведен анализ упругих постоянных моделей пород, компонентов акустического тензора, параметров линейности и сланцеватости, стереопроекции изолиний указательных поверхностей девяти параметров упругой анизотропии, а также парам Томсена. Установлено, что по акустическим данным возможно проследить изменение структуры пустотного пространства породы-коллектора, концентрацию породообразующих минералов в породе. Трещиноватость имеет большее влияние на структуру породы, чем гранулярные пустоты и структура минералов. Наибольшие значения (больше 20 %) имеют коэффициенты анизотропии в породах, где пустоты ориентированы в плоскости перпендикулярной оси скважины.

При расчётах параметров Томсена получены параметры упругой анизотропии, которые характеризуют не только минеральный состав пород, но и качественно структуру пустотного пространства, ориентацию минералов и пустот в породах. Рассчитанные параметры Томсена коррелируют с акустическими параметрами анизотропии.

Подобные разработанным модели могут быть использованы при интерпретации геофизических данных для внесения поправок за упругую анизотропию при поисках и разведке сложнопостроенных сланцевых пород-коллекторов, а также – для составления банка данных математических моделей пород-коллекторов приведенного региона.

Ключевые слова: нетрадиционная сланцевая порода-коллектор, математическое моделирование, упругая и акустическая анизотропия, параметры Томсена.

І. М. Безродна, Д. А. Безродний, О. О. Козионова. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНОЇ І ПРУЖНОЇ АНІЗОТРОПІЇ СЛАНЦЕВИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ. Мета роботи – аналіз параметрів пружної і акустичної анізотропії при дослідженні багатоконпонентної моделі породи-коллектора, яка представлена сланцем. Для вирішення поставленого завдання використовувалися методи умовних моментних функцій з використанням розрахункової схеми Морі-Танака, а також метод найменших квадратів. Розроблено методіку математичного моделювання ефективних пружних постійних нетрадиційних сланцевих порід-коллекторів.

Обґрунтовано і розроблено 8 різновидів математичних моделей, що характеризують мінеральний склад, структуру пустотного простору і пружні властивості, які характерні для сланцевих порід-коллекторів Дніпровсько-Донецької западини України. В основу моделей взяті попередні публікації авторів і результати петрографічних досліджень в ННІ «Інститут геології». Авторами вперше проведено аналіз пружних постійних моделей порід, компонентів акустичного тензора, параметрів лінійності і сланцеватості, стереопроекції ізоліній вказівних поверхонь дев'яти параметрів пружної анізотропії, а також параметри Томсена. Встановлено, що за акустичними даними можливо простежити зміну структури пустотного простору породи-коллектора, концентрацію породотвірних мінералів в породі. Трещиноватість має більший вплив на структуру породи, ніж гранулярні пустоти і структура мінералів. Найбільші значення (більше 20%) мають коефіцієнти анізотропії в породах, де пустоти орієнтовані в площині перпендикулярній осі свердловини.

При розрахунках параметрів Томсена отримані параметри пружної анізотропії, які характеризують не тільки мінеральний склад порід, але і якісно структуру пустотного простору, орієнтацію мінералів і пустот в породах. Розраховані параметри Томсена корелюють з акустичними параметрами анізотропії.

Подібні розробленим моделі можуть бути використані при інтерпретації геофізичних даних для внесення поправок за пружну анізотропію при пошуках і розвідці складнопобудованих сланцевих порід-коллекторів, а також при складанні банку даних математичних моделей порід-коллекторів наведеного регіону.

Ключові слова: нетрадиційна сланцева порода-коллектор, математичне моделювання, пружна і акустична анізотропія, параметри Томсена.

Введение. Промышленные скопления нефти и газа в нетрадиционных породах-коллекторах встречаются в мире значительно реже, по сравнению с месторождениями в песчаных и карбонатных породах. Поиски и разведка скоплений углеводородов в таких коллекторах требуют нетрадиционных подходов, в частности, и при разработке интерпретационных моделей пород.

Именно математическое моделирование может выступать надежной основой для оценки влияния минералогического состава, а также типа пустотного пространства на физические свойства пород-коллекторов. При рассмотрении перспективности сланцевых пород-коллекторов, которые в силу своего строения обладают анизотропией, математическое моделирование их эффективных упругих и акустических свойств возможно только при применении более совершенных моделей, которые бы адекватно отражали их свойства и структуру, а также деформационные процессы, которые в них происходят.

Оценка акустической и упругой анизотропии сланцевых пород-коллекторов очень важна в связи с необходимостью введения поправок за анизотропность пород при сейсмоакустических исследованиях.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследование анизотропии упругих свойств осадочных пород и минералов немногочисленны и достаточно противоречивы. Исследователи, занимавшиеся этим вопросом, в частности исследователи из Украины: И.Н. Безродная, Д.А. Безродный, С.А. Выжва, Б.П. Маслов, Г.Т. Продайвода и зарубежные ученые: Atkinson, L. Chen, D. Grgic, AA-C. Guéry, F. Cormery, L. Daridon, P. Haupt, Th. Kersten, D. Hoxha, A. Giraud, James J. Sheng, Y. Kozlovsky, V.E. Mirenkov, Y. Monerie, A.A. Krasnovsky, P. Plechac, J. Sgaoula, J.F. Shao, LS. Tsai, Xiukun Wang, MC. Weng, K. Wojtacki, K. Wilmański, К.С. Александров, А.А. Арутюнов, И.О. Баюк, Д.Е. Белобородов, Г.И. Джалалов, М.А. Дунямалыев, С.Ф. Левин, Т.В. Ольнева, О.В. Савенок, М. Храмченков Г.А. Шехтман и другие [1–19] уделяли внимание математическому моделированию анизотропных акустических свойств, но в основном рассматривали синтетические модели материалов, хотя в широком диапазоне пористости были получены и прогнозы упругих свойств.

В частности, представлен новый метод 3-D математического моделирования [1] для создания реалистичных гомогенных и гетерогенных моделей порового песчаника, сущность которого сводится к построению модели песчаника, которая является наиболее приближенной к реальным поровым песчаникам. Анализ показал [1],

что уплотнение пород уменьшает пространственную непрерывность значений физических параметров в горизонтальном направлении более быстро, чем в вертикальном.

Исследователями [1–5] проводилось математическое моделирование свойств традиционных пород-коллекторов простой структуры пустотного пространства.

В работах [6–9] оценивался потенциал сланцевых пород-коллекторов и проводилось физико-химическое моделирование подобных пород [10].

В работе [11] при исследовании известняков и песчаников предполагалось, что пустотное пространство представлено пустотами уже двух видов – порами и трещинами, здесь для выражения связи между эффективным тензором упругости и параметрами внутреннего строения среды использовался метод обобщенного сингулярного приближения.

