

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИВМиМГ СО РАН ЗА 2022 г.

Новый подход к устранению сингулярности в вычислительных моделях фильтрации жидкости в трещиновато-пористых средах

Иванов М. И., к.ф.-м.н. Кремер И. А., д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

Одной из важных задач вычислительного моделирования нефтяных месторождений является разработка модели вытеснения нефти водой в трещиновато-пористых пластах. В случае задания расходов воды и нефти на нагнетательных и эксплуатационных скважинах в математической формулировке задачи в каждый момент времени возникает сингулярность, приводящая к неоднозначному определению давления.

Для модели двойной пористости нами разработан подход, не требующий наложения дополнительных условий, приводящих к однозначности давления. В основе подхода лежит расширенная обобщенная формулировка системы законов сохранения массы и импульса, использующая специальный дополнительный функционал. При этом в виде набора теорем даны ответы на вопросы о размерности ядра оператора исходной задачи и ее однозначной разрешимости в подпространстве, о корректности расширенной формулировки, эквивалентности исходной и расширенной формулировок, однозначной разрешимости сеточной задачи, построенной смешанным методом конечных элементов. Данная методика является составной частью модели нестационарного процесса, численные результаты для которого приведены на рис. 1.

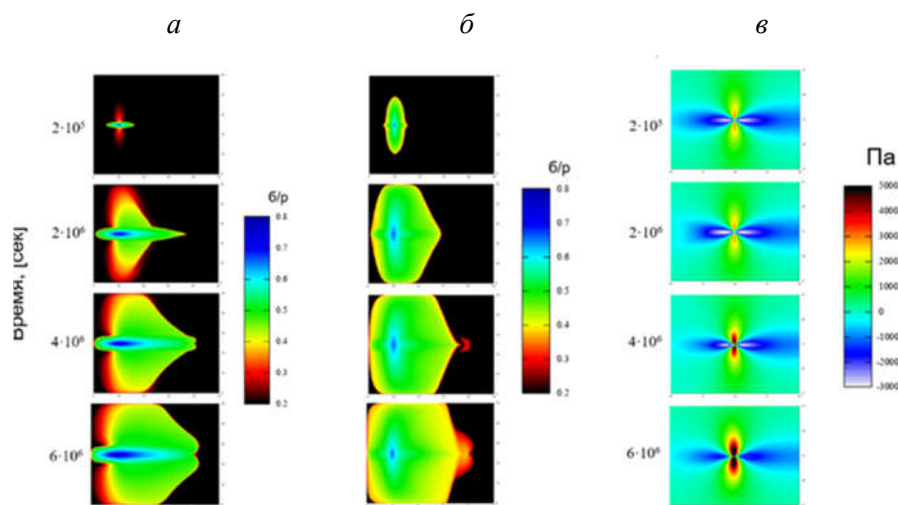


Рис. 1: Вытеснение нефти водой в анизотропной двухпористой среде с заданными дебитами скважин:

a – водонасыщенность в порах; *б* – водонасыщенность в трещинах;
в – разность давлений в порах и в трещинах в окрестности эксплуатационной скважины в различные моменты времени

Синтез, маршрутизация и параллельная оптимизация семейств циркулянтных сетей

К.т.н. Монахов О. Г., к.т.н. Монахова Э. А.

Для сетей на кристалле с топологией оптимальных циркулянтных сетей степени четыре разработаны новые эффективные алгоритмы маршрутизации константной сложности, позволяющие сократить время работы и требуемую память по сравнению с известными алгоритмами. Проведено экспериментальное исследование новых алгоритмов маршрутизации, получены оценки требуемых ресурсов при их реализации в СБИС (совместно с НИУ ВШЭ).

