

Международная лаборатория Многомасштабное математическое моделирование и компьютерные вычислений.

Многомасштабные методы в индустрии



***Подходы компьютерного моделирования и искусственного
интеллекта для решения прикладных задач***

Руководители лаборатории



Васильев Василий Иванович
д.ф.-м.н., профессор
СВФУ



Эфендиев Ялчин, Ph.D.
Руководит Мегагрантом



Вабищевич Петр Николаевич
д.ф.-м.н., профессор

Профессор Васильев собрал коллектив из числа перспективных молодых людей с целью создать якутскую школу по математическому моделированию. Профессора Эфендиев и Вабищевич руководят молодыми научными сотрудниками Лаборатории.



Мегагрант (p220.ru)

Мегагранты – программа международного сотрудничества российских вузов и научных организаций с учеными мирового уровня и ведущими зарубежными научно-образовательными центрами в сферах науки, образования и инноваций. Программа стартовала 9 апреля 2010 года с принятием Правительством Российской Федерации постановления №220.

Цель программы - создание под руководством ученых мирового уровня, в том числе наших соотечественников, проживающих за рубежом, в российских образовательных и научных организациях лабораторий, проводящих исследования на передовых рубежах развития науки и технологий.

Задачи, которые решаются в рамках программы мегагрантов:

1. привлечение ведущих мировых ученых, в том числе соотечественников, проживающих за рубежом, в Россию
2. создание под руководством ведущих ученых в российских вузах и научных организациях конкурентоспособных лабораторий мирового уровня (точек роста науки)
3. выполнение прорывных научных исследований в различных областях наук
4. подготовка высококвалифицированных научных кадров
5. стимулирование притока молодежи в сферу науки, образования и высоких технологий
6. создание устойчивых связей с ведущими мировыми научно-образовательными центрами и научными школами
7. трансфер передовых разработок и технологий в реальный сектор экономики

Многомасштабность и мультифизика

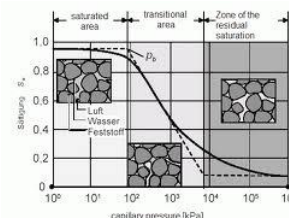
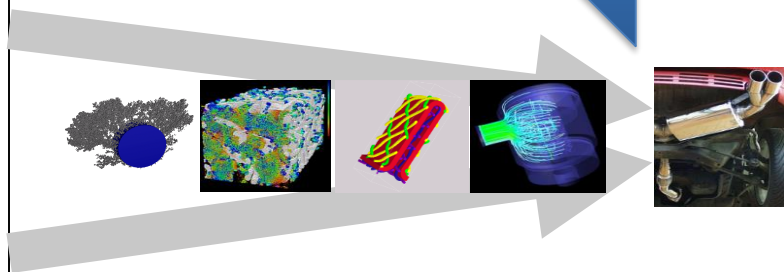
Многомасштабные методы

- Гомогенизация
- Численное усреднение
- Многомасштабные методы
- ...

Мультифизические процессы

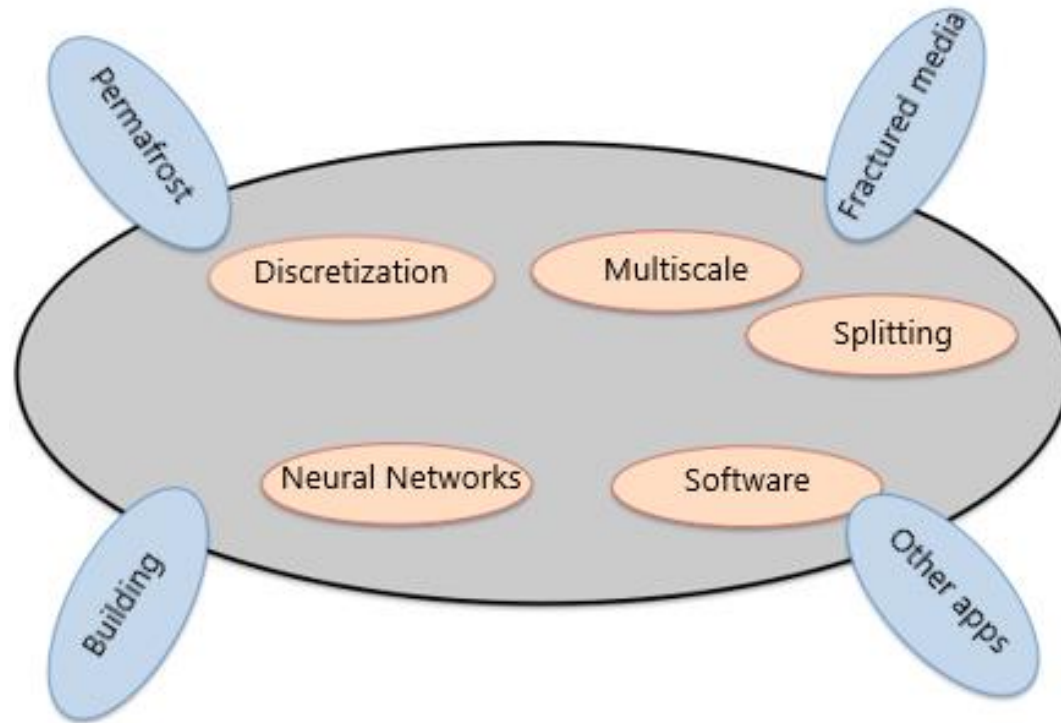
- Схемы расщепления
- Расщепление по пространству-времени
- Нелинейные решатели
- ...

Машинное обучение



Одним из аспектов нашей лаборатории, который делает ее "уникальной", является фокусировка внимания на фундаментальных аспектах, программном обеспечении и приложениях

Обзор



- Наши исследования структурно разбиты на части
- Существуют фундаментальные и прикладные части
- Части взаимосвязаны и между ними есть синергия

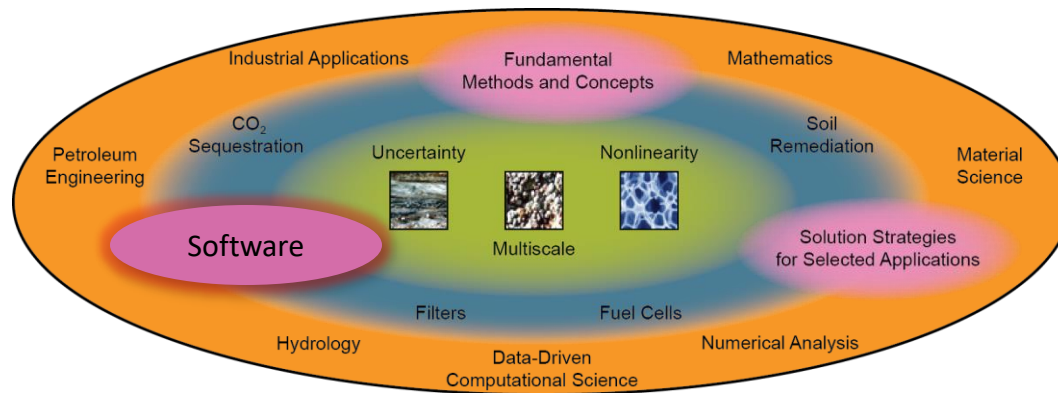
Фундаментальные проекты

Часть 1

- Понижение порядка модели
- Анализ и передовые дискретизации
- Схемы расщепления для мультифизики
- Физико-обоснованное машинное обучение

Часть 2

- Механика и течения в трещиновато-пористых средах
- Моделирование процессов Арктической тематики
- Задачи тепло-массопереноса в криолитозоне.



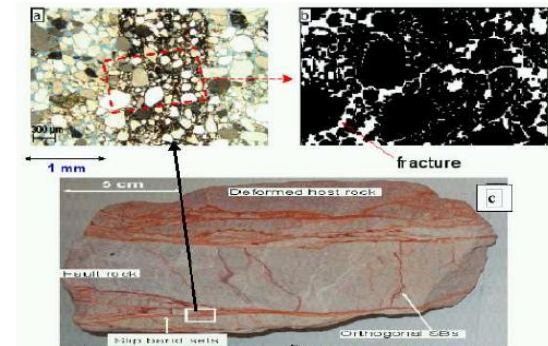
Часть 3

- Параллельные решатели
- Инструментарий для высокопроизводительных вычислений
- Новые средства с использованием методов машинного обучения (искусственного интеллекта)

Многомасштабные методы

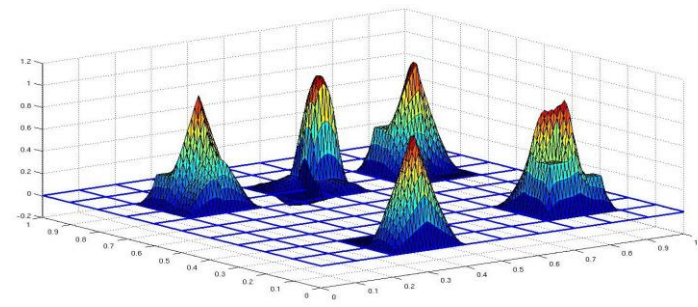
Апскэйлинг и гомогенизация

- Апскэйлинг микро-пористой среды
- Многофазные течения и транспорт (апскэйлинг)
- Численная гомогенизация



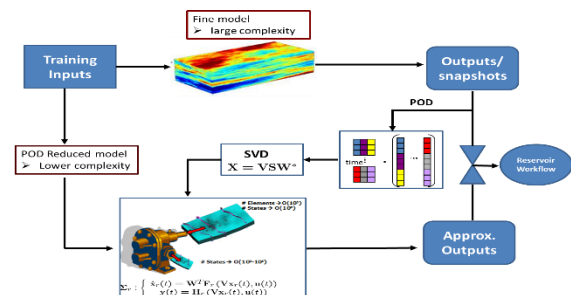
Многомасштабные методы

- Многомасштабность для течений в пористой среде
- Многомасштабные методы для геоячеечных течений в трещиноватых средах
- Приложения



Методы декомпозиции для мультифизики

- Схемы расщепления
- Приложения



Стажировки и курсы повышения

Регулярные научно-исследовательские поездки в

- Сеульский национальный университет (4 ч.)
- Китайский университет в Гонконге (3 ч. -2017, 4 ч. -2018, 4 ч. -2019)
- Университет Чангша (3 ч. -2017)
- Университет Сянтань (3 ч. -2018, 4 ч. - 2019)
- Техасский университет TAMU (2 ч. -2017, 1 ч. – 2018)
- Университет Кайзерслотерна (1 ч. – 2018, 2 ч. – 2019)
- ИБРАЭ РАН (1 ч. -2018, 4 ч. – 2019)
- Визиты в Якутск из научных организаций-партнеров

Награды и гранты

- Васильева Мария выиграла диплом признания заслуг от Министерства науки и образования 2017
- 4 заявки поддержаны Российским научным фондом (Васильева М., Григорьев А., Васильев А., Степанов С.) 2017-2020
- Премия Ларионова РС(Я) для молодых ученых – Колесов, Сивцев, Степанов
- Васильев В.И. – крупный грант РФ
- Большое количество грантов РФФИ и РФФ: 5 РФФ, 6 РФФИ, 7 стипендий Президента
- В 2019 году поддержано продолжение исследований в рамках Мегагранта
- Различные совместные заявки с Китаем, Индией, Тайванем, Германией, Вьетнамом
- Локальные хоздоговора для индустриальных партнеров

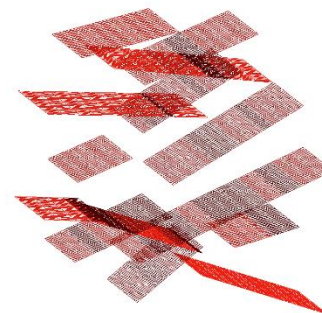
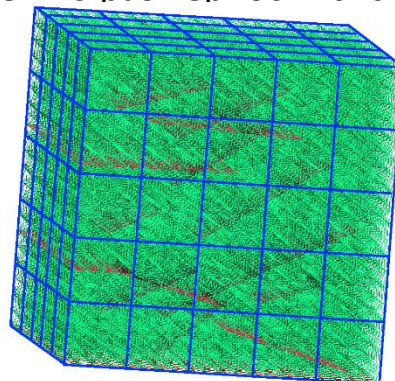
ПРИМЕРЫ

Многомасштабное моделирование ненасыщенной фильтрации

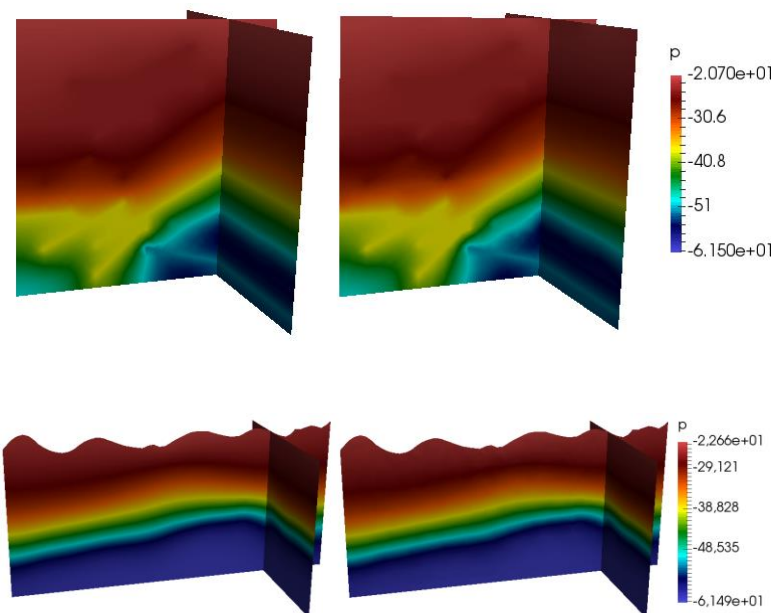


Спиридонов Д.А. Эфендиев Я.

- Модель мультиконтинуума для ненасыщенной фильтрации
- 3D геометрия с трещинами
- Неоднородная геометрия с сильными контрастами
- Приложения в инженерии, добыче нефти и газа, подземной гидрологии
- Применение процедуры понижения порядка модели к снижению размерности системы



Многомасштабное моделирование ненасыщенной фильтрации

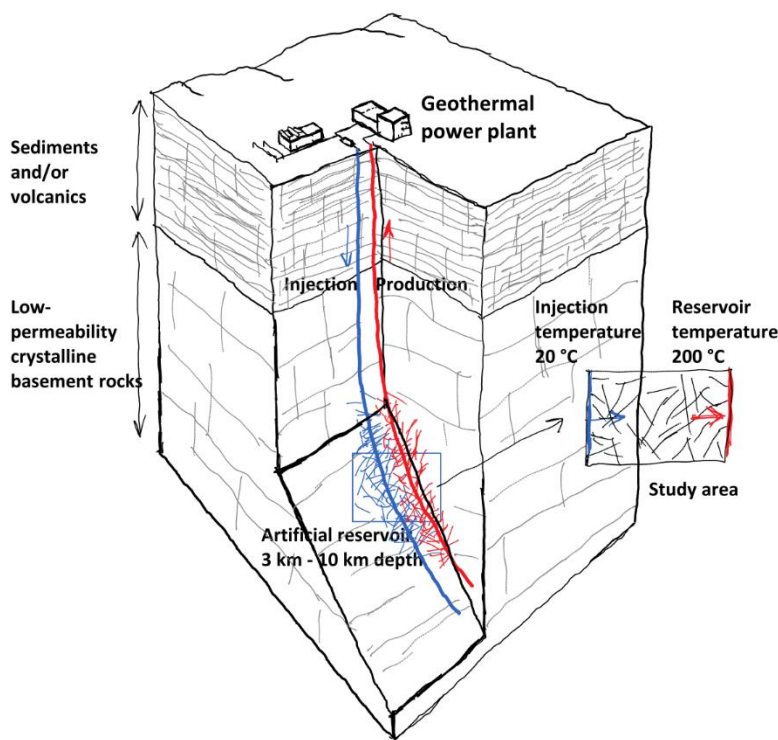


- Решение задачи на грубой сетке на основе GMsFEM метода
- Построение завязанных многомасштабных базисных функций для задач мультиконтинуума
- Моделирование задач в областях с неровными поверхностями
- Вариативность базисных функций для каждого типа геометрии

Прогноз влагонасыщенности почвы во времени в зависимости от состава грунта, рельефа и атмосферных условий

Эффективные расчеты с использованием многомасштабных методов с возможностью прогнозов в реальном времени и предсказывает корректные модели

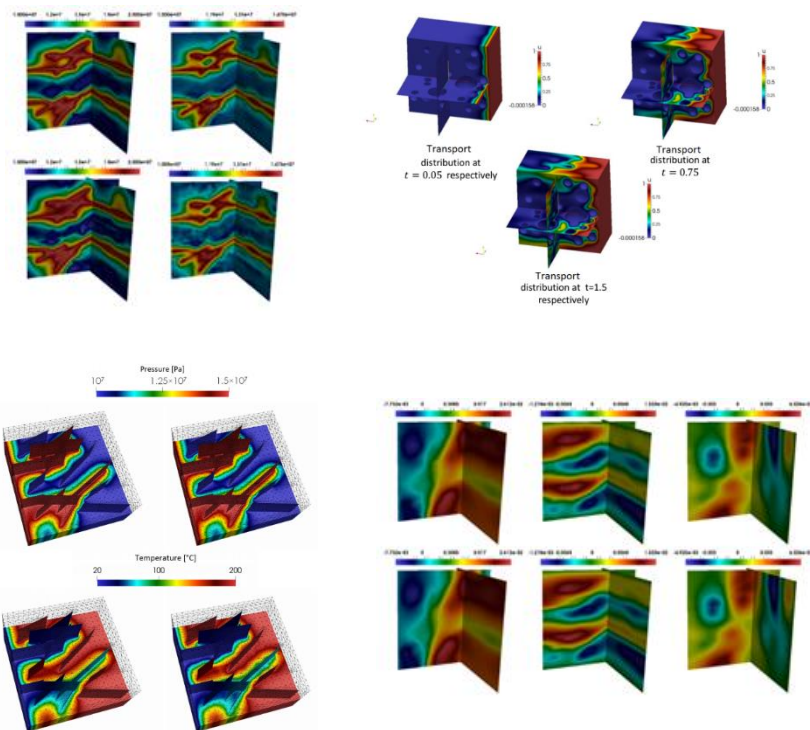
Многомасштабная поромеханика в мультиконтинуумных средах



Васильева М.В. Эфендиев Я.

