



Численное моделирование добычи и трубопроводного транспорта углеводородного сырья в условиях криолитозоны

*Васильев Василий Иванович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой
«Вычислительные технологии», главный научный сотрудник
лаборатории «Многомасштабное математическое моделирование
и компьютерные вычисления» (СВФУ)*

**Всероссийская научно-практическая конференция
«Применение математического моделирования,
цифровых технологий в сфере промышленности
Республики Саха (Якутия)»,**

Якутск, 15 декабря 2020 г.



Основные проблемы развития Арктики, Северных территорий Российской Федерации связаны с суровым климатом и наличием вечной мерзлоты, занимающем более 60% территории России, 25 % площади всей суши земного шара (35 млн. кв. км.).

Потепление климата и техногенное воздействие на природную среду приводит к деградации мерзлоты, снижению их деформационных и прочностных свойств и росту подвижности грунтов.

Данные физические процессы оказывают существенное влияние на инфраструктуру Северных территорий и, особенно, Арктических регионов.

Как примеры, следствия негативного воздействия на «вечную мерзлоту», можно указать *(на численное моделирование которых у нас есть наработки)*:

- деформацию и разрушение инженерных сооружений и зданий жилого фонда,
- смятие обсадных колонн газодобывающих и нефтедобывающих скважин,
- деформацию и разрыв трубопроводов,
- деформацию покрытия автомобильных и железных дорог, разрушение опор трубопроводов,
- разрушение плотин хранилищ бытовых отходов и хвостохранилищ,
- аварии систем подземных горных выработок,
- падение опор линий электропередачи и т.д.

Последствия деградации «вечной мерзлоты»

- деградация «вечной мерзлоты» дна северных рек и морей, когда исчезают целые острова и меняется рельеф дна, что приводит к проблемам при навигации по Северному морскому пути и северным рекам,
- участились подтопления городов, сел и долин при весеннем ледоходе и при длительных сезонных дождях, да и массовой вырубке лесных массивов, лесных пожаров.

Добыча, транспорт и хранение углеводородов

Арктические территории все интенсивнее вовлекаются в сферу деятельности нефтегазового комплекса. На этих территориях имеются значительные запасы углеводородов.

- арктическая зона Российской Федерации обеспечивает добычу более **80%** горючего природного газа и **17%** нефти (включая газовый конденсат) страны,
- континентальный шельф Российской Федерации в Арктике, по оценкам экспертов, содержит **85,1** трлн куб. м. горючего природного газа, **17,3** млрд тонн нефти (включая газовый конденсат) и является стратегическим резервом развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации.



Большое влияние на добычу углеводородного сырья оказывает образование газовых гидратов в призабойных зонах добывающих скважин и в системах их трубопроводного транспорта.

Взаимодействие гидратов и мерзлоты в приповерхностных слоях хорошо известно общественности и выразилось в виде образования кратеров и выбросов грунта на полуострове Ямал.

Предварительные оценки «Газпром ВНИИГАЗ» указывают на наличие в стране ресурсов газогидратов в 1 100 трлн. куб. м. – при появлении соответствующей технологии они ждут разработку.



Прикладные математические модели относятся к классу многофизичных: необходимо исследовать взаимосвязанные проблемы тепло- и массопереноса в деформируемых сильно гетерогенных грунтах (коллекторах) с учетом фазовых переходов (газовые гидраты).

Физические процессы имеют разные масштабы по пространству и по времени. Нужно учитывать неоднородности на малых размерах при моделировании на больших расстояниях, сами процессы идут с различной скоростью.

На практике сложные процессы, как правило, аппроксимируются с помощью упрощенных дискретных моделей. Точность их прогнозирования в значительной степени зависит от степени упрощения модели, вычислительной точности, оценки неопределенностей и так далее. Например, при рассмотрении процессов течения жидкости в неоднородной пористой среде речь идет о:

- пространственно-временном разрешении физических моделей,
- реалистичном представлении неоднородности (например, геометрия пор, крупномасштабные особенности),
- неопределенности, связанной с этими процессами в разных масштабах являются факторами, влияющими на общую точность моделирования.



Настоящий этап развития численных методов решения прикладных задач характеризуется высоким уровнем исследований для базовых задач математической физики, для монофизичных проблем.

Ключевая проблема состоит в том, чтобы на этой базе строить эффективные вычислительные алгоритмы связанных многофизичных многомасштабных проблем и создавать прикладное программное обеспечение для современных высокопроизводительных вычислительных систем параллельной архитектуры.

Фундаментальная значимость наших исследований обеспечивается разработкой методологически единой вычислительной стратегии декомпозиции-композиции общей задачи на более простые отдельные подзадачи для исследования современных 3М (*многомерность, многомасштабность, мультифизичность*) математических моделей.