В Украине подобное математическое моделирование проводилось в Киевском национальном университете имени Тараса Шевченко с участием авторов [14–18]. При моделировании акустических и упругих свойств пород-коллекторов в предыдущих исследованиях авторы использовали интегрированные модели трещинно-порово-кавернозных пород, что более характерно для сложнопостроенных пород-коллекторов.

Для сланцевых пород-коллекторов моделирование акустических и упругих свойств с учетом их анизотропности ранее не проводилось.

Теория исследований.

Предполагается, что тензорные поля упругих постоянных, напряжений и деформаций – статистически однородны [12]. Это в дальнейшем позволяет заменить усреднения случайных тензорных полей с макроскопическим объемом усреднением по ансамблю реализации.

Модель нетрадиционного сланцевого коллектора рассматривается авторами как многокомпонентная порово-трещинная кусочно-непрерывная среда, упругие свойства структурных элементов которой и их напряженно-деформированное состояние являются случайными функциями пространственных координат.

Для определения эффективных упругих постоянных C_{mn}^* применялся метод условных моментных функций [12, 19]. В этом методе для их определения необходимо найти зависимость между средними деформациями во включении, ориентированном в n -ном направлении $\mathcal{E}^{(in)}$ и макроскопическими деформациями матрицы $\mathcal{E}^{(m)}$:

$$\varepsilon^{in} = \langle \varepsilon \rangle + C_m d_i Z_i \varepsilon^{(m)}, \quad f_i = C^{(i)} - C^0, \quad d_i = C(i) - C(m),$$

где C_m – объемная концентрация матрицы;

$C^{(i)}$ – упругие постоянные i -го включения;

$C(m)$ – упругие постоянные матрицы;

C^0 – упругие постоянные тела сравнения.

В случае, когда включения ориентированы вдоль оси x_3 и равномерно в плоскости x_1x_2 , функция распределения ориентации имеет следующий вид:

$$f(\varphi, \theta) = \frac{1}{2\pi c_1} [\xi_{12} \delta(\theta - \pi/2) + \xi_3 \delta(\theta)],$$

где $\delta(\theta)$ – функция Дирака;

ξ_{12} – объемная концентрация трещин в плоскости x_1x_2 ;

$\xi_3 = c_1 - \xi_{12}$ – объемная концентрация трещин, ориентированных в направлении оси x_3 .

В зависимости от функции распределения трещин и их объемной концентрации упругая симметрия тензора эффективных упругих постоянных может изменяться от изотропной к ромбической.

Для численных расчетов эффективных упругих постоянных многокомпонентных сланцевых коллекторов в работе использовался обобщенный метод условных моментных функ-

$$A_\mu = \left[\frac{\frac{1}{3}[(\mu_g - \mu_m)^2 + (\mu_m - \mu_p)^2 + (\mu_g - \mu_p)^2]}{\mu_g^2 + \mu_m^2 + \mu_p^2} \right]^{1/2} \cdot 100\%.$$

По определенным собственным значениям акустического тензора рассчитываются параметры анизотропии акустического эллипсоида [12]:

- акустическая сланцеватость, $S_\mu = \mu_m / \mu_p$;

- акустическая линейность, $L_\mu = \mu_g / \mu_m$.

Результаты моделирования анализируют путем построения графиков изменения упругих постоянных, а также графиков зависимостей плотности и акустической анизотропии от концентрации различных форматов пустот трещинно-порового пространства и от концентрации включений минералов.

По упругим постоянным и плотности в трехмерной программе Surfer с помощью оригинальных программ создают стереопроекции изолиний значений параметров упругой анизотропии.

На следующем этапе исследований авторами впервые рассчитаны известные при интер-

претации сейсморазведки параметры Томсена [21] по результатам моделирования упругих постоянных для исследованных моделей сланцевых пород-коллекторов, а именно:

На основе построенных моделей подбираются уже просчитанные параметры упругих постоянных ее составляющих (минералов и пустотных наполнителей) и их плотность в соответствии с минеральным скелетом.

Результатом расчетов является полученная модель с изменением значений упругих постоянных в зависимости от концентрации или формата трещинно-порового пространства, концентрации или типа минерала.

Получив полный набор упругих постоянных анизотропной упругой среды, рассчитываются компоненты акустического тензора μ (μ_{11} – максимальное, μ_{22} – промежуточное, μ_{33} – минимальное значения), согласно соотношению [12]:

$$\rho \mu_{11} = C_{11} + C_{55} + C_{66},$$

$$\rho \mu_{22} = C_{22} + C_{44} + C_{66},$$

$$\rho \mu_{33} = C_{33} + C_{44} + C_{55}.$$

Получив собственные значения акустического тензора, далее определяется коэффициент акустической анизотропии (A_μ) по формуле:

претации сейсморазведки параметры Томсена [21] по результатам моделирования упругих постоянных для исследованных моделей сланцевых пород-коллекторов, а именно:

• ε – относительный коэффициент анизотропии продольной волны;

• δ – отклонение от эллиптичности изменения скорости продольной волны;

• γ – эллиптичность изменения скорости поперечной волны в зависимости от отклонения направления от вертикали.

Эти параметры можно рассчитать в поперечно-изотропном приближении ($\varepsilon, \delta, \gamma$), но по результатам моделирования пород можно получить параметры Томсена и для ортотропной среды:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{13} &= \frac{C_{11} - C_{33}}{2C_{33}}, & \gamma_{13} &= \frac{C_{66} - C_{44}}{2C_{44}}, & \delta_{13} &= \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})}; \\ \varepsilon_{23} &= \frac{C_{22} - C_{33}}{2C_{33}}, & \gamma_{23} &= \frac{C_{66} - C_{55}}{2C_{55}}, & \delta_{23} &= \frac{(C_{23} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})}; \\ \varepsilon_{12} &= \frac{C_{11} - C_{22}}{2C_{22}}, & \gamma_{12} &= \frac{C_{55} - C_{44}}{2C_{44}}, & \delta_{12} &= \frac{(C_{12} + C_{66})^2 - (C_{22} - C_{66})^2}{2C_{22}(C_{22} - C_{66})}. \end{aligned}$$

Полученные параметры Томсена используются в сейсморазведке при учете различных типов сейсмической анизотропии:

- трансверсальной изотропии с наклонной осью симметрии,
- трансверсальной изотропии с горизонтальной осью симметрии,
- трансверсальной изотропии с вертикальной осью симметрии,
- орторомбической анизотропии [11].

Обоснование математической модели сложнопостроенного сланцевого коллектора, разработанной в работе, основывается на результатах исследований подобных пород в УНИ «Институт геологии» [13, 22], а именно интервалов московского яруса развития сланцевых пород-коллекторов скважин Артемовской площади ДДв.

При формировании моделей пород авторами принято во внимание, что исследованный интервал (3710 – 3735 м) скважины № 1 Артемовской площади представлен сланцами серыми до темно-серых, сцементированными известково-глинистым цементом. Текстура слоистая, иногда косослоистая, подчеркивается листовыми тонкими (до 1 – 2 см) слоями черного углистого аргиллита. В шлифовках видна косая слоистость с элементами перекрестно-волнистой.