- Многомасштабное моделирование задач фильтрации
- Многомасштабная модель расширенных гео-термальных систем
- Многомасштабное моделирование задач пороэластичности
- Многомасштабное моделирование процессов течения и переноса
- Моделирование в неоднородных трещиновато-пористых средах
- Понижение порядка модели для задач переноса тепла

Многомасштабная поромеханика в мультиконтинуумных средах

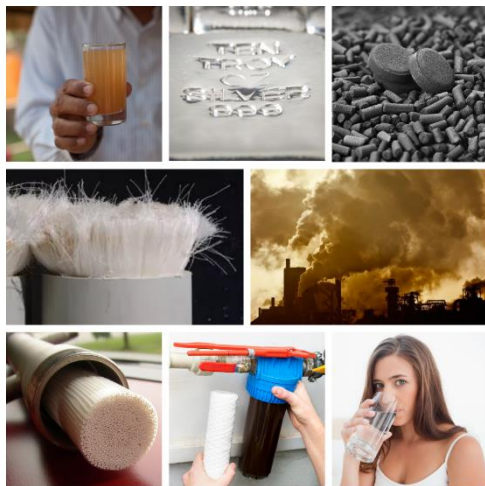


- Обобщенный многомасштабный метод для задач пороупругости
- Смешанный GMsFEM для задач течения и переноса
- Нелокальные мультиконтинуальные техники апскейлинга для задач фильтрации

Мультифизическое моделирование неоднородных
грунтов с многофазными течениями

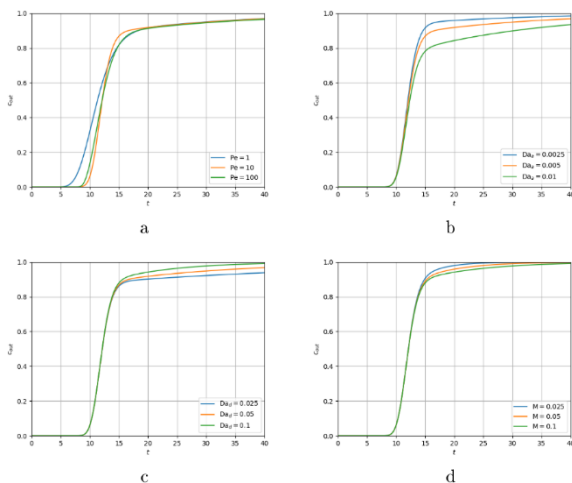
Точные модели прогнозов с учетом процессов деформаций,
течения, температур и т.д.

Моделирование реактивных течений в микро-масштабе



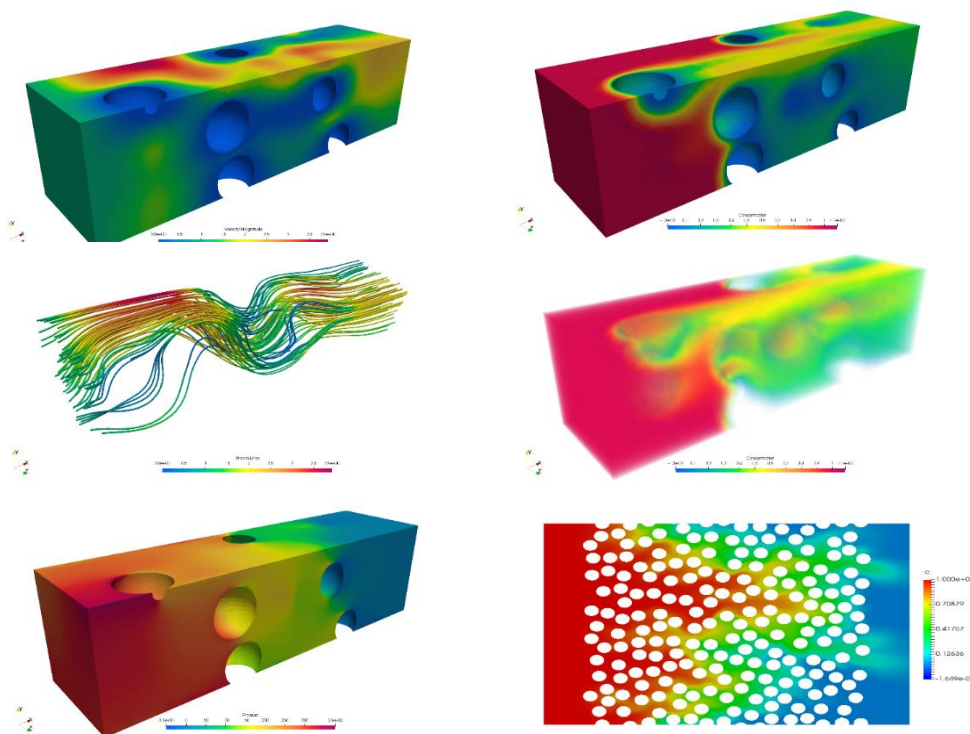
Григорьев В.В. Илиев О. Вабищевич П.Н.

- Мультифизичная модель реактивного течения на микро-масштабе
- Предсказание эффективности и срока эксплуатации водных фильтров
- Вычислительная идентификация скоростей на поверхности реакции
- Использование детерминистических, стохастических, эвристических и статистических методов идентификации



Outlet concentration: a — dependence from Pe , b — dependence from Da_d , c — dependence from Da_d , d — dependence from M

Моделирование реактивных течений в микро-масштабе

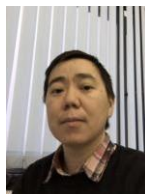
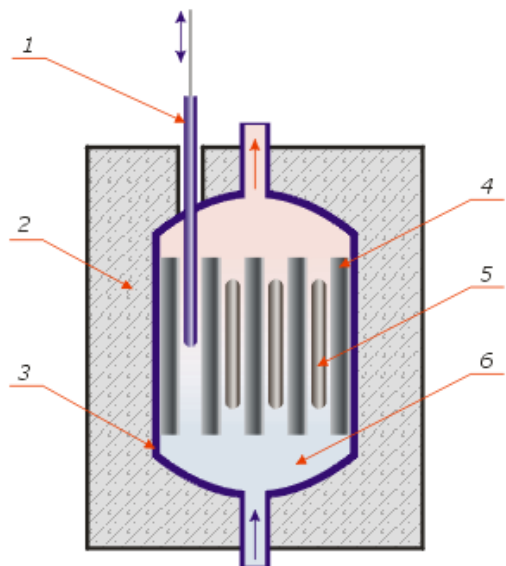


- Применяются МКЭ по пространству и схема Кранка-Николсона по времени
- Рассмотрено влияние шума на данные измерений
- Статистический подход основан на соболевских квази-случайных последовательностях
- Стохастический подход реализован на основе Марковских цепей Монте-Карло
- Эвристический подход реализующий алгоритм искусственной пчелиной колонии

Расчет конфигураций фильтров на основе моделирования реактивных течений

Оптимизация фильтров на основе передовых вычислительных алгоритмов

Моделирование нейтронного потока в активной зоне реактора

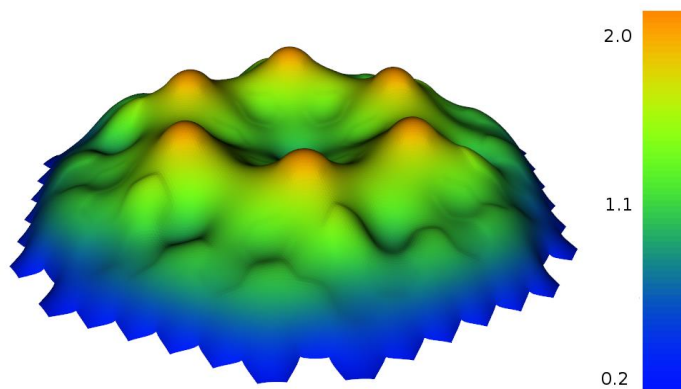
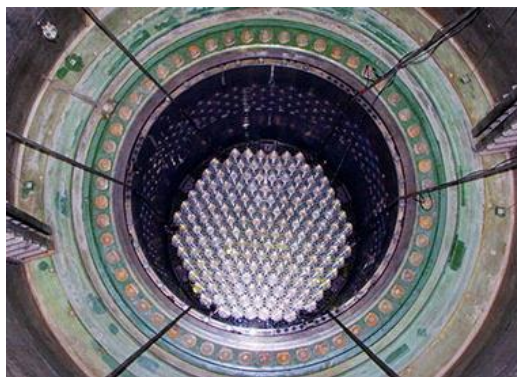


Васильев А.О.



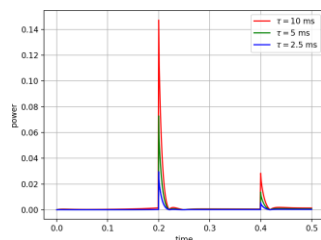
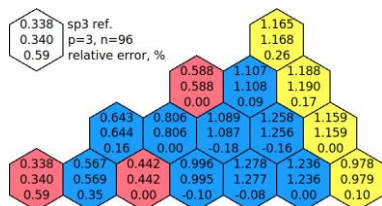
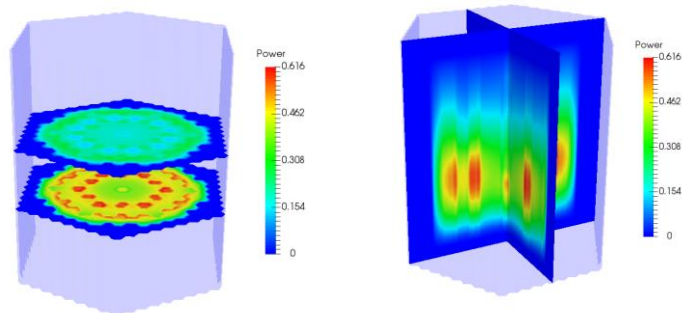
Вабищевич П.Н.

- Уравнение переноса нейтронов
- Мультигрупповое приближение
- 2D и 3D геометрии активных зон
- Спектральные свойства динамических процессов
- Численное моделирование переноса нейтронов

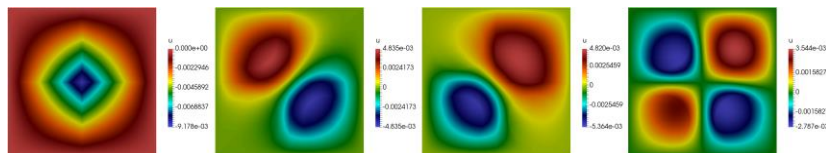


Плотность нейтронного потока

Моделирование нейтронного потока в активной зоне реактора

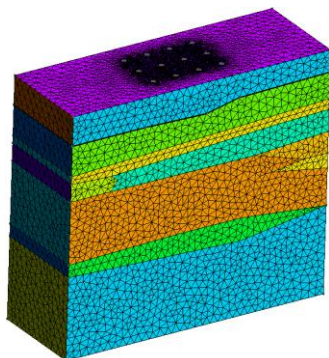
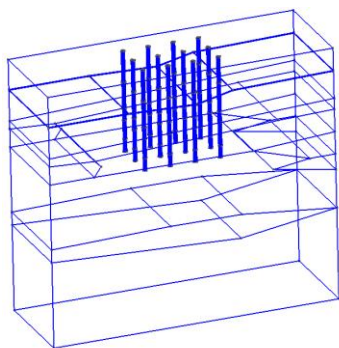


- Метод Конечных элементов хорошо подходит для моделирования сложных геометрий
- Диффузионное и SP3 приближение уравнений переноса нейтронов
- Понижение порядка модели с использованием многомасштабного метода



*Прогноз критического состояния ядерного реактора
Апробация моделей совместно с сотрудниками Института безопасного
развития атомной энергетики для построения точной модели*

Моделирование потока тепла в криолитозоне



Степанов С.П.



Васильева М.В.



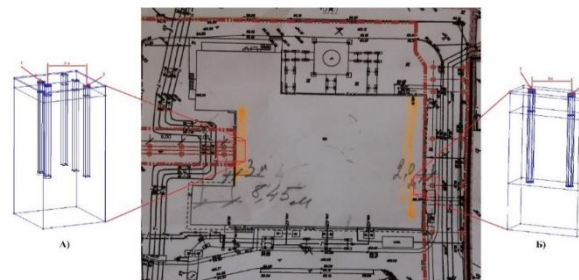
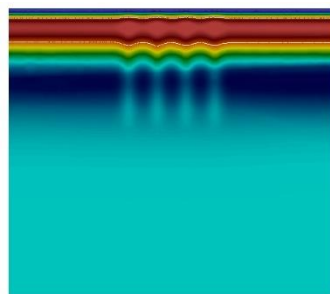
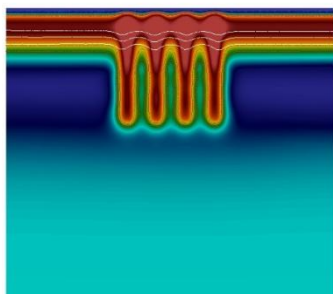
Васильев В.И.



Алексеев В.Н.

