



СОЗДАНИЕ И АНАЛИЗ ПЕТРОУПРУГИХ МОДЕЛЕЙ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ ПУСТОТНОГО ПРОСТРАНСТВА

Я.С. ГРИГОРЯН*, И.О. БАЮК

ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук»
10, стр. 1, ул. Б. Грузинская, г. Москва 123242, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Наличие трещин в карбонатных породах способствует движению флюида в пустотном пространстве. Каждый тип пустот имеет специфическое влияние на упругие свойства пород, что, в свою очередь, позволяет оценивать характеристики определенного вида пустот по измеренным скоростям упругих волн. В данной работе на основе петроупругого моделирования проведен анализ влияния пор и трещин на скорости упругих волн. Приведен пример решения обратной задачи, заключающейся в определении трещинной пористости и относительного раскрытия трещин по данным о скоростях упругих волн и плотности карбонатного коллектора углеводородов, полученным при геофизическом изучении скважин.

Цель. Повышение достоверности интерпретации экспериментальных данных о скоростях упругих волн, распространяющихся в карбонатных коллекторах углеводородов, в терминах характеристик пустотного пространства, представленного порами и трещинами.

Материалы и методы. Удобным аппаратом, позволяющим оценивать эффективные физические свойства, включая упругие, исходя из состава и микроструктуры породы, является теория эффективных сред (ТЭС). С использованием метода самосогласования Берримана была создана модель эффективных упругих свойств породы (петроупругая модель), пустотное пространство которой представлено изометричными порами и трещинами. Данная модель была применена к скважине, расположенной в одной из нефтегазоносных провинций Западной Сибири.

Результаты. Результатом данной работы является установление степени влияния различных параметров, характеризующих пустотное пространство пористо-трещиноватых пород на скорости упругих волн. По результатам моделирования выполнено построение поверхностей скоростей в зависимости от меняющихся параметров модели (трещинной пористости и аспектного отношения трещин). Произведено сравнение теоретических и экспериментальных данных, на основании которого определены зоны развития трещиноватости и дана оценка объемной концентрации и относительного раскрытия трещин, содержащихся в этих зонах.

Заключение. На основе петроупругого моделирования изучено влияние трещин и пор на поведение скоростей упругих волн в порово-трещинных карбонатных коллекторах. По данным геофизических исследований, проведенных в скважине нефтегазоносной провинции Западной Сибири, выделены зоны повышенной трещиноватости и определены параметры, характеризующие объемное содержание и относительное раскрытие трещин.

Ключевые слова: петроупругое моделирование, карбонатные породы, коллектор углеводородов, поровое пространство, нефтегазоносная провинция, геофизические исследования скважин, сейсморазведка

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Для цитирования: Григорян Я.С., Баюк И.О. Создание и анализ петроупругих моделей карбонатных коллекторов с учетом особенностей строения пустотного пространства. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2020;63(6):58—65.
<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-58-65>

Статья поступила в редакцию 27.11.2021
Принята к публикации 31.01.2022
Опубликована 21.02.2022

* Автор, ответственный за переписку

PETROELASTIC MODELING OF CARBONATE RESERVOIRS IN THE VIEW OF DIFFERENT VOID TYPES

YANINA S. GRIGORYAN*, IRINA O. BAYUK

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences
10, bld. 1, B. Gruzinskaya, Moscow 123242, Russia

ABSTRACT

Background. Fractures present in carbonate rocks facilitate fluid flow within void spaces. Each type of voids can have a different effect on rock elastic properties, which, in turn, allow the characteristics of voids to be estimated by assessing the velocity of elastic waves. In this paper, an effect of pores and fractures on the velocity of elastic waves is analyzed by petroelastic modeling. An example of solving an inverse problem is presented, involving the determination of fracture porosity and relative fracture opening using the data on elastic wave velocity and hydrocarbon reservoir density obtained during geophysical well logging.

Aim. To increase the accuracy of experimental data on the velocity of elastic waves that propagate across hydrocarbon carbonate reservoirs by assessing the pore and fracture characteristics of voids.

Materials and methods. The effective medium theory was used as an efficient way to evaluate physical, including elastic, properties based on rock composition and microstructure. Using Berryman's self-consistent method, we created a model of rock elastic properties, or a petroelastic model, the void space in which was represented by isometric pores and fractures. This model was applied to a well in a petroleum province in West Siberia.

