

# Петроупругая модель оолитового известняка в масштабе зерна

М.Ф. Гасеми

аспирант

Mfgh\_110@mail.ru

И.О. Баяк

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник

ibayuk@yandex.ru

Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта,  
Москва, Россия

**В статье представлена методика построения параметрической петроупругой модели оолитового известняка в масштабе зерна с помощью подходов теории эффективных сред (Rock Physics), данных о микроструктуре породы и о скоростях упругих волн, распространяющихся в породе. Параметры петроупругой модели характеризуют строение пустотного пространства породы и включают форму межзерновых и оолитовых пор, а также степень связности пор в матриксе и оолитах. Результаты петроупругого моделирования обосновывают важность учета специфической микроструктуры каждой конкретной породы, для которой это моделирование проводится.**

## Материалы и методы

Подходы теории эффективных сред (Rock Physics), метод обобщенного сингулярного приближения, данные о скоростях упругих волн, фото шлифов, аншлифов и растровой электронной микроскопии.

## Ключевые слова

петроупругое моделирование, методы Rock Physics, микроструктура, скорости упругих волн, оолитовый известняк, изотропные свойства, неоднородность

Снижение цен на нефть и сокращение традиционных углеводородных ресурсов, с одной стороны, и стремление использовать нетрадиционные ресурсы, с другой стороны, сделали в последние годы проблему построения эффективных моделей физических свойств коллекторов более важной. Под эффективными свойствами понимают макроскопические свойства неоднородных сред, содержащих большое число неоднородностей. В частности, при рассмотрении упругих свойств решение таких задач называют задачами петроупругого моделирования. Такое моделирование предполагает замену реальной породы некой модельной средой, в которой компоненты или неоднородности (в частности, поры, трещины, минеральные зерна, частицы органического вещества и т.п.) представляются в виде некоторых простых геометрических фигур. Как правило, эти фигуры являются эллипсоидами с различным аспектным отношением. Модельная среда должна отображать основные особенности строения породы (микроструктуры). Помимо построения модельной среды, необходимо выделить параметры, характеризующие состав и микроструктуру породы и влияющие на физические свойства пород. Необходимо также определить уравнения, которые позволяют оценить влияние различных параметров модели на ее физические свойства. В качестве таких уравнений используются формулы различных методов теории эффективных сред. Применительно к горным породам эти методы получили название «методы Rock Physics» [1].

Внутреннее строение породы может быть разным на разных масштабах, поэтому модели должны отражать особенности строения породы в разных масштабах. Каждый следующий масштаб наследует свойства предыдущего.

Целью настоящей работы является построение петроупругой модели породы-коллектора в сантиметровом масштабе, т.е. в масштабе образцов, которые обычно испытывают в лабораторных условиях. Эффективные упругие свойства определяют по характеристикам составляющих, имеющих размер в несколько микрометров. Характеристики этих составляющих включают объемные концентрации компонентов, параметры, характеризующие упругие свойства составляющих (модули упругости), их морфологические характеристики (форму, ориентацию, степень связности). В качестве уравнений, связывающих параметры модели и эффективные упругие свойства, взяты формулы метода обобщенного сингулярного приближения (далее — ОСП) [2, 3].

Формула метода ОСП для определения эффективного тензора упругости произвольного типа анизотропии  $C^*$  имеет вид (в тензорной форме):

$$C^* = \left\langle C [I - g(\delta C)]^{-1} \right\rangle \left\langle [I - g(\delta C)]^{-1} \right\rangle^{-1}. \quad (1)$$

В формуле (1) треугольные скобки означают усреднение по всем компонентам породы, имеющим разные модули упругости,

форму и ориентацию. Далее даны пояснения к членам, входящим в формулу (1), в индексной форме (все индексы принимают значения от 1 до 3):

$$\begin{aligned} \delta C_{ijkl} &\equiv C_{ijkl} - C_{ijkl}^c, \\ g_{klmn} &= \frac{1}{4} (\tilde{a}_{klmn} + \tilde{a}_{mnlk} + \tilde{a}_{knlm} + \tilde{a}_{mnlk}), \\ \tilde{a}_{klmn} &= \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi n_{mn} \Lambda_{kl}^{-1} \sin \theta d\theta d\varphi, \\ \Lambda_{kl} &\equiv C_{klmn}^c n_{mn}, n_{mn} \equiv n_m n_n, \\ n_1 &= \frac{1}{a_1} \sin \theta \cos \varphi, n_2 = \frac{1}{a_2} \sin \theta \sin \varphi, n_3 = \frac{1}{a_3} \cos \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $C$  — тензор упругости каждой компоненты (4-го ранга);  $I$  — единичный тензор 4-го ранга;  $a_1, a_2, a_3$  — полуоси эллипсоидов, моделирующих включения.  $C^c$  — тензор упругости тела сравнения.