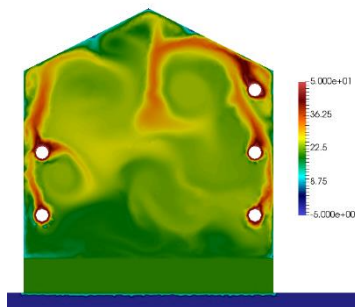
Прогноз распределения температуры в области свайных полей

- Мультифизичная модель учета теплового режима грунта и свайных полей
- Сложная 3D геометрия

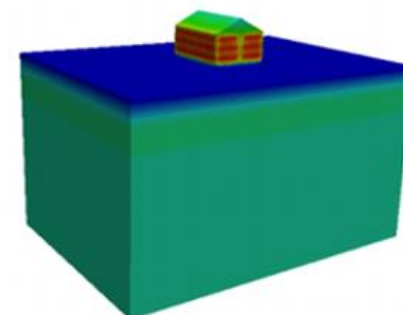
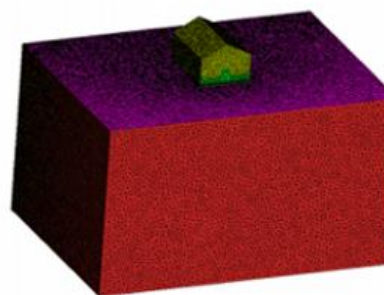
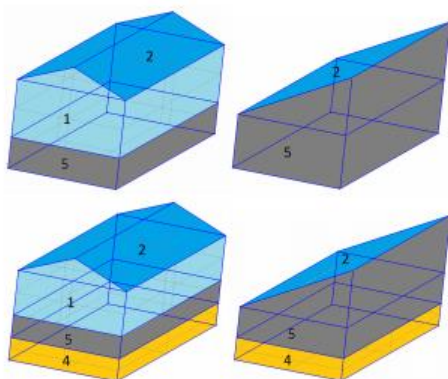


Совместная работа с АО «ЯкутПНИИС»

Моделирование потока тепла в криолитозоне

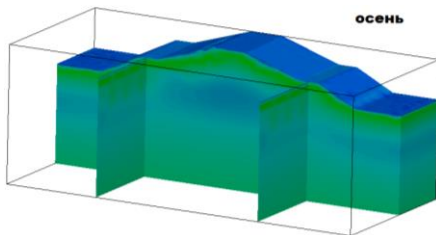
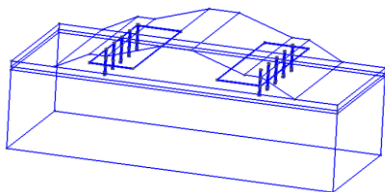
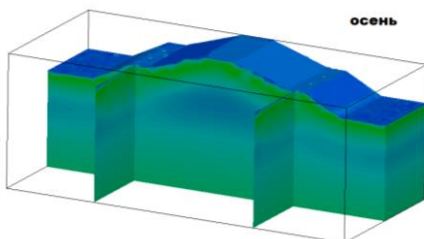
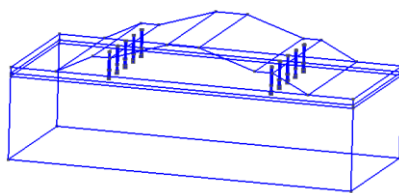
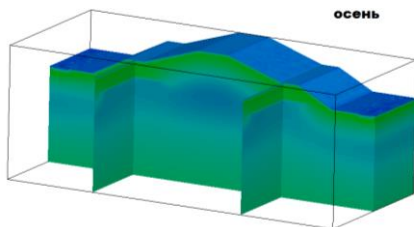
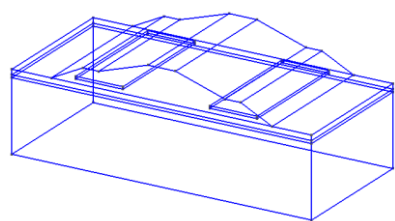


Моделирование теплицы
Изучение потери тепла для
различных типов теплиц для выбора
оптимального дизайна в условиях
Крайнего Севера.



Совместная работа с ООО «Оптоган»

Моделирование потока тепла в криолитозоне



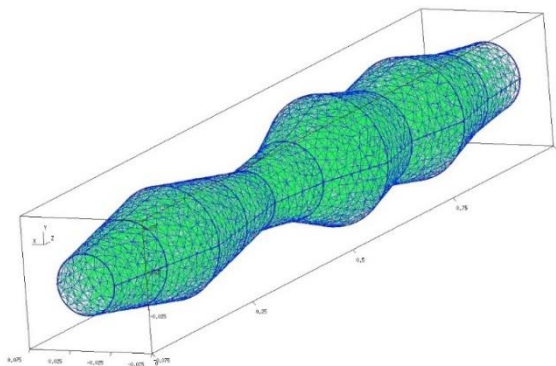
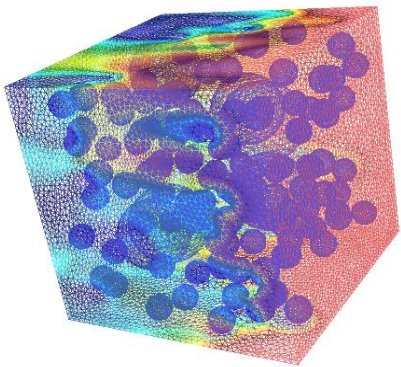
*Были рассчитаны распределения температур насыпи, для строительства
Амуро-Якутской магистрали железной дороги (совместно с ИМЗ СО РАН)*

Многомасштабное моделирование течения и переноса

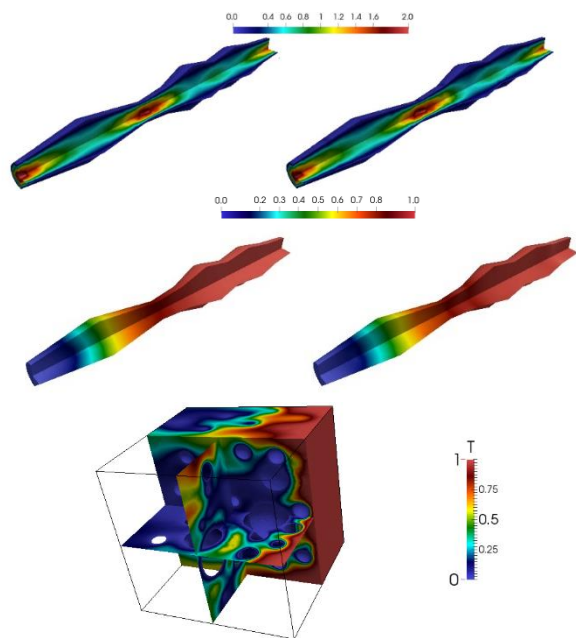


Алексеев В.Н. Калачикова У.С. Васильева М.В.

- Комплексная 3D геометрия (1) в тонких областях; (2) перфорированных областях
- Приложения в добыче нефти и газа, теплообменниках, геотермальных месторождениях
- Различные типы неоднородных свойств
- Использование многомасштабных методов для быстрых и точных вычислений
- Экономия оперативной памяти в расчетах



Многомасштабное моделирование течения и переноса

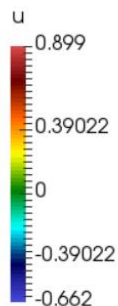
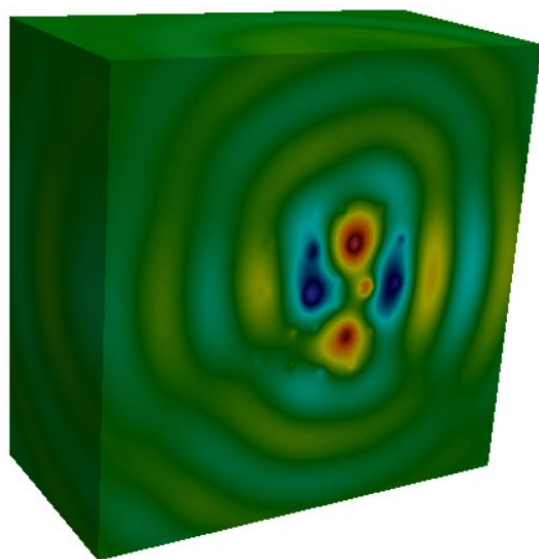


- Применение разрывного метода Галеркина GMsFEM для получения точных результатов
- Построение различных типов базисных функций
- Приложения метода апскейлинга для связанных задач в трещиноватых средах
- Использование дополнительных базисных функций для грубых не гомогенных границ

Получены эффективные методы вычислений для течения и транспорта многофазных жидкостей (нефти и газа) на разных масштабах

Точные прогнозы на основе передовых дискретизаций

Моделирование распространения волн в неоднородных средах



Васильева М.В.

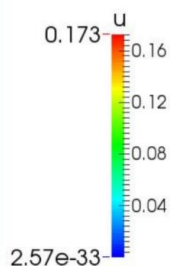
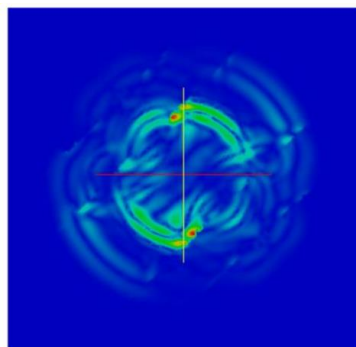


Калачикова У.С.



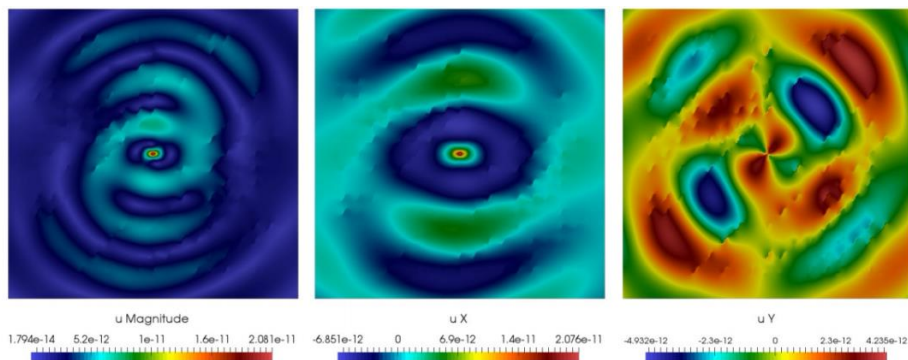
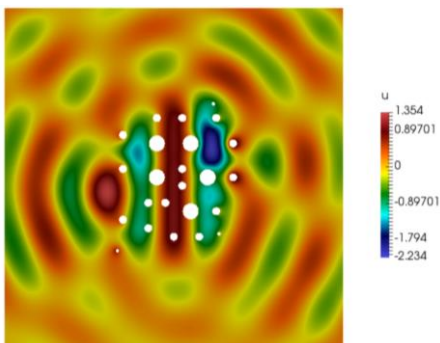
Алексеев В.Н.

- Волновые процессы: распространение, рассеяние
- Сложные неоднородные среды (перфорированные или с трещинами)
- Численная гомогенизация или многомасштабные методы для понижения вычислительной сложности задач
- Приложения в сейсмике, акустике газов и жидкостей, упругие волны в твердых телах, электромагнитные волны.



Моделирование распространения волн в неоднородных средах

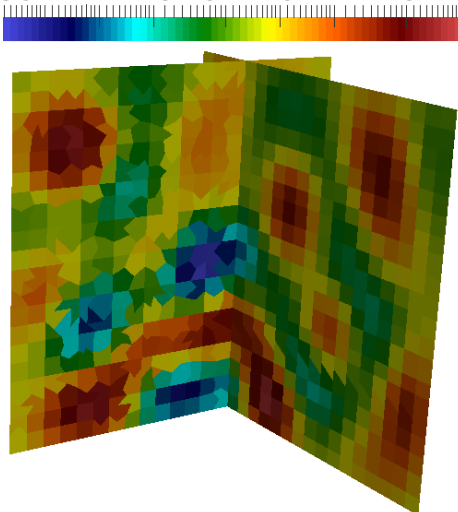
- Построение многомасштабных базисных функций для решения задач
- Модель линейного скольжения для трещиноватых сред
- Применение разрывного метода Галеркина для эффективного численного моделирования
- Адаптивность базисных функций к сложности задач



Эффективный расчет распространения волн в неоднородных грунтах на основе наших методов вычислений и программного кода
Исследования могут быть задействованы в сейсморазведке, медицинской томографии и т.д.

Многомасштабное моделирование потока жидкости и механики грунтов

2.935e-11 2e-10 2e-9 1.021e-08



Васильева М.В.



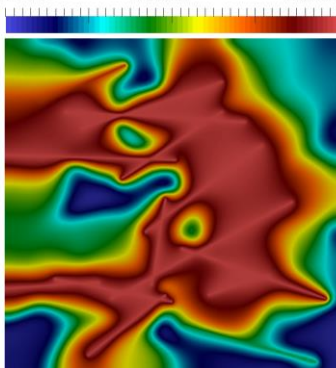
Тырылгин А.А.



Спиридонов Д.А.

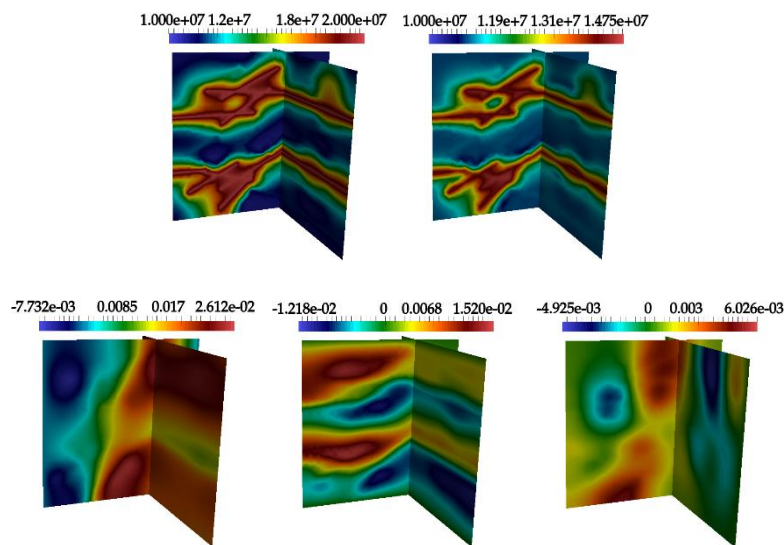
- Задача пороупругости для мультиконтинуумных сред
- Математическая модель состоит из связанных систем уравнений для давлений в каждом континууме
- Дискретная модель трещин (DFM)

1.000e+07 1.5e+7 2.000e+07



Многомасштабное моделирование потока жидкости и механики грунтов

- Решение локальных задач с различными граничными условиями для построения снимков пространств в локальных подобластях
- Генерация проекционной матрицы с использованием базисных многомасштабных функций
- Построение системы на грубой сетке с использованием проекционного подхода

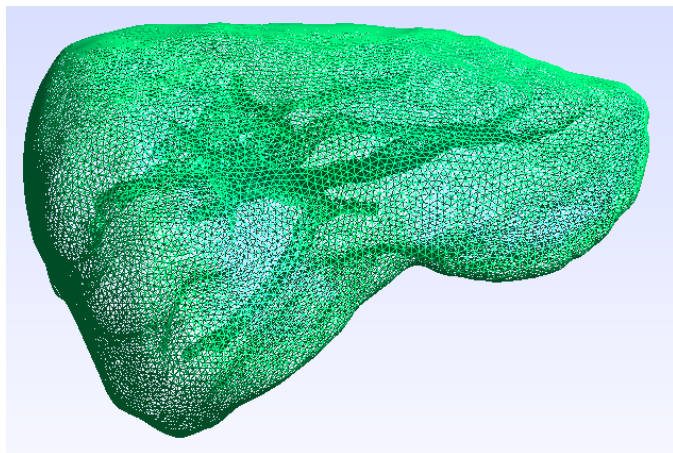


Распределения давлений и перемещений по направлениям X Y Z

Мультифизичное моделирование неоднородных
коллекторов с многофазными течениями

*Точные модели прогнозов с учетом процессов деформаций,
течения и т.д.*

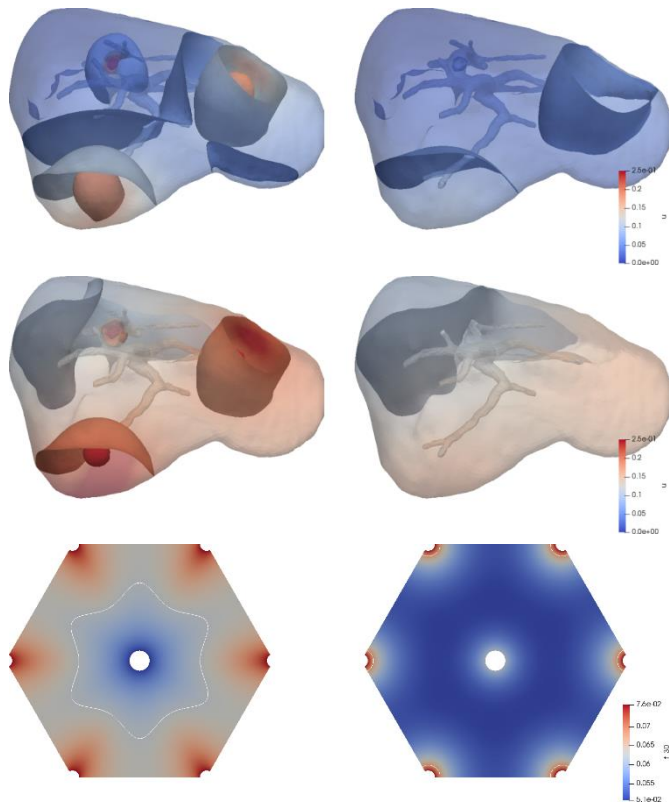
Моделирование течения крови в печени



Антонов М.Ю. Григорьев А.В. Колесов А.Е. Сивцев П.В. Васильев А.О. Вабищевич П.Н.

