



Digital rock modeling of a terrigenous oil and gas reservoirs for predicting rock permeability with its fitting using machine learning

**Vladimir Berezovsky, Ivan Belozarov,
Yungfeng Bai and Marsel Gubaidullin**

**Северный (Арктический)
федеральный университет имени
М.В. Ломоносова.
г. Архангельск**

**Докладчик: Березовский
Владимир Валерьевич**





Актуальность

На сегодняшний день технология цифрового моделирования керна является востребованным и развивающимся направлением в оценке геологических запасов нефти в мире. В России данная технология только начинает развиваться.

Вопрос о цифровом моделировании керна представляется весьма актуальным в силу того, что не всегда имеется достаточное количество керна материала с исследуемых скважин, а иногда таковой и вовсе отсутствует. Создание цифровой модели керна позволит в той или иной степени решить данные проблемы, а также снизить затраты нефтегазовых компаний на проведение керна исследований.

В процессе математического моделирования макроскопических свойств пористых сред возникает задача 3D-реконструкции микроструктуры керна и оценки связи между геометрией микроструктуры и макроскопическими физическими свойствами. Для пористых материалов, проницаемость является макроскопическим параметром, представляющим практический интерес, и его измерение имеет важное значение для прогнозирования потоков на макроуровне. В последнее время появились значительные подвижки в получении отображений внутриворонного пространства, и применение технологий высокопроизводительных вычислений ускорило разработку и использование инструментов “цифровой керна”, позволяя, в дополнение к физическим лабораторным измерениям, обеспечить быстрый и эффективный доступ к свойствам породы, извлекая их из трехмерных моделей.

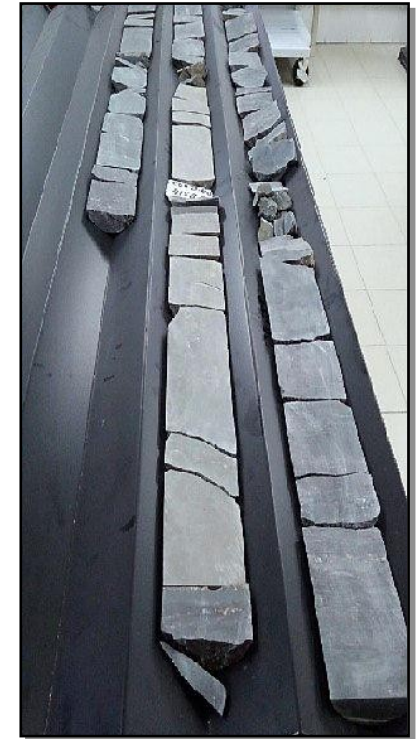


Экспериментальные исследования на керновом материале

Исследования кернового материала проводились в лаборатории комплексного изучения керна Инновационно-технологического центра арктических нефтегазовых лабораторных исследований САФУ имени М.В. Ломоносова.

Цель исследований на керновом материале - получение экспериментальных данных, которые необходимы для проведения вычислительных экспериментов на суперкомпьютере.

Для проведения первоначальных исследований была отобрана коллекция образцов керна стандартного размера диаметром 30 мм и длиной 30 мм (месторождение терригенного песчаника Berea Sandstone (USA)), обладающих минимальной анизотропией фильтрационно-емкостных свойств. При проведении фильтрационных исследований в качестве флюида использовался – керосин.





Лабораторные исследования керн

Основные исследования керн

- ✓ Определение коэффициента открытой пористости методом жидкостенасыщения в соответствии с ГОСТ 26450.1-85;
- ✓ Определение коэффициента абсолютной проницаемости в соответствии с ГОСТ 26450.2-85;
- ✓ Создание остаточной водонасыщенности методом капилляриметрии в соответствии с ГОСТ 39-204-86;
- ✓ Определение проницаемости керн по флюиду в пластовых условиях в соответствии с ГОСТ 39-235-89.

Дополнительные исследования керн

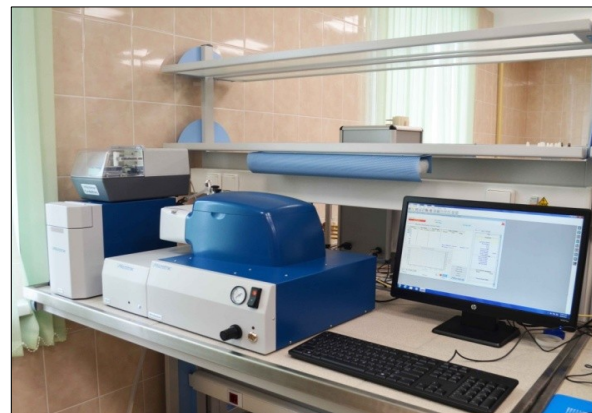
- ✓ Истирание образцов;
- ✓ Фотографирование срезов торцов керн;
- ✓ Определение гранулометрического состава образцов.