Проводится синтез многофизичной модели на основе анализ набора монофизичных моделей, задача на макроуровне базируется на основе набора задач на микроуровне, организуются распределенные вычисления на отдельных процессорах для численного решения многомерных задач для связанных нелинейных систем дифференциальных уравнений с частными производными.

Коллектив лаборатории имеет хороший задел в области математического моделирования многомасштабных многофазных систем, включающей в себя формулировки:

- новых математических моделей физических процессов и их численной реализации,
- многомасштабных моделей пониженного порядка,
- машинного обучения,
- передовых дискретизаций,
- разработки программного обеспечения.

Отдельные сотрудники лаборатории имеют опыт работы с индустриальными партнерами: РУСАЛ, Алроса, предприятиями нефтегазового и строительного комплексов страны, Якутскэнерго и др.

**Имеем установившиеся научные связи с ведущими
российскими математическими школами:**

- Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова;
- Санкт-Петербургского государственного университета;
- Московского государственного технического университет им. Н.Э.Баумана;
- Московского физико-технического университета;
- Дальневосточного федерального университета;
- Южного федерального университета;
- Северо-Кавказского федерального университета;
- Санкт-Петербургского политехнического университета;

- Математического института РАН им. В.А.Стеклова;
- Института прикладной математики РАН им. М.В.Келдыша;
- Института проблем механики РАН им. А.Ю.Ишлинского;
- Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН;
- Вычислительной математики РАН им. Г.И.Марчука;
- Института прикладной механики РАН им. И.Ф.Образцова;
- Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
- Института системного программирования РАН им. В.П.Иванникова.

Международные научные связи:

- Техасским агротехническим университетом (TA&MU, США),
- Китайским университетом Гонконга (CUHK (Гонконг),
- Институтом индустриальной математики (Fraunhofer ITWM, Кайзерслаутерн, Германия),
- Сеульским национальным университетом (SNU, Республика Корея),
- Сяньтанским университетом (КНР),
- Университетом Хецзе (КНР).



Награды и гранты в последние годы:

- Ялчин Эфендиев – Почетный профессор СВФУ (2019), действительным членом Общества промышленной и прикладной математики (*SIAM, 2018*)
- Васильев В.И. – Орден Дружбы (*2019*), Адъюнкт-профессор Университета Хезце (*КНР, 2019*)
- Мегагрант Правительства РФ – профессор ТА&МУ Я.Эфендиев
- 5 грантов РФФИ: Васильева М., Григорьев А., Васильев В.И., Васильев А., Степанов С. (*2017-2020, из них 4 молодые ученые*)
- Государственная Премия РС(Я) для **молодых ученых** им. акад. В.П. Ларионова – Колесов Саша, Сивцев Петя, Степанов Сережа (*2019*)
- Гранты РФФИ – 10 (*из них 6 грантов выиграли аспиранты*)
- Гранты Президента РФ – 2 (*Васильева Маша, Колесов Саша*)
- Стипендий Президента РФ – 7 (*аспиранты и молодые ученые*)

Наши предложения Правительству РС(Я):

- По приоритетным направлениям развития республики изучить возможность создания национальных лабораторий из числа достигнувших высокие показатели научной деятельности научных коллективов, не имеющих бюджетное финансирование *(например, как в США, Великобритании, КНР)*.
- Разработать механизмы привлечения средств промышленных предприятий, работающих на территории республики, для финансирования фундаментальных и прикладных научно-исследовательских работ, направленных на решение актуальных задач стоящих перед ними *(для индустриальных партнеров готовы создавать программные коды, пригодные для решения их актуальных наукоемких задач производства, создания инфраструктуры и задач управления предприятиями методами математического моделирования, искусственного интеллекта)*.
- Рассмотреть возможность софинансирования из бюджета Республики Саха (Якутия) ученых и коллективов ученых республики, выигравших престижных российских гранты (МОН РФ, РНФ, РФФИ) в размере сопоставимом финансированию полученных грантов.

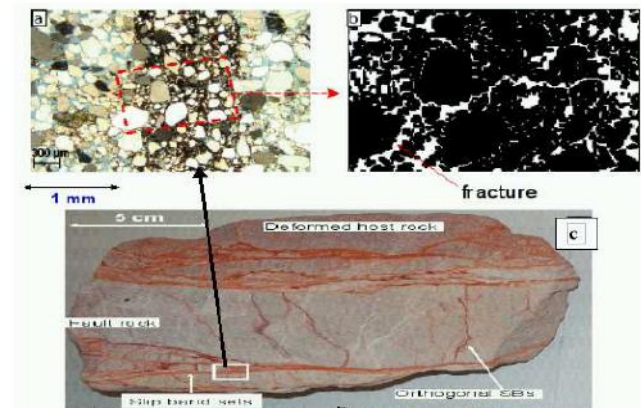


**Теоретические задел коллектива
по многомасштабному математическому
моделированию неизотермических
процессов разработки углеводородного
сырья и геотермальных источников в
высокорейтинговых научных журналах мира
(свыше 70 статей)**