- Мультифизичная модель биологических процессов
- Сложная 3D геометрия печени
- Рассмотрение течения крови на микро-уровне (уровень дольки печени)
- Приложения в терапии болезней печени, хирургии и биоинженерии
- Использование нейронных сетей в научных исследования для улучшения качества

Моделирование течения крови в печени

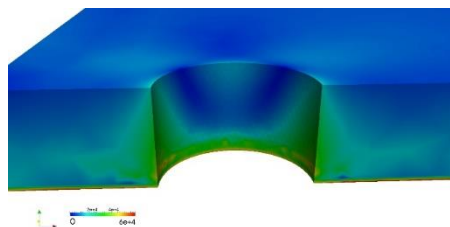


- Метод конечных элементов хорошо подходит для сложных геометрий
- Многоуровневая модель мультиконтинуума используется для учета процессов на разных масштабах
- Архитектуры нейронных сетей для задач препроцессинга
- Комплекс моделирования оформлен в виде научного ПО

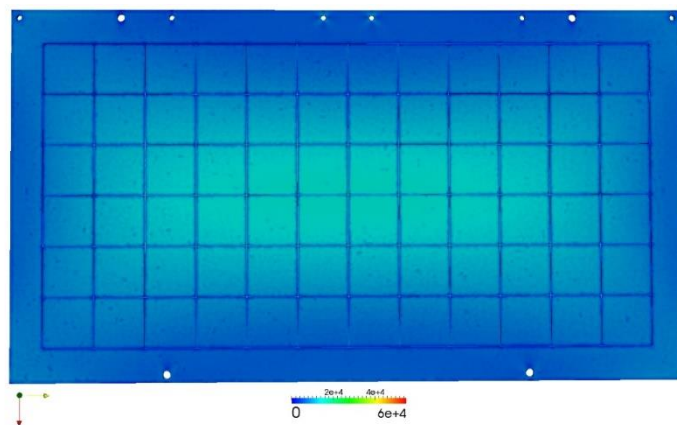
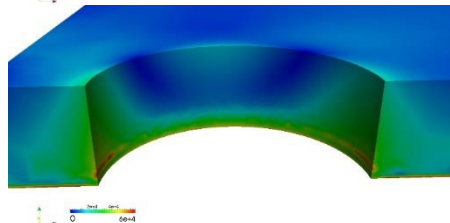
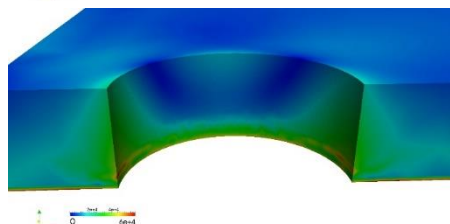
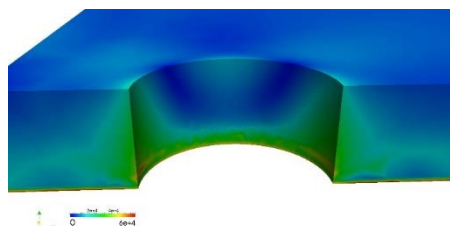
Моделирование био-механических процессов на разных уровнях на основе наших методов вычислений и программного кода

Приложения в хирургии, терапии заболеваний печени, био-инженерии и т.д.

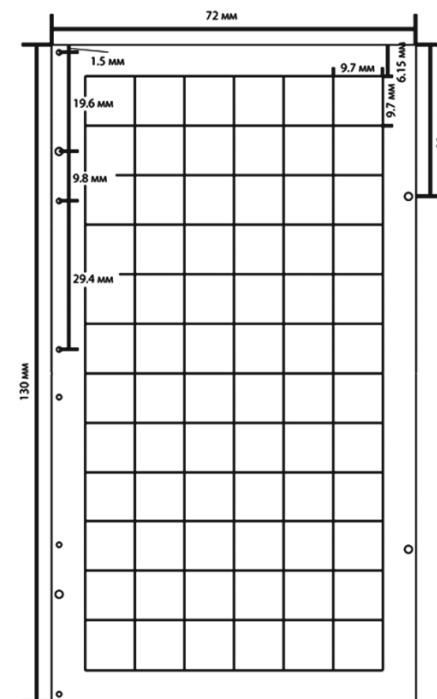
Исследование напряжений в керамической подложке



- Модель термоупругости
- Оценка термального напряжения
- Параметрические исследования
- Моделирование светодиодных материалов

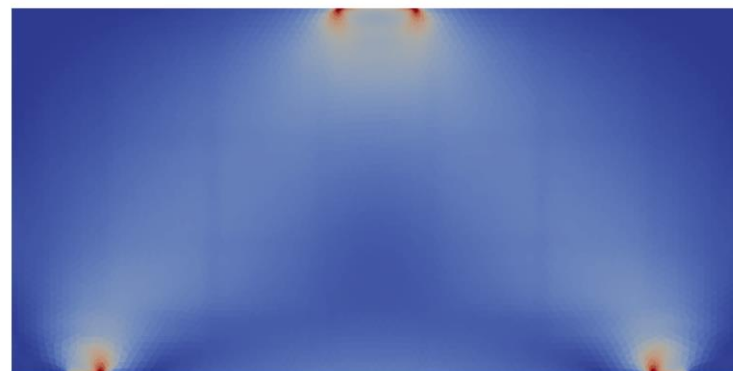
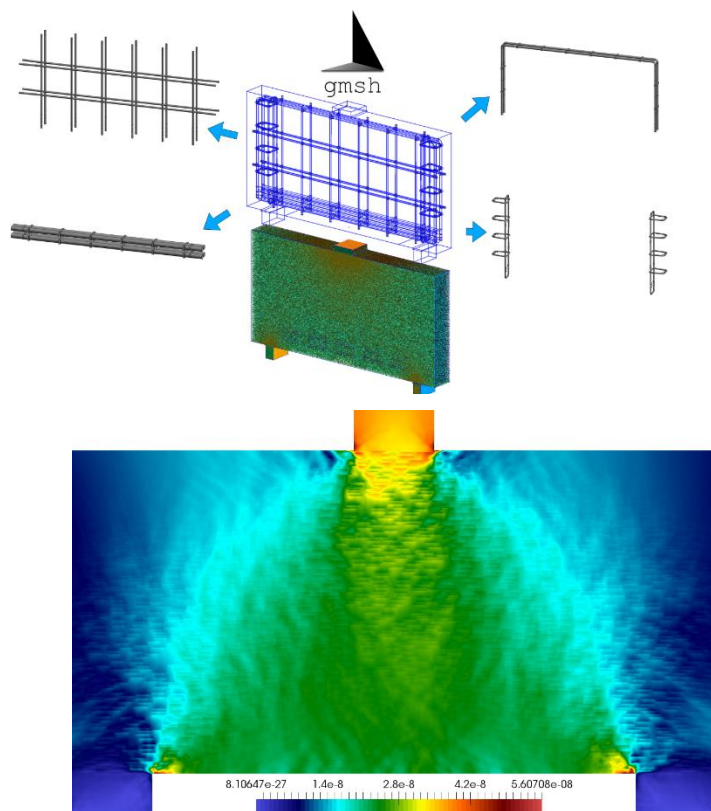


Сивцев П.В.

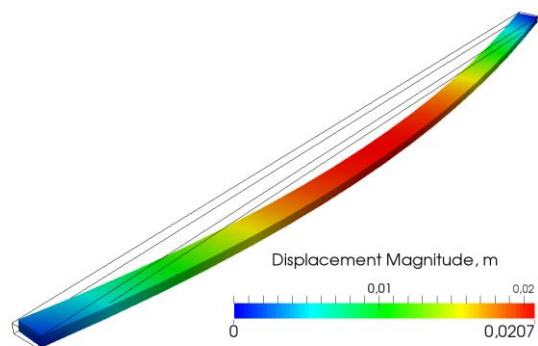


Моделирование железобетонных конструкций

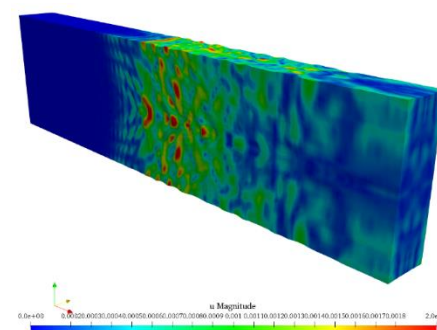
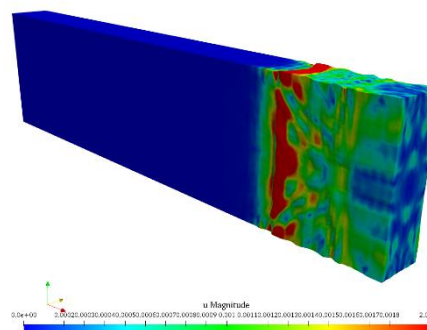
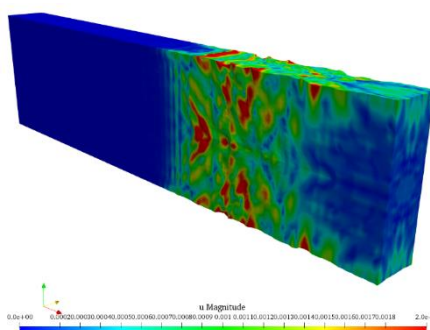
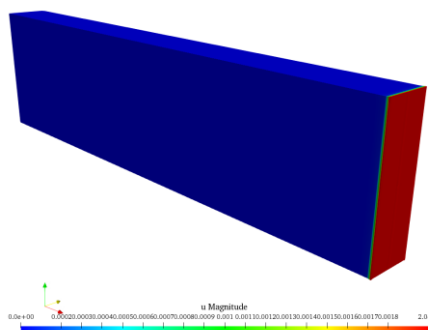
- Армированные бетонные конструкции
- Концентраторы напряжений
- Модель дискретных фибр
- Метод численного усреднения



Моделирование деформаций древесины



- Моделирование деформаций под воздействием напряжений роста
- Моделирование упругих волн
- Модели анизотропии
- Схемы раскроя древесины



*Мультифизическое прикладное моделирование с учетом
реальных параметров материалов*

Показатели Лаборатории

Наименование показателя	2017	2018	2019
Статьи (Коллектив 24 чел.)			
Web of Science	27	18	43
Scopus	51	33	63
Web of Science (Q1)	6	11	20
Доклады на Международных конференциях	50	75	100
Зарегистрированные программы на ЭВМ	3	4	6

Многомасштабные методы в индустрии



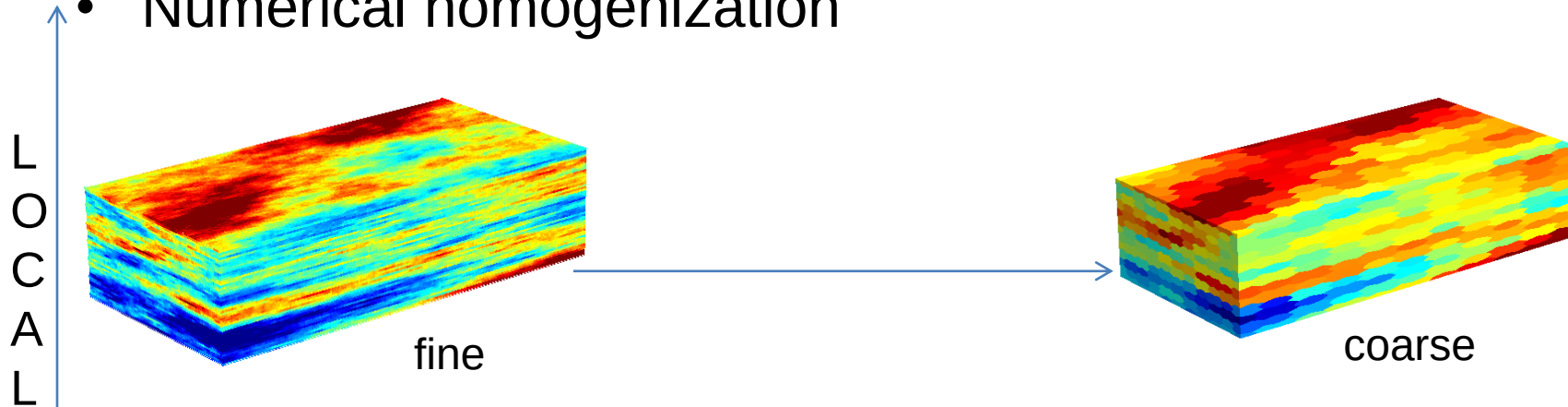
Эфендиев Ялчин, Ph.D.
Руководит Мегагрантом



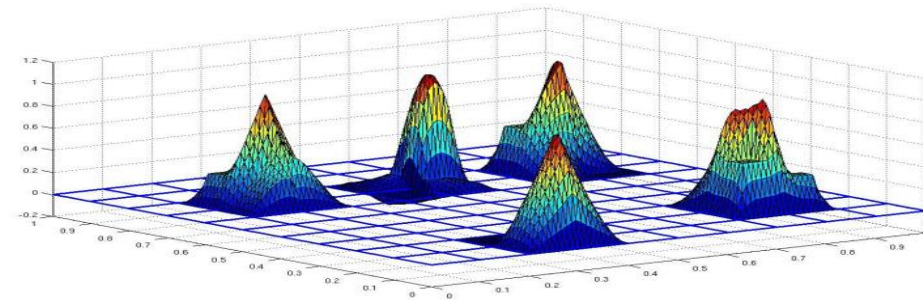
Илиев Олег
Профессор Кайзерслаутернского
университета & ITWM & NEFU
PhD, профессор

Reduced/coarse models

- Numerical homogenization



- Multiscale (on a coarse grid) methods

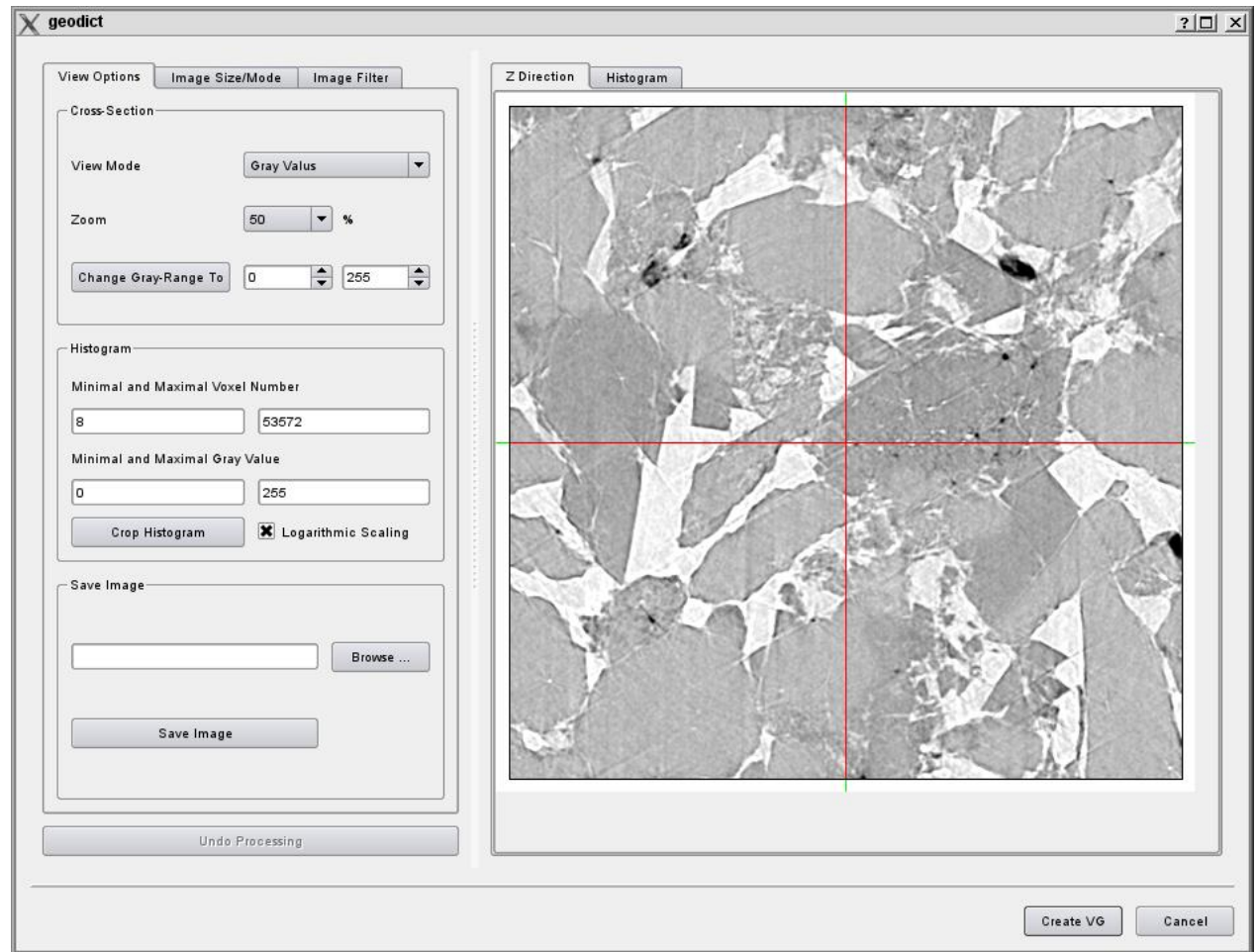


- Uses global snapshots and find best n-dimensional subspace based on, e.g., POD, BT,...