Results. The effect of characteristics determining the void space of porous-fractured rocks on the velocity of elastic waves was defined. Velocity surfaces were constructed in accordance with changing parameters of the model, i.e. fracture porosity and fracture aspect ratio. The obtained theoretical and experimental data were compared in order to determine fracture development zones and to evaluate volume concentration and relative fracture opening in these zones.

Conclusion. The effect of pores and fractures on elastic wave velocity in porous-fractured carbonate reservoirs was studied by petroelastic modeling. The zones of excessive fracturing were defined and the parameters of volume concentration and relative fracture opening were determined using the data obtained by geophysical well logging in a petroleum province in West Siberia.

Keywords: petroelastic modeling, carbonate rock, hydrocarbon reservoir, pore space, petroleum province, geophysical well logging, seismic survey

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: the work was carried out within the framework of the State assignment of the IPE RAS.

For citation: Grigoryan Ya.S., Bayuk I.O. Petroelastic modeling of carbonate reservoirs in the view of different void types. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2020;63(6):58—65. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2020-63-6-58-65>

Manuscript received 27 November 2021

Accepted 31 January 2022

Published 21 February 2022

* Corresponding author

Карбонатные коллекторы представляют значительную часть мирового углеводородного потенциала. Данные породы характеризуются сложностью строения пустотного пространства, которое может быть представлено трещинами, порами или кавернами. Исходя из строения пустотного пространства, карбонатные коллекторы подразделяют, как правило, на трещинные, трещинно-поровые, поровые, порово-кавернозные, трещинно-порово-кавернозные и т.п. Каждый тип пустот имеет специфическое влияние на упругие свойства пород, что, в свою очередь, позволяет оценивать характеристики определенного вида пустот по измеренным скоростям упругих волн.

Данная статья посвящена изучению влияния трещин и пор на поведение скоростей упругих волн в карбонатных коллекторах с использованием петроупругого моделирования.

Методы и подходы

Теоретические оценки эффективных модулей композитных или пористых упругих материалов обычно зависят от: (1) свойств отдельных компонентов композита, (2) объемных долей компонентов и (3) геометрических характеристик формы и пространственного распределения компонентов.

Первый и самый простой подход к определению эффективных модулей — это ограничивающие методы Хашина — Штрикмана и Фойгта — Ройсса [6], которые устанавливают оценки только верхних и нижних границ, когда известны только факторы (1) и (2) без каких-либо геометрических деталей. Второй подход улучшает эти оценки, добавляя статистическую информацию о взаимном расположении неоднородностей в объеме среды с помощью использования пространственных корреляционных функций [1, 4, 7, 8]. Однако при этом форма неоднородностей не задана в явном виде. Третий подход учитывает специфические формы неоднородностей. Одним из методов, относящихся к третьему подходу, является метод самосогласования Берримана, который позволяет определять эффективные модули упругости изотропных сред, включения которых могут иметь сферическую или эллипсоидальную форму. При этом могут рассматриваться как вытянутые (иглообразные), так и сплюснутые (монетообразные) эллипсоиды [2, 6].

Большинство теоретических методов используют решение для упругой деформации одиночного включения одного материала в бесконечной фоновой среде второго материала, а затем рассматривается та или иная схема

для оценки эффективных модулей, когда есть распределение этих включений. Эти оценки обычно ограничиваются малой концентрацией включений из-за сложности определения упругого взаимодействия включений, находящихся близко друг к другу.

Относительно успешный и, безусловно, популярный метод расширения области применения этих методов для более высоких концентраций включений — самосогласованное приближение [3, 5, 10]. В этом подходе также используется математическое решение для деформации изолированных включений, но взаимодействие включений аппроксимируется заменой фоновой среды на пока не известную эффективную среду.

Объекты исследования

Для достижения поставленной цели необходимо построение универсальной петроупругой модели изотропной карбонатной породы, которая является триадой, состоящей из следующих элементов:

(а) модельной среды, представляющей собой минеральную матрицу (изотропный поликристаллический кальцит) и две системы пустот — изометричные (сферические) поры и хаотические трещины;

(б) параметров модели, включающих вещественные параметры, характеризующие упругие свойства матрицы и флюида, и морфологические параметры, включающие общую и трещинную пористость, а также аспектное отношение трещин (относительное раскрытие);

(в) уравнений связи между эффективными модулями упругости породы и параметрами модели. В настоящей работе в качестве уравнений были взяты формулы метода самосогласования Берримана [2, 6] теории эффективных сред и формула Вуда для определения эффективного модуля упругости смеси флюидов в пустотном пространстве [9].