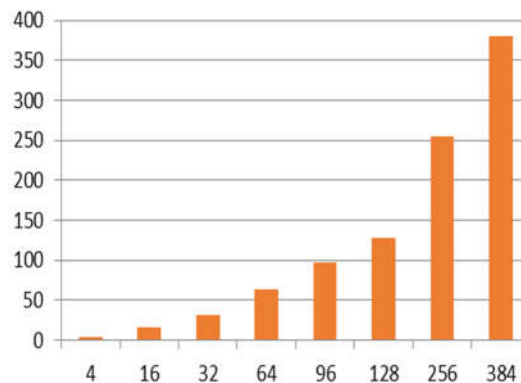
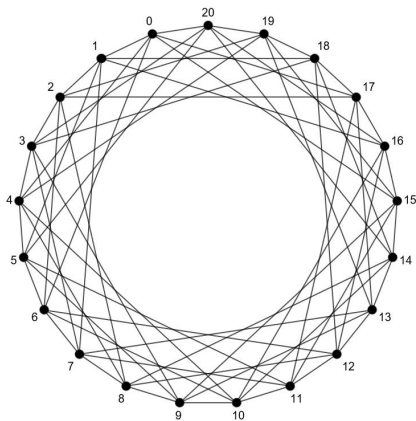


Рис. 2. Пример циркулянтной сети

Рис. 3. Ускорение для числа ядер кластера Kunpeng

Построена новая серия семейств циркулянтных сетей степени шесть с общими структурными и коммуникационными свойствами как масштабируемая топология сетей на кристалле. На рис. 2 показан пример циркулянтной сети новой серии. Разработан параллельный генетический алгоритм, основанный на MPI модели, для оптимизации больших циркулянтных сетей (с числом узлов до 300 тыс.). Получены линейное ускорение для параллельной программы и оценки эффективности (0,99) на кластере Kunpeng Сибирского Суперкомпьютерного Центра ИВМиМГ СО РАН. На рис. 3 показано ускорение работы алгоритма в зависимости от числа вычислительных ядер кластера Kunpeng. Найдены циркулянтные сети с меньшей средней задержкой и большей пропускной способностью, чем известные в литературе.

Цифровая система моделирования и построения сценариев распространения COVID-19 в регионах Российской Федерации.

К.ф.-м.н. Криворотько О. И., к.т.н. Зятьков Н. Ю., чл.-корр. РАН Кабанихин С. И.

Разработана цифровая система моделирования и построения сценариев распространения COVID-19 в регионах Российской Федерации (рис. 4) на основе совмещения дифференциального и агентного подходов, включающая:

- автоматический сбор, обработку, анализ и визуализацию эпидемиологических временных данных (выявленные случаи заболевания, госпитализированные, критические, умершие, протестированные в зависимости от возраста), основных пассажиропотоков, полученных в ходе комплексного синтаксического анализа в период с 2019 по 2022 гг.;
- идентификацию менее чувствительных эпидемиологических параметров на основе решения обратных задач для дифференциальных моделей, описываемых системами обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений "реакции-диффузии" (в случае достаточного количества данных пассажиропотоков); получение базового краткосрочного сценария распространения заболевания в регионе;
- идентификацию чувствительных параметров распространения при оцененных общих параметрах на основе решения обратной задачи для агентной модели, учитывающей штамм вируса, введенные ограничительные меры и возрастные ограничения;
- построение сценариев распространения COVID-19 в зависимости от ограничительных мер в регионе.

Отличительная особенность системы – ежедневное обновление эпидемиологических данных и оценка возможной вспышки заболевания на основе моделирования, а также оценка эффективности ограничительных мер по сдерживанию эпидемии в регионе. В настоящее



Рис. 4: Схема совмещения дифференциального и агентного подходов к моделированию распространения COVID-19 (цикл одного дня)

время результаты работы системы для Новосибирской обл. и регионов Сибирского федерального округа доступна в интернете по адресу <https://covid19-modeling.ru/>.

Работа выполнена в рамках проектов РНФ 18-71-10044-П и РФФИ 20-51-10003.