GLOBAL

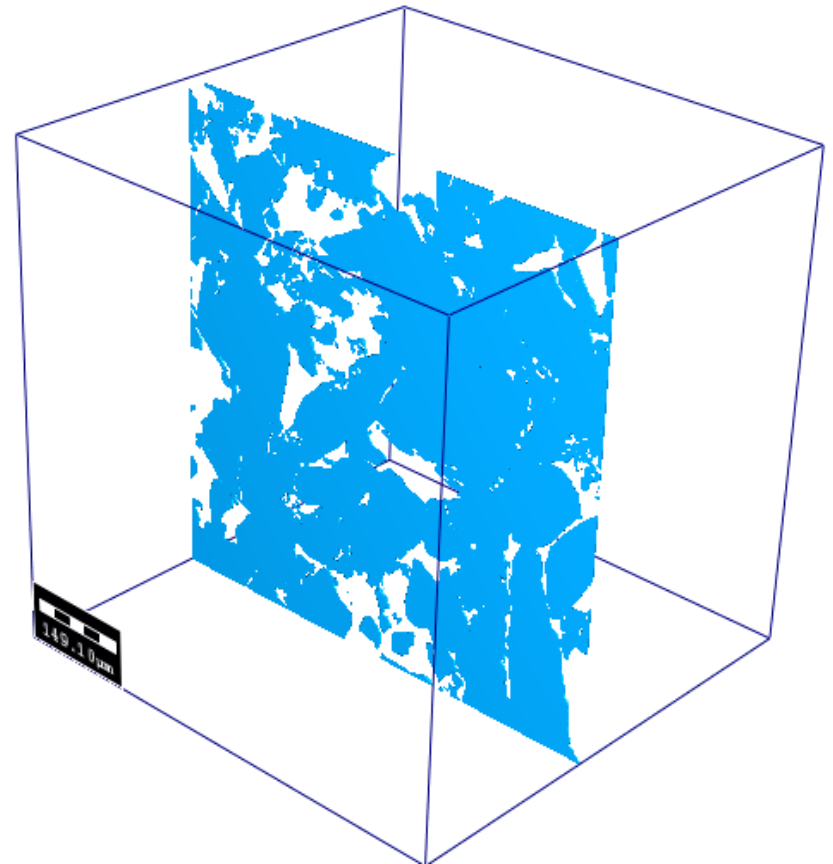
Tomogram

- F. Enzmann, Inst. for Geosciences, U. Mainz
- Pfälzer Buntsandstein
- resolution $0.7\ \mu\text{m}$
- 1024^3 voxels

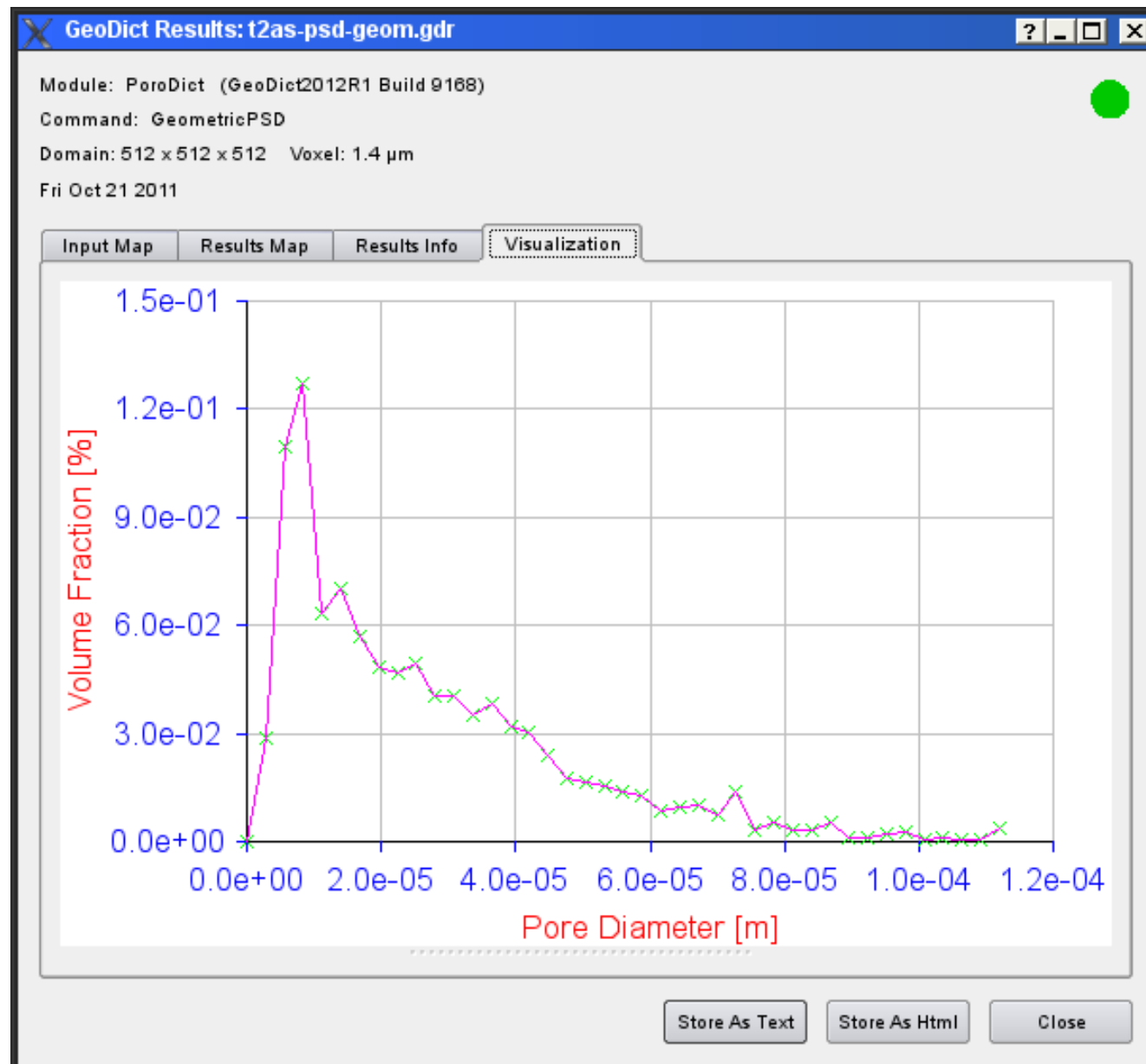


Segmentation

- Porosity 25.7 %
- Downscaled to 512^3 voxels

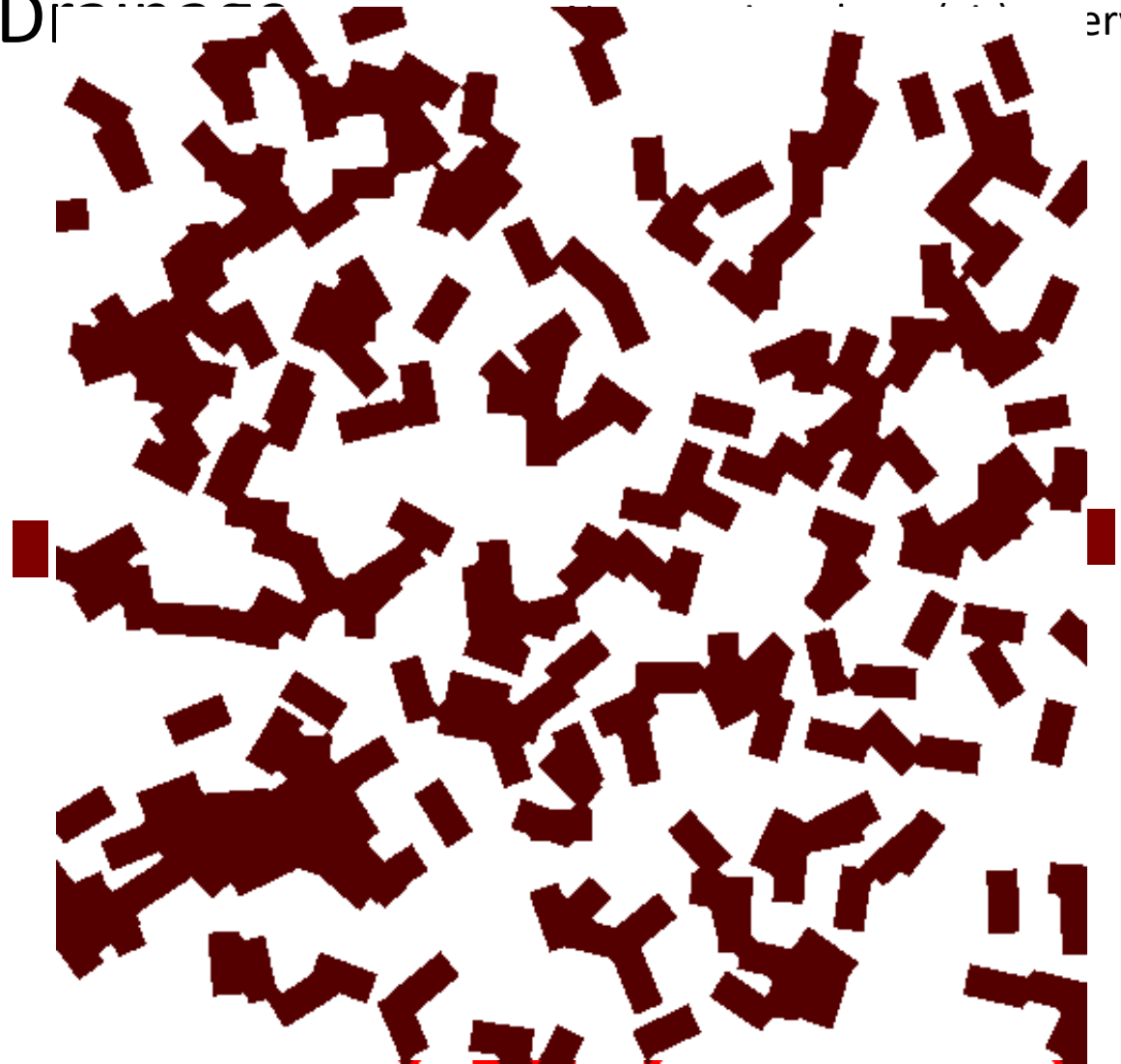


Pore Size Distribution (Sandstone)



Drainage and wetting phase (water) reservoir

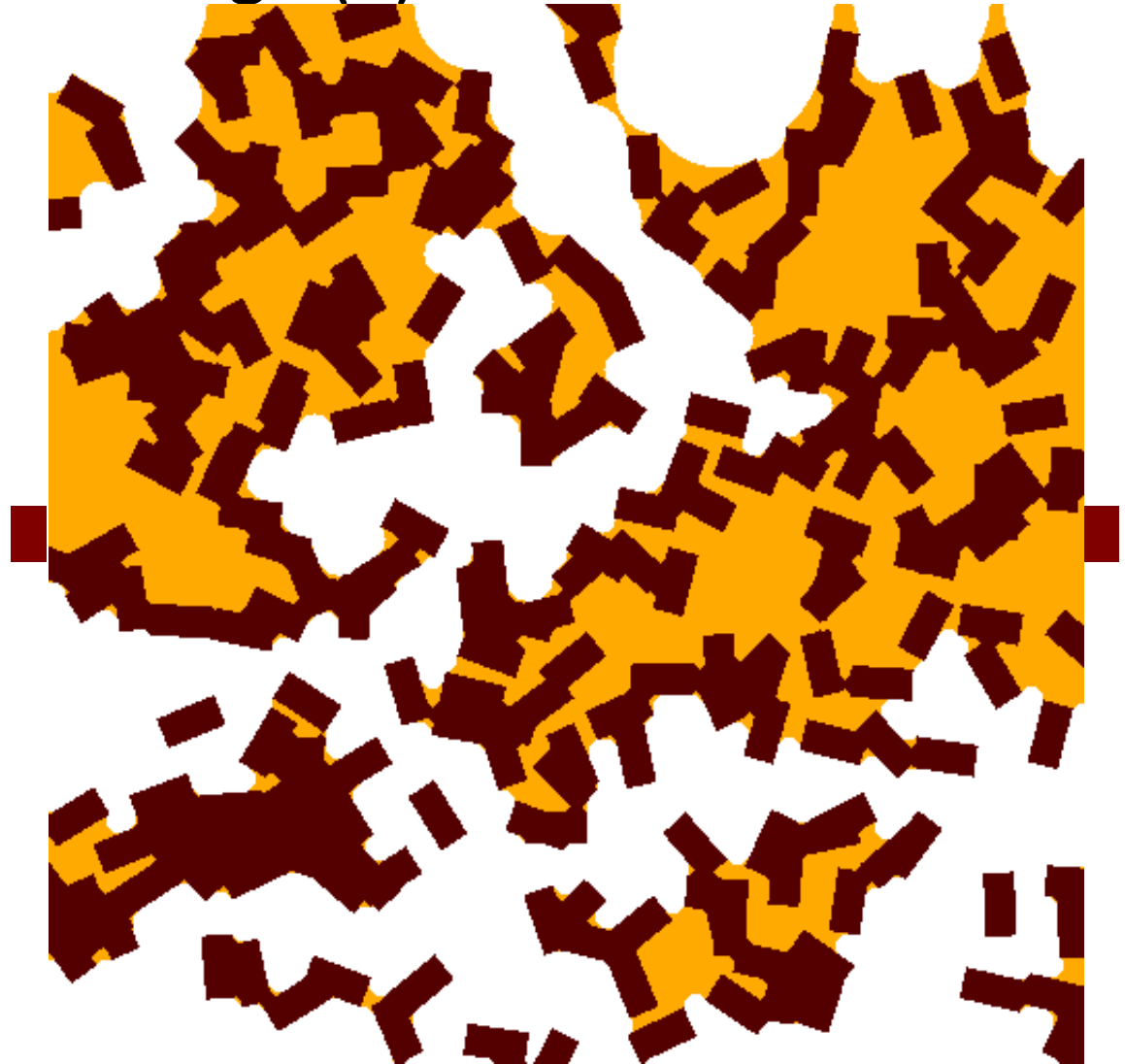
- Hilpert / Miller 2001
- Guarantees connectivity of NWP to reservoir
- Idea: move in spheres
 - Start: completely wet
 - Start: large radius (i.e. small p_c)
 - Steps: smaller radius (higher p_c)
- No residual water



Wetting phase (water) reservoir

Drainage (+)

- Ahrenholz et al. 2008
- Additionally: WP must be connected to reservoir
- Residual water (orange)

