

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ ЧАСТИЦ, СТОХАСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И ИХ ГИБРИДИЗАЦИЕЙ

Карсанина Марина Владимировна^{*,**}, Васильев Роман Викторович^{***}, Герке Кирилл Миронович^{****},
Корост Дмитрий Вячеславович^{***}

*Институт динамики геосфер РАН, **AIR Technology, ***Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ****CSIRO Land and Water

В последнее десятилетие с развитием как лабораторно-методической базы, так и вычислительных ресурсов, все большую популярность получают методы определения эффективных свойств материалов по данным об их строении [1,2,3]. Несмотря на то, что в последнее время стали более доступны томографические методы исследования 3D структуры: рентгеновская томография [4] и FIB-SEM [6], подобные методы имеют свои ограничения. В основном, они связаны с разрешением полученных изображений и размерами исследуемых образцов. Еще одним недостатком таких методов является сложность и дороговизна необходимого оборудования, и значительные временные затраты на работу с образцом. Электронная, и некоторые другие методы микроскопии позволяют исследовать 2D срезы со значительно более высокими разрешениями и за очень короткое время. Таким образом, данные о трехмерном строении образца необходимого размера с необходимым разрешением могут быть получены далеко не всегда, в то время как РЭМ изображения легко доступны. В петрофизике представляет интерес определение свойств пород-коллекторов, в особенности тех, которые нелегко или долго измерять лабораторно: проницаемость, коэффициент диффузии, дисперсия, механические или электрические свойства. Эти свойства можно определить различными численными и теоретическими методами при условии, что точная трехмерная структура материала известна. Поэтому возникает вопрос о возможности реконструкции трехмерной структуры по ее двумерным срезам [7]. Причем речь идет не о точном восстановлении, а о получении статистически равнозначной среды с одинаковыми свойствами [8]. В настоящее время существует три основных подхода для описания и моделирования многофазных материалов и пористых сред: статистические, последовательные (sequential) и морфологические методы. Основной задачей настоящей работы было разработать быстрые и эффективные методы реконструкции структуры пород-коллекторов, в том числе с использованием гибридных (т.е. считающих несколько методов) алгоритмов.

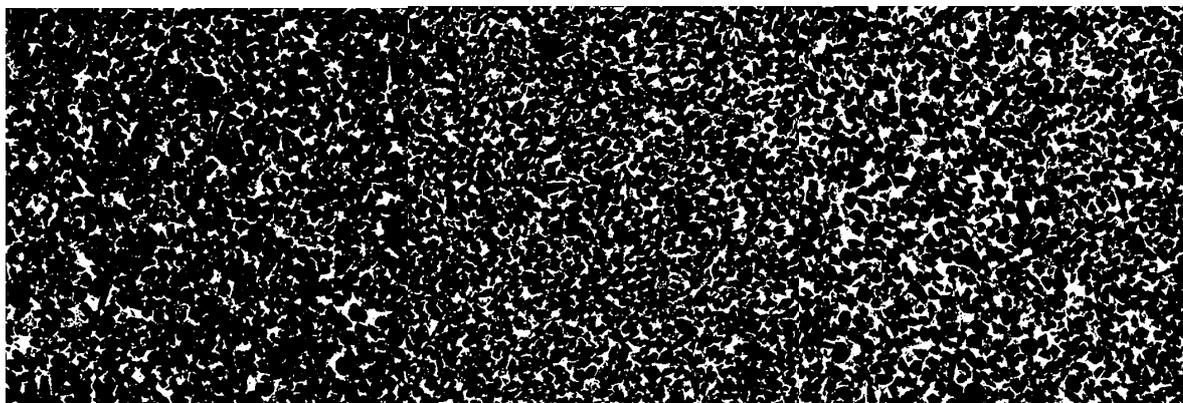


Рис. 1 Двухмерные срезы через три образца песчаника, использовавшихся для реконструкций.