Результаты исследований изложены в докладах на конференциях:

1. Международная конференция "Динамика в Сибири", Новосибирск, 28 февраля – 4 марта 2022 г.
2. The 10th International Conference "Inverse Problems: Modeling and Simulation", Malta, May 22–28, 2022.
3. 13-я Международная мульти-конференция "Bioinformatics of Genome Regulation and Structure and System Biology" (BGRS\SB-2022), Новосибирск, 4–7 июля 2022 г..
4. Международная конференция "Quasilinear Equations, Inverse Problems and Their Applications" (QIPA-2022), Сочи ("Сириус"), 22–26 августа 2022 г.
5. Международная конференция "Игры среднего поля, теория управления средним полем и их приложения", Сочи ("Сириус"), 3–7 октября 2022 г.
6. Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.
7. 2-я конференция Математических центров России, Москва, 7 – 11 ноября 2022 г. ИВМ РАН; МИАН.
8. Международная конференция "Прикладная математика иммунологии и вирусологии", Сочи ("Сириус"), 14–18 ноября 2022 г.

Построение эффективных рандомизированных проекционных оценок решений интегральных уравнений на основе полиномов Лежандра

Чл.-корр. РАН Михайлов Г. А., к.ф.-м.н. Корда А. С., д.ф.-м.н. Рогазинский С. В.

Строятся и оптимизируются численно-статистические проекционные оценки решений интегральных уравнений с использованием полиномов Лежандра в связи с вычислительной сложностью ортогональных разложений с адаптированным весом.

С помощью специальных теоретических и численных оценок определяется параметр k степенной зависимости детерминистического слагаемого $L_2(m)$ среднеквадратической

погрешности $L(m,n)$, где m – длина отрезка проекционного разложения, n – объем статистической выборки траекторий цепи Маркова, используемой для оценки коэффициентов a_i , $i = 0, \dots, 1, m$. Особую роль при этом играет соотношение $k \approx k_i = \ln(b_i^2/b_{i+1}^2)/\ln((i+1)/i) - 1$, возможно, реализуемое при $i_1 \leq i \leq i_2$, где $b_i^2 = a_{2i}^2 + a_{2i+1}^2$. Для минимизации величины $L(m,n)$ при фиксированном n с учетом вероятностного слагаемого $L_1(m,n)$ на основе построенных в работе аналитических соотношений используется $k = \bar{k}_i$. Предлагаемая методика успешно апробирована в тестовой задаче, близкой к проблеме Милна с индикатрисой Хенны – Гринштейна. Полученные оценки k_i представлены в таблице.

Значения k_i в тестовой задаче

i	3	4	5	6	7	8	9	10	11
k_i	4.71	5.05	4.70	5.47	5.39	5.29	4.46	4.26	5.42

Соответствующее значение $k = \bar{k}_i = 4.97 \approx 5$ дало оптимальные значения $m_{opt} = 28$ и $L(m_{opt}, 10^9) = 3.3 \cdot 10^{-8}$, достаточная точность которых проверена с помощью независимой оценки решения. В работе получены и асимптотические соотношения: $m_{opt} = O(n^{1/(k+1)})$, $L(m_{opt}, n) = O(n^{-k/(k+1)})$.

Результаты исследований изложены в пленарном докладе на международной конференции "Марчуковские научные чтения–2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Исследование структуры экситонных полей в полупроводниковых материалах с учетом проникающих дислокаций и применения в методах катодоллюминесцентной визуализации

Д.ф.-м.н. Сабельфельд К. К., к.ф.-м.н. Киреева А. Е.

Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование экситонных полей в полупроводниковых материалах GaN. На основе предложенной модели рекомбинации экситонов в пьезоэлектрическом поле вокруг краевых дислокаций и стохастического моделирования траекторий экситонов впервые удалось рассчитать величину длины диффузии экситона и подтвердить ее экспериментально. На основе этих исследований разработан практический метод катодоллюминесцентной визуализации дислокаций и других дефектов в полупроводниковых материалах.

