

## **ПРОЯВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ СРЕД В СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ**

### ***Михаил Александрович Новиков***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-13-37, e-mail: novikovma@ipgg.sbras.ru

### ***Вадим Викторович Лисица***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-13-37, e-mail: lisitsavv@ipgg.sbras.ru

### ***Татьяна Станиславовна Хачкова***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-13-37, e-mail: khachkovats@ipgg.sbras.ru

В работе исследуется проявление в сейсмических волновых полях процесса растворения карбонатов при взаимодействии с углекислотой в трещиновато-пористом резервуаре. Получены численные оценки изменения физических свойств известняка при насыщении  $\text{CO}_2$  по результатам анализа томографических изображений образцов породы. При помощи полученных оценок смоделирован пороупругий материал, используемый в качестве заполнителя трещин в статистически сгенерированных моделях трещиновато-пористой флюидозаполненной среды. Выполнено численное моделирование распространения сейсмической волны в полученных моделях среды для оценки дисперсии скорости и затухания, вызванных потоками флюида, индуцированными волной.

**Ключевые слова:** растворение карбонатов углекислотой, компьютерная томография, пороупругость, распространение сейсмических волн, сейсмическое затухание.

## **IMPACT OF FRACTURED-POROUS MEDIA TRANSPORT PROPERTIES CHANGE IN SEISMIC WAVEFIELDS**

### ***Mikhail A. Novikov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)330-13-37, e-mail: novikovma@ipgg.sbras.ru

### ***Vadim V. Lisitsa***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Head of Laboratory, phone: (383)330-13-37, e-mail: lisitsavv@ipgg.sbras.ru

### ***Tatiana S. Khachkova***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptuyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Junior Researcher, phone: (383)330-13-37, e-mail: khachkovats@ipgg.sbras.ru

In this paper we research the response of carbonates dissolution when interacting with carbon dioxide in the seismic wave fields in a fractured-porous reservoir. We numerically estimate the change of limestone physical properties due to CO<sub>2</sub> sequestration based on the analysis of samples CT-scans. Obtained estimations is then used to model a poroelastic material, which we use as fracture-filling material in statistically generated fractured porous fluid-saturated media models. A numerical modeling of wave propagation is performed to estimate a velocity dispersion and attenuation caused by a wave-induced fluid flow.

**Key words:** CO<sub>2</sub> carbonate dissolution, CT scan, poroelasticity, seismic wave propagation, seismic attenuation.

Химические процессы, возникающие в трещиновато-пористой породе, могут приводить к значительным изменениям ее физических свойств. В частности, при насыщении трещиновато-пористого резервуара раствором CO<sub>2</sub> вследствие химической реакции с вмещающим известняком происходит значительное ослабление породы [9] наряду с ростом пористости и проницаемости [4], а также уменьшением извилистости. Эти свойства породы в настоящее время оцениваются с помощью микромасштабных исследований как экспериментально [4], так и методами вычислительной физики горных пород [1].

Карбонатные коллекторы содержат сеть трещин, которая поддерживает перенос флюида. В нашем исследовании мы рассматриваем трещины как мезомасштабные объекты, заполненные пористым материалом, встроенным в практически непроницаемый материал. Последние результаты исследования потоков флюида, индуцированных сейсмическими волнами [6, 8], показывают, что рост проницаемости материала трещины влечет за собой рост сейсмического затухания за счет потока флюида между связанными трещинами. Поскольку при растворении породы в результате реакции с CO<sub>2</sub> меняется не только ее проницаемость, необходимо дальнейшее подробное изучение данного явления.

Сначала выполняется численный анализ томографических изображений неоднородного оолитового известняка. При этом используются отсканированные с разрешением 3,43 мкм на воксель образцы породы до и после химической реакции с раствором CO<sub>2</sub> в пластовых условиях [4] (рис. 1).