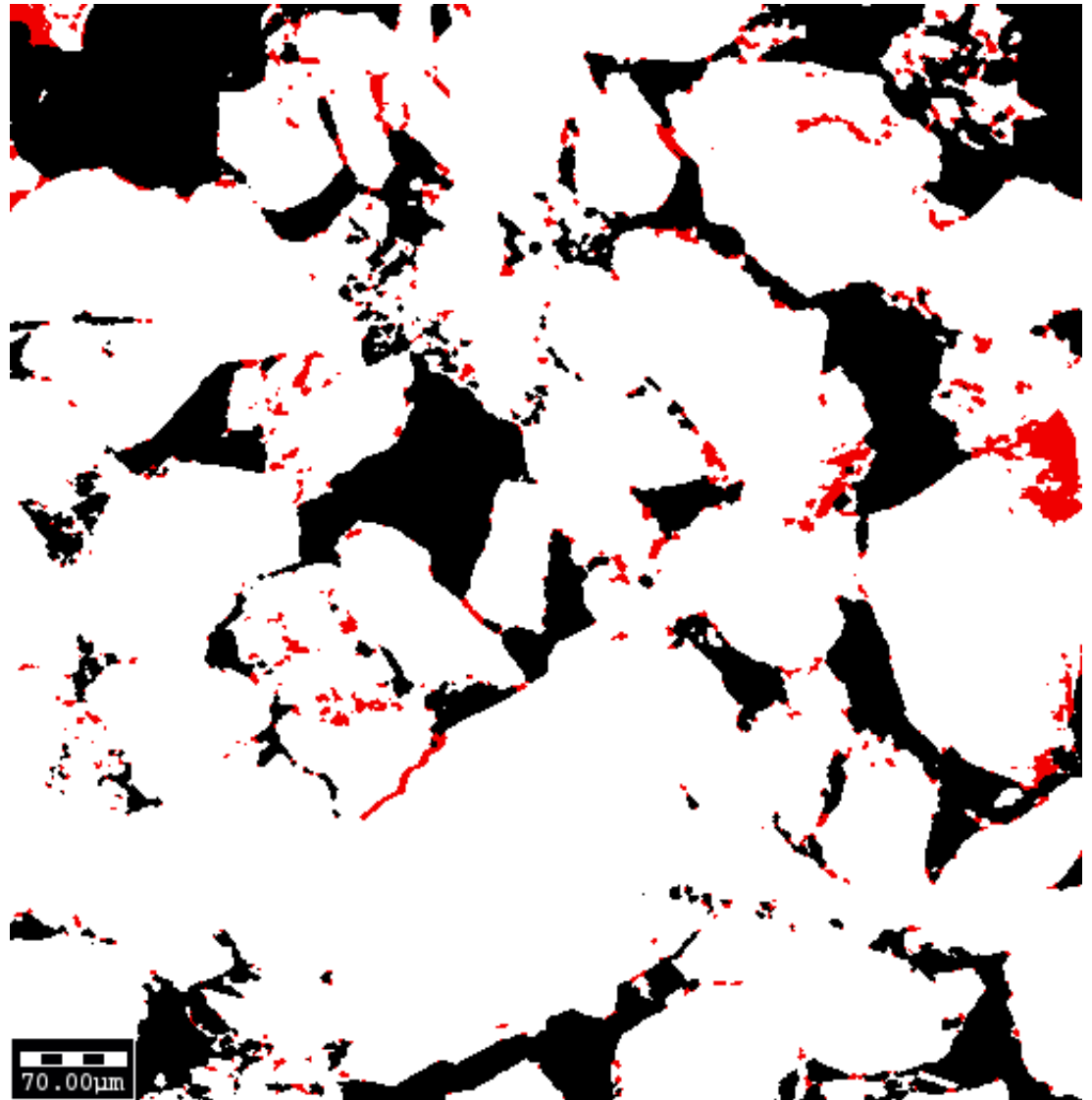


Wetting phase (water) reservoir

Non-wetting phase (air) reservoir

Drainage - Sandstone Sample

- Slice of the 3D result
- Residual water: 8.6 %
- black: air
- red: residual water
- white: matrix material



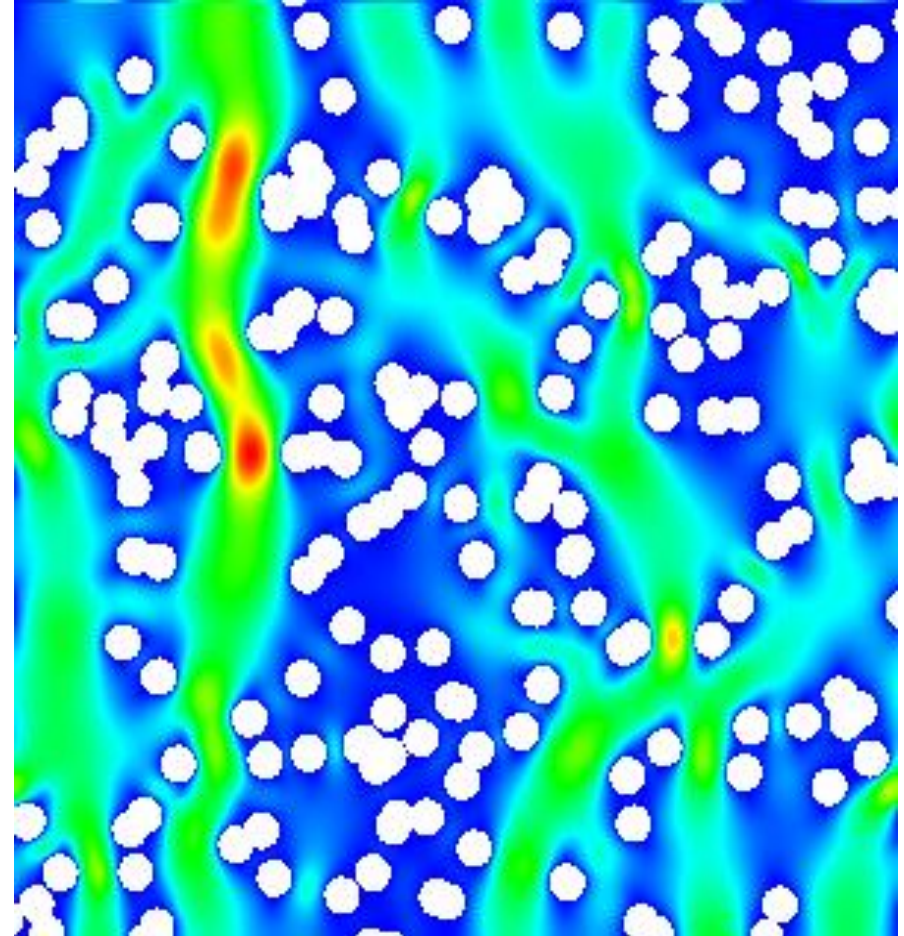
Permeability

- **Macroscopic description**
- **(homogenized porous media model)**

- Darcy's law : $u = -\frac{1}{\mu}\kappa\nabla p$
- u : average flow velocity
- κ : permeability tensor **unknown**
- μ : viscosity
- p : pressure

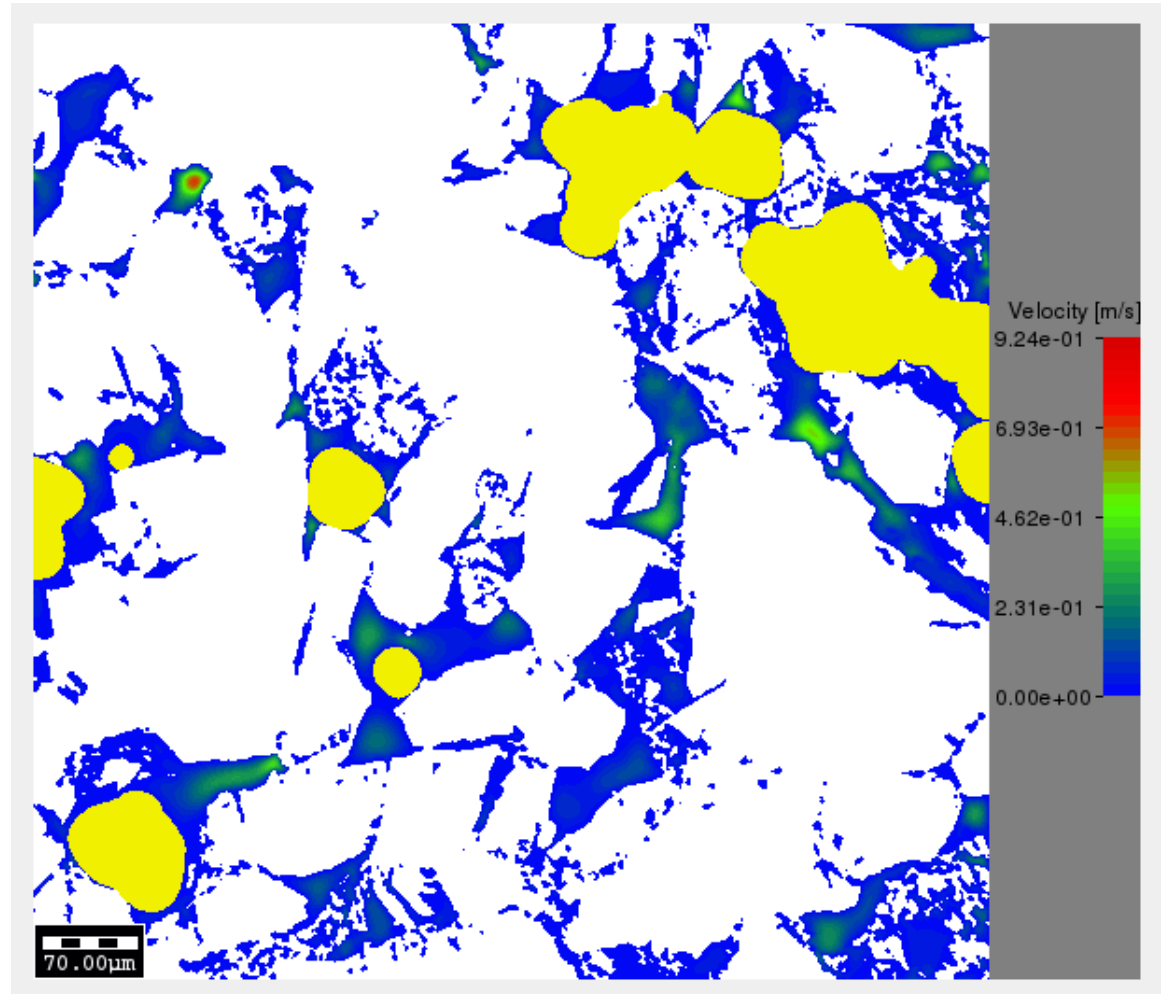
- **Microscopic description**
- **(pore structure model)**

- Stokes equation: $-\mu\Delta u + \nabla p = 0$

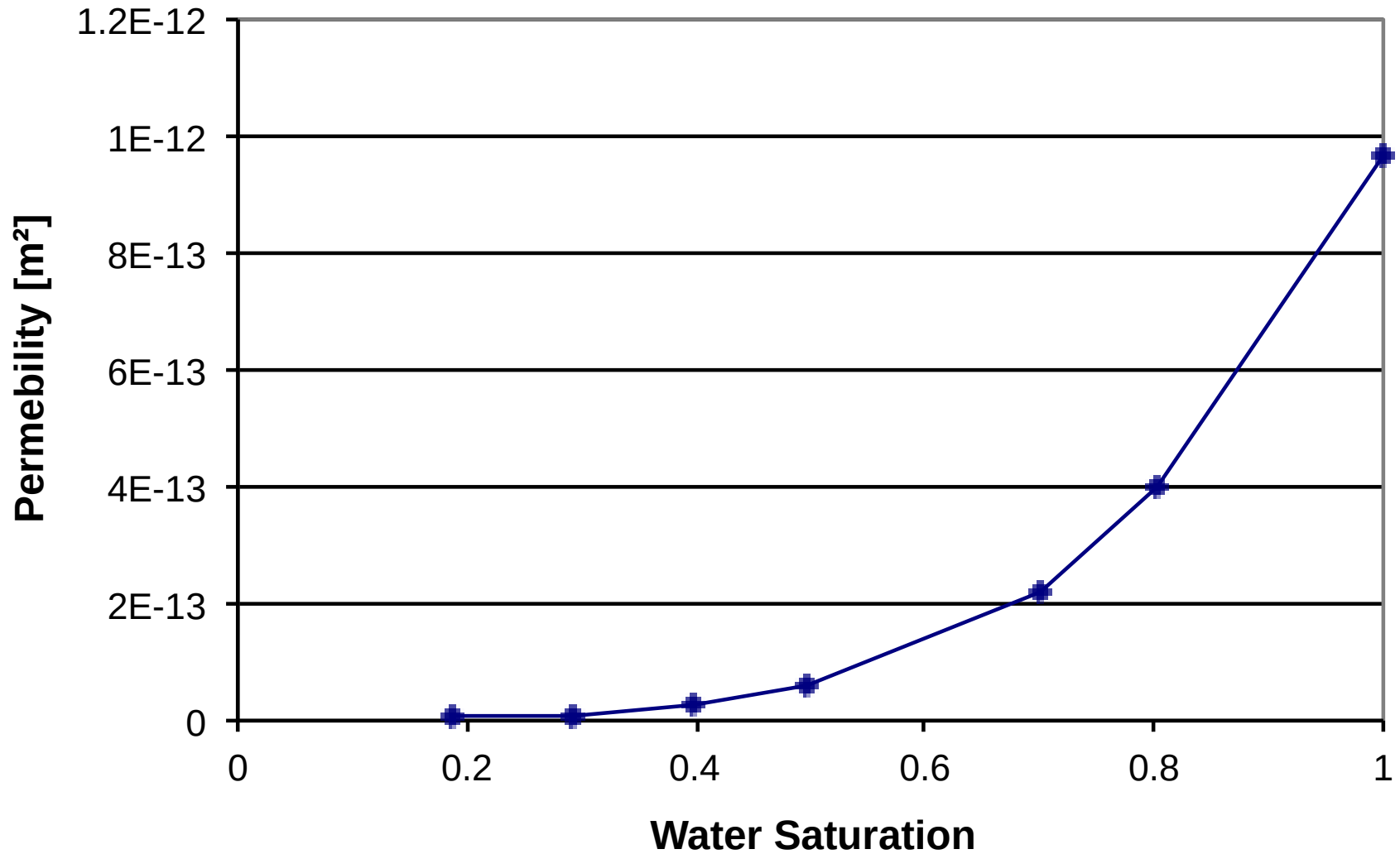


Relative Permeability (Sandstone)

- Choose saturation level, choose wetting model
- Use PM to find air distribution (here: yellow)
- Solve Stokes equation in remaining pore space



Relative Permeability (Sandstone)



Filtration

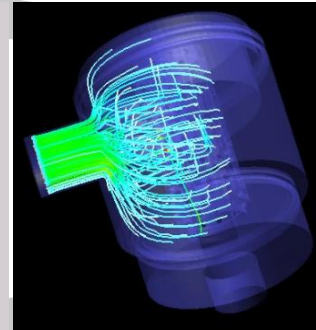
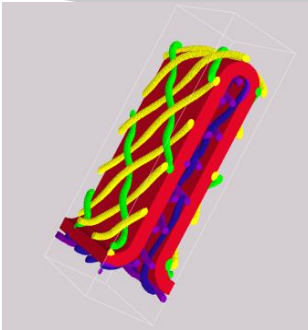
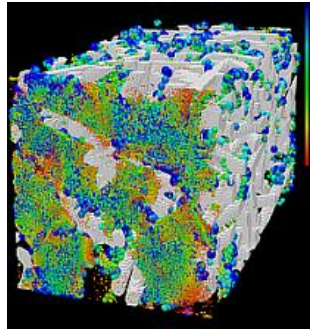
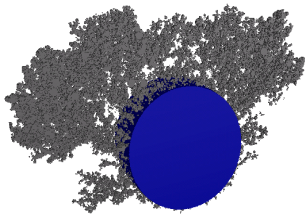
Filtration

Particles level

Filter components

Filter element

Complete system



Fiber

Media

Pleat

Element

System

Nanometer

Micrometer

Millimeter

Centimeter

Meter

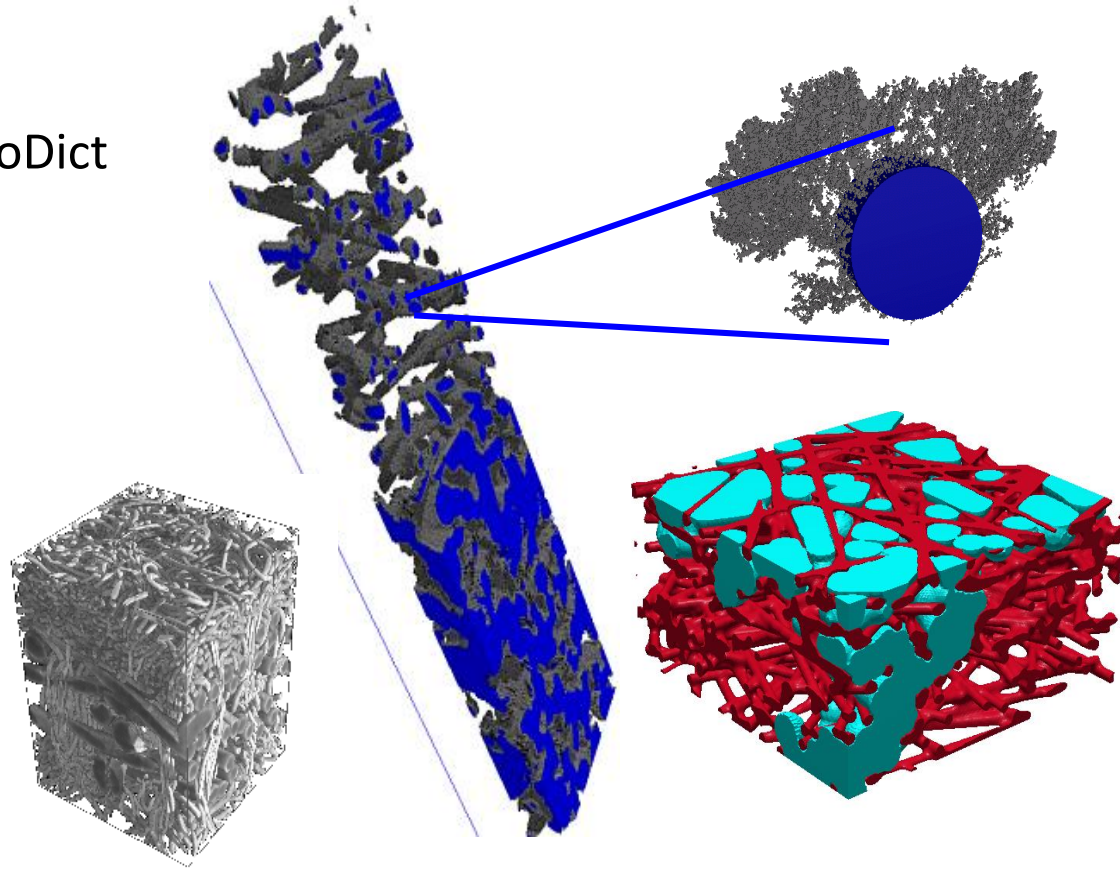
(Navier-)Stokes(-Brinkman) plus
Stochastic ODE for particles