Согласно теории, его выбор может быть произволен. Это позволяет выбрать тело сравнения в таком виде, чтобы учесть основные особенности взаимного расположения неоднородностей в породе. Выбор тензора упругости тела сравнения в виде  $C^c = (I - f) C^m + f C^f$ , где  $C^c$ ,  $C^m$  и  $C^f$  — тензоры упругости тела сравнения, матрицы и флюида, а  $f$  — эмпирический параметр, определяющий степень связности пустотного пространства, позволяет рассматривать различные типы микроструктуры — от изолированных включений в минеральной матрице до экзотического случая, соответствующего эллипсоидальным частицам минерального вещества, окруженных флюидом.

Как показала практика использования метода ОСП, он является достаточно эффективным и надежным методом для определения тензора упругости микронеоднородных анизотропных пород с любым контрастом свойств компонент [3].

## Методика построения математической модели упругих свойств оолитового известняка в масштабе зерна

В качестве объекта исследований выбран оолитовый известняк. Оолитовые известняки, как правило, являются хорошими коллекторами, обладая повышенными значениями пористости и проницаемости.

Фото шлифов и растровой электронной микроскопии (РЭМ) представительных образцов породы показаны на рис. 1. Результаты анализа шлифов образцов, выполненного группой Д.В. Короста (МГУ) [5], показывают, что зерна оолитов составляют больше 80%. Тонкокристаллический кальцит занимает примерно 15%, а кварц — 5% от общей площади зерен. Зерна составляют 70% от площади шлифа, цемент — 15%, поры — 15%. Оолиты являются основными структурными зернами породы и представляют собой сфероагрегаты концентрического строения, сложенные литоморфным кальцитом (микритом). Структура большей части оолитов нарушена за счет выщелачивания ядра сфер. Минеральный состав оолитов преимущественно кальцитовый. Размер оолитов от 0,06 до 0,6 мм, преобладают оолиты с размером 0,125 мм.

Форма оолитов сферическая или овальная. Мелкокристаллический кальцит со следами кварца окружают зерна оолитов в качестве цемента. Микроморфологический анализ порового пространства показывает, что поры с разнообразными размерами развиты в цементе и внутри оолитов. Микротрещины и каналобразные поры не наблюдались в масштабе шлифов и полноразмерного образца.

Для нескольких образцов породы с вышеуказанными характеристиками микроструктуры измерялись следующие параметры (усредненные значения): общая пористость (0,22 — доли единицы), гидравлическая проницаемость (22 мД), плотность (2,09 г/см<sup>3</sup>) (результаты группы Д.В. Короста) [5]. Однако для получения полного тензора упругости необходимо оценить параметры, характеризующие микроструктуру породы, в том числе форму и ориентацию пор/трещин (при наличии), их емкость и степень связности. В настоящее время нет прямого метода для измерения вышеперечисленных параметров, и их можно оценить либо с использованием методов нелинейной оптимизации, либо используя статистические подходы (например, метод Монте-Карло).

Модельная среда строится на основе проведенных визуальных анализов в масштабе зерна (для данной работы — это цилиндры диаметром 30 мм и высотой 60 мм — так называемые стандартные образцы), включая данные компьютерной томографии с большим разрешением (60 мк) и акустической томографии. Более подробно методика акустической томографии описана в работах [5, 6]. Основным смыслом данного исследования является возможность разделения неоднородности и анизотропии. Согласно этой методике, скорости объемных продольных и поперечных волн ( $V_p$ ,  $V_s$ ) измеряются для разных азимутов на разной высоте от основания образца. Помимо этого, скорости измеряются вдоль оси зерна на разных трассах. Исследования проводятся для нескольких образцов-близнецов, вырезанных из полноразмерного зерна. Образцы-близнецы имеют сходную микроструктуру и акустические характеристики ( $V_p$ ,  $V_s$ ). Для данной породы исследования проводились для пяти образцов-близнецов. После проведения измерений полученные значения скоростей статистически обрабатываются.

Тип упругой симметрии определяется путем сравнения индикатрис измеренных скоростей упругих волн с индикатрисой фазовых скоростей в среде с данным типом анизотропии.