Многомасштабные методы для пористых сред

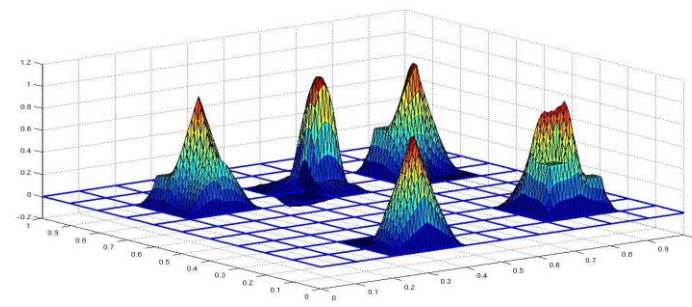
Апскэйлинг и гомогенизация

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



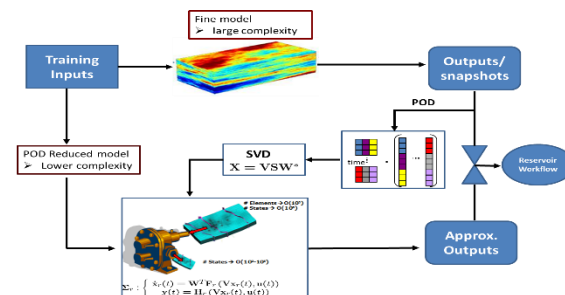
Многомасштабные методы

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



Методы декомпозиции для мультифизики

- Схемы расщепления
- Приложения



Многомасштабное моделирование ненасыщенной фильтрации

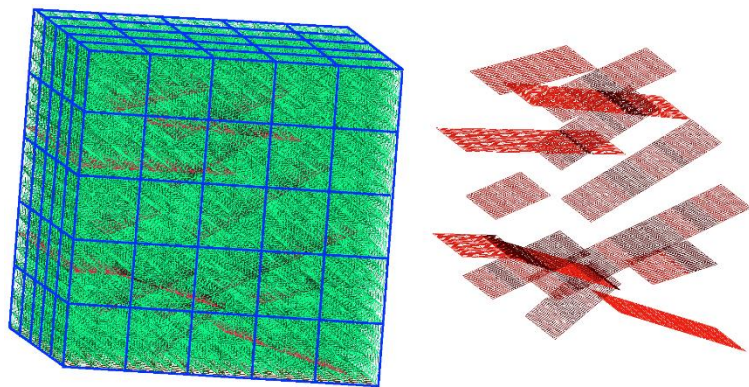


Спиридонов Д.А.

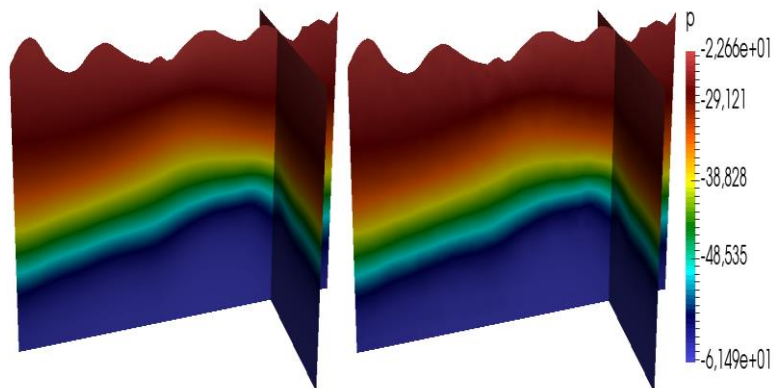
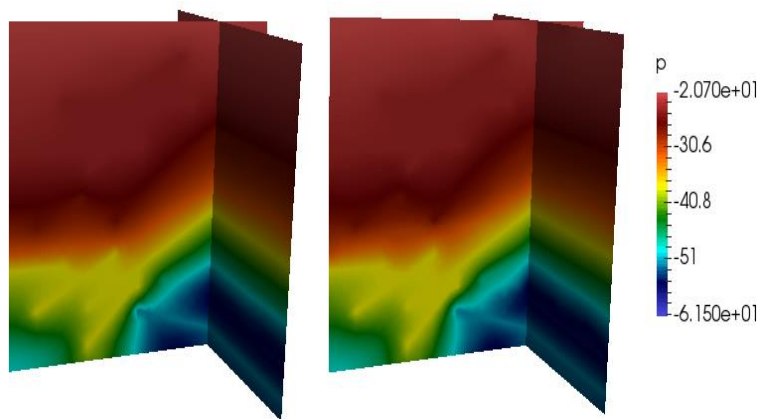


Эфендиев Я.