В качестве верификационного набора данных были отобраны три 3D изображения песчаников (Рис.1) полученные с помощью рентгеновской микротомографии с разрешением 2.5-5 мкм. Изображения представляют собой стеки двухмерных срезов. Для каждого образца мы выбрали один двухмерный срез, пористость которого наиболее близка к пористости 3D куба. Для каждого из образцов нам были известны лабораторно определенные проницаемость и гранулометрический состав. Сначала мы использовали стандартные методы стохастической реконструкции на основе корреляционной функции S_2 [7,8,9]. Затем реконструкцию проводили последовательным методом частиц (drop and roll) [10] и модифицированным методом Любачевского-Стиллинжера, при этом размер частиц определялся либо по данным гранулометрического размера, либо с использованием метода watershading на двухмерных срезах (Рис.1). Тоже самое проводили с ограничением упаковываемых сфер различным количеством случайно расположенных в пространстве плоскостей. Затем в полученных последовательными методами упаковках генерировалась глина (третья фаза) до достижения необходимой пористости. Полученные последовательными методами 3D изображения затем использовались как входные изображения для стохастического метода, т.е. в них переставлялись воксели до тех пор, пока корреляционная функция не получалась идентичной оригинальному 2D изображению. Т.е., мы применяли гибридный метод – последовательно-стохастическую реконструкцию. На каждом этапе 3D изображения использовались для моделирования физических свойств (проницаемость, капиллярные кривые, относительные

проницаемости по воде и газу) с на основе сеточных моделей, выделенных методом inscribed maximal ball. Качество реконструкции оценивалось по соответствию полученных численными методами физических свойств самих реконструкций и оригиналов.

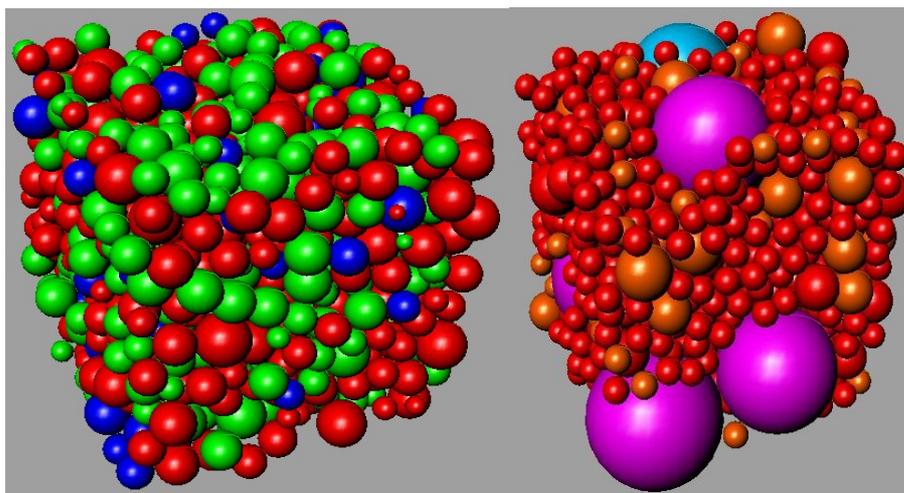
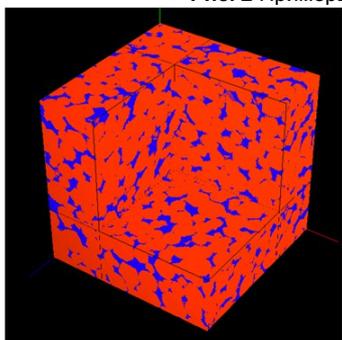
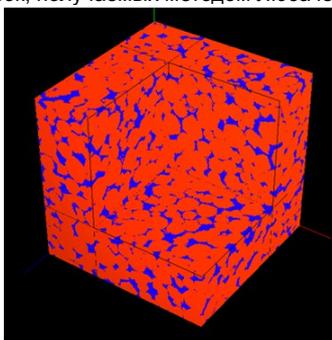


Рис. 2 Примеры упаковок, получаемых методом Любачевского-Стиллинжера.