Для исследованных образцов характер изменения скоростей продольных и быстрых поперечных волн имеет некоторое сходство с таковыми для системы НТИ с осью симметрии  $x_1$ . Однако форма медленных поперечных волн нарушает допущение об этом типе симметрии. Анализируя характер распределения скоростей упругих волн в зависимости от высоты от основания образца и азимута (рис. 2), можно полагать, что данная порода в масштабе стандартных образцов является изотропной и неоднородной средой. В таб. 1 показаны результаты статистической обработки измеренных значений скоростей упругих волн для исследованных образцов. Степень неоднородности породы можно характеризовать коэффициентами вариации скоростей (среднеквадратическое отклонение, нормированное на среднее значение), которые, в среднем, составляют

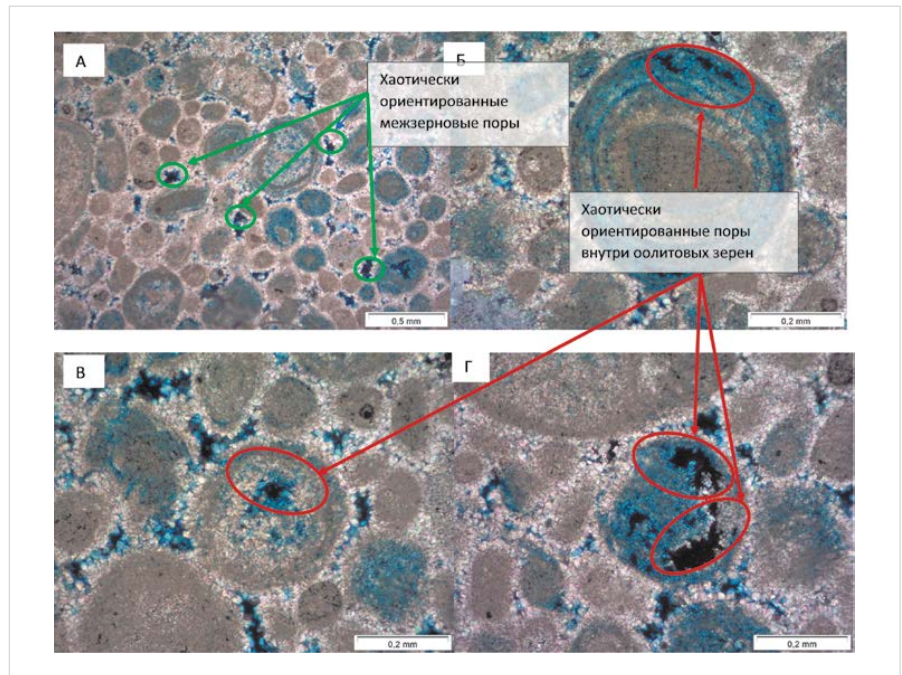


Рис. 1 — Известняк оолитовый. Фото шлифа: А — в параллельных, Б, В, Г — в скрещенных николях. Фото группы Д.В. Короста (МГУ)  
Fig. 1 — Oolitic limestone. Photos of the section: А — in parallel, Б, В, Г — in crossed Nicol prisms. Photo by group of D. V. Korost (Moscow State University)

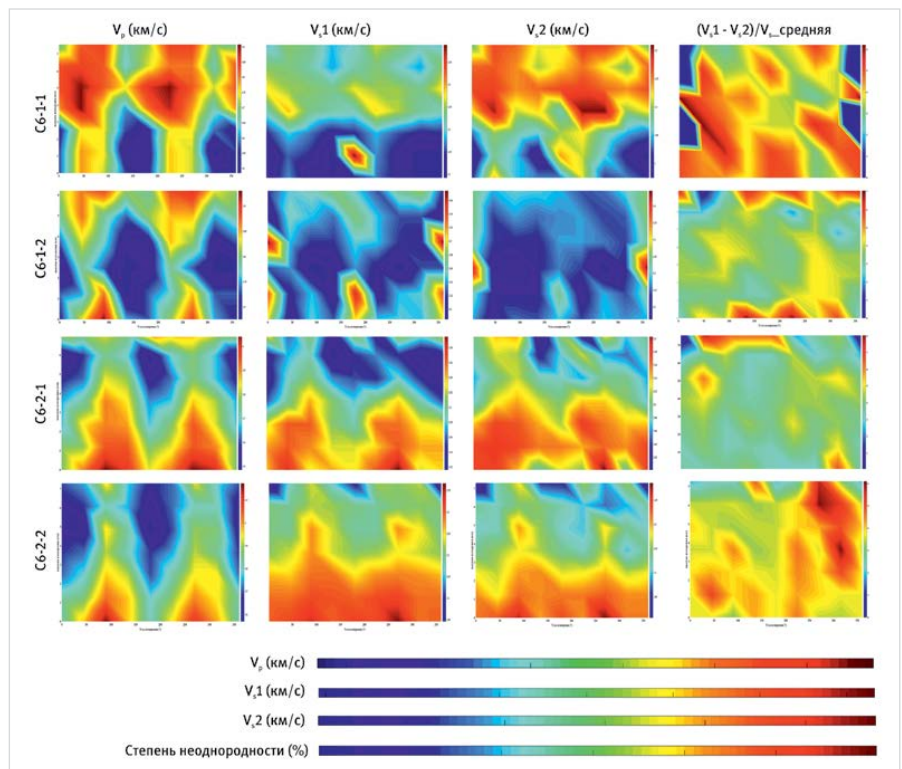


Рис. 2 — Результаты акустической томографии стандартных образцов оолитового известняка. Неравномерное распределение скоростей показывает слабую неоднородность.  
Fig. 2 — Results of acoustic tomography of standard samples of oolitic limestone. The nonuniform velocity distribution shows a weak inhomogeneity

3,5% для  $V_p$  и 3% для  $V_s$ . В дальнейшем эти значения используются при проведении нелинейной оптимизации в качестве пороговых для отбора приемлемых решений.