- 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

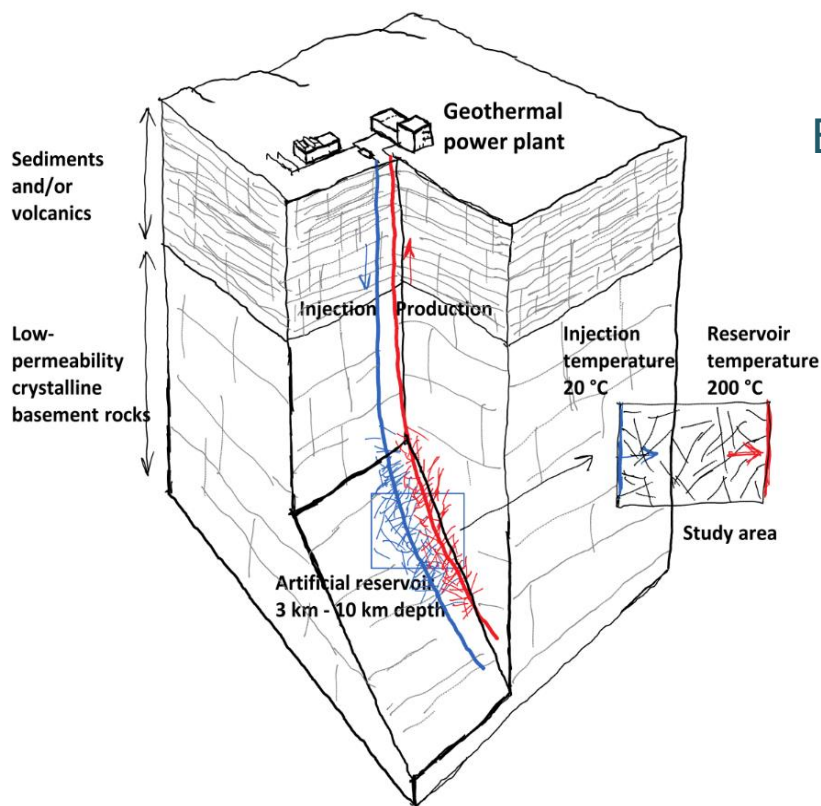
Многомасштабная поромеханика в мультиконтинуумных средах



Васильева М.В.

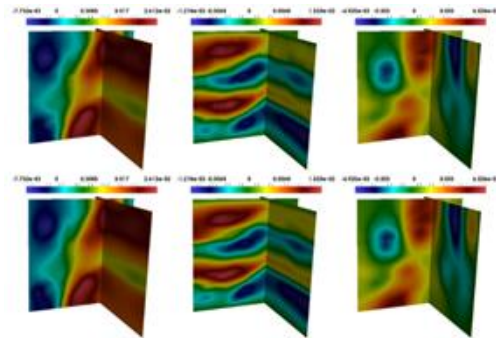
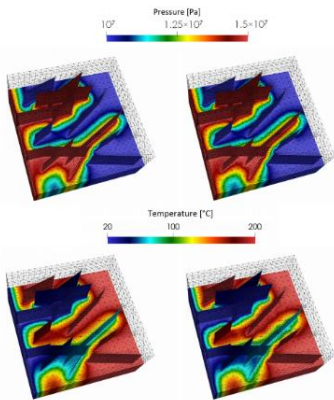
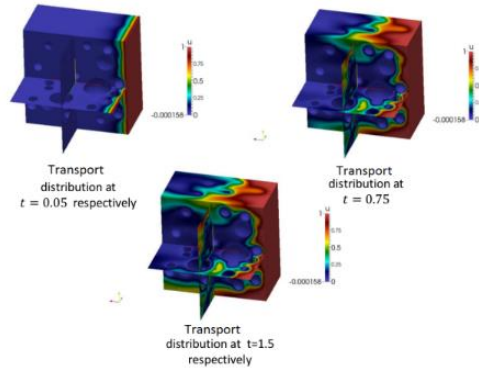
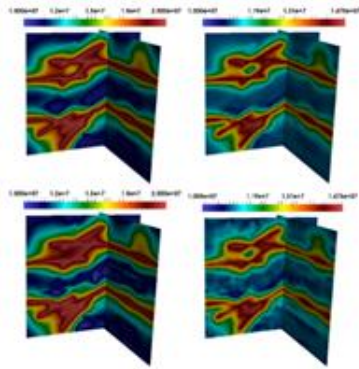


Эфендиев Я.