Оборудование для исследований керна



Установка для определения открытой пористости образцов керна методом жидкостенасыщения УОП-АТМ.200 (ЗАО «Аргоси»)



Лазерный анализатор размера частиц Bluewave M3500 (Microtrac)



Газовый пермеаметр УИП-АТМ.002 (ЗАО «Аргоси»)

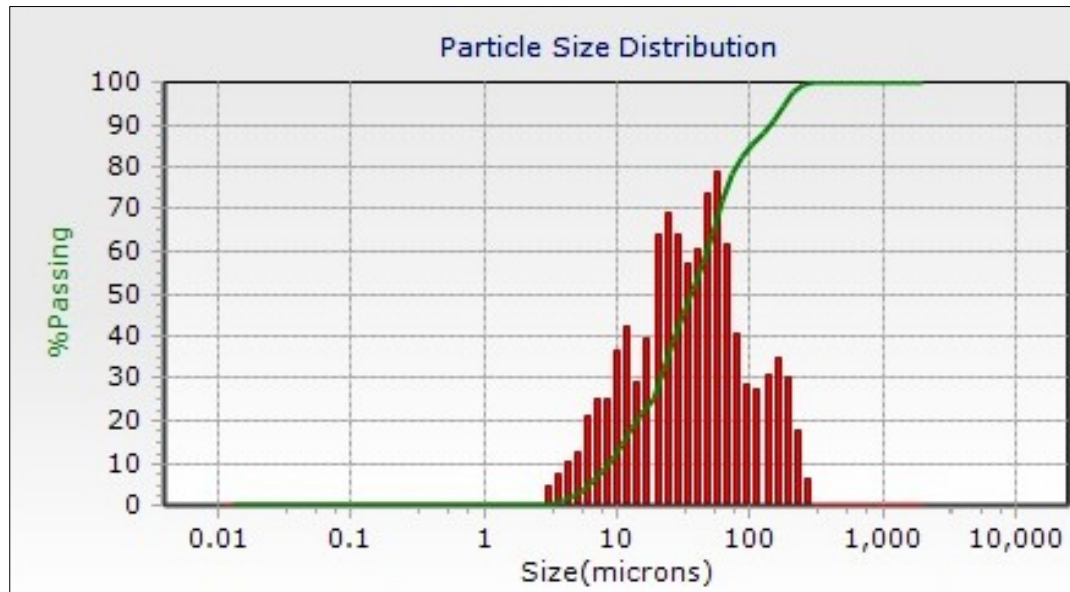


Фильтрационная установка УИК – 5(7) (ООО «Гло-Бел лаборатория»)



Гранулометрический состав

В ходе исследований также были проведены эксперименты по определению гранулометрический состава образца.



Пример относительного графика распределения частиц по размерам и график кумулятивного объема