Для данной породы нами предложен следующий алгоритм построения математической модели эффективных упругих свойств в масштабе образца, в котором соблюдается общий принцип «от мелких неоднородностей — к крупным»:

- мелкокристаллические кальцит и кварц составляют цемент породы. Рентгеновская дифракция образца показывает более 99,5% кальцита от общего объема пород (включая оолитовые зерна и цемент). Мы предполагаем, что такая же относительная объемная доля действительна для состава цемента. Применяется метод Хашина-Штрикмана для расчета эффективного тензора упругости цемента (матрикса),

в котором кальцит играет роль вмещающей среды. В этом случае тензор упругости тела сравнения совпадает с таковым для изотропного поликристалла кальцита. Эти свойства можно вычислить по тензору упругости монокристалла кальцита, используя, например, метод Фойгта–Ройсса–Хилла или самосогласования [2, 7]. Для частиц кварца так же используются свойства изотропного поликристалла;

- оолитовые зерна представляются в виде составной среды — «эллипсоидальные поры в кальцитовой матрице» (рис. 3а). Тензор эффективных упругих параметров оолитовых зерен рассчитывается по методу ОСП (среда I) (рис. 3б);
- сферические включения среды I помещаются в цемент (матрикс) и добавляются хаотически ориентированные эллипсоидальные поры (среда II). Ориентированная пора показана на рис. 3г. Результаты анализа шлифов показывает, что зерна оолитов составляет 70% от общей площади шлифа (82,35% от матрицы образца). Полагая, что среда статистически однородная, можно считать, что объемная доля оолитовых зерен, составляющих

исследуемый образец, приблизительно равна этому значению.

Применение метода ОСП для третьей модели приведет к эффективному тензору упругости исследуемого карбонатного образца (рис. 3в). При моделировании считалось, что поры заполнены воздухом. Это соответствует реальному заполнению пор в исследуемых образцах.

Формы межзерновых и оолитовых пор предполагаются эллипсоидальными, поскольку метод ОСП основан на допущении эллипсоидальных пор. Оолитовые поры образуются между кальцитовыми круглыми слоями оолитовых зерен, и можно считать их хаотически ориентированы. В ультразвуковом эксперименте обнаружилось низкое расщепление поперечных волн. Однако микро- и макроморфологические анализы подтвердили изотропию образца (отсутствие большого числа ориентированных неоднородностей), поэтому наблюдаемое расщепление является артефактом.

Неизвестными параметрами предлагаемой модели оолитового известняка являются:

- объемная доля пор внутри оолитовых зерен;
- параметр связности пор внутри оолитовых зерен;

- эффективное аспектное отношение пор внутри оолитовых зерен;
- эффективное аспектное отношение межзерновых пор;
- параметр связности межзерновых пор и оолитовых зерен в матрице.

Для решения данной задачи, в которой число неизвестных больше, чем число измеренных независимых величин, требуются ограничения на искомые параметры. Методы нелинейной оптимизации позволяют получить решение задачи в определенной области значений параметров. Увеличение числа неизвестных расширяет область поиска и приводит к большой неопределенности найденного решения. Наличие информации об области возможного изменения параметров сужает диапазон поиска решения и повышает достоверность решения задачи. В нашей работе предполагается, что объемная доля пор внутри оолитовых зерен не превышает 50% от общей пористости (по визуальным анализам фото шлифов). Параметры связности меняются от 0 до 1, эффективные аспектные отношения от 0,1 до 1. Поскольку трещины не наблюдались в микро и макромасштабе, в модели предполагается, что аспектное отношение пор не может быть меньше 0,1. Для реализации алгоритма нелинейной оптимизации, имеющей целью получение неизвестных параметров модели, применялся метод Complex search algorithm библиотеки IMSL FORTRAN 90.

### Результаты моделирования

На рис. 4 показаны значения параметров модели для одного из образцов-близнецов в процессе работы алгоритма нелинейной оптимизации, направленной на поиск минимума функционала, который является усредненной невязкой расчетных и теоретических значений скорости. «Зеленые зоны» иллюстрируют подобранные параметры, при которых расхождение теоретических и экспериментальных значений скоростей находится в приемлемом диапазоне, определяемом степенью неоднородности породы. Все решения для параметров модели, полученные в «зеленых зонах», запомнились, а по окончании работы алгоритма статистически обрабатывались.