В качестве объекта исследования использовалась модель порово-трещинного карбонатного коллектора. Пустотное пространство модели представлено изометричными порами (аспектное отношение равно 1 для сфер) и трещинами (аспектное отношение варьирует от 0,0001 до 0,1). Трещинная пористость варьирует от 0 до 2,5%. Согласно экспериментальным данным, максимальное значение общей пористости (сумма объемной концентрации сферических пор и объемной концентрации трещин) для исследованной породы не превышает 15%. В качестве минеральной матрицы взят поликристаллический кальцит с изотропными упругими свойствами.

Пустотное пространство последовательно заполнено тремя типами флюидов: метан, нефть и пластовая вода. Так как на практике редко можно встретить заполнение пустотного пространства чистой нефтью, также был рассмотрен смешанный тип флюида (метан + нефть + пластовая вода).

Результаты исследования

Для анализа зависимости скоростей упругих волн от параметров модели (прямая задача) были построены поверхности скоростей упругих волн в зависимости от изменяющихся параметров модели: трещинной пористости и аспектного отношения трещин. При построении поверхностей в качестве осей координат использовались десятичные логарифмы этих параметров, поскольку модули упругости проявляют значительную изменчивость в области тонких трещин даже при малой пористости.

Реализация прямой задачи производилась в несколько этапов. На каждом этапе анализировалось поведение скоростей упругих волн при постепенном изменении параметров модели. Во избежание возникновения артефактов при построении поверхностей решений производился подбор наилучшего разбиения области изменения значений аспектного отношения трещин и трещинной пористости.

В результате численного моделирования было выявлено, что наиболее резкое изменение скоростей наблюдается при наименьших значениях аспектного отношения. Поэтому в этом случае использовался более мелкий шаг изменения значений аспектного отношения для построения поверхности скоростей упругих волн.

Построенная петроупругая модель была применена для решения обратной задачи по определению объемной концентрации трещин, аспектного отношения трещин и типа порозаполняющего флюида в условных «зонах интереса». Экспериментальными данными для решения обратной задачи являлись результаты акустического и плотностного каротажа, полученные для карбонатных пород одного из месторождений Западной Сибири. Породы были представлены известняком (содержание кальцита не менее 90%).

В качестве «зон интереса» были выбраны интервалы глубин, в которых общая пористость 1) была мала, 2) имела средние значения, 3) достигала максимальных значений. В качестве «опорных» значений малой, средней и значительной пористости были выбраны 5, 10 и 15%. Именно для этих трех значений общей пористости

в качестве примера был выполнен анализ параметров трещиноватости на основе построенной петроупругой модели. Следует отметить, что эти значения были выбраны исходя из диапазона пористости, установленного по данным плотностного каротажа для изучаемой скважины. На практике предложенный метод может быть применен во всем интервале глубин для любых значений пористости.

Для решения обратной задачи были использованы поверхности скоростей упругих волн в зависимости от изменяющихся параметров модели: десятичного логарифма трещинной пористости и десятичного логарифма аспектного отношения трещин. При решении обратной задачи значения скоростей упругих волн сравнивались с экспериментальными значениями скоростей по данным акустического каротажа (рис. 1) для тех глубин, у которых общая пористость была близка к выбранным для анализа решения «опорным» значениям — 5, 10 и 15%.

В результате проведенного анализа результатов моделирования было выявлено, что флюид, находящийся в скважине в интервалах глубин