Фотографии шлифов



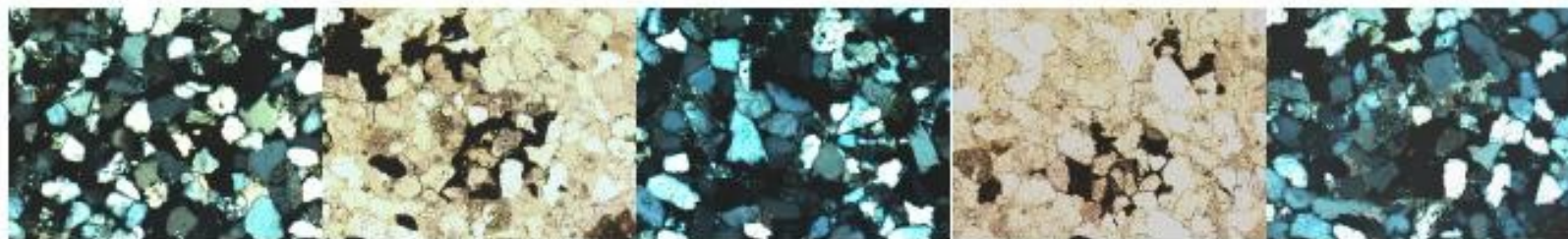
229

i-6

г-1

i-1

i-4



1

2

i-2

i-7

i-8

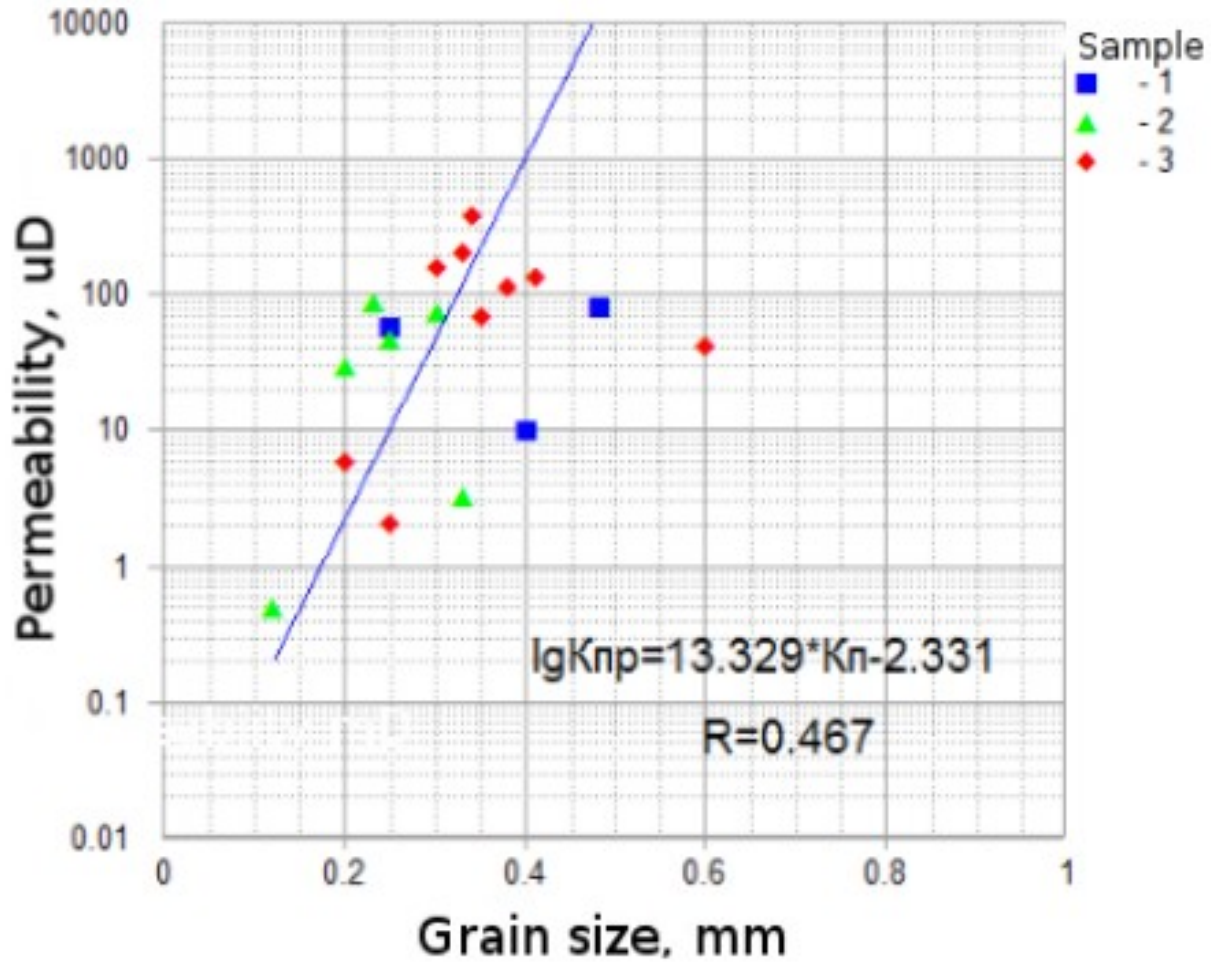


Результаты лабораторных измерений

Sample	Length, cm	Diameter, cm	Absolute permeability, 10^{-3}um^2	Open porosity, %
r-1	3,068	3,003	101,01	20,11
i6	2,682	2,997	125,64	20,42
i1	3,110	2,999	130,25	17,99
i2	2,722	2,996	96,43	18,89
i4	2,743	3,002	85,82	17,48
i7	2,854	3,003	91,64	18,55
229	2,974	2,995	121,13	19,63
1	3,580	2,995	101,032	18,07
i8	2,967	2,997	97,22	18,52
2	3,630	3,003	83,64	18,79