Результаты статистической обработки решений обратной задачи для оценки параметров микроструктуры пяти образцов-близнецов приведены в таб. 2. Как видно, значения параметров, полученных для разных образцов, достаточно близки. Это, в свою очередь, еще раз подтверждает, что данные образцы можно считать близнецами. Поры внутри оолитовых зерен составляют примерно 10% от общей пористости. Межгранулярное и оолитовое поровое пространство имеют схожую морфологию с аспектным отношением 0,75 и 0,60. Коэффициент связности оолитового порового пространства ( $f=0,92$ ) выше по сравнению с коэффициентом связности межзернового порового пространства ( $f=0,71-0,75$ ) показывает, что поры в оолитовых зернах имеют более высокую связность по сравнению с таковыми в межзерновом пространстве. Это также подтверждается результатами визуального анализа микроструктуры образцов.

На основании полученных параметров были рассчитаны модули упругости для каждого образца (модуль всестороннего объемного сжатия и сдвига), которые показаны в таб. 3.

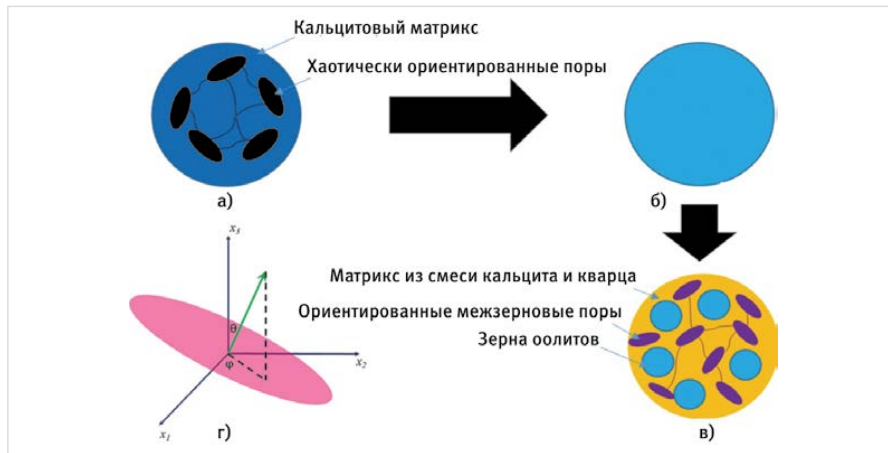


Рис. 3 — (а) зерна оолитов с пористой внутренней структурой, (б) эффективная модель оолитовых зерен (среда I), (в) модель исследуемой среды со сферическими оолитовыми зёрнами (с эффективными свойствами, рассчитанными на предыдущем этапе) и ориентированными связанными межзерновыми порами (среда II). (г) межзерновая пора, ориентированная относительно вертикальной и горизонтальной осей ( $x_3$  и  $x_1$ ) земной системы координат

Fig. 3 — (a) Grain of oololiths with a porous internal structure, (б) an effective model of oolitic grains (medium I), (в) a model of the investigated medium with spherical oolitic grains (with effective properties calculated at the previous stage) and chaotically oriented and connected intergranular pores (medium II). (г) intergranular pore oriented with respect to the vertical and horizontal axes ( $x_3$  and  $x_1$ ) of the Earth's coordinate system

	C6_1_1	C6_1_2	C6_2_1	C6_2_2	C6_2_3
$Kn_{\text{оолитов}}$	0.022	0.020	0.022	0.021	0.019
$\sigma Kn$	0.005	0.005	0.009	0.021	0.019
$AO_{\text{оолитов}}$	0.74	0.75	0.77	0.76	0.71
$\sigma AO_{\text{оол}}$	0.0830	0.0650	0.0972	0.0488	0.0688
$AO_{\text{межзерн}}$	0.60	0.63	0.63	0.61	0.63
$\sigma AO_{\text{меж}}$	0.0618	0.0603	0.1415	0.0916	0.0731
$f_{\text{оолитов}}$	0.92	0.92	0.93	0.92	0.93
$\sigma f_{\text{оолит}}$	0.020	0.016	0.011	0.025	0.020
$f_{\text{межзерн}}$	0.74	0.75	0.71	0.74	0.72
$\sigma f_{\text{межзерн}}$	0.066	0.052	0.056	0.045	0.055

Таб. 2 — Параметры, характеризующие поровое пространство исследуемых образцов, полученные в результате решения обратной задачи  
Tab. 2 — Parameters characterizing the pore space of the studied samples provided by the inverse problem solution

### Анализ чувствительности модели к параметрам

Был проведен анализ, показывающий, насколько изменения разных параметров построенной математической модели эффективных упругих свойств оолитового известняка влияют на скорости упругих волн. При варьировании одного из параметров остальные параметры модели фиксировались — использовались их средние значения.