По данным лабораторных исследований значения пористости в исследованных породах московского яруса колеблются в пределах 1,1 – 3,4 %. Карбонатность изменяется от 0 до 15,3 %. Определение коэффициента проницаемости образцов в лабораторных условиях часто сопровождалось растрескиванием, что делало невозможным получение достоверных результатов. Последнее свидетельствует о существенной

трещиноватости или способности образовывать трещины в породах всех исследованных литотипов.

По данным геофизических исследований скважин (ГИС) в изучаемом интервале скважины значения пористости достаточно низкие и мало отличаются для различных литологических разновидностей пород. Содержание органического вещества в глинистых сланцах – преимущественно существенное (более 1 %).

За основу модели взяты образцы (№№ 103АТ, 105АТ, 107АТ) алевритистых сланцев с алевритовой структурой (0,05 – 0,25 мм), неясно слоистой текстурой. Минеральный состав: кварц (40 %), гидрослюда (иллит) (15 %), криптокристаллический карбонат (15 %) и относительно крупные (до 0,5 – 1,0 мм) карбонатные обломки (до 40 % от общего содержания карбонатной составляющей), растительный детрит (5 – 7%), по которому развивается микрокристаллический пирит; отмечены единичные поры и микротрещины закрытого типа [13, 22].

Таким образом, авторами создан ряд моделей сланца сложнопостроенного нефтенасыщенного кальцитизированного пиритизированного углефицированного. Минеральный состав моделей представлен минералами: кварц, пирит, уголь (в сумме – 66,3 %), кальцит – 15,3 %, иллит – 15 %; пористость породы - 3,4 %.

Пустоты в двух типах моделей пород ориентированы по-разному: по осям X, Y, Z и в плоскости XOY, которая перпендикулярна стволу скважины (табл. 1). Они представлены межзерновыми порами (формат 0,9) для всех типов моделей кроме трещинного коллектора, трещинами (формат 0,001) и вторичными пустотами уплотнения (форматы 0,05 и 0,01).

Таблица 1

Параметры математических моделей

Обозначение модели	Тип коллектора	Ориентация пустот в модели	Формат пустот (концентрация пустот, %)
Aosn1	гранулярно-трещинный	по осям X, Y, Z	0,001(1), 0,05 (1), 0,9 (1,4)
Aon1		в плоскости XOY	
Aosn2	трещинно-гранулярный	по осям X, Y, Z	0,001(1), 0,05 (1), 0,01 (0,5), 0,9 (0,9)
Aon2		в плоскости XOY	
Aosn3		по осям X, Y, Z	
Aon3		в плоскости XOY	0,001(1), 0,05 (1), 0,01 (1), 0,9 (0,4)
Aosn4	трещинный	по осям X, Y, Z	0,001(1), 0,05 (1), 0,01 (1,4)
Aon4		в плоскости XOY	

Результаты. Анализ результатов моделирования сланцевых пород-коллекторов позволяет сделать следующие выводы.

Авторами рассчитаны упругие постоянные для всех восьми моделей. Установлено, что постоянная C_{33} независимо от типа пустотного пространства для всех моделей имеет приблизительно одинаковое значение. Остальные значения упругих постоянных четко отличают тип ориентации пустот и минералов: для моделей, где включения ориентированы в плоскости XOY значения C_{11} , C_{22} , C_{44} , C_{55} , C_{66} , C_{23} являются большими по сравнению с другими моделями того же типа породы-коллектора, а значения C_{12} , C_{13} ,

наоборот, являются меньшими в этих моделях, чем в тех где включения расположены по осям X , Y , Z . По результатам анализа компонент матрицы упругих постоянных моделей установлен исключительно поперечно-изотропный тип симметрии текстуры.

Для моделей, в которых пустоты и минералы расположены по осям X , Y , Z (рис. 1), характерен планальный тип симметрии текстуры породы; для моделей с включениями, ориентированными в плоскости XOY , присущи повышенные значения акустической линейности, то есть характерен аксиальный тип симметрии текстуры.

В зависимости от ориентации включений

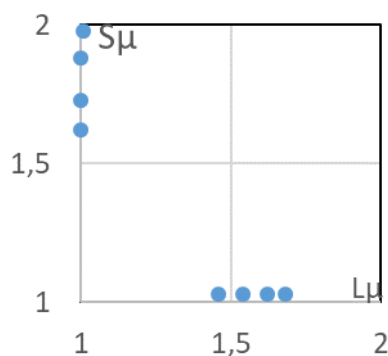


Рис. 1. Определение типа симметрии по взаимному расположению акустических линейности и сланцеватости моделей сланцевых пород-коллекторов

коэффициент интегральной акустической анизотропии (A_{μ}) моделей изменяется (табл. 2), но постоянно возрастает при увеличении количества трещин в моделях пород. Наименьшее значение A_{μ} характерно для моделей, где включения расположены по осям X , Y , Z (меньше 19,33 %) для модели гранулярно-трещиноватого сланца, где включения расположены по осям X , Y , Z . Наибольшее значение – 26,99 % присуще для модели трещинного сланца с включениями, ориентированными в плоскости XOY .

На рис. 2-3 представлен пример стереопроекций указательных поверхностей рассчитанных девяти упругих параметров. В зависимости от типа модели на стереопроекциях прослеживается изменение приведенных параметров, причем модели с ориентированными в плоскости XOY включениями имеют очевидную ориентационную направленность изменения параметров.

Анализ построенных стереопроекций упругих параметров анизотропии моделей сланцевых пород коллекторов позволил сделать следующие выводы.

Таблица 2

Параметры акустической анизотропии моделей

№ пп	№ модели	Параметры акустической анизотропии						Тип симметрии
		A_{μ} , %	L_{μ}	S_{μ}	μ_{11}	μ_{22}	μ_{33}	
1	Aosn1	19,33	1,46	1,03	24,06	23,36	35,21	планальная
2	Aon1	20,32	1	1,62	23,58	23,62	38,32	аксиальная
3	Aosn2	21,82	1,54	1,03	22,65	22,08	34,9	планальная
4	Aon2	22,61	1	1,73	21,61	37,41	37,49	аксиальная
5	Aosn3	24,16	1,62	1,03	21,43	20,84	34,67	планальная
6	Aon3	25,34	1	1,88	20,16	37,88	38,04	аксиальная
7	Aosn4	25,85	1,68	1,03	20,58	20,02	34,53	планальная
8	Aon4	26,99	1,01	1,98	19,1	37,81	38,01	аксиальная

Характер упругой анизотропии для всех ее параметров существенно отличается для моделей с ориентацией пустот по осям X, Y, Z (модели Aosn1, Aosn2, Aosn3, Aosn4) и моделей, где пустоты ориентированы в плоскости XOY (модели Aon1, Aon2, Aon3, Aon4). Однако, все без исключения рассчитанные модели сланцевых пород-коллекторов являются высокоанизотропными.

