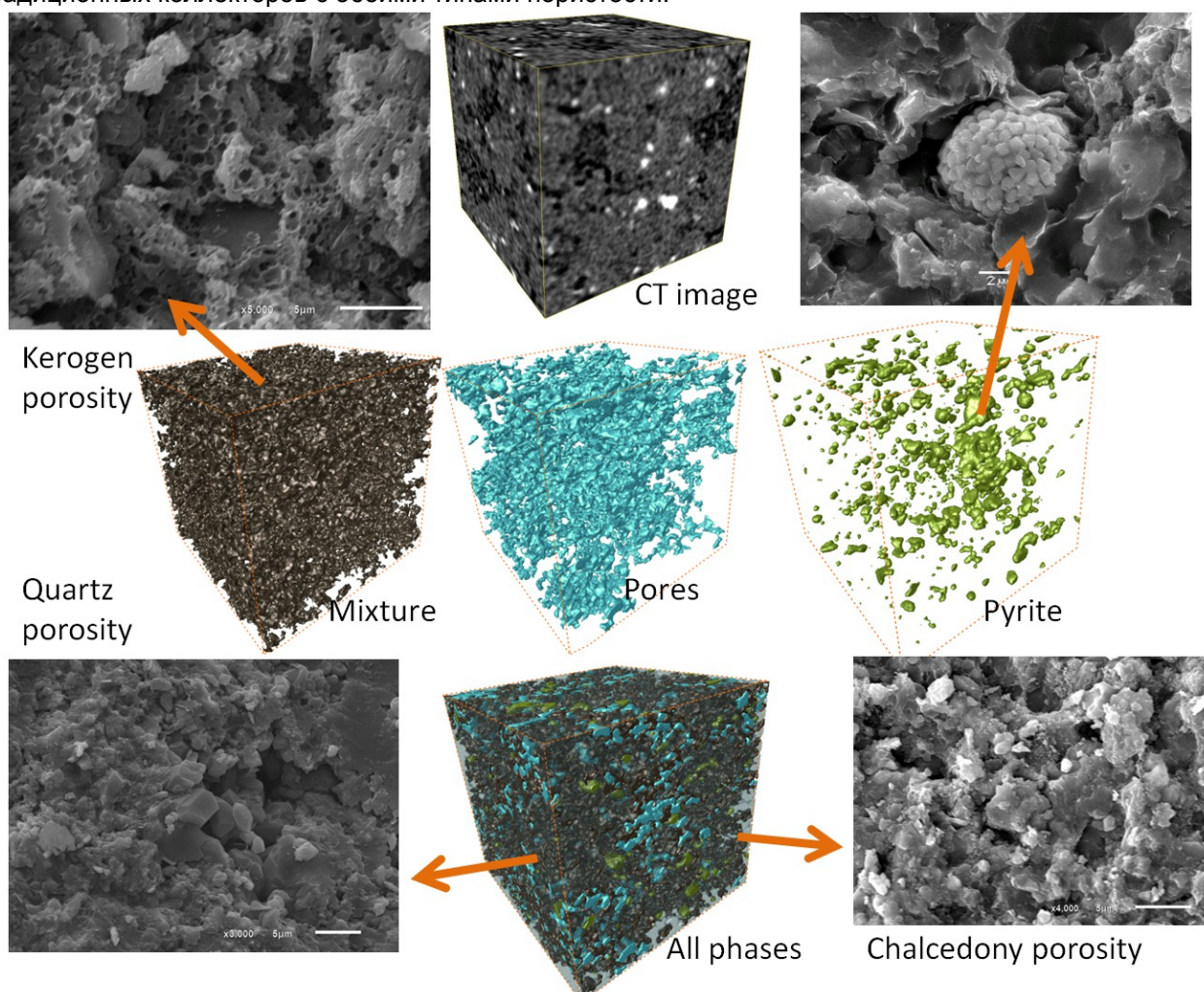


## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ СЛАНЦЕВ И ОТЛОЖЕНИЙ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ В МАСШТАБЕ ПОР