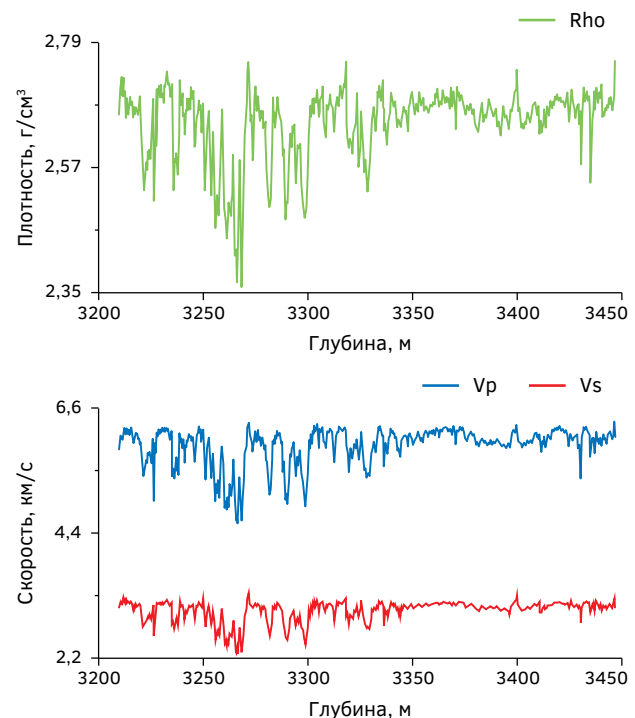


Рис. 1. Каротажные кривые, характеризующие скорости упругих волн V_p , V_s и плотность в изучаемом интервале глубин

Fig. 1. Logging curves V_p , V_s and density in the studied depth interval

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ / GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

с общей пористостью пород 5 и 10%, мог быть представлен любым из исследованных флюидов: метаном, нефтью, пластовой водой и смешанным флюидом (метан + нефть + пластовая вода). То есть для малых и средних значений пористости невозможно достоверно определить тип флюида в пустотном пространстве при помощи петроупругого моделирования.

Однако для общей пористости, равной 15%, петроупругое моделирование показало, что флюид мог быть представлен только нефтью или пластовой водой. При рассмотрении модели кальцитово-матрицы с включениями метана и модели со смешанным типом флюида, в котором процентное содержание метана, нефти и пластовой воды составляло 30, 30 и 40% соответственно, найти хорошее соответствие между прогнозными теоретическими значениями скоростей упругих волн и экспериментальными данными, определенными

по результатам каротажа скважины, не удалось. Вместе с тем соотношение твердой, жидкой и газообразной фаз оказывает существенное влияние на свойства пород. Так, например, наличие газа в пустотном пространстве заметно понижает значения модуля сжатия.

При сравнении теоретических значений скоростей упругих волн и экспериментальных значений скоростей на глубинах, где общая пористость близка к 5, 10 и 15%, были выделены диапазоны возможного изменения значений аспектного отношения трещин, трещинной пористости и плотности трещин. Приемлемым расхождением теоретических и экспериментальных значений скоростей считалось значение 2%.

На рисунке 2 слева представлены поверхности скоростей продольных и поперечных волн в зависимости от десятичного логарифма трещинной пористости. Справа на рисунке 2 показана