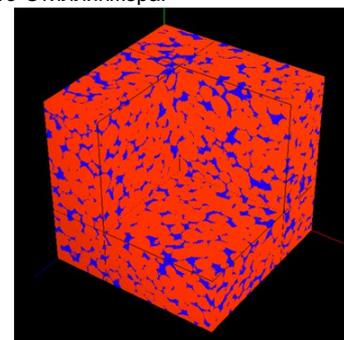
Drop-and-roll
(низкие энергии)

Анизотропия = 1.39,
Проницаемость = 330 мД



Drop-and-roll
(высокие энергии)

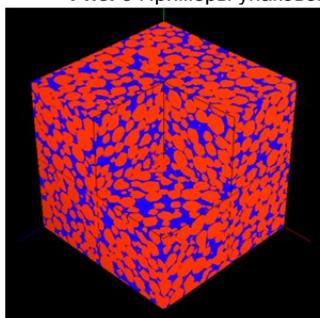
Анизотропия = 1.37,
Проницаемость = 275 мД



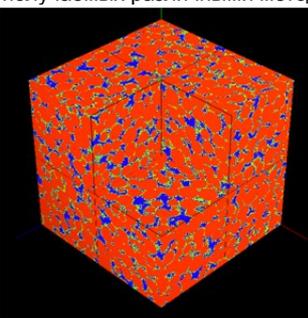
Модифицированный
Любачевский-Стиллинжер

Анизотропия = 1.08,
Проницаемость = 207 мД

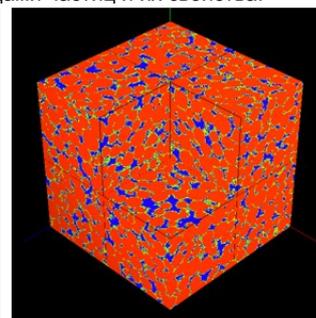
Рис. 3 Примеры упаковок, получаемых различными методами частиц и их свойства.



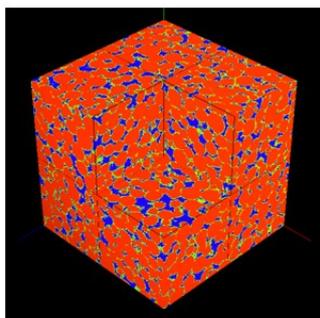
Упаковка



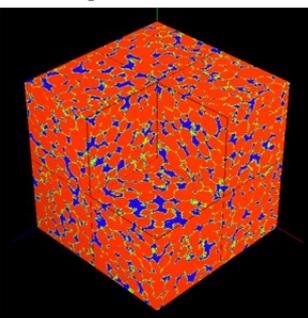
$\mu = 0.2$



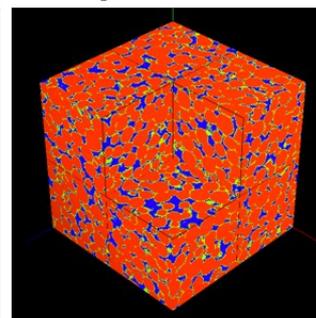
$\mu = 0.4$



$\mu = 0.6$



$\mu = 0.8$



$\mu = 1.0$

Рис. 4 Примеры упаковок, получаемых с различными параметрами роста глины.