Васильев Роман Викторович<sup>\*,\*\*</sup>, Герке Кирилл Миронович<sup>\*\*\*,\*\*\*\*</sup>, Карсанина Марина Владимировна<sup>\*\*\*\*</sup>, Корост Дмитрий Вячеславович<sup>\*</sup>, Балущкина Наталья Сергеевна<sup>\*</sup>, Калмыков Георгий Александрович<sup>\*</sup>  
<sup>\*</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, <sup>\*\*</sup>AIR Technology, <sup>\*\*\*</sup>CSIRO Land and Water, <sup>\*\*\*\*</sup>Институт динамики геосфер РАН

Для проведения геофизических исследований и создания моделей месторождений необходимы детальные данные о локальных физических свойствах пород-коллекторов. Подобная информация обычно включает в себя гранулометрический состав, абсолютные и относительные проницаемости, фактор пористости и прочие. Единственным прямым способом определения этих характеристик являются лабораторные измерения. Однако для нетрадиционных коллекторов (в том числе баженовской свиты), где пустотное пространство заполнено керогеном и битумами, такие прямые измерения часто невозможны без экстракции, которая может нарушить целостность образца или же приводит к завышенным значениям эффективных свойств. Альтернативой лабораторным методам является моделирование в масштабе пор [1,2,3]. Однако, в отличие от традиционных коллекторов, в сланцах присутствуют поры различного масштаба – микропористость (до 1 мкм), видимая с помощью рентгеновской микротомографии [4,5], и нанопористость (до 10 нм), которая не видна на томографических снимках и может быть получена лишь с помощью РЭМ или FIB-SEM методов [6]. Даже если структура пустотного пространства на разных масштабах известна, моделирование течения в микро и нанопористости необходимо проводить с использованием различной физики течения, т.к. с уменьшением размера поры, начинают играть роль различные нелинейные эффекты, которые делают проницаемость такого канала зависимым от давления. Целью настоящей работы является разработка методов моделирования эффективных свойств (газопроницаемости) нетрадиционных коллекторов с обоими типами пористости.



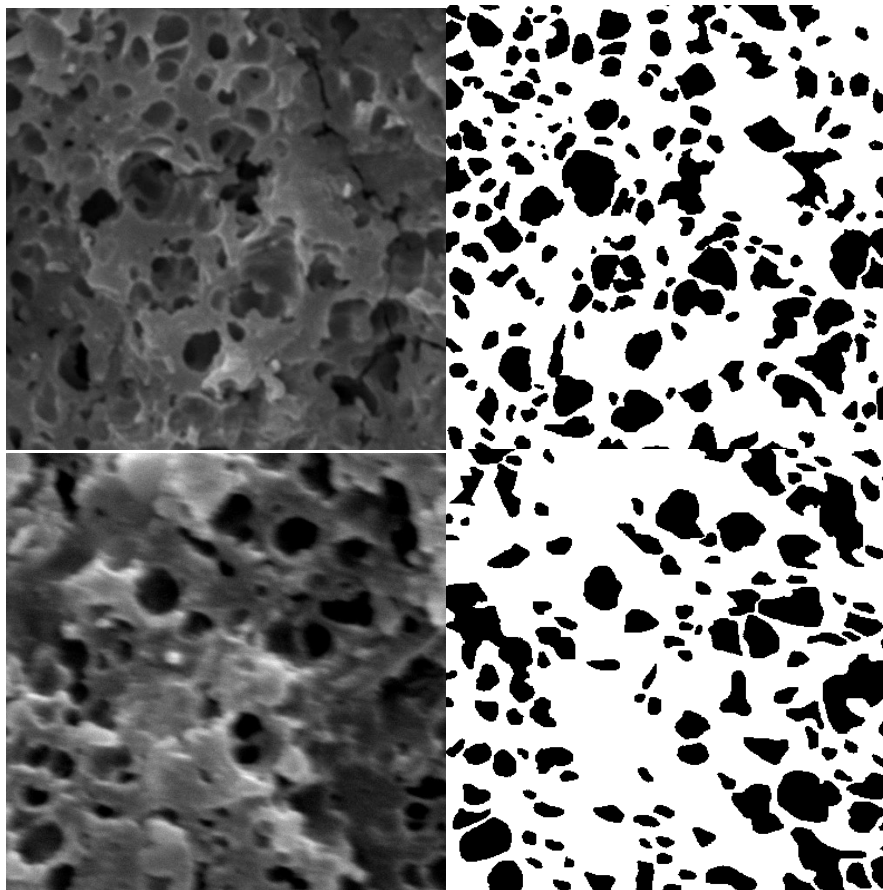
**Рис. 1** Схематичное изображение различных типов пористости и выделение доменов этих типов пористости в масштабе съемки с помощью рентгеновского микротомографа.