Математические модели коллекторов с ориентацией пустот по осям X, Y, Z характеризуются наличием одного ярко выраженного экстремума для скорости квазипродольной волны V_p (максимум), дифференциального коэффициента упругой анизотропии A_d и угла отклонения вектора упругих смещений от направления волновой нормали (минимумы). А также двойным минимумом разницы между «быстрой» и «медленной» квазипоперечными волнами, значений упругих модулей (минимум для модуля Юнга, максимум для коэффициента Пуассона, минимум для модуля сжатия).

Для первых трех параметров это направление совпадает с направлением распространения

волны продольной поляризации, максимальные значения которой находятся в пределах 5200 – 5300 м/с для указанных моделей.

Соответствующие минимумы других параметров, близки к нулю, что подчеркивает, тот факт, что свойства распространения упругих волн в этом направлении близки к изотропной среде. Максимальные значения дифференциального коэффициента упругой анизотропии изменяются для этих моделей от 31 до 36 %, что однозначно относит все модели к высокоанизотропным.

В центральной приосевой области для моделей Aosn1, Aosn2, Aosn3, Aosn4 четко выделяется двойной минимум параметра ΔV_s , значение которого близко к нулю. Это показывает, что в данных направлениях явление расщепления волны поперечной поляризации фактически отсутствует. Вместе с тем, значение этого параметра достигает величин примерно 1000 м/с, что однозначно подчеркивает факт, что рассмотренные модели с ориентацией пустот по осям X, Y, Z можно уверенно назвать высокоанизотропными.

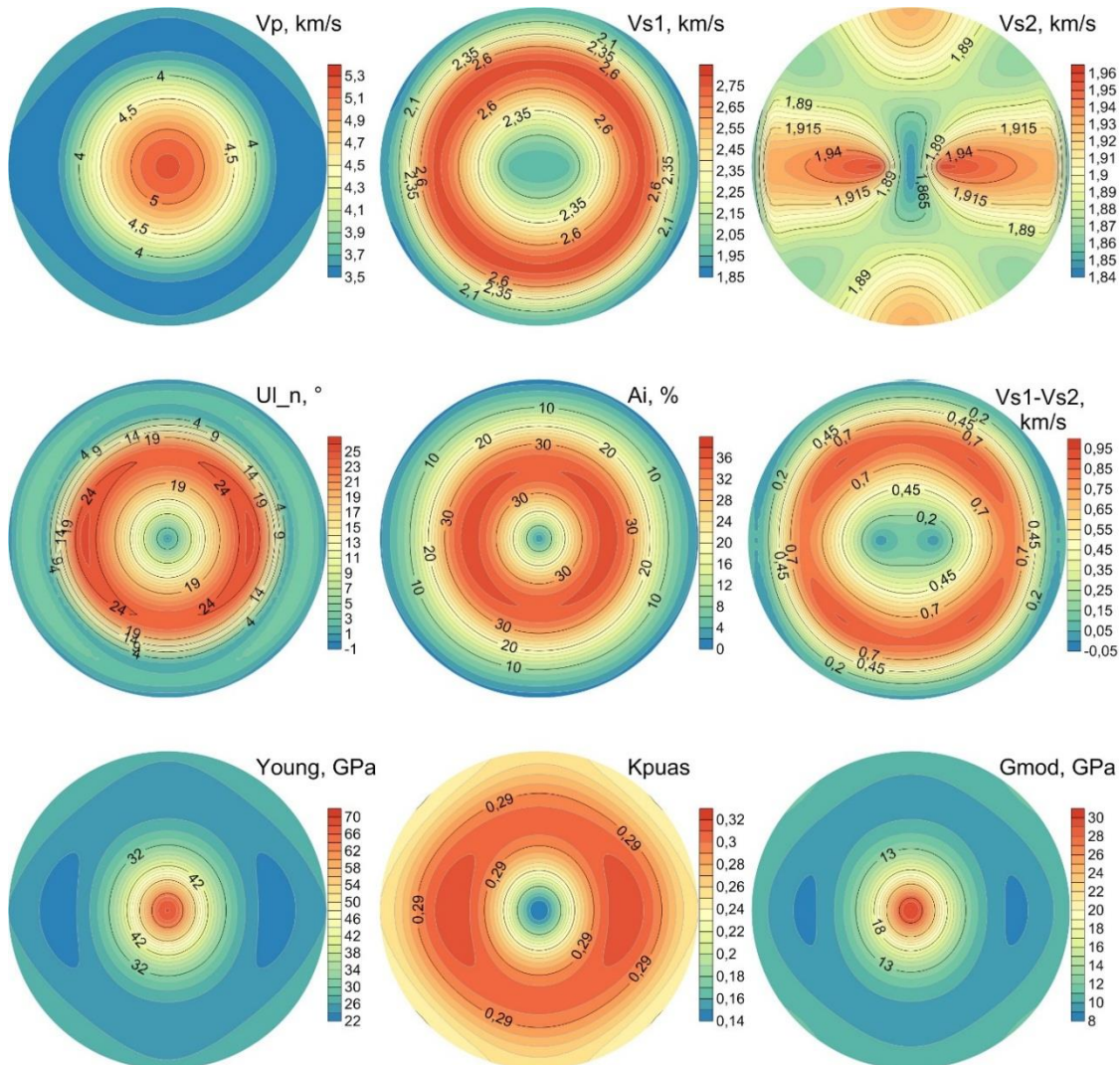


Рис. 2. Стереопроекции указательных поверхностей параметров анизотропии модели Aosn4