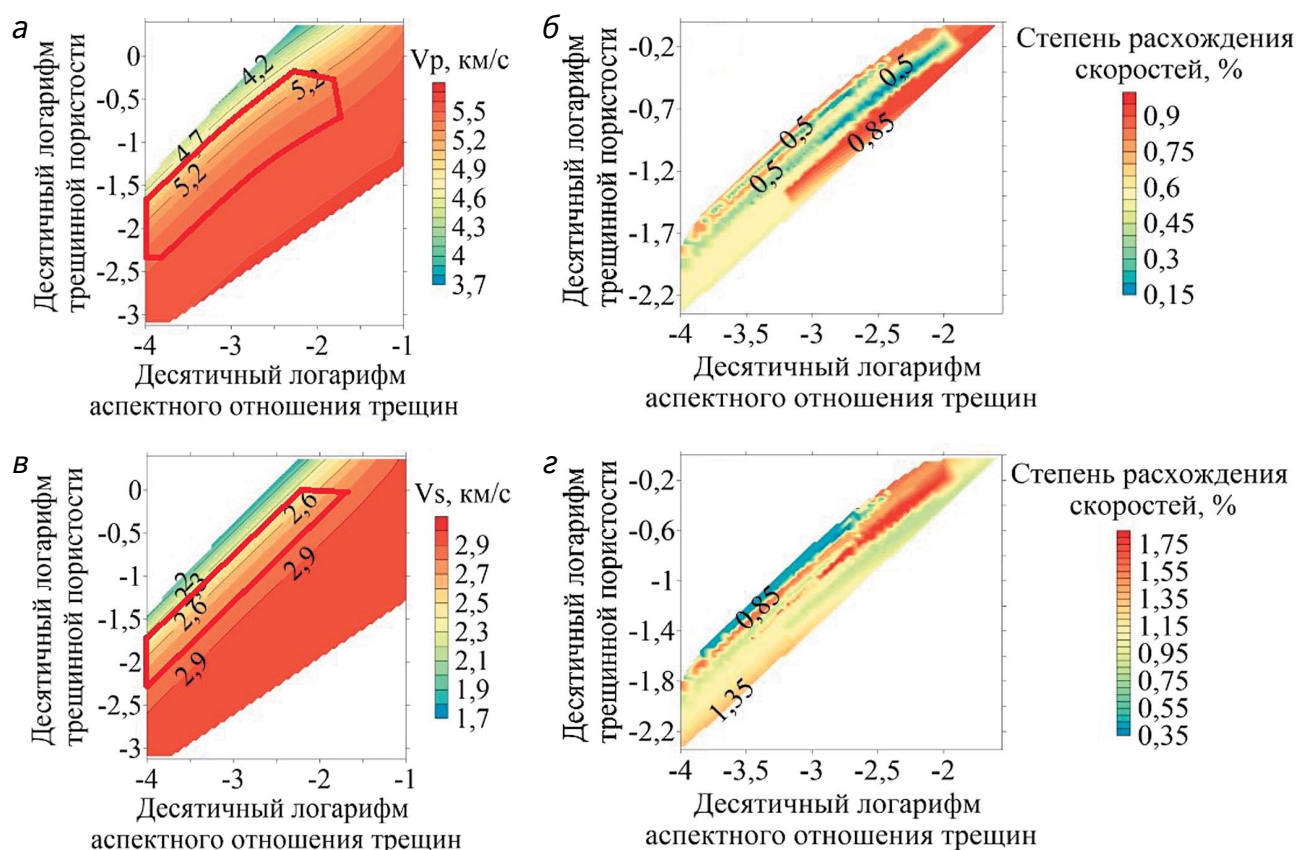


Рис. 2. Результаты петроупругого моделирования для модели с включениями нефти (общая пористость близка к 15%). Поверхности скоростей а) продольных и в) поперечных волн в зависимости от десятичных логарифмов трещинной пористости и аспектного отношения трещин; степень расхождения теоретических и экспериментальных значений скоростей б) продольных и г) поперечных волн

Fig. 2. Results of petroelastic modeling for model with oil inclusions (total porosity is close to 15%). Left panels are surfaces of P- and S-wave velocities depending on the decimal logarithms of fracture porosity and fracture aspect ratio; right panels are misfit between theoretical and experimental values of the respective velocities