Нами была отобрана коллекция образцов баженовской свиты, для которых был проведен стандартный набор лабораторных измерений (включая измерения проницаемости по газу), сканирование в рентгеновском микротомографе с разрешением 1 мкм, сканирование нанопористости с помощью РЭМ (разрешения до 10 нм). Полученные изображения пористости в керогене

использовались для проведения стохастических реконструкций [6] и выделения сеточных моделей нанопористости. По сеточным моделям рассчитывались газопроницаемости с использованием обычной физики для микропор (закон Хагена-Пуазейля):

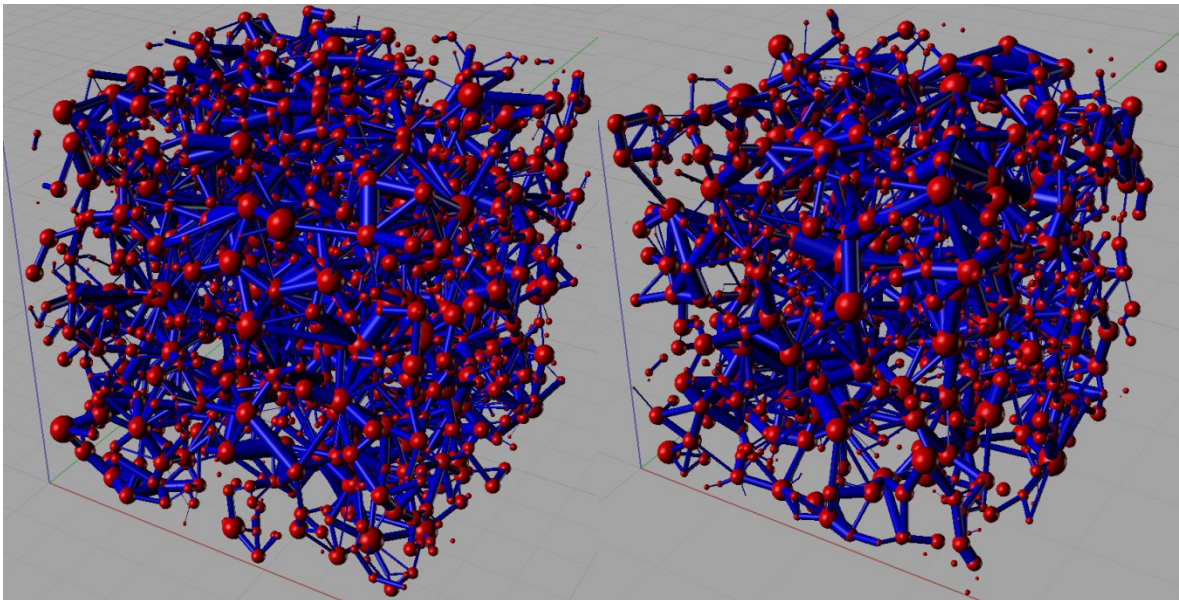
Для нанопористости учитываются нелинейные процессы (в том числе кнудсеновская диффузия) [7]:

Ввиду нелинейности предыдущего уравнения, проницаемость сеточной модели с нанопорами не может быть рассчитана решением СЛАУ. Для решения полученной системы нелинейных уравнений мы используем метод Ньютона и следующую рекуррентную формулу:



**Рис. 2** РЭМ изображения пористости в керогене (слева) и бинаризованные изображения, используемые для стохастических реконструкций (справа).