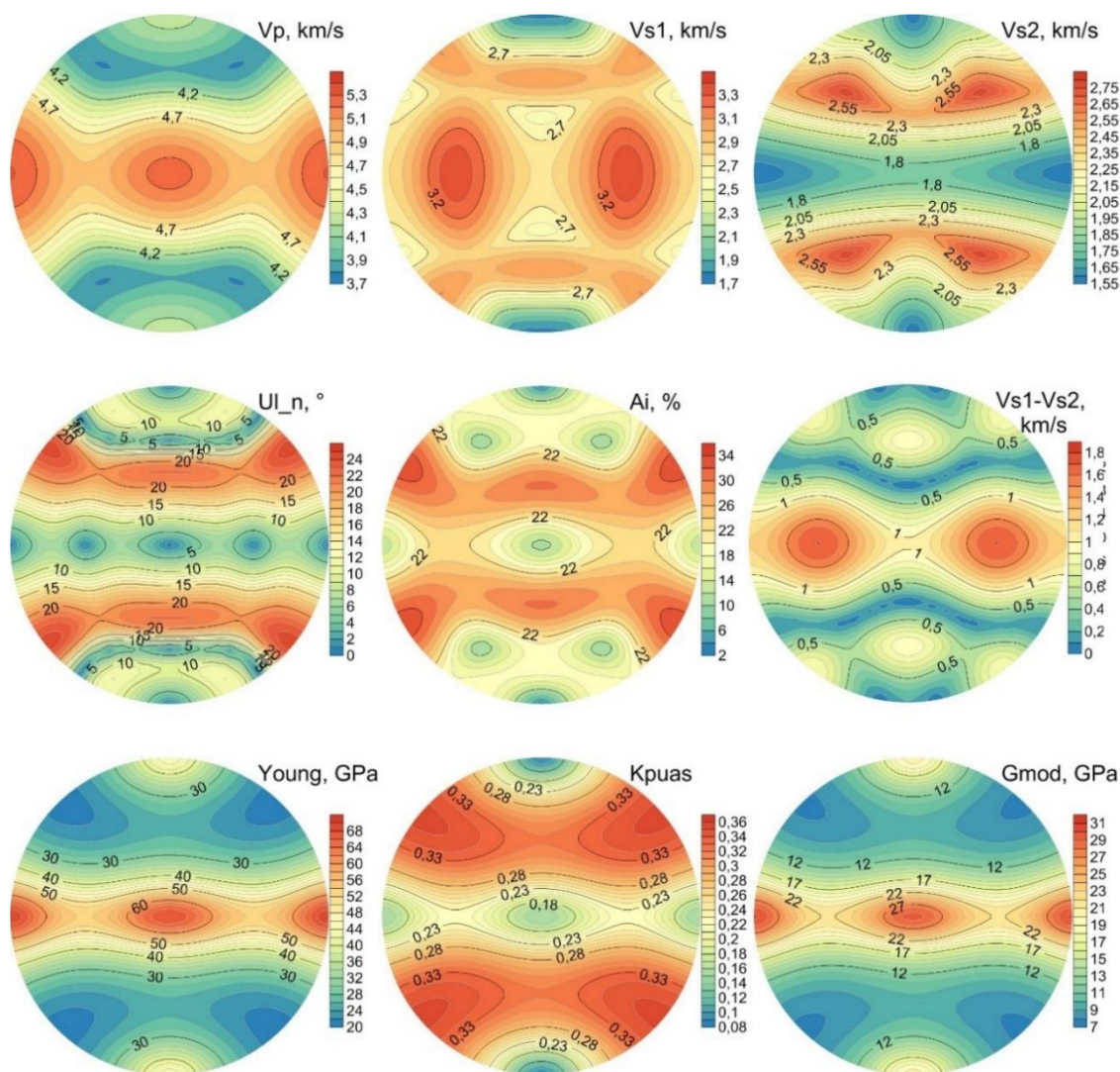


Рис. 3. Стереопроєкції указательних поверхностей параметрів анізотропії для моделі Aon1

Значення еластичних модулів (Юнга, Пуассона, сжатия) для моделей Aon1, Aon2, Aon3, Aon4 в цілому не являються показовими для визначення типу колектора. В основному, вони змінюються плавно від моделі до моделі і їх значення становлять: $E = 22 \div 70$ ГПа, $K_{\text{пуас}} = 0,14 \div 0,34$, $G = 8-30$ ГПа. На стереопроєкції цих параметрів для всіх чотирьох моделей характерні тільки 3 екстремуми

Еластична симетрія моделей Aon1, Aon2, Aon3, Aon4 – поперечно-ізотропна.

Швидкість квазіпродольної хвилі в моделях Aon1, Aon2, Aon3, Aon4 декілька більше (рис. 3), ніж в моделях з орієнтацією порожнин вздовж осей X, Y, Z і досягає величини 5350 м/с. В порівнянні з розглянутими раніше моделями кількість екстремумів збільшується і коливається для різних типів моделі від семи до дев'яти. Вздовж цих напрямків поширюється продольна хвиля.

Різниця між «швидкою» і «повільною» поперечними хвилями змінюється від 1800 до

1950 м/с і на указальній поверхні виділяється 12-ю екстремумами різної інтенсивності.

Для моделей, де порожнини орієнтовані в площині XOY (моделі Aon1, Aon2, Aon3, Aon4) параметри еластичної анізотропії мають більш складне розподілення. Для всіх без виключення параметрів характерно наявність мінімуму п'яти екстремумів, що свідчить про специфічні особливості поширення еластичних хвиль в представлених моделях.

На стереопроєкції еластичних модулів (Юнга, Пуассона, сжатия) для моделей Aon1, Aon2, Aon3, Aon4, в порівнянні з розглянутими раніше моделями з осовою орієнтацією порожнин, кількість екстремумів збільшилася до 9, що вказує на те, що напрямлена вздовж сланцеватості тріщинуватість дуже сильно змінює структуру породи в цілому. При аналізі результатів моделювання для різних типів колекторів встановлено, що типи пористості не сильно впливають на анізотропію модулів еластич-

сти. В общем, модули имеют более широкий диапазон, чем в предыдущей группе моделей и изменяются в диапазоне: $E = 18 \div 70$ ГПа, $K_{\text{Плас}} = 0,04 \div 0,36$, $G = 6-32$ ГПа. Наибольшее различие на стереопроекции имеют проекции коэффициента Пуассона для модели Aon4.

Максимальные значения дифференциального коэффициента упругой анизотропии изменяются от 34 до 43 %, что подтверждает, что представленные модели - высокоанизотропные. С минимумами этого параметра (2%, т.е. отсутствуют изотропные направления) совпадают минимумы угла отклонения вектора упругих смещений от направления волновой нормали, которые мало отличаются от нуля.

Таким образом, даже при преобладании высокоанизотропной среды для представленных моделей в их объеме существуют такие особые направления, где упругие свойства среды мало отличаются от ближайшей к ним изотропной среды.

Для использования разработанной методики математического моделирования в практике поисковых геофизических работ авторами впервые

рассчитаны для моделей сланцевого коллектора параметры Томсена для ортотропной среды ($\epsilon_{12}, \epsilon_{13}, \epsilon_{23}, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{23}, \delta_{12}, \delta_{13}, \delta_{23}$) и проведен анализ полученных результатов (рис. 4-5).

По результатам математического моделирования установлено, что для сланцев, где пустоты ориентированы в плоскости напластования (ХОУ), большинство параметров Томсена ($\epsilon_{12}, \epsilon_{23}, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \delta_{12}$) имеют противоположный знак по отношению к параметрам, которые характеризуют сланец с пустотами, которые ориентированы по осям X, Y, Z независимо от типов и концентрации пустот (рис. 4).

Авторами проведен анализ взаимосвязи параметров Томсена и параметров акустической анизотропии. В целом, корреляционных зависимостей между этими параметрами не получено, но на большинстве точечных кросс-плотов обособились 2 класса моделей (с разной ориентацией пустот) на две группы точек (пример - на рис. 5), что говорит о влиянии структуры пустотного пространства на параметры Томсена.