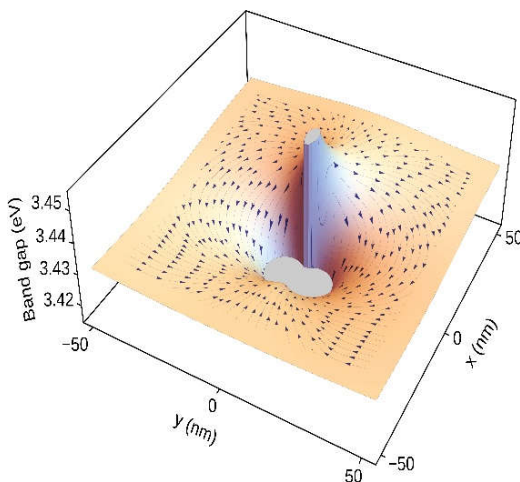


Рис. 5: Структура пьезоэлектрического поля вокруг дислокаций

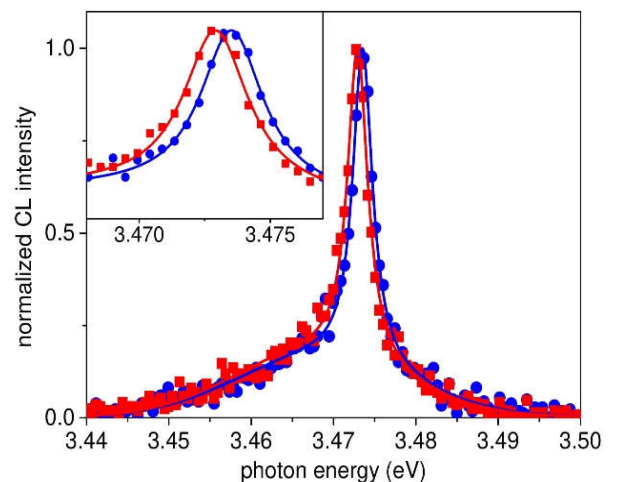


Рис. 6: Интенсивность катодоллюминесценции

Исследование проведено при научном сотрудничестве с международной группой физиков и опубликовано в серии работ из трех статей в журнале *Physical Review Applied*.

Работа выполнена при поддержке Российского научного Фонда, проект 19-11-00019 (2019–2023).

Уменьшение дисперсии оценки функционала от диффузионного процесса в области с отражающей границей

Д.ф.-м.н. Гусев С. А.

Предложен способ уменьшения дисперсии для оценки функционала от диффузионного процесса в области с отражающей границей. Оценка получается на основе численного моделирования траекторий решения системы СДУ, соответствующей диффузионному процессу. Значение этого функционала совпадает с решением в заданной точке краевой задачи третьего рода для параболического уравнения. Для уменьшения дисперсии оценки предложено преобразование этой краевой задачи. Получена формула для предельного значения дисперсии этой оценки при убывании шага в методе Эйлера. При этом значение дисперсии зависит от матрицы диффузии и градиента решения краевой задачи. Преобразование краевой задачи приводит к уменьшению нормы градиента решения краевой задачи на большей части области ее определения, что приводит к уменьшению дисперсии оценки функционала.

Пример уменьшения градиента решения краевой задачи. На рис. 7 в координатной плоскости представлены нормы градиентов решений исходной и преобразованной краевых задач, определенных в круге радиусом единица. Коэффициент вариации оценки решения исходной краевой задачи, равный 1.1849, уменьшился после преобразования краевой задачи до 0.01142.