На рис. 5 показано влияние аспектного отношения (далее — АО) оолитовых и межзерновых пор на скорости упругих волн в породе. Здесь и на последующих рисунках скорости продольных волн показаны синим цветом, поперечных — красным. Для анализа выбран

достаточно широкий диапазон аспектного отношения, переводящий поры в трещины. Наблюдается сильная нелинейность в зависимости скоростей от этого параметра. Для аспектных отношений менее 0,01 наблюдаются аномально низкие, противоречащие наблюдениям, значения скоростей. Такие области аспектных отношений сразу могут быть исключены из рассмотрения при петроупругом моделировании для данной породы.

Характер зависимостей скоростей от АО оолитовых и межзерновых пор довольно схож. Однако для при уменьшении АО межзерновых пор скорости падают более резко, что объясняется тем, что порода «чувствует» оолитовые поры через оолитовые включения,

в то время как межзерновые поры непосредственно находятся в матриксе.

В целом при варьировании значения АО от 0,1 до 1 скорости продольных волн изменяются на 13% для оолитовых пор и на 31% для межзерновых пор. Для скоростей поперечных волн эти изменения скоростей составляют соответственно 15% и 25%.

На рис. 6 показано влияние связности оолитовых и межзерновых пор на скорости упругих волн в породе. Как видно, поведение скоростей при изменении этого параметра для оолитовых пор и межзерновых пор различно. Влияние связности оолитовых пор на скорости упругих волн породы довольно незначительно вплоть до значения параметра связности 0,8 (менее 5% для  $V_p$ ). После этого значения параметра связности скорости падают довольно резко. Падение скорости  $V_p$  выше, чем на 5%, наблюдается уже при значении параметра связности межзерновых пор равном 0,3. С ростом параметра связности наблюдается более заметное падение скоростей.

Поскольку влияние формы и степени связности оолитовых и межзерновых пор различно на скорости упругих волн, то перераспределение доли пор между межзерновыми и оолитовыми отражается на значениях скоростей упругих волн. Увеличение доли оолитовых

	Модуль сжатия ( $K$ ), ГПа	$\sigma_k$ , ГПа	Модуль сдвига ( $\mu$ ), ГПа	$\sigma_\mu$ , ГПа
C6_1_1	14.99	1.303	10.29	0.432
C6_1_2	15.60	1.022	10.63	0.333
C6_2_1	15.23	0.695	10.43	0.216
C6_2_2	15.22	0.681	10.42	0.211
C6_2_2	15.16	0.671	10.51	0.113

Таб. 3 — Модули упругости исследуемых образцов, полученные по рассчитанным параметрам микроструктуры образцов  
Tab. 3 — Elastic modulus of the studied samples obtained from the inverted microstructural parameters

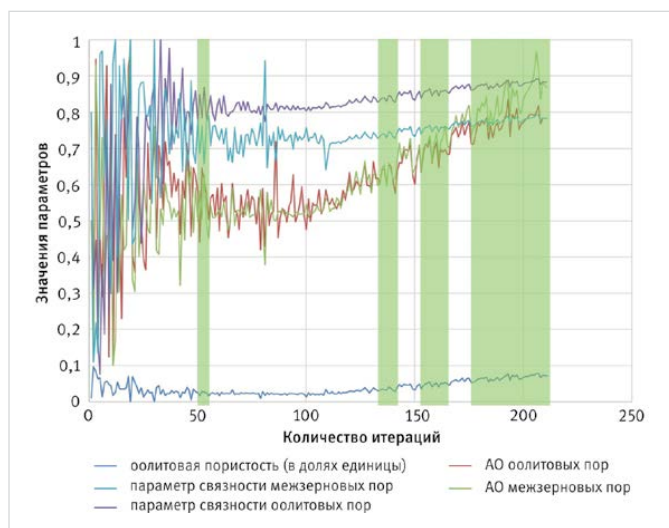


Рис. 4 — Итерации алгоритма оптимизации  
Fig. 4 — Iteration of the optimization algorithm