В целом, параметры Томсена дают дополни-

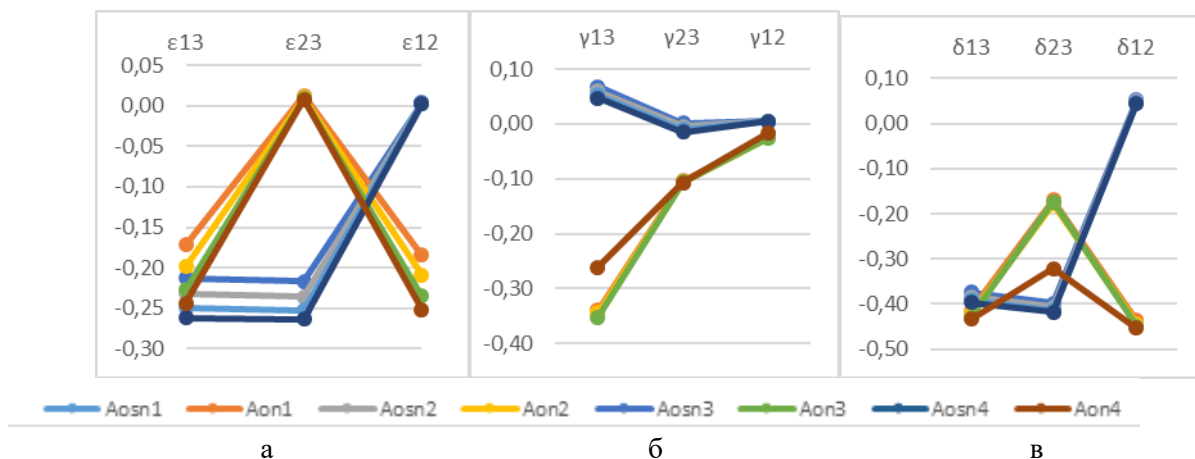


Рис. 4. Параметры Томсена для моделей сланцевого коллектора: а - ϵ , б - δ , в - γ

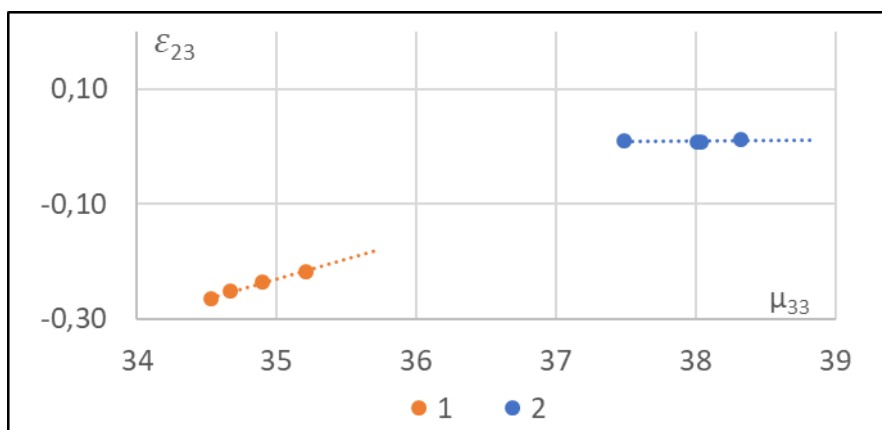


Рис. 5. Взаимосвязь параметров Томсена ϵ_{23} и компонента акустического тензора μ_{33} для моделей сланцевого коллектора: 1 – модели Aosn1, Aosn2, Aosn3, Aosn4; 2 - модели Aon1, Aon2, Aon3, Aon4

тельную інформацію об упругій анизотропії досліджуваних моделей порід, і їх розрахунок може бути використаний при наявності матриці упругих постійних порід при проведенні сейсмоакустичних досліджень.

Висновки. Авторами розроблена методика математичного моделювання ефективних упругих постійних нетрадиційних сланцевих порід-колекторів.

Обосновано і розроблено 8 різновидностей математических моделей, характеризуючих мінеральний склад, структуру порожнього простору і упругі властивості, які характерні для сланцевих порід-колекторів Дніпровсько-Донецької впадини України.

При аналізі упругих постійних, компонентів акустического тензора, параметрів лінійності і сланцеватості, стереопроекцій ізоліній вказувальних поверхностей дев'яти параметрів упругої анизотропії, а також параметрів Томсена встановлено:

- по акустическим даним можливо прослідити зміну структури порожнього простору породи-колектора, концентрацію породообразувальних мінералів в породі;
- трещиноватість має більше впливу на структуру породи, ніж гранулярні порожності і структура мінералів;
- на коефіцієнт акустическої анизотропії найбільше впливу має орієнтація включень; найбільші значення мають коефіцієнти анизотропії в породах, де порожності орієнтовані в площині XOY;
- сланцеві породи-колектори – високоанізотропні: коефіцієнт акустическої анизотропії для всіх типів моделей перевищує 10 % (19,3 – 26,99 %), в таких породах на коефіцієнт впливає як сланцеватість (орієнтація) мінералів, так і орієнтація порожностей, а особливо трещин;

- анизотропія модулів упругості кардинально відрізняється для груп моделей сланців з різною орієнтацією порожностей і подібна для моделей з однаковою орієнтацією порожностей;

- при розрахунках параметрів Томсена отримані параметри упругої анизотропії, які характеризують не тільки мінеральний склад порід, але і якісно структуру порожнього простору, орієнтацію мінералів і порожностей в породах;

- параметри Томсена для моделей сланцевих порід-колекторів корелюють з акустическими параметрами анизотропії;

- параметри акустическої і упругої анизотропії є індикаторами при дослідженні однотипних порід з різними типами мінеральних включень і структури порожнього простору.

Проведене авторами математическе моделювання упругих і акустических параметрів, характеризувальне їх анизотропію, є важливим етапом при обґрунтуванні математических моделей сланцевих порід-колекторів. Подібні моделі можуть бути використані при інтерпретації геофізических даних (сейсморозвідки і геофізических досліджень скважин) для внесення поправок за упругу анизотропію при пошуках і розвідці нафто-, газо- і водонасиченних складнобудованих нетрадиційних сланцевих порід-колекторів, а також – для складання банку даних математических моделей порід-колекторів вказаного регіону.

В перспективі авторами планується провести практическе вивчення подібних порід з використанням інваріантно-поляризаційного методу дослідження порід, який дає можливість отримати повний набір матриці упругих постійних.