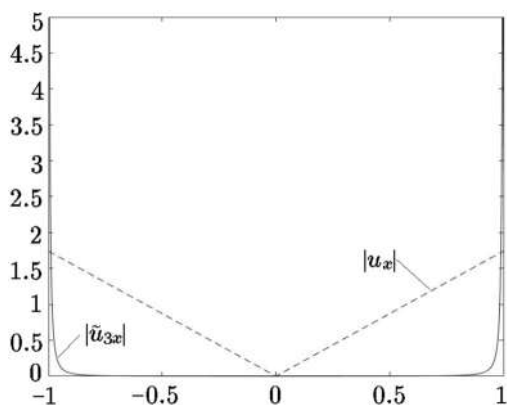


Рис. 7: Норма градиента решения исходной краевой задачи (пунктирная линия), преобразованной краевой задачи (сплошная линия)

Исследование долгопериодной изменчивости процесса обрушения планетарных волн Россби в окрестности субтропического струйного течения

Д.ф.-м.н. Крупчатников В. Н.

На основе метода идентификации явлений обрушение волн Россби (RWB) исследуется динамика процессов антициклонического (АС-тип) и циклонического (С-тип) опрокидывания волн Россби в районе субтропического струйного течения Северного Полушария в исторический период 1979–2018 гг. Обрушение волны Россби проявляется как необратимое опрокидывание контуров потенциального вихря (PV) на изэнтропической поверхности. Для идентификации явления RWB использовались данные о PV на θ -поверхности 350 К из архива реанализа ERA-Interim. Результаты исследования показали, что интенсивность АС-типа RWB имеет положительный тренд изменчивости (рис. 8a), а С-тип RWB – отрица-

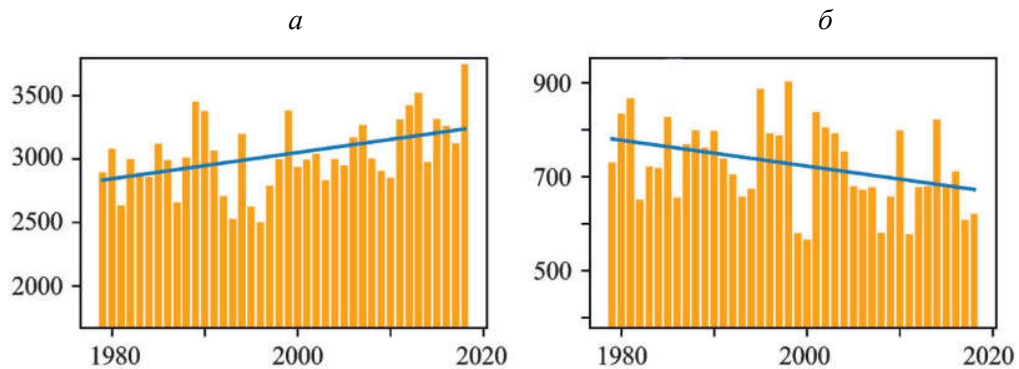


Рис. 8: АС-тип RWB (а); С-тип RWB (б)

тельный (рис. 8б). Волны Россби оказывают сильное влияние на формирование погоды в средних широтах. RWB связано с характеристиками струйных течений, фазой Арктического колебания (АО), внезапным стратосферным потеплением и блокирующими явлениями. Атмосферные блокировки представляют собой квазистационарный гребень волны Россби большой амплитуды, который блокирует движение циклонов. Они часто связаны с квазистационарными антициклонами синоптического масштаба большой амплитуды во внетропических широтах. Из полученных результатов можно сделать вывод о росте явлений блокирования, которые связаны с региональной экстремальной погодой – волнами тепла в летний сезон и холода в зимний сезон.

Результаты исследований изложены в докладах на конференциях:

1. Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–14 сентября 2022 г. (приглашенный доклад).
2. Международная конференция "Марчуковские научные чтения–2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.
3. 4-я Всероссийская конференция "Турбулентность, динамика атмосферы и климата", посвященная памяти акад. А. М. Обухова.

Параллельная реализация алгоритма идентификации источников в моделях адвекции-диффузии-реакции для вычислительных систем с распределенной памятью

Д.ф.-м.н. Пененко А. В., к.т.н. Русин Е. В.