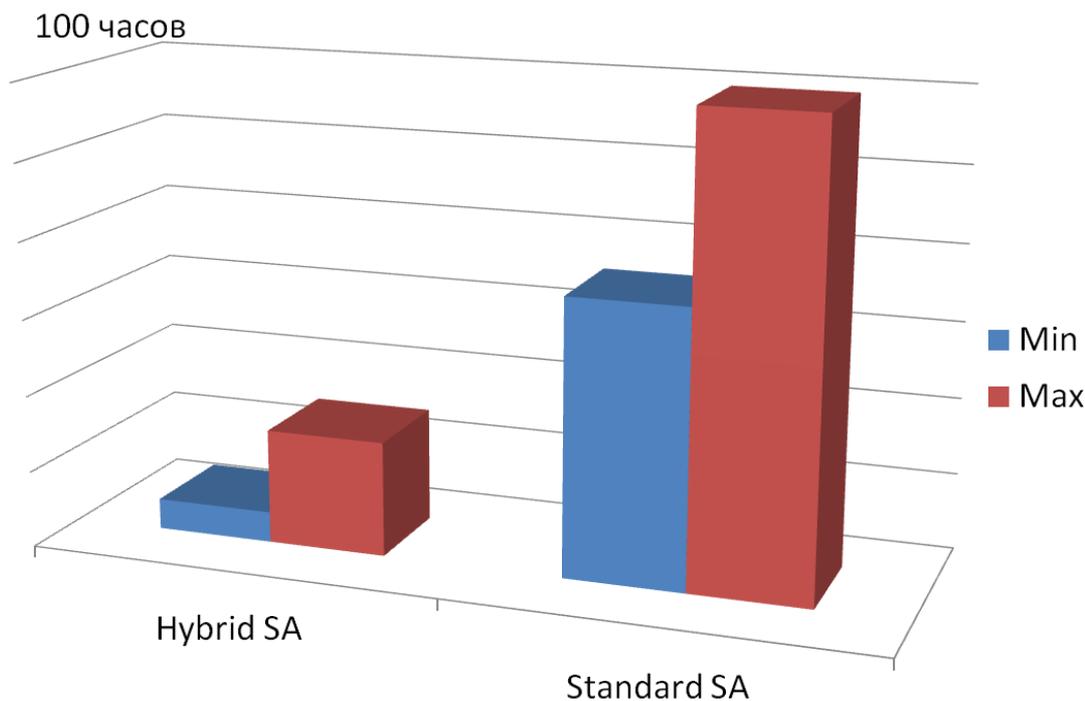


Рис. 5 Время, требуемое на проведение стандартной стохастической реконструкции и гибридной.

Образец	1		2		3	
Пористость	14.33%		19.22%		23.55%	
Проницаемость, мД	105		260		824	
Проницаемость (стохастич. Реконструкция)	1.3		31		225	
Данные для метода частиц	GSD*	IS*	GSD	IS	GSD	IS
Проницаемость (метод частиц)	116.46	175.21	379.22	354.99	641.15	887.75
Проницаемость (гибрид)	74.34	105.89	281.17	228.91	768.34	750.84

*GSD = гранулометрия, IS = по 2Д изображениям

Рис. 6 Проницаемости, полученные для различных методов реконструкций

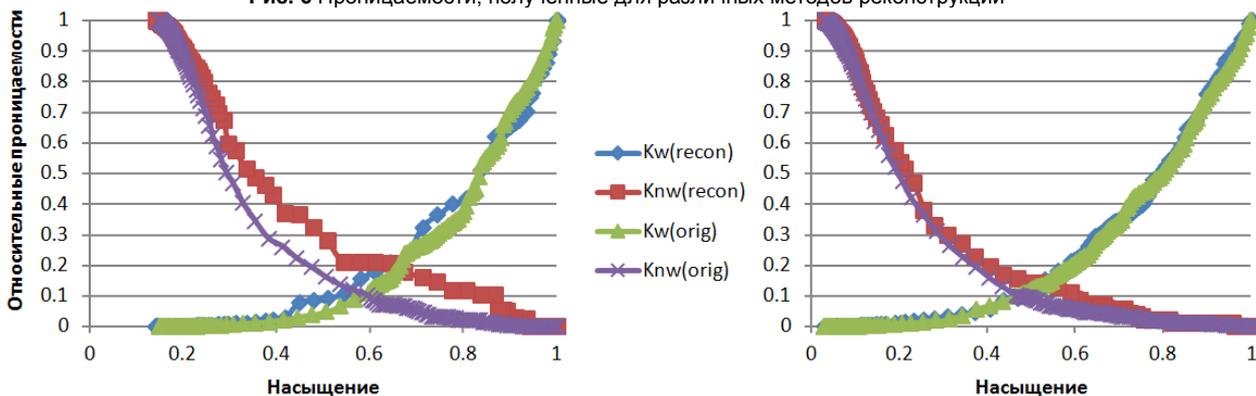


Рис. 7 Относительные проницаемости для гибридных реконструкций двух образцов – худший и лучший варианты.