Література

1. Wojtacki, K. *The elastic properties of sandstone submitted to progressive dissolution [Текст]* / K. Wojtacki, L. Daridon, Y. Monerie Computing, K. Wojtacki // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Montpellier, France. – 2017. – С. 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.12.015>
2. Guéry, A. *A micromechanical model for the elasto-viscoplastic and damage behavior of a cohesive geomaterial [Текст]* / A. Guéry, F. Cormery, K. Suet et al. // *Phys. Chem. Earth*. – 2008. – №33. – С. S416–S421.
3. Weng, M. *An associated elastic-viscoplastic constitutive model for sandstone involving shear-induced volumetric deformation [Текст]* / M. Weng, L. Tsai, Y. Hsieh, F. Jeng // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 2010. – №47. – С. 1263–1273.
4. Atkinson, B.K. *Subcritical crack propagation in rocks: theory, experimental results and applications [Текст]* / B.K. Atkinson // *J. Struct. Geol.* – 1982. – №4. – С. 41–56.
5. Grgic, D. *Modelling of the short and long-term behavior of rocks of Lorraine (France) feriferous formation: PhD Thesis [Текст]* / D. Grgic. – INPL, Nancy. – 2001.
6. Гулієв, І.С. *Оцінка генераційного потенціалу сланцевих низкопроницаємих товщ (майкопська серія Кавказу) [Текст]* / І.С. Гулієв, В.Ю. Керімов, Р.Н. Мустаєв, А.В. Бондарєв // *SOCAR Proceedings*. – 2018. – №1. – С. 4–20. DOI: 10.5510/OGP20180100335

7. Johnson, D. Reservoir characterization of the Barnett Shale [Електронне видання] / D. Johnson // Barnett Shale Symposium, Ellison Miles Geotechnology Institute at Brookhaven College, Dallas, Texas. 12–13 November, 2003. <http://www.energyconnect.com/pttc/archive/barnettshalesym/2003barnettshalesymp.pdf>.
8. Lopatin, N.V. Unconventional Oil Accumulations in the Upper Jurassic Bazhenov Black Shale Formation, West Siberian Basin: A Self-Sourced Reservoir System [Текст] / N.V. Lopatin, S.L. Zubairaev, I.M. Kos, T.P. Emets, E.A. Romanov, O.V. Malchikhina // Journal of Petroleum Geology. – 2003. – Vol. 26. – P. 225–244. doi.org/10.1111/j.1747-5457.2003.tb00027.x
9. Арутюнов, Т.В. Сланцевый газ как перспективный вид ископаемого топлива [Текст] / Т.В. Арутюнов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2015. – № 2. – С. 27–35.
10. Арутюнов, Т.В. Постановка задачи физико–химического моделирования сланцевых пород [Текст] / Т.В. Арутюнов, А.А. Арутюнов, О.В. Савенок // Научно–технический журнал «Инженер–нефтяник». – 2015. – № 1. – С. 42–47.
11. Баяк, И.О. Сейсмоакустические исследования ядра при пластовых условиях [Текст] / И.О. Баяк, Д.Е. Белобородов, И.А. Березина и др. // Технологии сейсморазведки. – 2015. – №2. – С. 36–45. <http://ts.sbras.ru> [doi:10.18303/1813-4254-2015-2-36-45](https://doi.org/10.18303/1813-4254-2015-2-36-45)
12. Продайвода, Г. Геофізичні методи оцінки продуктивності колекторів нафти і газу [Текст] / Г. Продайвода, С. Вишва, І. Безродна, Т. Продайвода. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2011. – 368 с.
13. Александров, К.С. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород [Текст] / К.С. Александров, Г.Т. Продайвода. – Н.: Изд. СО РАН, 2000. – 354 с.
14. Безродна, І. Математичне моделювання впливу мінерального скелету та пористості на параметри пружної анізотропії складнопобудованих теригенних порід–колекторів Волино–Поділля [Текст] / І. Безродна, Д. Безродний, Р. Голяка // Вісник Київського університету. Геологія. – 2016. – №73. – С.27–32. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.73.04>.
15. Комплексні аналітичні лабораторні дослідження кернів із свердловин Руновщинської ділянки: Звіт з НДР [Текст] / С.А. Вишва, І.І. Онищук, І.М. Безродна та ін. – Київ, 2017.
16. Безродна, І. Аналіз впливу мінерального скелету порід–колекторів Руновщинської площі на пружні та акустичні параметри (за результатами математичного моделювання) [Текст] / І. Безродна, Д. Безродний, О. Козіонова // Вісник Київського університету. Геологія. – 2017. – №77. – С. 52–58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.06>
17. Продайвода, Г.Т. Дослідження впливу тектонічних деформацій на параметри пружної і акустичної анізотропії залізистих кварцитів Криворізької надглибокої свердловини за даними математичного моделювання [Текст] / Г.Т. Продайвода, Д.А. Безродний, І.М. Безродна // Вісник Київського університету. Геологія. – 2012. – №57. – С. 8–12.
18. Prodayvoda, G.T. Mathematical modeling of influence of fluid saturation and saline's on the elastic and acoustic properties of volyn–podillya limestone's [Електронне видання] / G.T. Prodayvoda, I.M. Bezrodna, T.M. Kuzmenko // Матеріали ІХth International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, 11–14 May 2010, Kiev, Ukraine.
19. Продайвода, Г.Т. Акустика текстур гірських порід [Текст] / Г.Т. Продайвода. – К.:ВГЛ “Обрії”, 2004. – 144 с.
20. Mori, T. Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with misfitting inclusions [Текст] / T. Mori, K. Tanaka // Acta Metallurgica. – 1973. – V. 21, №4. – P. 571–574.
21. Thomsen, L. Weak elastic anisotropy [Текст] / L.Thomsen // Geophysics. – 1986. – №51 (10). – С. 1954–1966. [doi:10.1190/1.1442051](https://doi.org/10.1190/1.1442051).
22. Михайлов, В.А. Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. В. 1. Нетрадиційні джерела вуглеводнів: огляд проблеми [Текст] / В.А. Михайлов, Е.А. Ставицький, О.А. Проскураков та ін. – К.: Ніка–Центр, 2013. – 208 с.

Вклад авторов: все авторы сделали равный вклад в эту работу.

UDC 550.834

Iryna Bezrodna,

PhD (Geology), Senior Researcher, Deputy Director of Institute of Geology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine,
e-mail: bezin3@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6835-5276>;

Dmytro Bezrodnyi,

PhD (Geology), Associate Professor of the Department of Geophysics,
Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv,
e-mail: manific2@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7463-7133>;

Olesia Kozionova,

Lead Engineer, Institute of Geology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
e-mail: rapakivi@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2563-8719>

MATHEMATICAL MODELING OF THE ACOUSTIC AND ELASTIC ANISOTROPY OF THE SHALE RESERVOIR ROCKS OF THE DNIPRO-DONETSK DEPRESSION

The **purpose** of the work is to analyze the parameters of elastic and acoustic anisotropy in the study of a multicomponent reservoir rock model, which is represented by shale.

Research theory To solve this problem, the methods of conditional moment functions using the Mori-Tanaka calculation scheme, as well as the ordinary least squares were used. The technique of effective elastic invariables mathematical modelling of unconventional shale reservoir rocks has been developed.