- Многомасштабное моделирование задач фильтрации
- Многомасштабная модель расширенных геотермальных систем
- Многомасштабное моделирование задач пороупругости
- 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

Многомасштабное моделирование течения и переноса



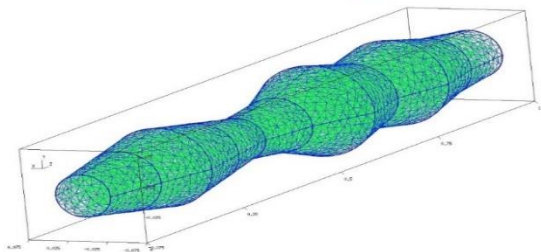
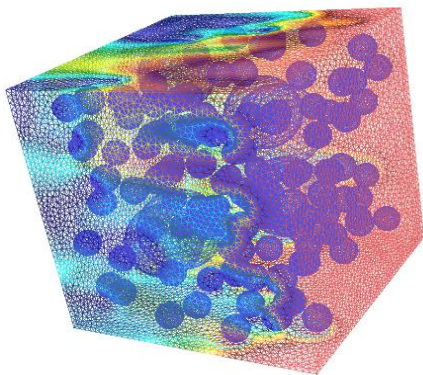
Алексеев В.Н.



Калачикова У.С.

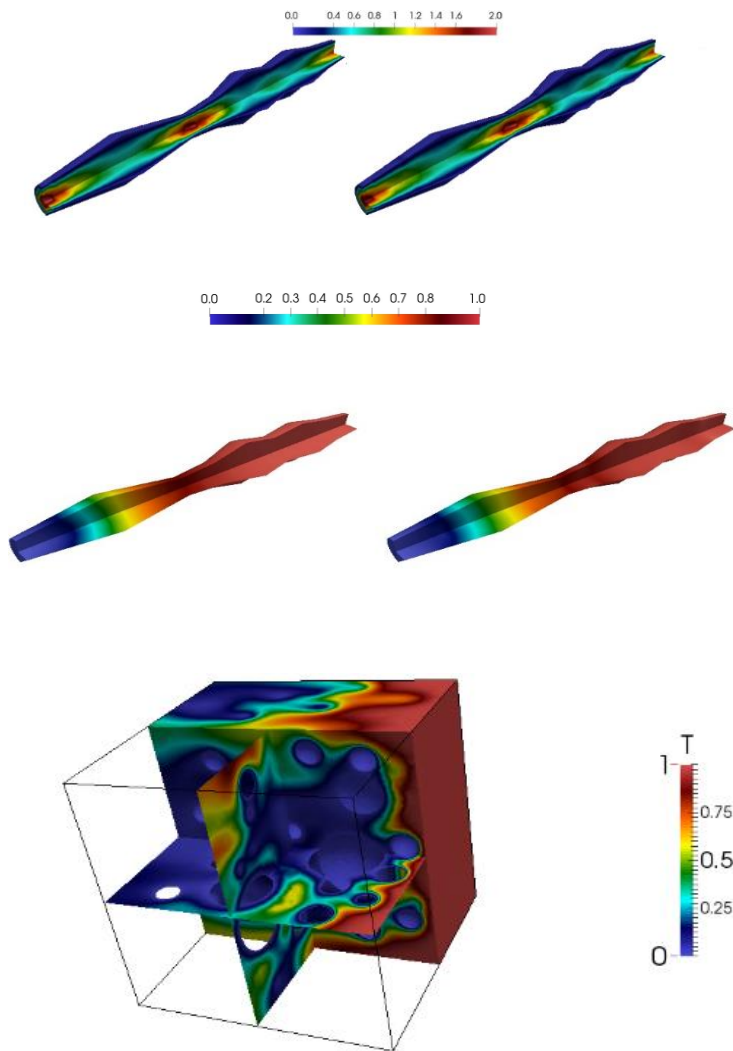


Васильева М.В.



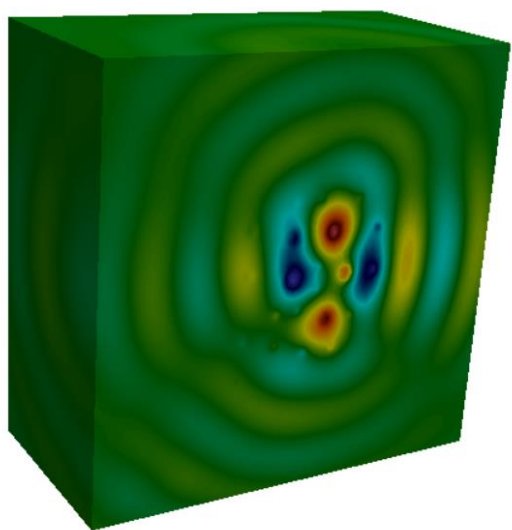
- Комплексная 3D геометрия (1) в тонких областях; (2) перфорированных областях
- Приложения в добыче нефти и газа, теплообменниках, геотермальных месторождениях
- Различные типы неоднородных свойств
- Использование многомасштабных методов для быстрых и точных вычислений
- Экономия оперативной памяти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

Моделирование распространения волн в неоднородных средах



Васильева М.В.