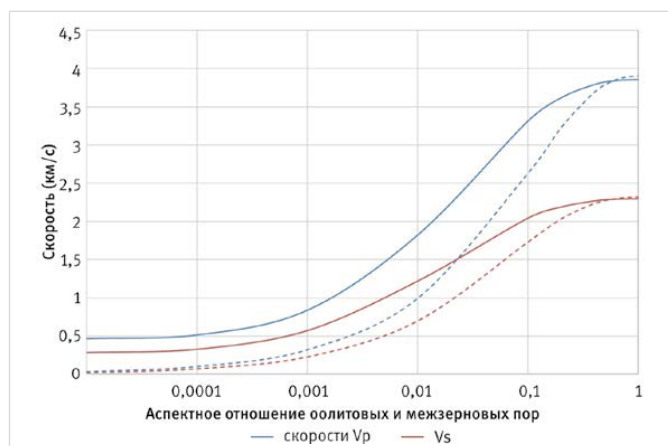


Рис. 5 — Влияние аспектного отношения оолитовых пор (сплошные кривые) и межзерновых пор (пунктирные кривые) на скорости объемных упругих волн в исследуемом образце  
Fig. 5 — Effect of the aspect ratio of oolitic pores (solid curves) and intergranular pores (dashed curves) on the velocity of bulk elastic waves in the studied sample

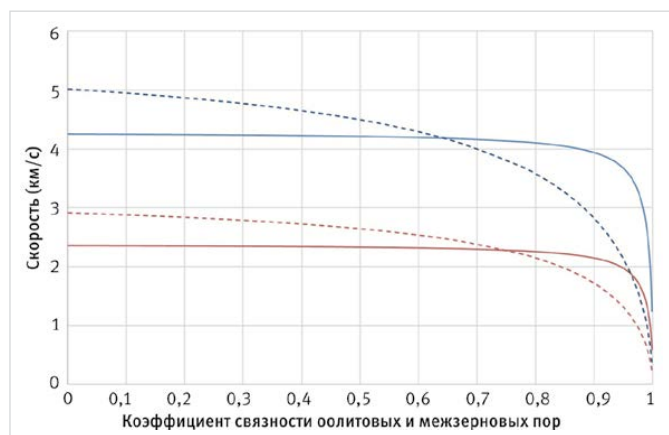


Рис. 6 — Влияние связности оолитовых пор (сплошные кривые) и межзерновых пор (пунктирные кривые) на скорости объемных упругих волн в исследуемом образце  
Fig. 6 — Effect of the connectivity of oolitic pores (solid curves) and intergranular pores (dashed curves) on the velocity of bulk elastic waves in the studied sample

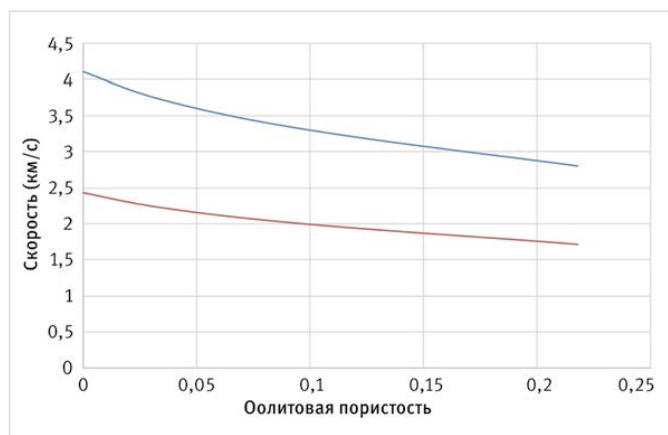


Рис. 7 — Влияние оолитовой пористости на скорости объемных упругих волн в исследуемом образце  
Fig. 7 — Effect of oolitic porosity on the velocity of bulk elastic waves in the studied sample

пор в общей пористости снижает жесткость оолитовых зерен. Это приводит к тому, что скорости упругих волн в породе падают с увеличением пористости оолитов (рис. 7).

### Итоги

Построена петроупругая модель оолитового известняка в масштабе зерна. Исследована степень влияния параметров модели на скорости упругих волн. Показано, что построенная модель довольно чувствительна к этим параметрам. Одноименные параметры оолитов и межзерновых пор оказывают разное влияние на скорости упругих волн. Перераспределение пористости между оолитами и межзерновым пространством приводит к существенно изменению упругих характеристик породы.

### Выводы

Подходы Rock Physics использованы для построения петроупругой модели оолитового известняка в масштабе зерна по результатам изучения микроструктуры породы и скоростям упругих волн, измеренным на представительном образце породы. Методика измерения

скоростей позволила оценить степень неоднородности породы в масштабе образца и классифицировать породу как изотропную с отдельными неоднородностями. Получены статистические характеристики параметров строения пустотного пространства: аспектное отношение оолитовых и межзерновых пор, коэффициенты их связности. Показано, что при фиксированной общей пористости перераспределение пористости между минеральной матрицей и оолитами может приводить к значительному изменению скоростей упругих волн.

### Список литературы

1. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The Rock Physics Handbook. 2nd Edition. Tools for Seismic Analysis of Porous Media. Cambridge: Cambridge University Press, 2009, 511 p.
2. Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusions and related problems // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1957, V. 241, pp 376–396.