Был разработан гибридный метод реконструкции пород-коллекторов, который совмещает как последовательный метод частиц (Рис.1-3), так и стохастическую реконструкцию на основе «отжига» (simulated annealing, SA). Данный метод оказался намного точнее негибридизированных методов, в частности:

- 1) Гибридный метод позволяет значительно сократить время, требуемое для процедуры реконструкции, в сравнении со стандартной стохастической реконструкцией (Рис.5) .
- 2) Точность реконструкции (т.е., получаемые в результате моделирования петрофизические свойства) при использовании гибридного метода значительно возрастают и отлично совпадают со значениями для оригинала, как для абсолютной проницаемости (Рис.6), так и для относительных проницаемостей (Рис.7).
- 3) Модельные результаты для проницаемости лучше для образцов с более высокой пористостью, что скорее всего, объясняется закупоркой пор при «отжиге». Общая ошибка по проницаемости во всех случаях не превышала 13%.
- 4) Гибридный метод можно значительно улучшить за счет использования более сложных корреляционных функций при стохастической реконструкции.

Благодарности

Авторы сердечно благодарят проф. Воеводина В.В. и к.ф.-м.н. Брызгалова П.А. за помощь в организации высокопроизводительных вычислений на суперкомпьютере Чебышев (НИВЦ МГУ). Отдельная благодарность Брендану Спиту (CSIRO Land and Water) за доступ к вычислительным ресурсам. Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: 12-05-33089, 12-04-32264, 13-04-00409, 13-05-01176 и 12-05-01130.

Список литературы

1. Герке К.М., Корост Д.В. Применение высокопроизводительных вычислительных методов для определения свойств пород-коллекторов. // Сборник материалов 2-й научно-практической конференции «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли», 2011 (http://www.hpc-oilgas.ru/hpc-oilgas/files/019_Gerke.pdf).
2. Герке К.М., Корост Д.В., Васильев Р.В., Карсанина М.В. Интеграция микропористости в петрофизические модели. // Сборник материалов 3-й научно-практической конференции «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли», 2012.
3. Torquato S., Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties (Springer-Verlag, New York, 2002).
4. Корост Д.В., Калмыков Г.А., Япаскурт В.О., Иванов М.К. Применение компьютерной микротомографии для изучения строения терригенных коллекторов. // Геология нефти и газа. 2010. №2, с. 36-42.
5. Gerke K.M., Skvortsova E.B., Korost D.V. MicroCT study of soil structure: current perspectives and some results for Russian soils. // Eurasian Soil Science, 2012, 45(7): 700-709.
6. Joos J., Carraro Th., Weber A., Ivers-Tiffée E. Reconstruction of porous electrodes by FIB/SEM for detailed microstructure modeling. // Journal of Power Sources, 2011, 196: 7302-7307.
7. Карсанина М.В., Васильев Р.В., Герке К.М., Корост Д.В. Статистически-морфологическое описание, моделирование и реконструкция структуры пород-коллекторов. // Сборник материалов 2-й научно-практической конференции «Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли», 2011 (http://www.hpc-oilgas.ru/hpc-oilgas/files/020_Karsanina.pdf).
8. Yeong C.L.Y., Torquato S., 1998b. Reconstructing random media. II. Three-dimensional media from two-dimensional cuts. // Phys. Rev. E, 58: 224-233.
9. Yeong C.L.Y., Torquato S. Reconstructing random media. // Phys. Rev. E. 1998a. 57: 495-506.
10. Øren, P.E., and Bakke, S. Process based reconstruction of sandstones and prediction of transport properties. // Transport in Porous Media. 2002. 46: 311-314.