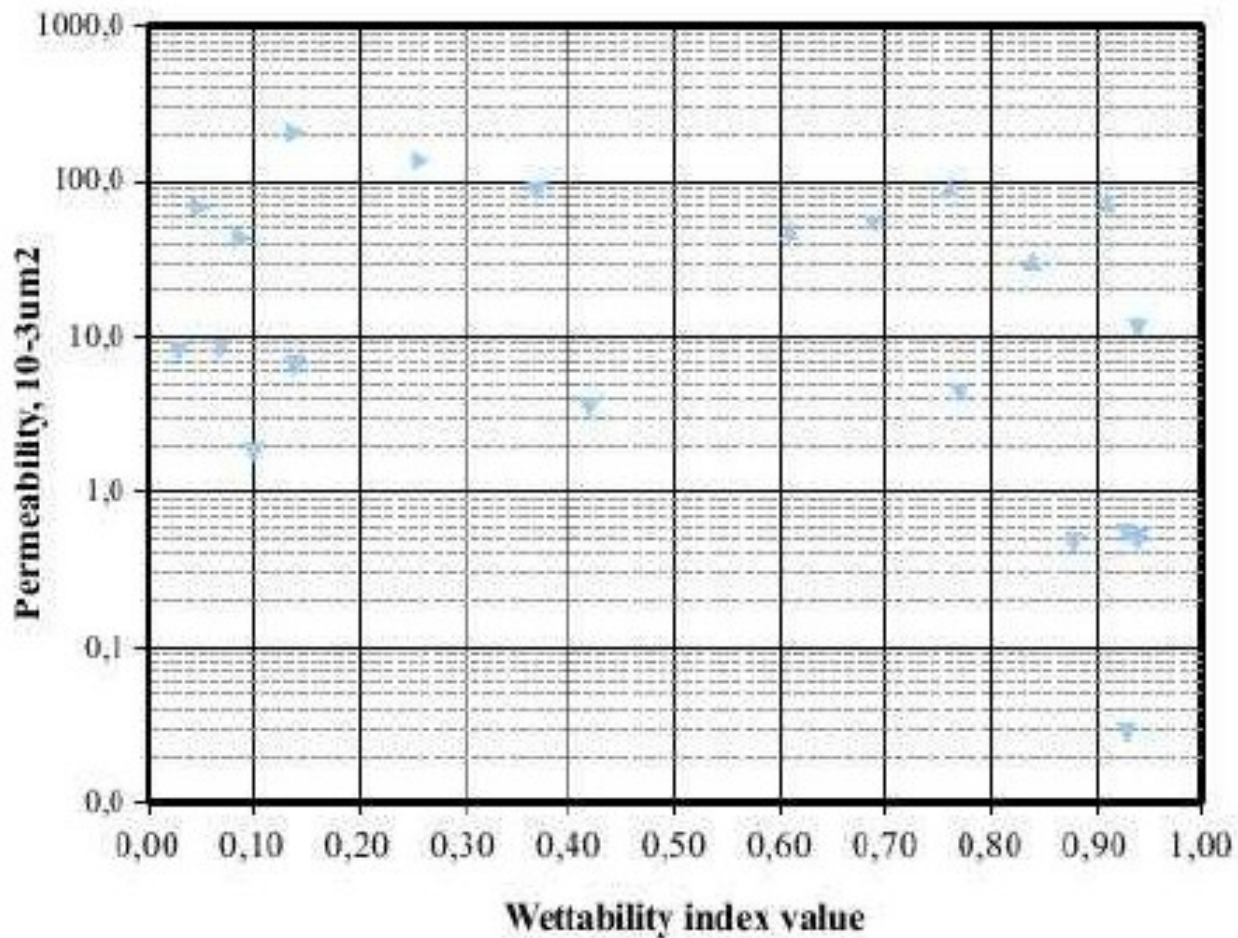


Зависимость проницаемости от пористости



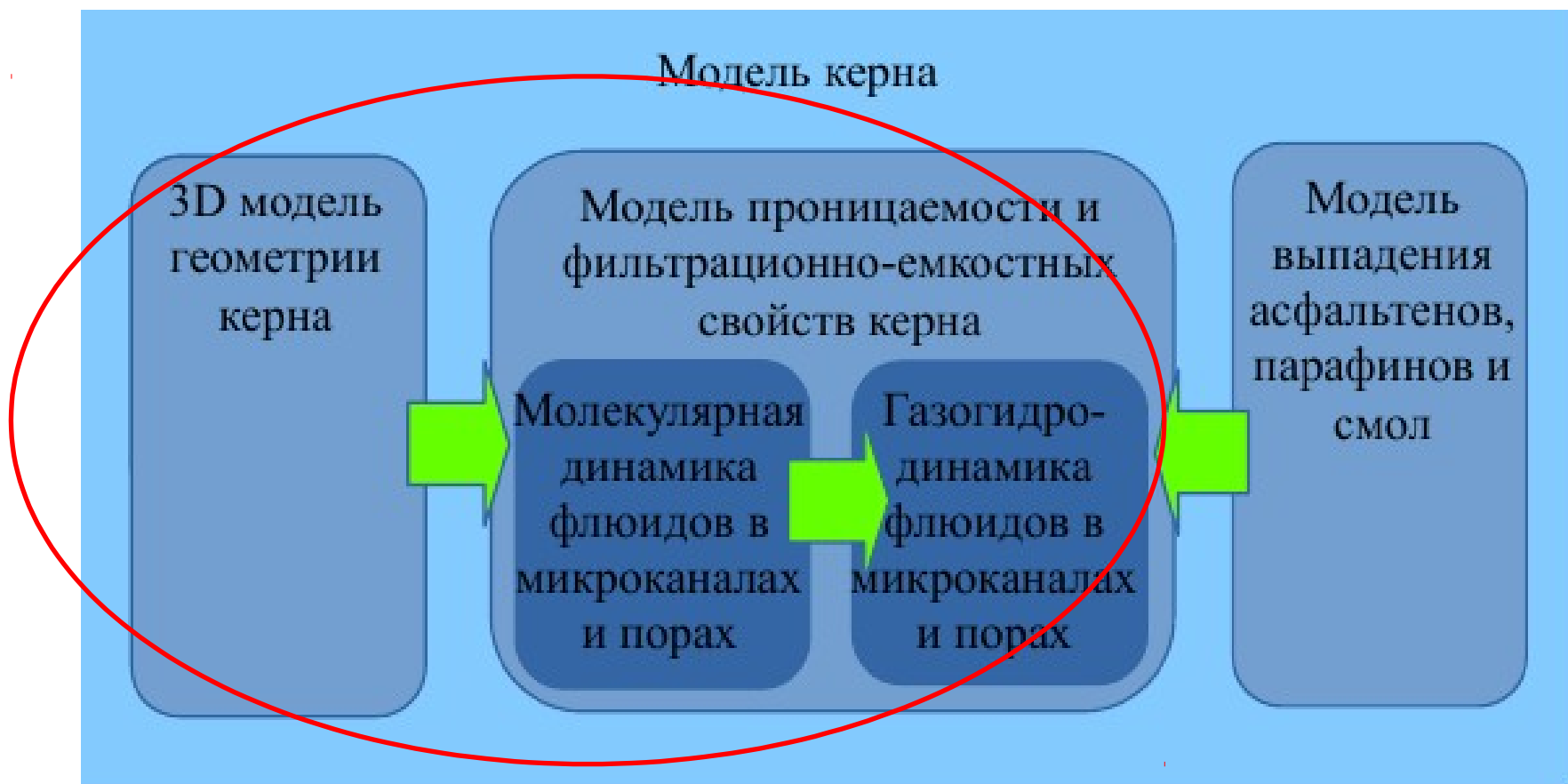


Смачиваемость





Цифровая модель керна

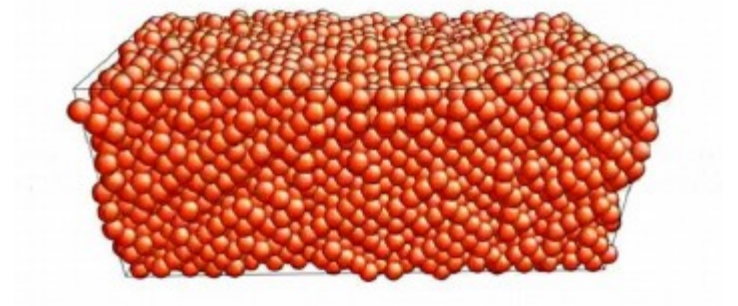




3D модель микроструктуры керна

Возможные подходы:

- плотной упаковкой шаров
- плотной упаковкой сферополиэдров
- плотной упаковкой выращенных кристаллов