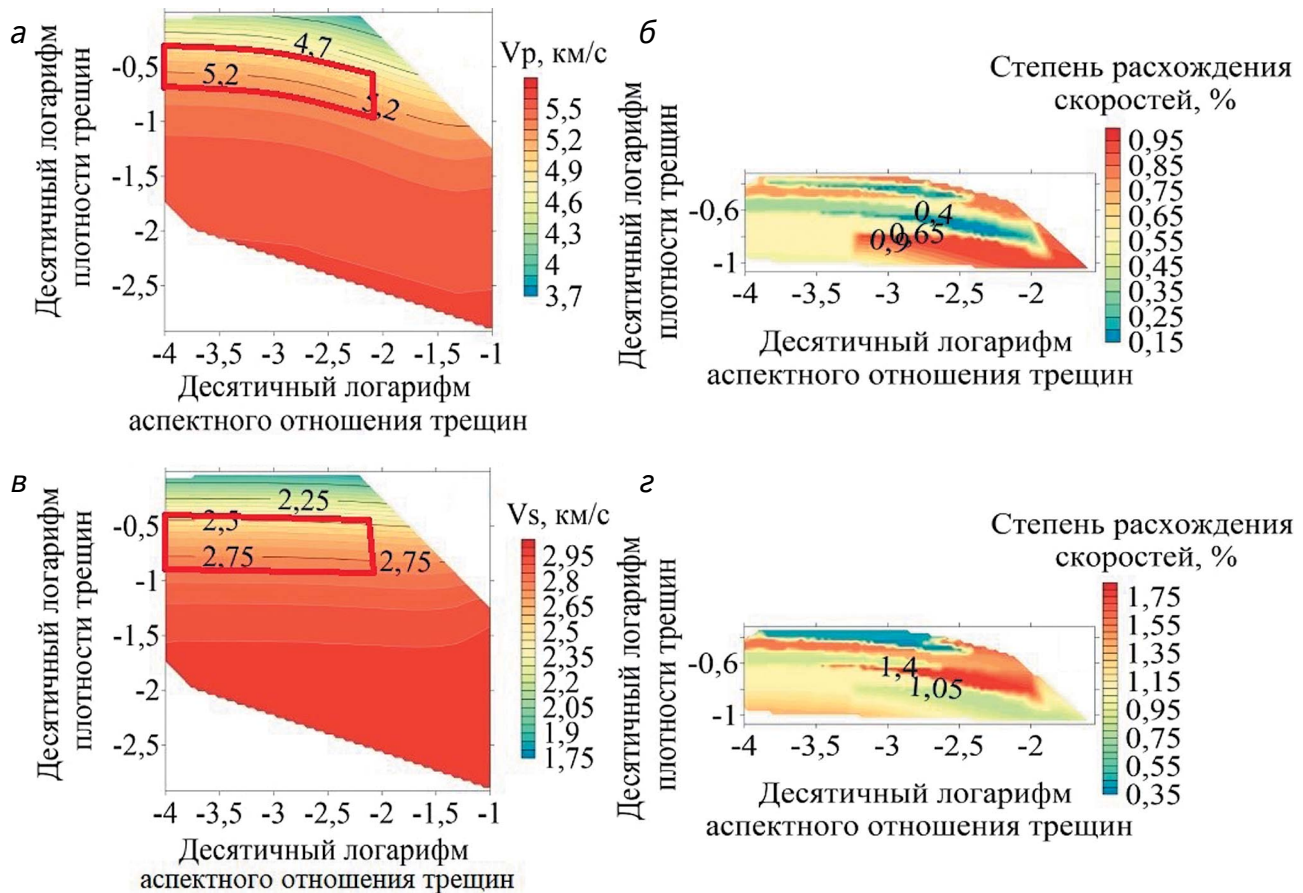


Рис. 3. Результаты петроупругого моделирования для модели с включениями нефти (общая пористость близка к 15%). Поверхности скоростей а) продольных и в) поперечных волн в зависимости от десятичных логарифмов плотности трещин и аспектного отношения трещин; степень расхождения теоретических и экспериментальных значений скоростей б) продольных и г) поперечных волн

Fig. 3. Results of petroelastic modeling for model with oil inclusions (total porosity is close to 15%). Left panels are surfaces of P- and S-wave velocities depending on the decimal logarithms of fracture density and fracture aspect ratio; right panels are misfit between theoretical and experimental values of the respective velocities

степень расхождения теоретических и экспериментальных значений этих скоростей для области, которая выделена красным цветом на поверхностях скоростей. Результаты показаны для пористости, близкой к 15%. Выделенные области соответствуют диапазонам изменения параметров модели, при которых расхождение теоретических и экспериментальных значений скоростей не превышает 2%.

На рисунке 3 представлены аналогичные зависимости, но в качестве характеристики количественного содержания трещин выбрана плотность трещин, которая в теории эффективных сред определяется по формуле $\epsilon = \frac{3\phi}{4\pi\alpha}$, где ϕ — пористость (в долях единицы), α — аспектное отношение трещин [6]. Этот параметр очень удобен

при анализе трещиноватости, поскольку показывает степень близости трещин друг к другу. На рисунке 3 все зависимости показаны от десятичного логарифма трещинной пористости. Как видим, использование плотности трещин вместо трещинной пористости позволяет сузить область неопределенности решения обратной задачи.

Обсуждение результатов

Таким образом, на основе результатов моделирования был проведен анализ влияния параметров, характеризующих пустотное пространство порово-трещинных карбонатных пород, на скорости упругих волн. Анализ выполнен с использованием метода самосогласования Берримана для трехкомпонентной модели породы (матрица + поры + трещины). По результатам моделирования

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ / GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

выполнено построение поверхностей скоростей упругих волн в зависимости от меняющихся параметров модели.

Результаты моделирования, проведенного в данной работе, находятся в соответствии с имеющимися знаниями о влиянии пористости на скорости волн, которые, как известно, уменьшаются с ростом пористости. Однако характер этого уменьшения определяется формой пустот. Так, например, если оценивать влияние трещин на скорости упругих волн для модели нефтенасыщенной породы с аспектным отношением трещин равным 0,1 (значение, часто принимаемое в качестве граничного, разделяющего «трещины» и «поры»), то можно увидеть, что пористость 2,5% (максимальное значение в данном исследовании) уменьшила скорости V_p на 4,6% и V_s на 2,3%. Однако при малых значениях аспектного отношения трещин, таких как 0,0001, влияние трещин способно уменьшить значение скоростей продольных и поперечных волн более чем на 20%.