Navier-Stokes-Brinkman plus
Concentration CDR for particles

Computer simulation of coupled microscale and macroscale
filtration and separation processes

Filtration

- Virtual 3D structure models
- Model generator + simulator GeoDict (www.geodict.com)
- Material property computation
- Material structure optimization
- FilterDict: Particle filtration
- SatuDict: saturation dependent quantities (i.e., capillarity)



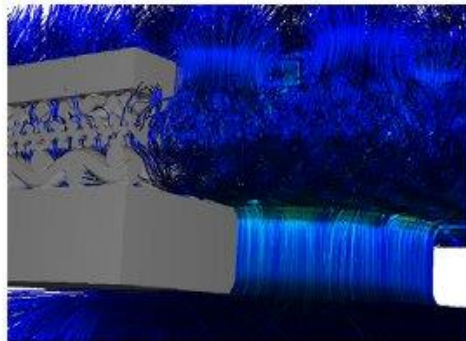
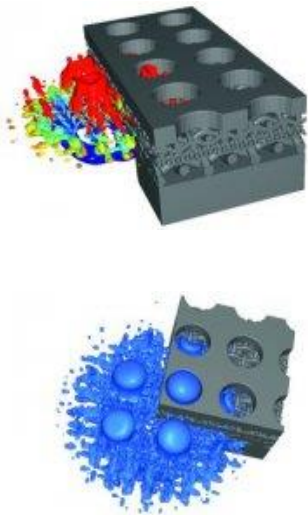
Micro-structure Simulation and Virtual Material Design

Filtration

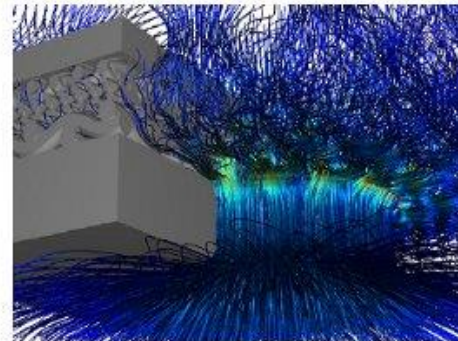
A single Sand Control Failure Event in deep water production way cost up to 30,000,000 \$¹.

Optimized Sand Control Screens can be designed by creating the layered pipe / multiple mesh / protective sheet filter virtually using WeaveGeo, GridGeo and LayerGeo; then computing the performance using FlowDict and FilterDict².

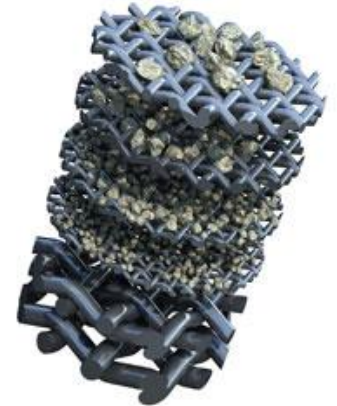
Screen cut out after adjacent holes plugged. Photo courtesy of BP.



Picture 5: 3D visualisation of the flowlines.



Picture 6: Simulation of the multilayer mesh with a reduced number of flowlines.



¹Identifying the Root Cause of a Deepwater GoM Infant Sand Control Failure, SPE 90004, 2004.

²Simulations an screens by GKD Gebrüder Kufferath, Düren.

Sand Control Screen Design with GeoDict

Multiscale Methods & Algorithms

Multi-scale modeling modeling of two-phase flow **including capillary pressure**

$$\nabla \cdot [-\lambda_t \mathbf{K} \nabla p_w] = q_t$$



$$\nabla \cdot [-\lambda_t \mathbf{K} \nabla p_w - \lambda_n \mathbf{K} \nabla p_c - (\lambda_w \rho_w + \lambda_n \rho_n) \mathbf{K} g \nabla z] = q_t$$

Outline

- Adaptive grid refinement
- Numerical upscaling. Multi-phase upscaling
- Multi-scale modeling. Generalized local model reduction

Local steady state upscaling:

$$p_C^*$$

Assumption:
local capillary
equilibrium

- Percolation
approach



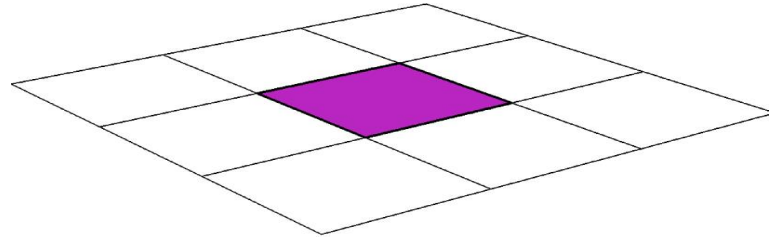
Saturation distribution

- Averaging



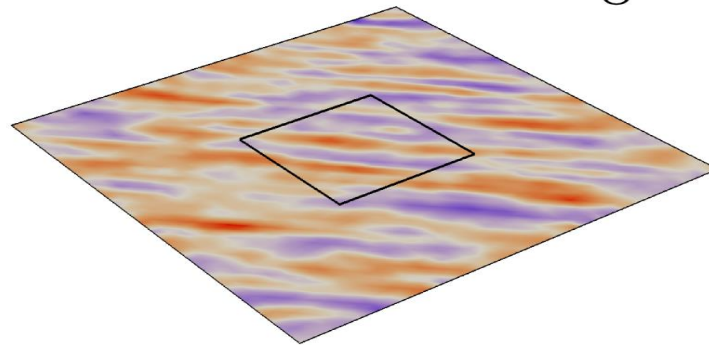
$$p_C^* = p_n^* - p_w^*$$

Capillary pressure

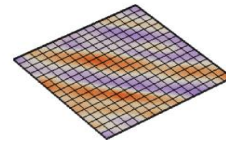


coarse scale

global model scale



fine scale



sub-model scale

Local steady state upscaling:

$$K_r^*$$

Assumption:
local capillary equilibrium

- Percolation approach



Saturation distribution

- Solve local two-phase flow problem

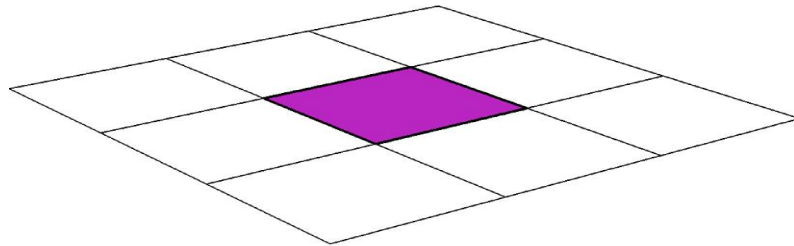


Flow field

- Averaging $K_r^* = K_{\text{tot}}^* K^{*-1}$

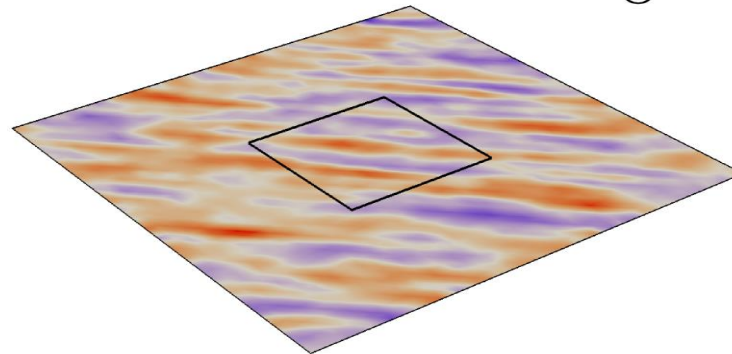


Relative permeability tensor

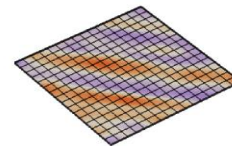


coarse scale

global model scale



fine scale

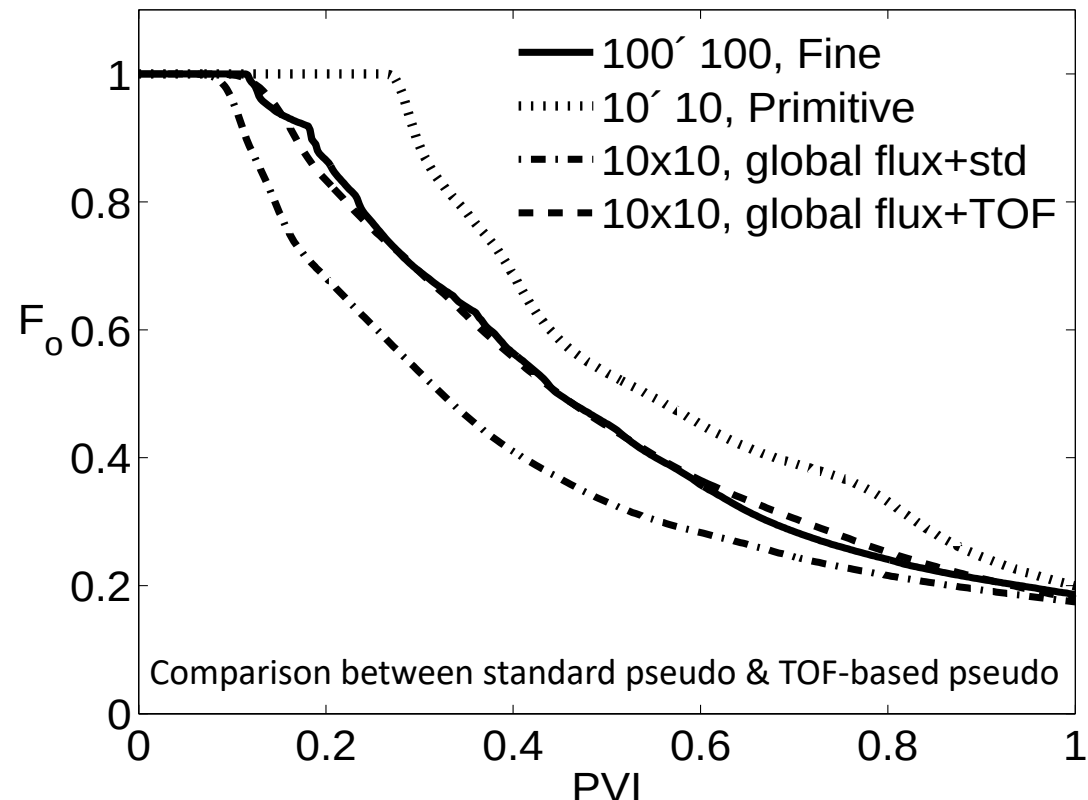
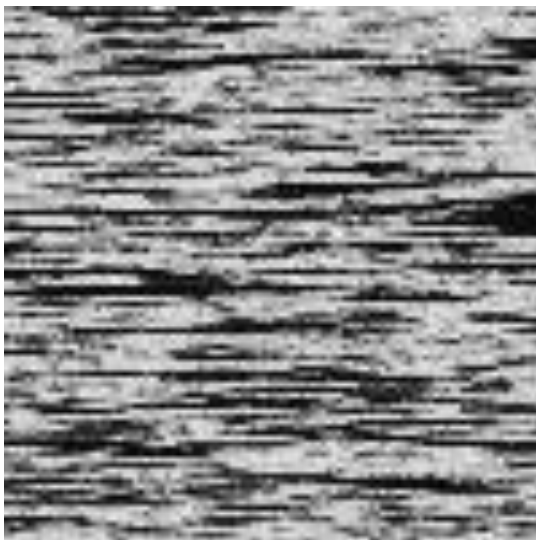


sub-model scale

Multiphase Upscaling

- Expertise in efficient computations of pseudo-relative permeabilities from geocellular models or pore-scale models
- Improved boundary conditions for pseudo-relative permeability computations of multiphase upscaling using time-of-flight (TOF) and oversampling

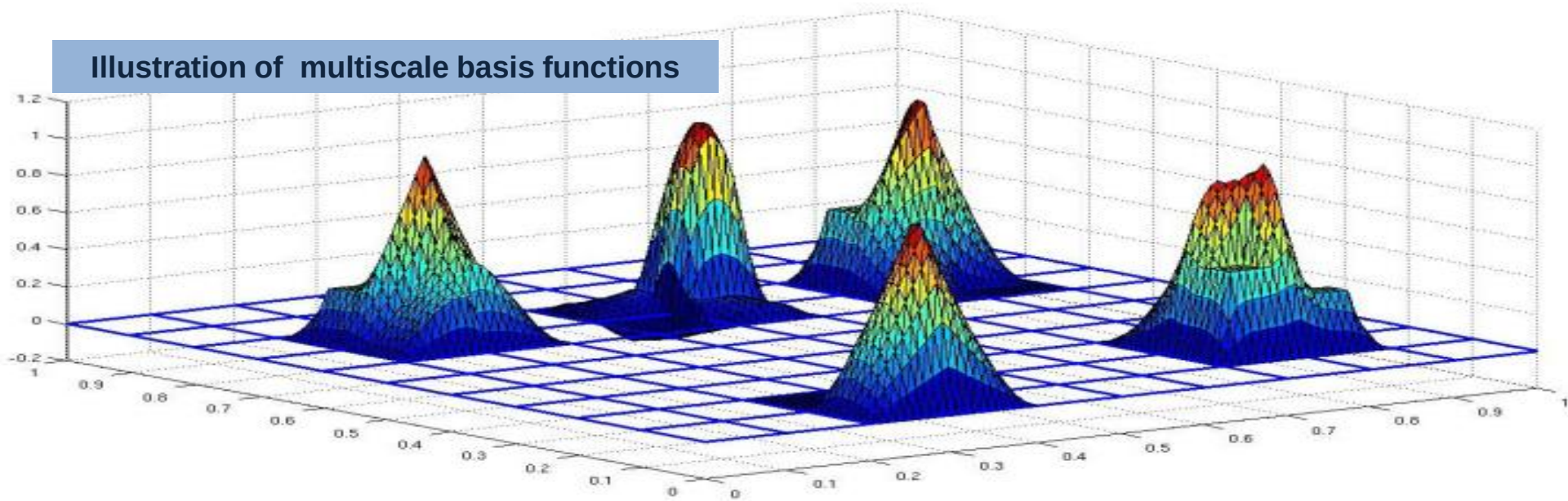
Fine model (2D cross section)



Multiscale model reduction

- Representing fine-scale features of flow and transport solution via multiscale basis functions.
- Generalizes upscaling techniques and allows systematically increasing the degrees of freedom in each coarse computational grid
- Flexible coarse gridding
- Can use single-phase solutions to improve the accuracy
- Allows incorporating the information across scales and uncertainties