3D модель микроструктуры керна

- Стохастическая упаковка
 - случайным образом раскидаем в объеме центры роста сфер,
 - сферы растут до тех пор, пока не достигнут своих заданных размеров, сдвигая касающихся их соседей
 - распределение радиусов сфер соответствует заданному
- Симуляция молекулярной динамики
 - Атомы, с соответствующим заданному распределению радиусом Ван-дер-Ваальса, двигаются под действием сил гравитации и сил Ван-дер-Ваальса в ограниченном объеме, до тех пор, пока, не потеряют кинетическую энергию
 - Аналог осадка



Молекулярная динамика

Потенциал Леннарда-Джонса $U(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$

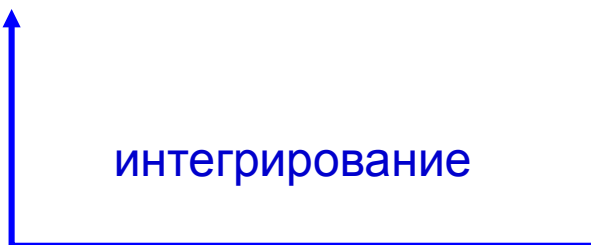
Сумма сил действующих
на атом

$$F_i = \sum_j F_{ij}$$

Δt



интегрирование



Расчет новых координат

$$\frac{d^2 r_i}{dt^2} = \frac{F_i}{m_i}$$

or

$$\frac{dr_i}{dt} = v_i; \quad \frac{dv_i}{dt} = \frac{F_i}{m_i}$$



Моделирование проницаемости

- Электродинамическая аналогия
- Гидрогазодинамика
 - Аналитическая
 - Численная, с использованием сеточных методов вычислительной гидрогазодинамики
- Молекулярная динамика
- Гидродинамика сглаженных частиц (SPH)



Ресурсоемкость расчетов

- Построение геометрии требует ~100 процессорных часов
- Расчет проницаемости ~1000



Вычислительный кластер САФУ

- Серверные узлы:
 - 12 x PRIMERGY CX400 S2 (2 x Intel Xeon (10 Core), 64 GB)
 - 8 x PRIMERGY CX270 S2 (2 x Intel Xeon (10 Core), 64 GB, Intel Xeon Phi 5110P)
- Интерконнект: Infiniband
- 20xCN: $R_{\text{peak}} = 8960$ GFlops; LINPACK: $R_{\text{max}} = 8020.92$ GFlops
- 8xCN+GPU: $R_{\text{peak}} = 11680$ GFlops; LINPACK $R_{\text{max}} = 7683.13$ GFlops
- Файловое хранилище: FEFS (Lustre); 53.6 TB; скорость: 1.67 GB/s