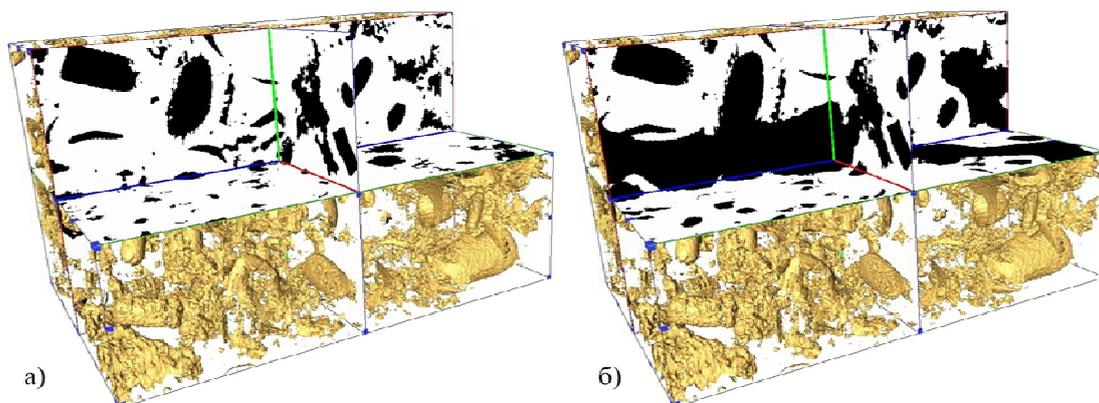


Рис. 1. КТ-изображения известняка до химической реакции с раствором CO<sub>2</sub> (а) и после реакции (б).

Черным цветом показано поровое пространство, белым – скелет, желтым – поверхность раздела

Прежде всего, по двум изображениям оцениваются пористость, проницаемость и извилистость (таблица). Последние два параметра находятся решением дифференциальных уравнений Стокса для установившегося потока несжимаемой жидкости [2], после этого проницаемость определяется согласно закону Дарси, а для определения извилистости мы используем рассчитанные значения расхода и формулу из [3].

#### Физические параметры материалов

Параметр	Вмещающая порода	До растворения	После растворения
Пористость, %	5	14.25	22.5
Модуль объемного сжатия, ГПа	46	28.3	17
Модуль сдвига, ГПа	28	19.9	11.5
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2615	2458	2318
Проницаемость, Д	0.001	0.53	141.4
Извилистость	1.83	1.83	1.17

Далее мы оцениваем эффективные упругие параметры образцов, используя метод, основанный на принципе эквивалентности энергии деформации и новом подходе к решению трехмерной задачи статической упругости итерационным методом установления [7]. Поскольку рассматриваемый известняк состоит из 97% кальцита и 3% биотита, эффективные упругие параметры образцов рассчитываются с использованием известных для кальцита значений ( $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$ ,  $V_p = 6037 \text{ м/с}$ ,  $V_s = 3507 \text{ м/с}$ ).

Полученные оценки пористости, проницаемости, извилистости и упругих параметров породы (таблица) при сопоставлении с экспериментальными данными показывают высокую степень достоверности. Численные оценки свойств породы до и после растворения  $\text{CO}_2$  демонстрируют увеличение пористости примерно в 1,5 раза, уменьшение упругих модулей и существенное изменение транспортных свойств пористого материала.

Для оценки сейсмического затухания, вызванного индуцированным волной потоком флюида, и его изменения вследствие изменения свойств материала выполняется численное моделирование продольной плоской волны в трещиновато-пористой флюидонасыщенной среде. Сначала мы генерируем набор трещиноватых моделей с разной степенью связности трещин (рис 2). Системы трещин формируются из двух наборов мелкомасштабных трещин (вертикальных и горизонтальных), представленных прямоугольниками со сторонами 3 и 0,4 см. Объемная концентрация трещин в области – 15 %. Для построения систем связанных трещин используется метод имитации отжига с максимизацией вероятности перколяции. Всего построено 10 реализаций по 6 моделей, соответствующих разным длинам перколяции.

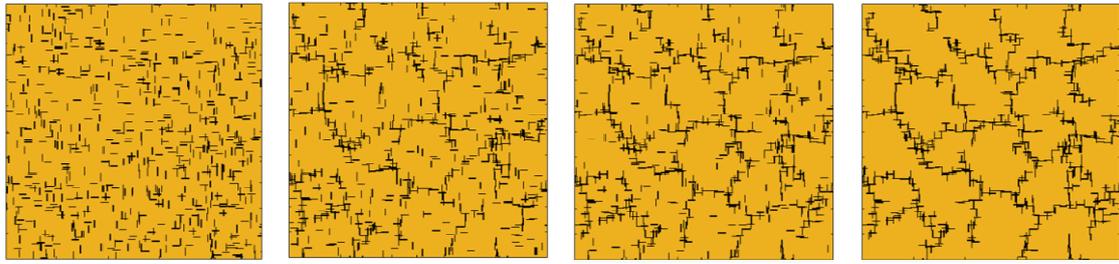


Рис. 2. Модели трещиноватых сред с разной степенью связности трещин

В полученных моделях трещиноватых сред моделируется распространение волны с использованием конечно-разностной аппроксимации уравнений динамики Био [5]. Две полученные модели известняка (до и после растворения  $\text{CO}_2$ ) используются в качестве материала в трещинах. Вмещающая среда также представляет пороупругий и флюидонасыщенный материал, однако, проницаемость и пористость у него значительно меньше. Свойства флюида во всей модели одинаковы: модуль объемного сжатия 2,25 ГПа, плотность –  $1090 \text{ кг/м}^3$  и динамическая вязкость –  $0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Доминирующая частота сигнала – импульса Рикера – варьируется от 1 до 10 кГц с шагом 1 кГц, поскольку наибольшая интенсивность потоков флюида в трещинах достигается на высоких частотах.