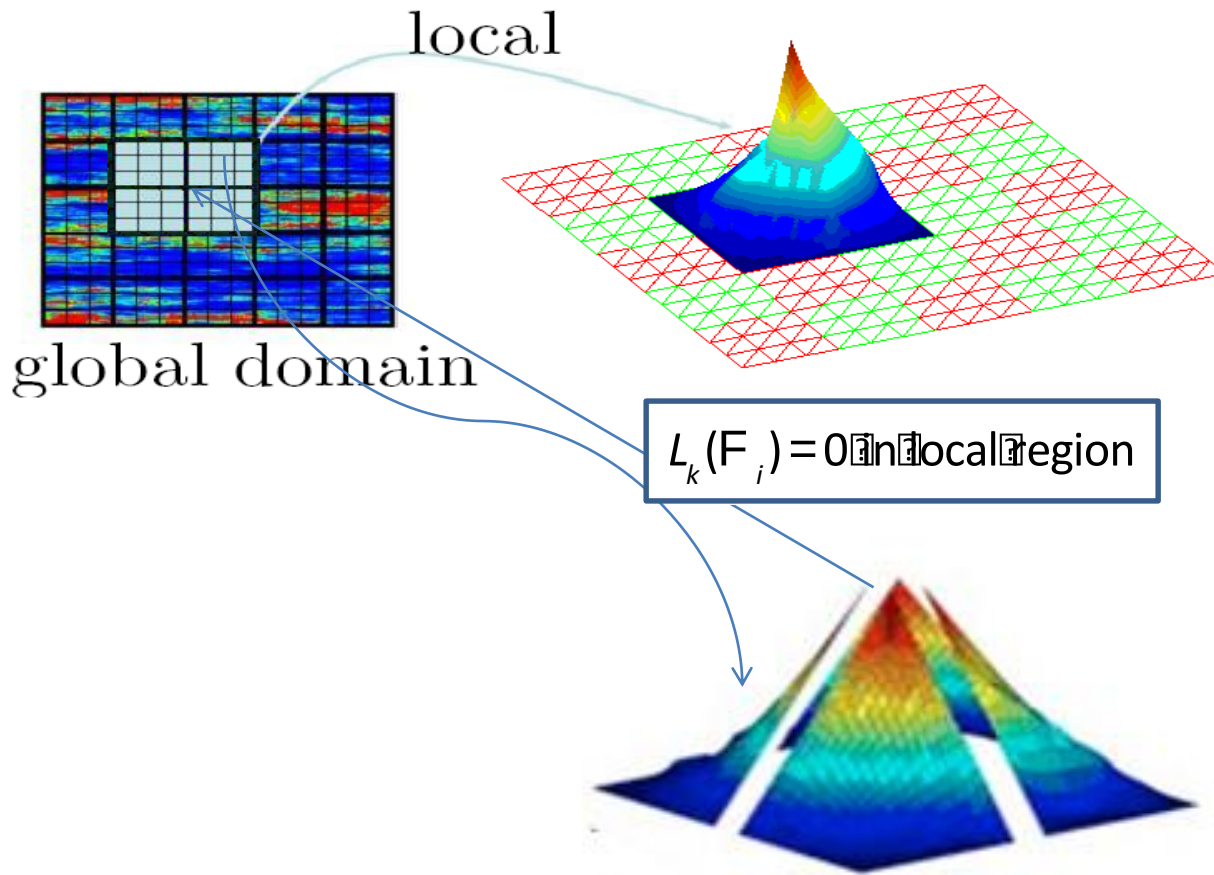
Illustration of multiscale basis functions



A simplified multiscale method

We look for a reduced approximation of fine-scale solution $u = \sum_{i=1}^{fine} u_i f_i$

as $u^* = \sum_{i=1}^{coarse} u_i^* F_i$, such that $\|u - u^*\|$ is small. Goal is to find F_i .



Application to multi-phase flow

Requirements:

- (1) retain geological realism in flow simulation;
- (2) valid for different types of subsurface heterogeneity;
- (3) applicable for varying flow scenarios (well conditions)

• Two-phase flow and transport:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{S} k \nabla p \right) = q,$$

$$S_t + \nabla \cdot \mathbf{v} f(S) = 0,$$

where $\mathbf{v} = -\frac{1}{S} k \nabla p$.

• A workflow:

Offline construct multiscale basis in each coarse grid to approximate flow field;

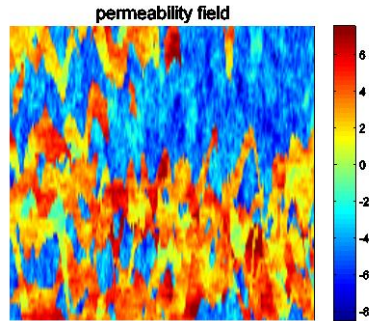
(1) solve pressure equation on a coarse grid, compute fine-scale velocity (adaptively);

(2) solve saturation equation on fine grid

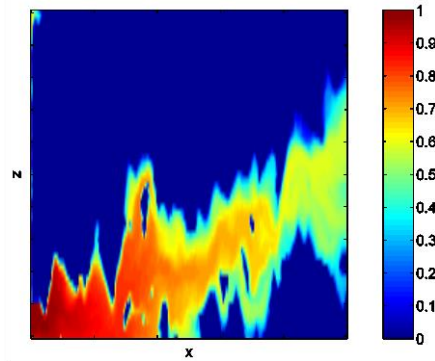
• Fully implicit construction of multiscale basis functions for the transport equation

Two-phase flow and transport

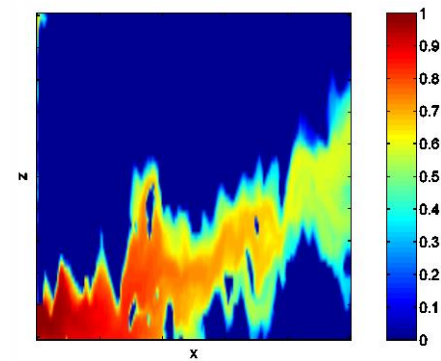
Permeability



Reference saturation

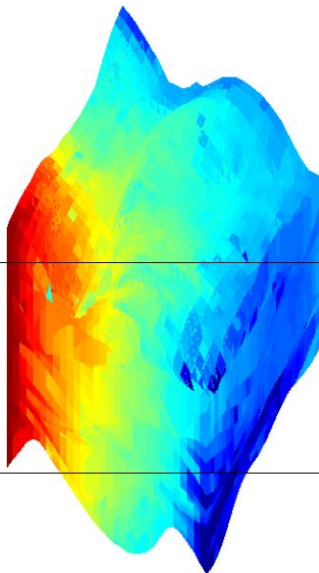


Multiscale saturation

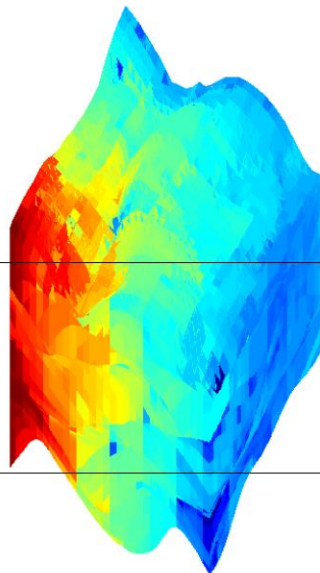


SPE 10 Example

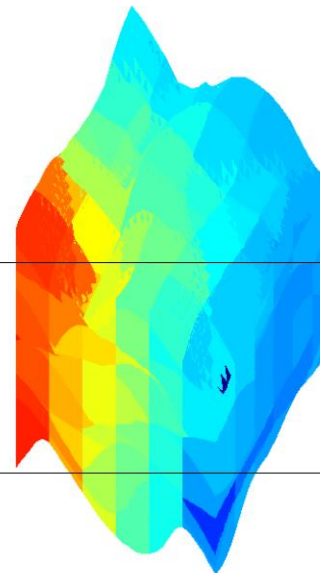
Reference Solution



Multiscale Solution

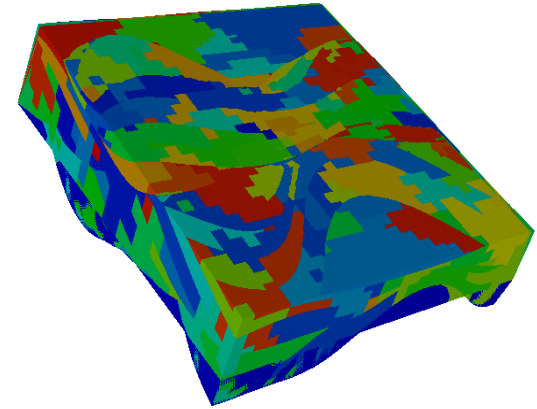
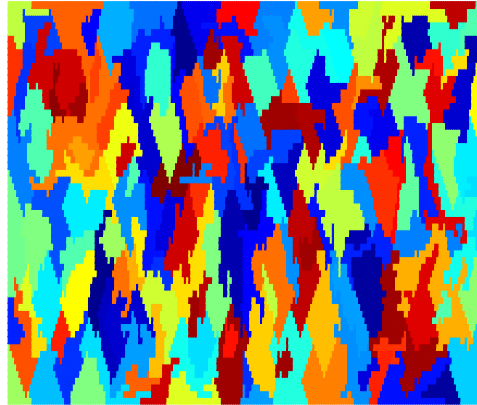


Coarse grid solution

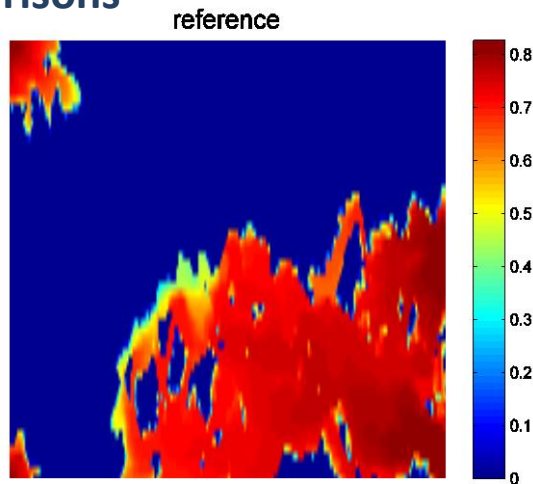


Two-phase flow and transport

Adaptive coarse gridding

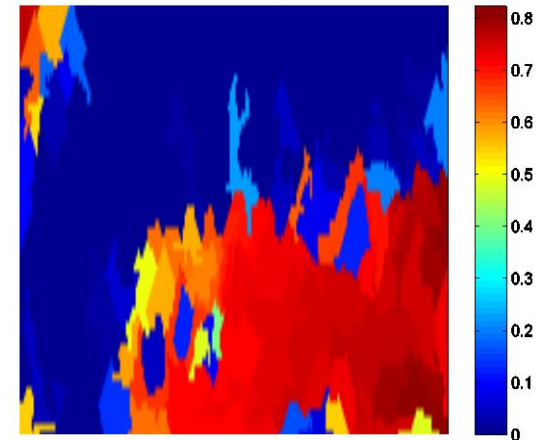


Solution comparisons



reference

multiscale saturation using unstructured grid

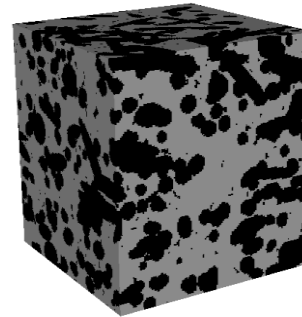
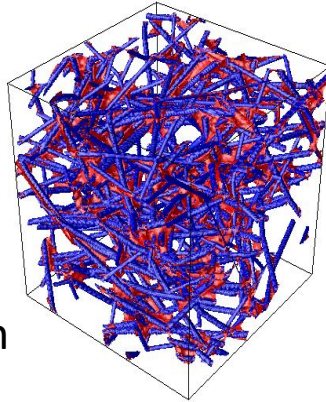
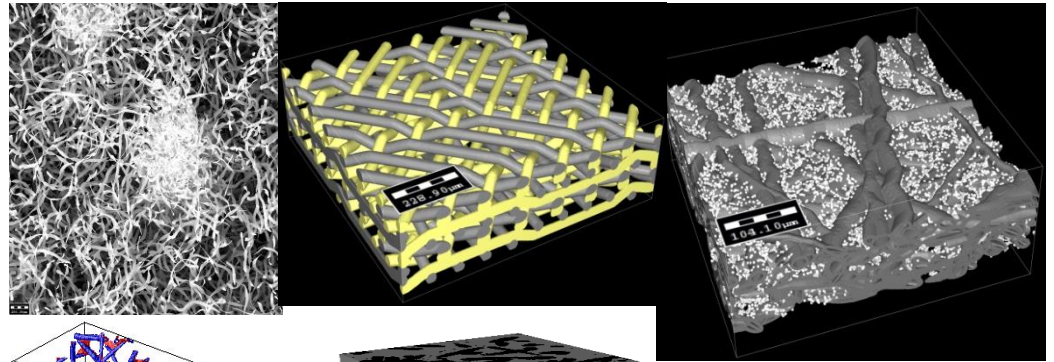


MS with adaptive grid

Porous Material Microstructures

Porous and composite material modelling & design

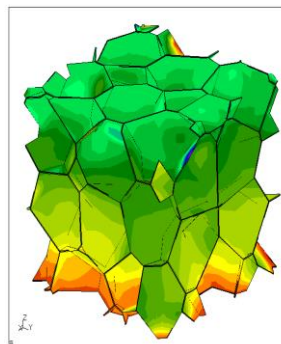
- Stone/soil microstructures
- Paper, cellulose material: capillarity
- Non-wovens (textiles): filter efficiency
- Weaves: flow resistance
- Foam: Heat or acoustic insulation material
- Sinter material: ceramics, MMC thermo-mech. behaviour
- Fibre reinforced composites: visco-elastic behavior, creep, fatigue



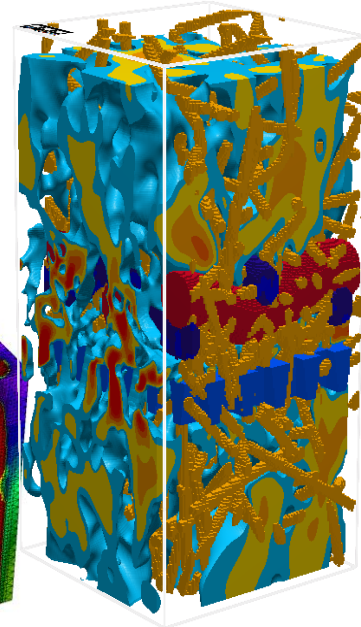
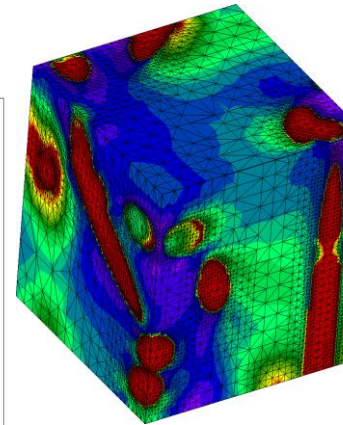
LCSP:00SP
TSP:000000
SP:000000

max: 2.68e-03
min: -2.85e-02

2.68e-03
1.20e-03
-2.85e-04
-1.78e-03
-3.26e-03
-4.75e-03
-6.24e-03
-7.72e-03
-9.21e-03
-1.07e-02
-1.22e-02
-1.37e-02
-1.52e-02
-1.66e-02
-1.81e-02
-1.96e-02
-2.11e-02
-2.26e-02
-2.41e-02
-2.56e-02
-2.71e-02
-2.85e-02



standard.visco.Frd

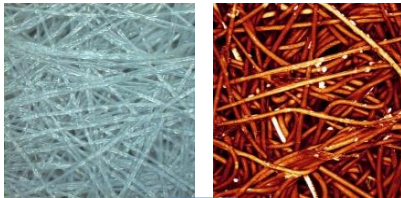


Generation of 3D porous structures (materials)

Virtual Material Design

Development of materials

Image acquisition



Change
Geometr
y

Material
Property

Experimental
verification

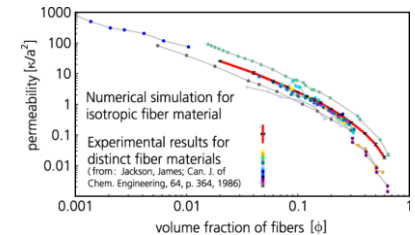
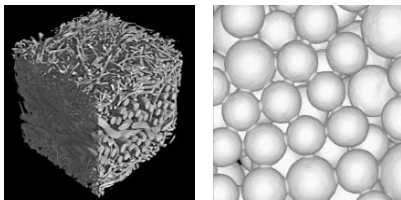
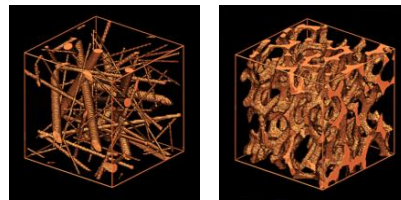


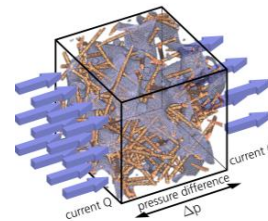
Image analysis



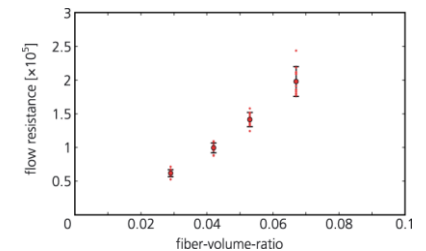
Models of
microstructures



Microstructure
simulation



Macroscopic material
parameters



Structure- Property- Relationship



Мы открыты для сотрудничества

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!