Justification of the mathematical model Eight varieties of mathematical models that characterize the mineral composition, the structure of the void space and elastic properties that are characteristic for shale reservoir rocks of the Dnipro-Donetsk depression in Ukraine were substantiated and developed. The models are based on previous publications by the authors and the results of petrographic studies at the Institute of Geology.

Results The authors for the first time carried out an analysis of elastic constant rock models, acoustic tensor components, linearity and shale parameters, isolines stereo projections of index surfaces of nine elastic anisotropy parameters, as well as Thomsen parameters.

Acoustic data can be used to trace the change in the structure of the reservoir rock void space, the concentration of rock-forming minerals in the rock. Fracturing has a greater effect on rock structure than granular voids and mineral structure. The orientation of inclusions has the greatest influence on the coefficient of acoustic anisotropy, anisotropy coefficients in rocks, where the voids are oriented in the plane perpendicular to the borehole axis have the largest values (more than 20%).

When calculating the Thomsen parameters, the parameters of elastic anisotropy were obtained. They characterize not only the mineral composition of the rocks but also the qualitative structure of the void space, the orientation of minerals and voids in the rocks. Thomsen parameters correlate with acoustic anisotropy parameters for shale reservoir models.

The parameters of acoustic and elastic anisotropy are indicators in the studies of similar-type rocks with different types of mineral inclusions and the structure of the void space.

The mathematical modelling of elastic and acoustic parameters which characterizes their anisotropy and was carried out by the authors is an important step in substantiating mathematical models of shale reservoir rocks. Such models can be used in the interpretation of geophysical data (seismic surveys and well logging) to make corrections for elastic anisotropy in prospecting and exploration of oil, gas and water saturated unconventional shale reservoir rocks of complex structure, and also to compile a database of mathematical models of reservoir rocks in the given region.

Keywords: unconventional shale reservoir rock, mathematical modeling, elastic and acoustic anisotropy, Thomsen parameters.

References

1. Wojtacki, K., Daridon, L., Monerie Computing, Y., Wojtacki K. (2017). *The elastic properties of sandstone submitted to progressive dissolution. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Montpellier, France, 16-25. <http://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.12.015>*
2. Guéry, A., Cormery, F., Suet K. et al. (2008). *A micromechanical model for the elasto-viscoplastic and damage behavior of a cohesive geomaterial. Phys. Chem. Earth, 33, 416-421.*

3. Weng, M., Tsai, L., Hsieh, Y., Jeng F. (2010). An associated elastic–viscoplastic constitutive model for sandstone involving shear-induced volumetric deformation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 47, 1263-1273.
4. Atkinson, B.K. (1982). Subcritical crack propagation in rocks: theory, experimental results and applications. *J. Struct. Geol.*, 4, 41-56.
5. Grgic, D. (2001). Modelling of the short and long-term behavior of rocks of Lorraine (France) ferriferous formation. PhD Thesis. INPL, Nancy.
6. Guliyev, I.S., Kerimov, V.YU., Mustayev, R.N., Bondarev, A.V. (2018). The estimation of the generation potential of the low permeable shale strata of the Maikop Caucasian series. *SOCAR Proceedings*, 1, 4-20. DOI: 10.5510/OGP20180100335
7. Johnson, D. (2003). Reservoir characterization of the Barnett Shale. Barnett Shale Symposium, Ellison Miles Geotechnology Institute at Brookhaven College, Dallas, Texas. 12–13 November 2003. <http://www.energyconnect.com/pttc/archive/barnettshalesym/2003barnettshalesymp.pdf>.
8. Lopatin, N.V., Zubairae, S.L., Kos, I.M., Emets, T.P., Romanov, E.A., Malchikhina, O.V. (2003). Unconventional Oil Accumulations in the Upper Jurassic Bazhenov Black Shale Formation, West Siberian Basin: A Self-Sourced Reservoir System. *Journal of Petroleum Geology*, 26, 225–244. doi.org/10.1111/j.1747-5457.2003.tb00027.x
9. Arutyunov, T.V. (2015). Shale gas as perspective type fossilized fuel. *Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin)*, 2, 27–35.
10. Arutyunov, T.V., Arutyunov, A.A., Savenok, O.V. (2015). Problem definition of physical and chemical modeling of slate breeds. *Scientific and technical magazine «Inzhener-neftyanik»*, 1, 42–47.
11. Bayuk, I.O., Beloborodov, D.Ye., Berezina I.A. et al. (2015). Elastic properties of core samples under confining pressure. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2, 36-45. <http://ts.sbras.ru> doi:10.18303/1813-4254-2015-2-36-45
12. Prodayvoda, G., Vyzhva, S., Bezrodna, I., Prodayvoda, T. (2011). Geophysical methods for estimation the performance of oil and gas collectors. K.: VPTS "Kyivskyy universytet".
13. Aleksandrov, K.S., Prodayvoda, G.T. (2000). Anisotropy of the elastic properties of minerals and rocks. N.: Izd. SO RAN.
14. Bezrodna, I., Bezrodnyy, D., Holyaka, R. (2016). Mathematical modelling of influence of the mineral composition and porosity on elastic anisotropic parameters of complex sedimentary rocks of Volyn-Podolia area. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 73, 27-32. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.73.04>.
15. Vyzhva, S.A., Onyshchuk, I.I., Bezrodna, I.M. et al. (2017). Complex analytical laboratory researches of core from wells of the Runovshchyna region. Report, Kyiv.
16. Bezrodna, I., Bezrodnyy, D., Kozionova, O. (2017). Analysis of impact of mineral matrix of Runovshchinska area reservoir rocks on the elastic and acoustic parameters (based on the results of mathematical modelling). *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (77), 52-58 <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.06>
17. Prodayvoda, G.T., Bezrodnyy, D.A., Bezrodna, I.M. (2012). Investigation of the influence of tectonic deformations on the parameters of elastic and acoustic anisotropy of ferruginous quartzite of Krivoy Rog ultra-deep well according to mathematical modeling. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 57, 8-12.
18. Prodayvoda, G.T., Bezrodna, I.M., Kuzmenko, T.M. (2010). Mathematical modeling of influence of fluid saturation and saline's on the elastic and acoustic properties of volyno-podillya limestone's. *Materials of the IXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*, 11-14 May 2010, Kiev, Ukraine.
19. Prodayvoda, G.T. (2004). Acoustics of rocks texture. K.: VGL "Obriyi".
20. Mori, T., Tanaka, K. (1973). Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica*, 21, 4, 571-574.
21. Thomsen, L. (1986). Weak elastic anisotropy. *Geophysics*, 51 (10), 1954-1966. doi:10.1190/1.1442051.
22. Mykhaylov, V.A., Stavys'tky, E.A., Proskuryakov, O.A. et al. (2013). Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. B. 1. Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine: review of the problem. K.: Nika-Tsentr.