Результирующие волновые поля давления флюида для трещиноватых моделей с разной степенью связности и разным материалом в трещинах показаны на рис. 3. Крайне низкая проницаемость вмещающей породы приводит к тому, что перепады давления наблюдаются исключительно внутри систем трещин. Контраст давления в трещинах указывает на возникновение флюидопотоков. Потоки значительно интенсивнее в растворенном материале. Связность трещин же слабо влияет на волновые поля. Более того, при росте связности трещин потоки флюида между трещинами остаются строго локальными во всех случаях.

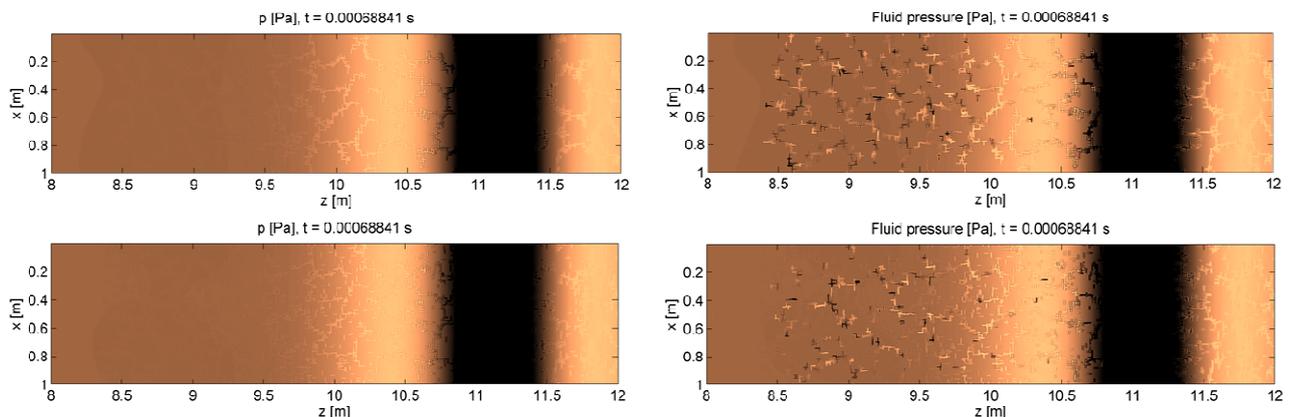


Рис. 3. Поля давления жидкости в трещиноватых моделях до (слева) и после (справа) воздействия  $\text{CO}_2$ . Длина перколяции в модели на верхних изображениях больше, чем на нижних

На основе сигналов, записанных до и после прохождения через трещиноватую среду, получены оценки фазовой скорости и затухания проходящей волны (рис. 4). Скорость волны в моделях с материалом в трещинах до растворения незначительно выше (приблизительно на 3 %). Однако с ростом связности трещин изменения скорости практически не наблюдается. Наблюдается существенный относительный рост затухания волны после растворения материала в трещинах, как и зависимость затухания от степени связности. Кроме того, одинаковое положение пиков затухания около 4 кГц свидетельствует о строгой локальности потоков флюида, проявляющихся лишь в масштабе отдельных трещин. Отметим, что поскольку для всех проведенных экспериментов добротность имеет порядок  $10^{-3}$ , то потоки флюида внутри трещин, возникающие при растворении породы, практически невозможно различить.