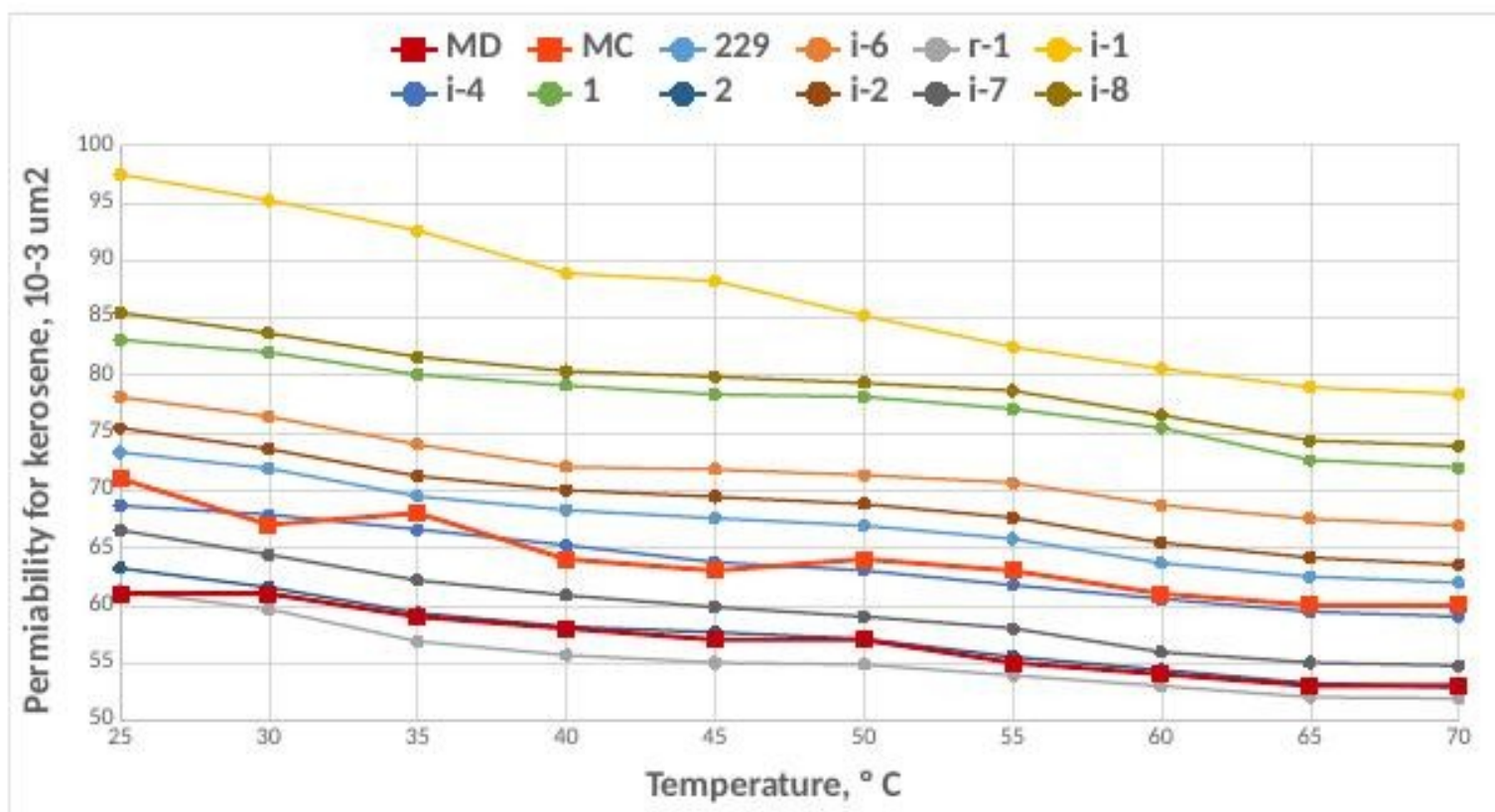


Сравнение результатов

	Открытая пористость, %	Проницаемость по керосину, 10^{-3} мкм ²
Экспериментальное исследование	20.11	55.66
Стохастическая упаковка	25.82	68.45
Упаковка в результате симуляции молекулярной динамики	22.27	60.92

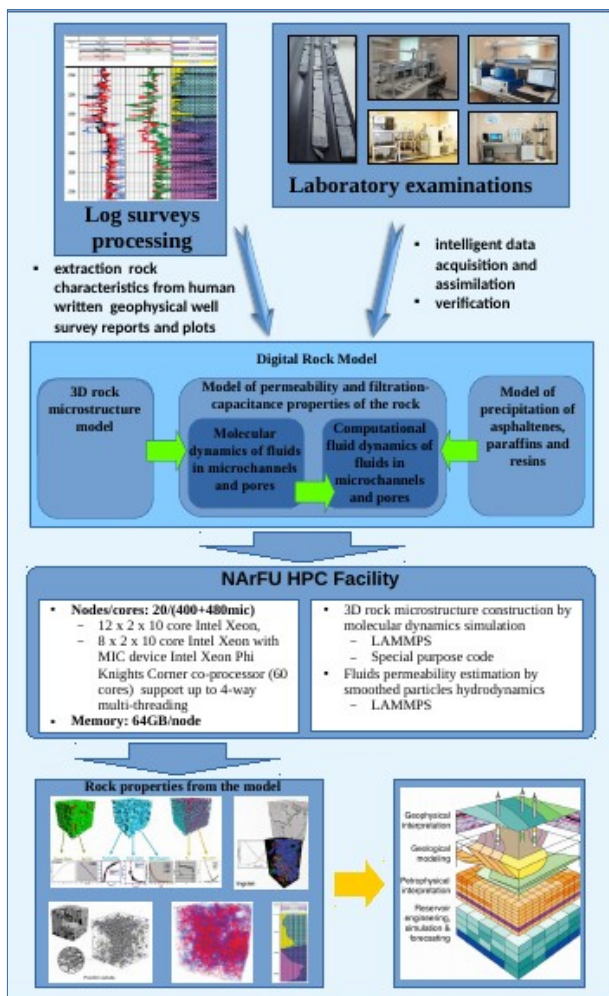


Сравнение результатов





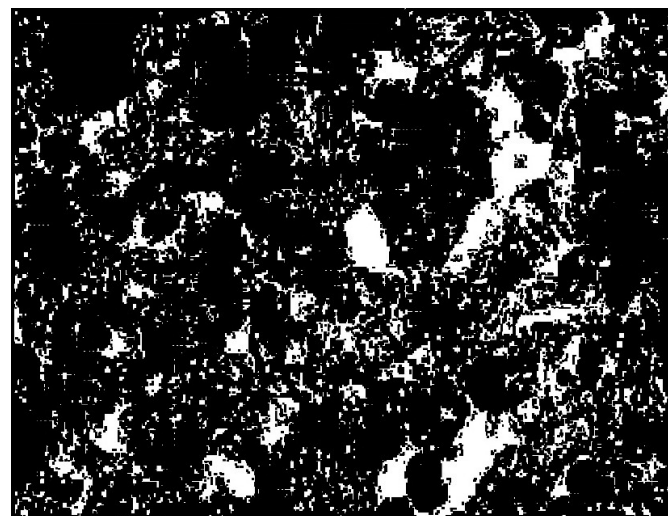
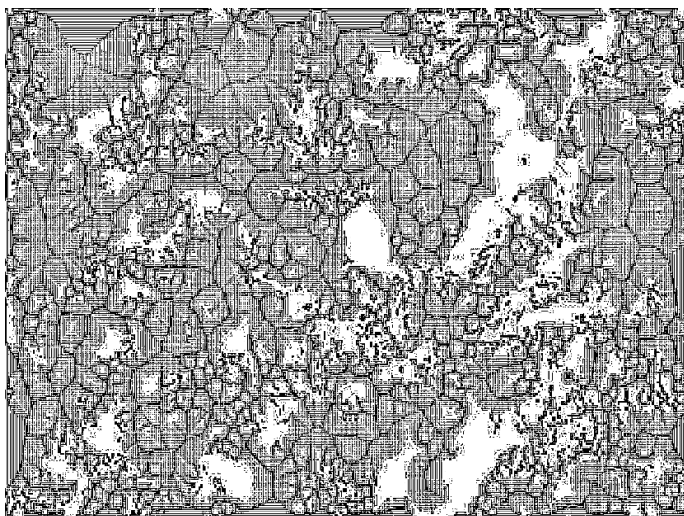
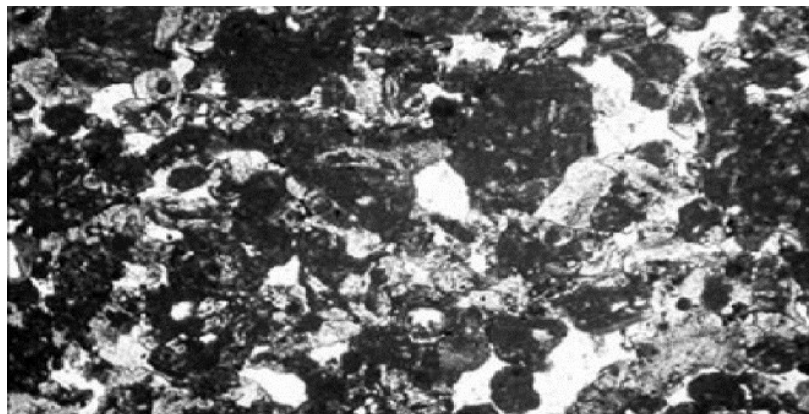
Среда для построения прогнозов проницаемости породы участков где керна не отбирался