3. Баяк И.О. Основные принципы математического моделирования макроскопических физических свойств коллекторов углеводородов // Технологии сейсморазведки. 2013. №4. С. 5–18.
4. Баяк И.О., Белобородов Д.Е., Березина И.А., Гилязетдинова Д.Р., Краснова М.А., Корост Д.В. и др. Сейсмоакустические исследования ядра при пластовых условиях // Технологии сейсморазведки. 2015. №2. С. 36–45.
5. Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Баяк И.О., Белобородов Д.Е., Березина И.А. и др. Комплексные лабораторные исследования ядра в ЦПИ ИФЗ РАН // Наука и технологические разработки. 2017. № 2. С. 17–32.
6. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 400 с.
7. Willis J.R. Bounds and self-consistent estimates for the overall properties of anisotropic composites // Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1977, issue 3, pp. 185–202.

ENGLISH

GEOPHYSICS

## Petroelastic model of oolitic limestone at the core scale

UDC 550.3

### Authors:

**Mohammad F. Ghasemi** — Ph.D. student; [Mfgh\\_110@mail.ru](mailto:Mfgh_110@mail.ru)  
**Irina O. Bayuk** — Sc.D., chief researcher; [ibayuk@yandex.ru](mailto:ibayuk@yandex.ru)

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

### Abstract

The paper presents a technique for constructing a parametric petroelastic model of oolitic limestone on the core scale using the approaches of the Effective Medium Theory (Rock Physics), data on the microstructure of the rock, and the velocities of elastic waves in the rock. Parameters of the petroelastic model characterize the structure of the void space of the rock and include the shape of intergranular and oolitic pores, as well as the degree of connectivity of pores in the matrix and oolites. The results of petroelastic modeling justify the importance of taking into account the specific microstructure parameters of each particular rock for which this simulation is carried out.

### Materials and methods

Approaches of the Effective Medium Theory (Rock Physics), the method of generalized singular

approximation, data on elastic wave velocities, images of thin sections, polished sections, and scanning electron microscopy (SEM).

### Results

A petroelastic model of oolitic limestone is constructed on core scale. The degree of influence of the model parameters on the elastic wave velocities is investigated. It is shown that the constructed model is quite sensitive to these parameters. The same parameters of oolites and intergranular pores have a different effect on the speed of elastic waves. Redistribution of porosity between oolites and intergranular space leads to a significant change in the elastic characteristics of the rock.

### Conclusions

The Rock Physics approaches are used to construct a petroelastic model of oolith limestone

on a core scale from the rock microstructure and elastic wave velocities measured on samples. The method of velocity measurements allowed one to estimate the degree of rock heterogeneity on the sample scale and classify the rock as an isotropic one with embedding various inhomogeneities. Statistical characteristics of the parameters describing the void space structure are obtained: aspect ratio of oolitic and intergranular pores and coefficients of their connectivity. It is shown that for a fixed total porosity a redistribution of the porosity between the mineral matrix and oolites can lead to a significant change in the elastic wave velocities.

### Keywords

petroelastic modeling, Rock Physics methods, microstructure, elastic wave velocities, oolitic limestone, isotropic properties, inhomogeneity.

### References

1. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The Rock Physics Handbook. 2nd Edition. Tools for Seismic Analysis of Porous Media. Cambridge: Cambridge University Press, 2009, 511 p.
2. Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusions and related problems // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1957, V. 241, pp. 376–396.
3. Bayuk I.O. *Osnovnye printsipy matematicheskogo modelirovaniya makroskopicheskikh fizicheskikh svoystv*

- kollektorov uglevodorodov* [Basic principles of mathematical modeling of macroscopic physical properties of hydrocarbon reservoirs]. Seismic technologies, 2013, issue 4, pp. 5–18.
4. Bayuk I.O., Beloborodov D.E., Berezina I.A., Gilyazetdinova D.R., Krasnova M.A., Korost D.V. and oth. *Seysmoakusticheskie issledovaniya kerna pri plastovykh usloviyakh* [Seismoacoustic studies of core under reservoir conditions]. Seismic technologies, 2015, issue 2, pp. 36–45.
5. Tikhotskiy S.A., Fokin I.V., Bayuk I.O., Beloborodov D.E., Berezina I.A. and oth.

- Kompleksnyye laboratornye issledovaniya kerna v TsPGI IFZ RAN* [Complex laboratory core studies at the CPPI IPE RAS]. Science and Technological development, 2017, issue 2, pp. 17–32.
6. Shermergor T.D. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred* [Theory of Elasticity of Microinhomogeneous Media]. Moscow: Nauka, 1977, 400 p.
7. Willis J.R. Bounds and self-consistent estimates for the overall properties of anisotropic composites // Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1977, issue 3, pp. 185–202.