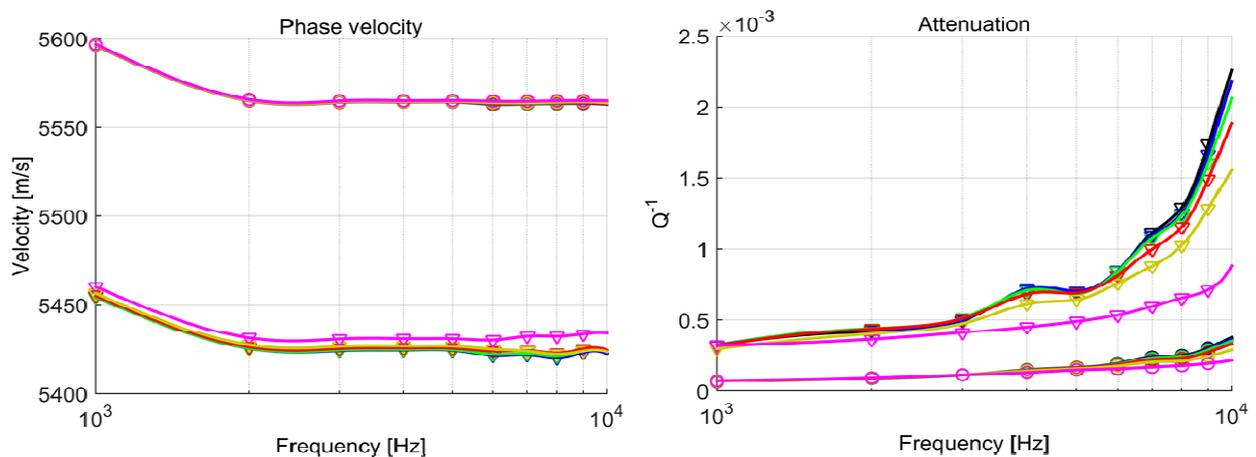


Рис. 4. Оценки фазовой скорости и затухания волны для двух моделей материала в трещинах.

Линии с кружками – оценки для материала до растворения, с треугольниками – после растворения. Цвета соответствуют убыванию длины перколяции в следующем порядке: черный, синий, зеленый, красный, желтый, розовый

*Численное моделирование проводилось при поддержке проекта ФНИ 0331-2019-0008, анализ микротомографических изображений породы проводился при поддержке гранта РФФИ 18-01-00579, оценка геометрических характеристик систем трещин поддержана грантом РФФИ 18-05-00031, определение скоростей сейсмических волн и коэффициентов добротности проводилось при поддержке гранта президента РФ для молодых докторов наук МД-20.2019.5.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Digital rock physics benchmarks - part II: Computing effective properties / H. Andra, N. Combaret, J. Dvorkin, E. Glatt // Computers & Geosciences. – 2013. – Vol. 50. – P. 33-43.
2. Effect of CT Image Size and Resolution on the Accuracy of Rock Property Estimates / Y. Bazaikin, B. Gurevich, S. Iglauer, T. Khachkova, D. Kolyukhin, M. Lebedev, V. Lisitsa, G. Reshetova // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2017. – Vol. 122(5). – P. 3635–3647.

3. Duda A., Koza Z., Matyka A. Hydraulic tortuosity in arbitrary porous media flow // *Physical Review E*. – 2011. – Vol. 84(3). – P. 036319.
4. Carbon geosequestration in limestone: Pore-scale dissolution and geomechanical weakening / M. Lebedev, Y. Zhang, M. Sarmadivaleh, A. Barifcani, E. Al-Khdheawi, S. Iglauer // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2017. – Vol. 66. – P. 106-119.
5. Masson Y. J., Pride S. R. Finite-difference modeling of Biot's poroelastic equations across all frequencies // *Geophysics*. – 2010. – Vol. 75(2). – P. N33-N41.
6. Numerical study of fracture connectivity response in seismic wavefields / M. Novikov, E. Caspari, K. Holliger, B. Quintal, V. Lisitsa, J. Germán Rubino, K. Holliger // 2017 SEG: proceedings of the International Exposition and Annual Meeting (Houston, Texas, 24-29 September, 2017). – Houston, Texas: SEG, 2017. – P. 3786-3790.
7. Reshetova G., Hachkova T. Numerical Computation of Effective Elastic Parameters of Rock Samples by 2d and 3d Numerical Images. // *Innovations in Geosciences - Time for Breakthrough: proceedings of the 8<sup>th</sup> EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition (Saint Petersburg, April 9-12 2018)*. – Saint Petersburg: EAGE, 2018. – P. 524-530.
8. Seismoacoustic signatures of fracture connectivity / J.G. Rubino, T.M. Muller, L. Guarracino, M. Milani // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2014. – Vol. 119(3). – P. 2252-2271.
9. Sim C.Y., Adam L. Are changes in time-lapse seismic data due to fluid substitution or rock dissolution? A CO<sub>2</sub> sequestration feasibility study at the Pohokura Field, New Zealand // *Geophysical Prospecting*. – 2016. – Vol. 64(4). – P. 967-986.

© М. А. Новиков, В. В. Лисица, Т. С. Хачкова, 2019