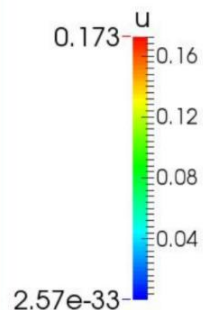
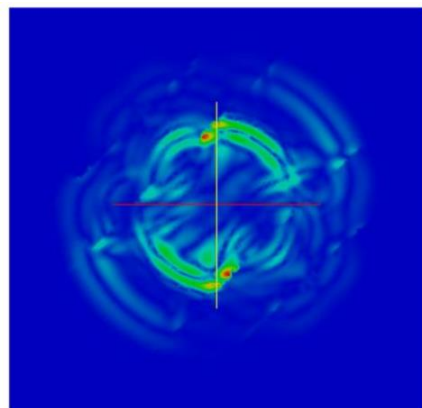


Калачикова У.С.

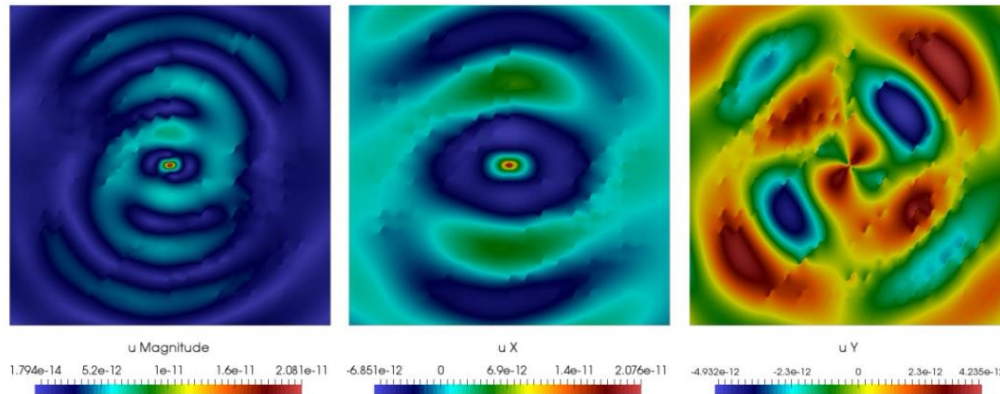
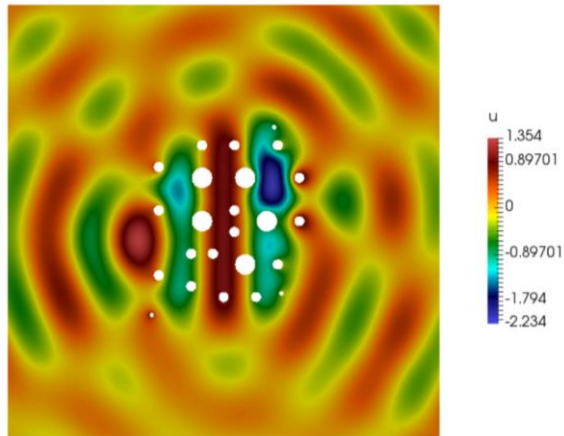


Алексеев В.Н.

- 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.



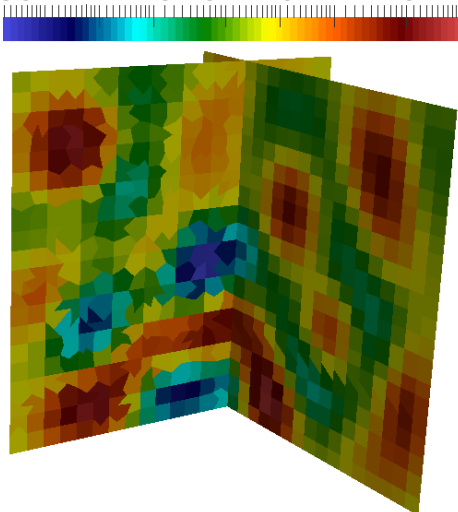
Моделирование распространения волн в неоднородных средах



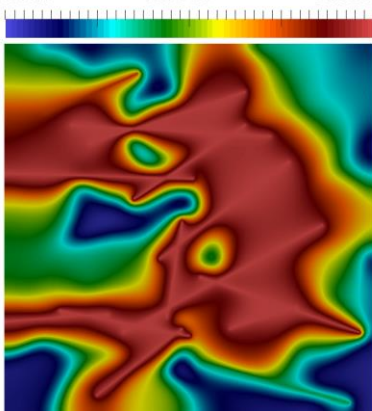
- Построение многомасштабных базисных функций для решения задач
- Модель линейного скольжения для трещиноватых сред
- Применение разрывного метода Галеркина для эффективного численного моделирования
- Адаптивность базисных функций к сложности задач