Структура алгоритмов решения обратных задач на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений, реализованных в системе Inverse Modeling & Data Assimilation Framework (IMDAF), хорошо согласуется с параллельными вычислительными архитектурами. Ранее были разработаны версии алгоритмов для систем с общей памятью, однако решение обратных задач большого масштаба для моделей адвекции-диффузии-реакции высокой размерности с большим количеством данных требует привлечения систем с распределенной памятью, состоящих из нескольких вычислительных узлов. С этой целью была разработана MPI + OpenMP версия алгоритма идентификации источников. В вычислительных экспериментах на кластере НКС-1П Сибирского суперкомпьютерного центра для четырех вычислительных узлов достигнуто 40-кратное ускорение расчетов относительно последовательного исполнения (рис. 9). Эксперименты проводились для модельной задачи идентификации источников выбросов в Байкальском регионе по разнородным данным измерений качества воздуха, включающим точечные наблюдения,

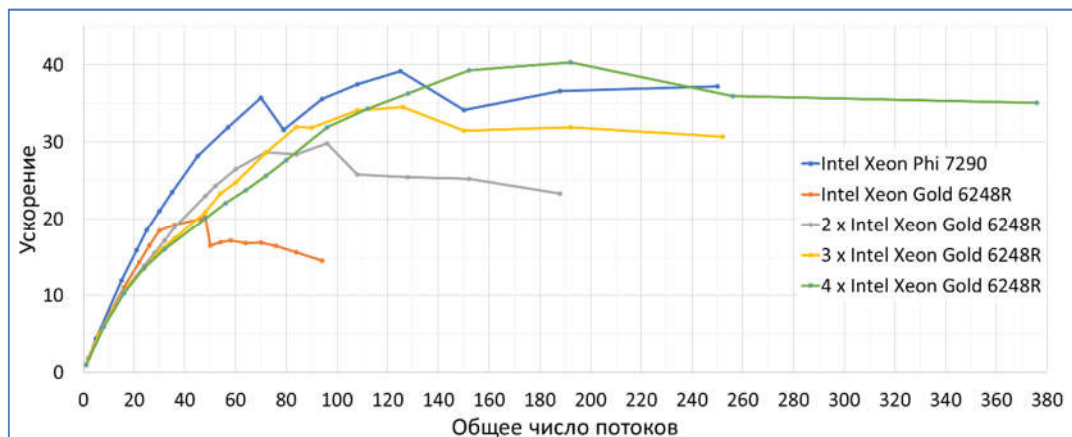


Рис. 9: Ускорение решения обратной задачи на различных конфигурациях кластера НКС-1П ССКЦ

временные ряды, интегральные данные и снимки. Полученный результат позволяет расширить область приложения алгоритмов, входящих в IMDAF.

Результаты исследований изложены в докладах на конференциях:

1. Международная конференция "Суперкомпьютерные дни в России", Москва, 26–27 сентября 2022 г.
2. Пененко А. В., Русин Е. В. Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.
3. Пененко А. В., Пененко В. В., Цветова Е. А., Русин Е. В. 29-я Рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 22–25 ноября 2022 г.

Цифровая платформа для комплексного геофизического мониторинга Байкальской природной территории

Григорюк А. П., Брагинская Л. П., д.т.н. Ковалевский В. В.