- Singularity
- SageMath
- Eclipse
- Python
- OpenStack

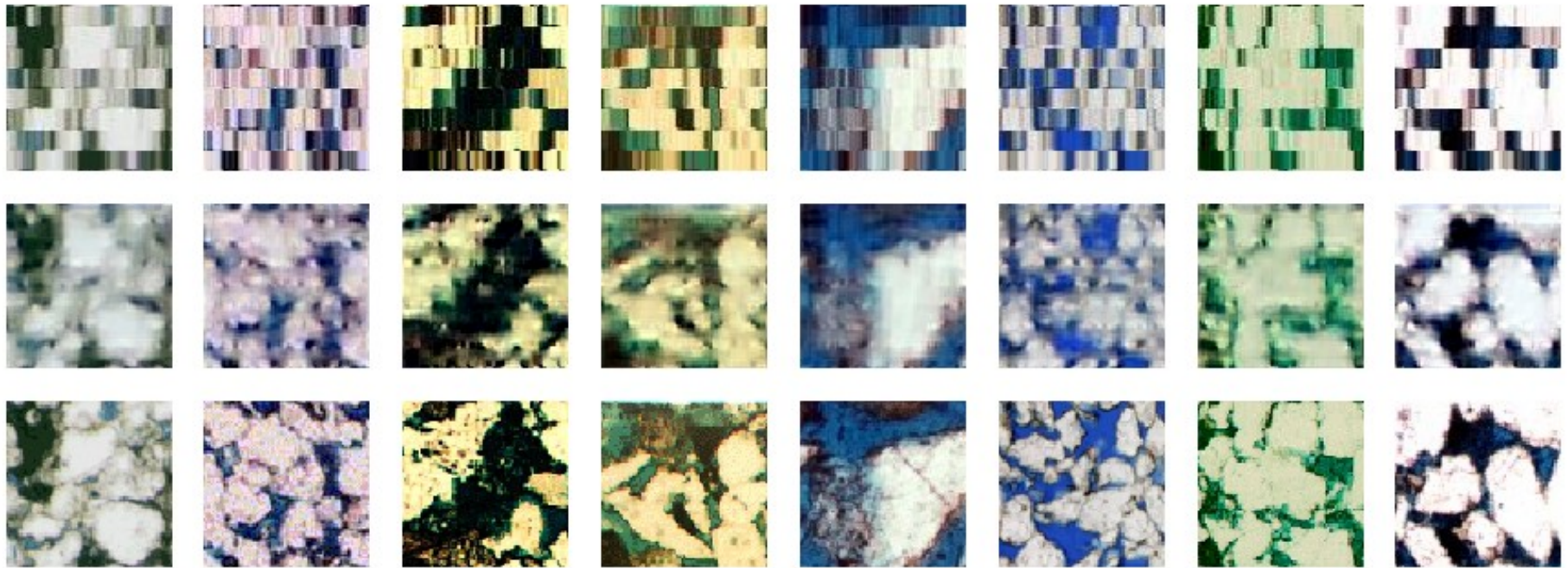


Обработка изображения шлифа





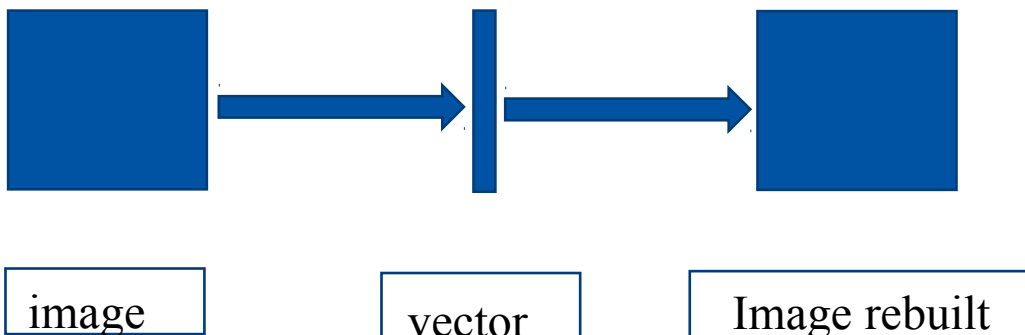
Кластеризация изображений шлифов на основе их особенностей, извлеченных с помощью сверточных автоэнкодеров





Автоэнкодер

Convolutional Autoencoder



K-Means method

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|_2^2$$

Support Vector Machines

$$D = \left\{ (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m) \right\}$$