Многомасштабное моделирование потока жидкости и механики грунтов

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



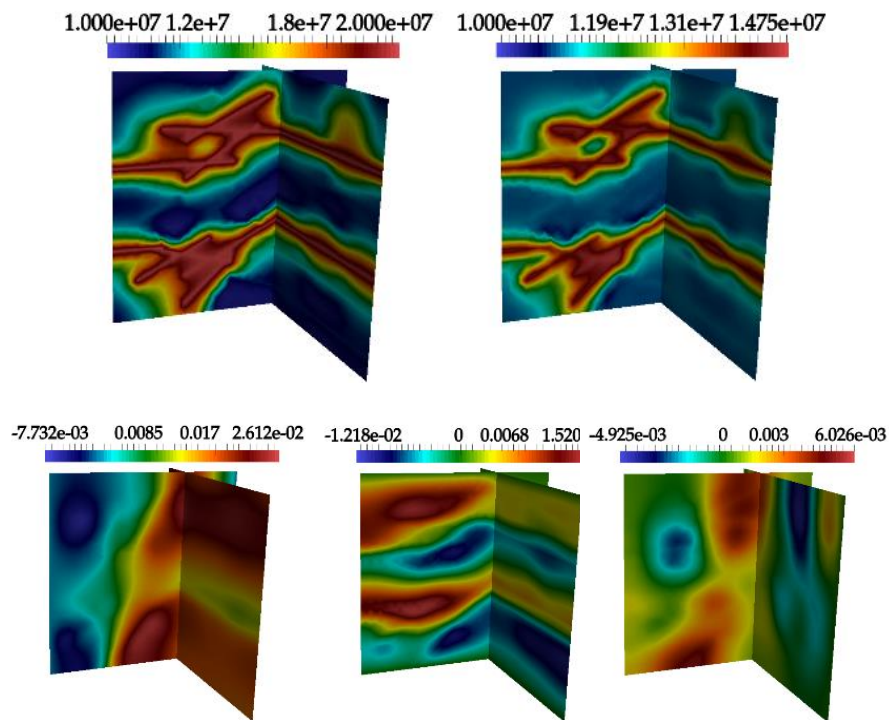
1.000e+07 1.5e+7 2.000e+07



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)

Многомасштабное моделирование потока жидкости и механики грунтов



Распределения давлений и перемещений
по направлениям X, Y, Z

- 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



**Краткая справка о
Международной лаборатории
«Многомасштабное математическое
моделирование и компьютерные
вычисления»**



Цель и состав лаборатории

Целью научных исследований лаборатории является проведение фундаментальных научных исследований по математическому моделированию, вычислительной математике.

Заложили фундамент для проведения прикладных разработок – прошли государственную регистрацию 14 программ на ЭВМ, в том числе параллельной архитектуры, пригодные для численного моделирования:

- современных технологий разработки углеводородного сырья,
- термомеханического взаимодействия инженерных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами и горными породами.

В лаборатории работают профессора ведущих университетов мира – Ялчин Эфендиев (США), Райчо Лазаров (США), Эрик Чун (Гонконг), Олег Илиев (Германия), Петр Вабищевич (Москва); ведущие исследователи ИМИ – Лазарев Н.П., Антонов М.Ю.; 11 молодых кандидатов наук, 9 аспирантов, 5 магистрантов.

Основатели лаборатории



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



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



Эфендиев Ялчин, Ph.D.
Руководит Мегагрантом

Профессора Васильев В.И. и Вабищевич П.Н. в 1997 г. начали работу по созданию коллектива перспективных молодых ребят – костяк якутской школы по математическому моделированию. С 1997 по 2015 годы проводили в Якутске и Линьи (Китай) школы-семинары молодых ученых и студентов с приглашением ведущих математиков страны и мира в качестве лекторов, проводили исследования с участием молодых ученых на средства выигранных грантов ФЦП «Интеграция», МОПО РФ, МОН РФ, РФФИ и СВФУ. Профессор Ялчин Эфендиев – математик с мировым именем в 2016 году выиграл Мегагрант Правительства РФ, на его базе создана Лаборатория.