Задача по определению характеристик пустотного пространства пород является неоднозначной, как большинство обратных задач, возникающих в геофизике и других областях знаний. Предложенный способ ее решения позволяет оценить область допустимых решений поставленной обратной задачи и тем самым

охарактеризовать область неопределенности ее решения. На практике, как правило, используют «наиболее вероятное» решение обратной задачи, которое характеризует решение, обеспечивающее минимальное значение выбранной меры расхождения экспериментальных и теоретических значений скоростей.

Важным результатом данных исследований является возможность определения зон повышенной трещиноватости. Обнаружение таких зон имеет важное практическое значение для разведочной геофизики, поскольку именно эти зоны наиболее благоприятны для движения углеводородов по сравнению с зонами, имеющими близкие значения пористости, но содержащими в основном квазиизометричные пустоты.

Выводы

Предложен метод построения поверхностей скоростей упругих волн в зависимости от параметров, характеризующих морфологию трещин. Данный метод может быть использован для обнаружения зон повышенной трещиноватости в порово-трещинных карбонатных коллекторах и характеристик этих зон в терминах параметров трещин — их содержания и степени относительного раскрытия — с использованием данных акустического и плотностного каротажа.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Beran M.J., Molyneux J. Use of classical variational principles to determine bounds for the effective bulk modulus in heterogeneous media // *Quart. Appl. Math.* 1966. № 24. P. 107—118 (In English).
2. Berryman J.G. Mixture theories for rock properties. In *Rock Physics and Phase Relations: a Handbook of Physical Constants*, ed. T.J. Ahrens. Washington, DC: American Geophysical Union. 1995. P. 205—228 (In English).
3. Budiansky B. On the elastic moduli of some heterogeneous materials // *J. Mech. Phys. Solids*. 1965. № 13. P. 223—227 (In English).
4. Corson P.B. Correlation functions for predicting properties of heterogeneous materials // *J. Appl. Phys.* 1974. № 45. P. 3159—3179 (In English).
5. Hill R. A self-consistent mechanics of composite materials // *J. Mech. Phys. Solids*. 1965. № 13. P. 213—222 (In English).
6. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. *The Rock Physics Handbook*. 2-nd Edition. Cambridge Univ. Press. 2009. (In English).
7. McCoy J.J. On the displacement field in an elastic medium with random variations in material properties. In *Recent Advances in Engineering Science*. Vol. 2. Ed. A.C. Eringen. New York: Gordon and Breach, 1970. P. 235—254 (In English).
8. Watt J.P., Davies G.F., O'Connell R.J. The elastic properties of composite materials // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1976. № 14, 541—563 (In English).
9. Wood A.W. *A Textbook of Sound*. New York: McMillan Co. 1955 (In English).
10. Wu T.T. The effect of inclusion shape on the elastic moduli of a two-phase material // *Int. J. Solids Structures*. 1966. № 2. P. 1—8 (In English).

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Григорян Я.С. — разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Баяк И.О. — разработала концепцию статьи, присоединилась к подготовке текста статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Yanina S. Grigoryan — developed the concept of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Irina O. Bayuk — developed the concept of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Григорян Янина Сергеевна* — аспирант ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук».

10, стр. 1, ул. Б. Грузинская, г. Москва 123242, Россия

e-mail: grigorian.yanina@yandex.ru

тел.: +7 (985) 476-65-16

SPIN-код: 3494-6160

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9389-2316>

Yanina S. Grigoryan* — post-graduate researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

10, bld. 1, B. Gruzinskaya str., Moscow 123242, Russia

e-mail: grigorian.yanina@yandex.ru

tel.: +7 (985) 476-65-16

SPIN-code: 3494-6160

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9389-2316>

Баяк Ирина Олеговна — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук».

10, стр. 1, ул. Б. Грузинская, г. Москва 123242, Россия

e-mail: bayuk@yandex.ru

SPIN-код: 6268-4076

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1148-9609>

Irina O. Bayuk — Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Senior Scientist, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

10, bld. 1, B. Gruzinskaya str., Moscow 123242, Russia

e-mail: bayuk@yandex.ru

SPIN-code: 6268-4076

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1148-9609>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author