Сравнение результатов



Заключение

- Рассмотрен подход к решению задачи математического моделирования макроскопических свойств терригенной породы
- Для 3D-реконструкции микроструктуры пористой среды применяются методы стохастической упаковки и молекулярной динамики .
- Приведены результаты численных расчетов и их сравнение с лабораторными исследованиями.
- Использован сверточный автоэнкодер для извлечения особенностей изображений шлифов для их класификации



Спасибо

Intelligent Digital Rock Modeling

Vladimir Berezovsky¹, Evgeny Osipov², Olga Yufryakova¹, Yunfeng Bai¹

¹Applied Mathematics and High Performance Computing, Northern (Arctic) Federal University, Russia

²Dependable Computation and Communication group, Luleå University of Technology, Sweden

v.berezovsky@narfu.ru

Background

The context of the project is mathematical, computational and cognitive challenges in the Digital Rock Modeling (DRM). DRM implies using virtual or reconstructed digitized pore space and mineral matrix of natural rock to numerical simulating various physical processes in this digital object to obtain such macroscopic rock properties as permeability and porosity, to analyze reservoir characterization. The project is focused on following key issues:

- Efficient digital rock models and methods for extraction of rocks macroscopic properties from it;
- Natural language proceedings to extract data from geophysical survey reports;
- Image processing and associative reconstruction;
- Machine learning for model tuning;
- Open rock modeling infrastructure;
- High-Performance computing in modeling, simulation, visualization and data analysis.

The focus of the project is well-aligned with trends in Digital Rock Analysis and e-Core technology, that promise to address challenges of integration of intelligent data analysis into digital rock modeling to accurately and efficiently predict oil and gas reservoir characteristics using high-performance computing technology.

Methods

Molecular dynamics simulations using HPC for 3D rock microstructure construction and fluids permeability estimation. Brute-force search accompanied by HPC for model simulations is used to train multilayer neural network to identify the correspondence between model parameters and geophysical survey and well logs data.

Assumptions

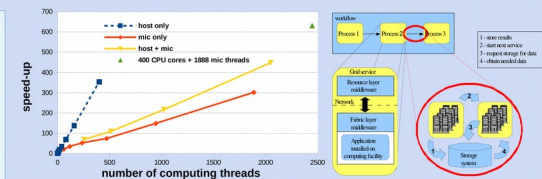
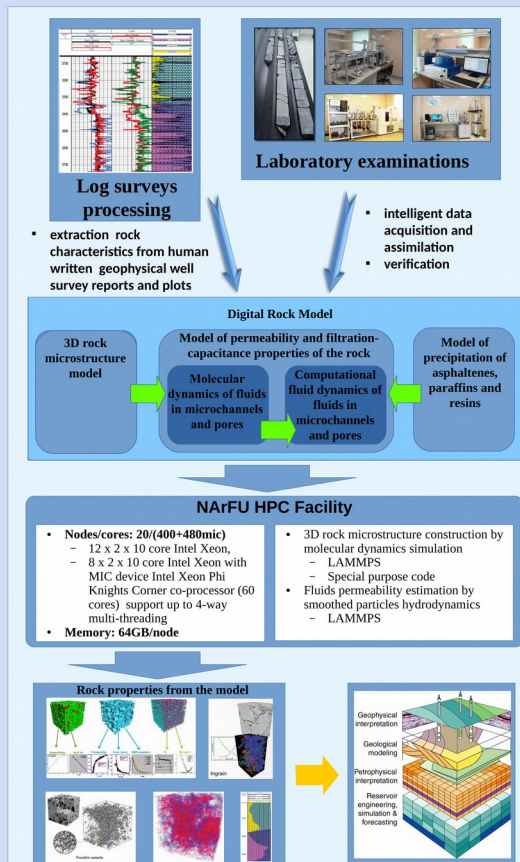
Having enough data from geophysical survey reports, adequate rock model and using artificial intelligence methods it can be possible to predict oil and gas reservoirs behaviors.

Assets

NARFU have a strong research record in computational methods for the digital rock simulation to predict the main permeability and porosity parameters of the oil and gas reservoirs.

LTU have a strong research record in machine learning and artificial intelligence.

NARFU have a considerable high-performance facility.



Performance of special purpose code for molecular dynamics building of rock microstructure on hybrid HPC with many-integrated core (mic) co-processors.

Diagram of modeling workflows implementation.

Results & Output

- prototype of the intelligent infrastructure for digital rock modeling with several capabilities,
- extraction foremost rock characteristics from human written geophysical well survey reports,
- intelligent data acquisition and assimilation for the model,
- verification of obtained from the model macroscopic properties.

Outlook

- Open source infrastructure
- Added chemistry
- Verification of prognostic capabilities
- Producing human-written like reports
- Visualization
- Reconstruction of rock based on geological data
- Grid services

References

1. Belozerov, V. Berezovsky, M. Gubaidullin, A.Yuriev. Model of core microstructure terrigenous oil and gas reservoirs. Proceeding of V Scientific-Practical conference "Tyumen 2017: Geoscience is the key to rational development of mineral resources", URL:<http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=87662>, DOI:10.3997/2214-4609.201700081
2. V. Berezovsky, M. Gubaydullin. Modeling of the microstructure of a clastic oil and gas reservoir rock using molecular dynamics simulation. 16th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects, 2017. URL:<http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=89508>, DOI:10.3997/2214-4609.201701837
3. D. Kleyko, E. Osipov, R. W. Gayler. Recognizing permuted words with Vector Symbolic Architectures: A Cambridge test for machines. 2016 In: "Procedia Computer Science."