Показатели Лаборатории

Наименование показателя	2017	2018	2019	2020
Статьи				
Web of Science	27	18	43	27
Scopus (без дублирования WoS)	24	15	20	8
Список журналов ВАК РФ	16	5	9	5
Доклады на Международных конференциях	50	75	100	28
Зарегистрированные программы на ЭВМ	3	4	6	1(2)
Монографии и учебные пособия	3	-	4	(1)
Гранты				
Мегагрант Правительства РФ	1	1	1	1
Российский научный фонд	2	2	4	3
Российский фонд фундаментальных исследований	2	2	10	3
Грант Президента РФ	1	-	-	1
Хоздоговора	2	1	1	-
Основные исполнители гранта РНФ ИВММГ СО РАН	3	2	2	-
Стипендия Президента РФ	-	3	3	4
Участники				
Доктора физико-математических наук и phd	6	6	6	6
Кандидаты физико-математических наук	10	10	11	11
Аспиранты	9	10	11	11
Магистранты	5	5	5	5
Защита диссертаций на соискание к.ф.-м.н.	1	2	2	(1)
Постдокторантура в ведущих университетах мира	2	2	1	1
Стажировки в ведущих университетах мира	8	8	10	-
Организованы Международные конференции	1	2	3	1

Математические конференции

Приглашенные

РФ/ города	Иностр /стран ы	Д.н.	Phd	К.н.	Аспир.	Молодые	Всего
---------------	-----------------------	------	-----	------	--------	---------	-------

I Международная конференция «Суперкомпьютерные технологии математического моделирования», 2011, Якутск, СВФУ, 28.11 – 30.11

33/7	4/5	23	4	40	7	50	95
------	-----	----	---	----	---	----	----

II Международная конференция «Суперкомпьютерные технологии математического моделирования», 2013, Якутск, СВФУ, 8.07 – 11.07

35/8	19/7	31	15	25	10	60	131
------	------	----	----	----	----	----	-----

III Международная конференция «Суперкомпьютерные технологии математического моделирования», 2016, Москва, МИ РАН, 27.06 – 1.07

16/5	4/4	21	4	28	10	50	82
------	-----	----	---	----	----	----	----

IV Международная конференция «Суперкомпьютерные технологии математического моделирования», 2019, Москва, МИ РАН, 21.06-23.06

30/7	6/5	49	6	55	25	60	155
------	-----	----	---	----	----	----	-----



Церемония открытия Центра вычислительных технологий



Церемония открытия



Приветственное слово Ректора СВФУ Михайловой Е.И.



Philippe Trautmann, директор по развитию бизнеса HPC (Париж, Франция)



Член-корр. Шайдулов В.В. (Красноярск)



Академик Левин В.А. (Москва)



Академик Куликовский А.Г. (Москва)



Член-корр. Кабанихин С.И. (Москва)



Участники конференции



Участники конференции



Восхождение участников международной конференции на Левские столбы



Профессор Carstensen Carsten (Берлин)



Лучший НЭО, HP (Москва)



Член-корр. Медведь О.Э. (Москва)



Участники конференции



Академик
Кононов А.Н. (Новосибирск)



Профессор Вабищевич П.Н.
(Москва)



Профессор Васильев В.И. (Якутск)

Приглашенные

РФ/ города	Иностр/ страны	Д.н.	Phd	К.н.	Аспир.	Молодые	Всего
---------------	-------------------	------	-----	------	--------	---------	-------

I Международная конференция «Многомасштабные методы и высокопроизводительные научные вычисления», 2017, Якутск, СВФУ, 30.07-04.08

10/10	12/10	11	12	8	17	32	54
-------	-------	----	----	---	----	----	----



II Международная конференция «Многомасштабные методы и высокопроизводительные научные вычисления», 2018, Москва, ИВМ РАН, 15.08-17.08

12/3	12/12	5	12	17	4	19	43
------	-------	---	----	----	---	----	----



III Международная конференция «Многомасштабные методы и высокопроизводительные научные вычисления», 2019, Владивосток, ДВФУ, 7.10.-11.10

8/4	12/10	15	9	12	7	31	53
-----	-------	----	---	----	---	----	----

IV Международная конференция «Многомасштабные методы и высокопроизводительные научные вычисления», 2020, Сочи, 8.9.-13.10

16/3	1/1	11	1	7	8	13	29
------	-----	----	---	---	---	----	----



Приглашенные

РФ/ города	Иностр /стран ы	Д.н.	Phd	К.н.	Аспир.	Молодые	Всего
---------------	-----------------------	------	-----	------	--------	---------	-------

I Международная конференция «Многомасштабные и высокопроизводительные вычисления для мультифизичных задач», 2018, Якутск, СВФУ, 8.08-10.08

3/2	7/6	3	7	9	9	19	28
-----	-----	---	---	---	---	----	----

II Международная конференция «Многомасштабные и высокопроизводительные вычисления для мультифизичных задач», 2019, Якутск, СВФУ, 24.07-25.07

2/2	6/5	2	5	8	12	20	27
-----	-----	---	---	---	----	----	----







БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!

Васильев Василий Иванович:

vasvasil@mail.ru