С помощью томографии были выделены различные домены (поры, смесь органики, пирит), каждому из которых соответствует свой тип пористости, в том числе наноразмеров. Очевидно (Рис.1), что большие поры в образцах баженовской свиты не связаны и общая связь в образце происходит в большинстве случаев через пористость в керогене. Используя изображения пористости в керогене и выделенные из реконструированных 3Д изображений сеточные модели, для трех различных изображений были получены следующие значения проницаемости по газу (при давлении 1.38 МПа, что соответствует поровому давлению во время лабораторных измерений): 0.533, 0.43, и 0.3133 мД (Рис.4). Полученные значения в среднем на порядок больше лабораторно полученных значений. Это неудивительно, ввиду того, что 1) для реконструкций были выбраны характерные изображения с высокой пористостью, 2) керогеновая пористость не распределена равномерно, а лишь образует связную в 3Д топологию (Рис.1), проницаемость которой ожидаемо ниже полученных значений. Для моделирования эффективных свойств всего образца, необходимо проводить апскейлинг свойств, например, в простейшем случае, используя некоторое среднее значение газопроницаемости керогена, решать макроскопическое уравнение Дарси в геометрии домена керогеновой пористости. В будущем мы планируем проводить и такие вычисления. Чтобы исследовать влияние давления на проницаемость нанопористости, мы провели моделирование для различных давлений (Рис.4б). Чем меньше давление/больше количество нанопор, тем сильнее влияние нелинейных эффектов на проницаемость. Для больших давлений (13.8 МПа) для двух изображений нанопористости разница между расчетами для микро и нанопор практически пропадает.



**Рис. 3** Сеточные модели, выделенные из реконструкций, полученным по изображениям на Рис. 2.

**Рис. 4** Проницаемости реконструкций и отношение проницаемостей, рассчитанных с и без учета физики течения газа в нанопорах.

На основе лабораторных измерений свойств, рентгеновской микротомографии и РЭМ исследований нанопористости в более чем 20 образцах баженовской свиты, на основе стохастического реконструирования и моделирования в масштабе пор с использованием различной физики описания течения в микро и нанопористости мы разработали методы получения проницаемости нетрадиционных коллекторов на различных масштабах на основе цифровых расчетов. Также к основным результатам следует добавить следующие:

1) С помощью РЭМ микроскопии были выделены различные типы нанопористости, включая пористость в керогене, на основе 2Д изображений были получены 3Д реконструированные изображения.

2) Все выявленные методом РЭМ разные типы нанопористости были отнесены к различным доменам на микроизображениях большого масштаба (микротомография).

3) Проницаемость керогена была смоделирована на основе сеточных моделей с различной физикой течения газа в микро и нанопористости.

4) Было показано, что нанопористость в различных частях образца различна, т.е., обладает своими эффективными свойствами, а потому, например, единичное исследование с помощью FIB-SEM не позволяет правильно рассчитать свойства всего образца.

5) Полученные в моделях значения проницаемости керогена хорошо соотносятся с лабораторными замерами на керновом материале.

### **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](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. 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](http://www.hpc-oilgas.ru/hpc-oilgas/files/020_Karsanina.pdf)).
7. Mehmani A., Prodanović M., Javadpour F.. Multiscale, Multiphysics Network Modeling of Shale Matrix Gas Flows // Transp Porous Med, DOI 10.1007/s11242-013-0191-5 (2013).