Разработана цифровая инфраструктура – электронная онлайн-платформа, позволяющая осуществлять в реальном времени сбор, анализ и визуализацию на единой временной сетке долговременных рядов данных, полученных в ходе комплексного геофизического мониторинга (магнитотеллурического, сейсмологического, деформометрического, гидрогеологического, эманионного и температурного) в период с 2019 по 2022 гг. на научных стационарах ИЗК СО РАН и ИСЗФ СО РАН, расположенных на территории Прибайкалья. Интеграция и анализ данных на единой временной сетке позволяет выявлять аномалии и тренды во временных рядах, которые могут интерпретироваться как предвестники землетрясений. Структурная схема цифровой платформы (ЦП) приведена на рис. 10. Коллектор данных периодически подгружает в локальное хранилище данные, поступающие непосредственно с приборов на пунктах мониторинга. Пользователи на рабочих станциях через веб-браузер формируют запросы к ЦП и получают результаты, выбирая интересующий их интервал времени, пункты мониторинга, виды мониторинга, виды анализа. Кроме традиционных методов анализа, таких как спектральный и корреляционный, применяются методы нелинейной динамики, в частности оценка фрактальных и энтропийных параметров.

Отличительной особенностью платформы является возможность автоматического поиска предвестников сейсмической активации с помощью прогностических алгоритмов анализа рядов данных, основанных прежде всего на многолетнем опыте сотрудников ИЗК и ИСЗФ СО РАН. В настоящее время ЦП доступна в интернете по адресу <https://izk.sccc.ru>.



Рис. 10: Цифровая платформа для комплексного геофизического мониторинга

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН при проведении совместных работ с ИЗК СО РАН, ИСЗФ СО РАН и ГИН СО РАН.

Результаты исследований изложены в докладах на конференциях:

1. 1-я Всероссийская научная конференция "Добрецовские чтения: наука из первых рук", Новосибирск, 1–5 августа 2022 г.
2. 20-я Научная конференция "Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)", Иркутск, 18–21 октября 2022 г.
3. Международная конференция "Марчуковские научные чтения-2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.
4. 6-я Всероссийская конференция "Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности ITES-2022", Владивосток, 3–7 октября 2022 г.

Математическое моделирование интенсивных пучков заряженных частиц в протяженных электронно-оптических системах

Козырев А. Н., д.ф.-м.н. Свешников В. М.

Математическое моделирование протяженных электронно-оптических систем с интенсивными пучками приводит к решению самосогласованной нелинейной задачи, включающей расчет электрических и магнитных полей, траекторий заряженных частиц и объемного заряда. Под протяженной понимается система, размер которой в направлении движения пучка намного больше поперечного размера. Применение традиционных вычислительных подходов к моделированию таких систем не дает удовлетворительных результатов. В на-

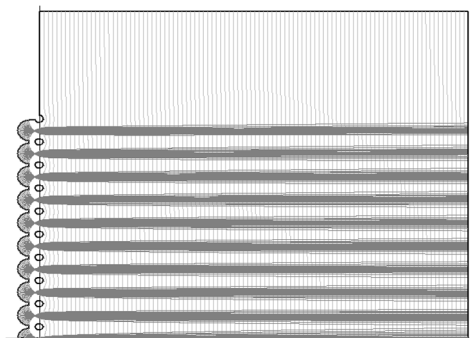


Рис. 11: Траектории пучков в моделируемой системе

стоящей работе предложены новые алгоритмы и технологии, направленные на повышение точности и снижение времени расчетов. Они основаны на методе декомпозиции области, который применяется в трех предназначениях. С помощью предлагаемых алгоритмов и технологий получены результаты моделирования сложной практической системы, дающие хорошее совпадение с результатами натуральных экспериментов. На рис. 11 приведены траектории пучков в моделируемой системе.

Результаты исследований изложены в пленарном докладе на международной конференции "Марчуковские научные чтения-2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Реконструкция рассеивающих объектов субсейсмического масштаба методом зеркального обращения времени

Д.ф.-м.н. Решетова Г. В., Галактионова А. А.

Пространственная локализация неоднородных включений в геологической среде имеет принципиальное значение для повышения разрешающей способности и достоверности методов интерпретации геофизических данных. Предложен метод локализации случайных неоднородностей субсейсмического масштаба в однородной упругой среде методом зеркального обращения времени (TRM), основанном на принципе обратимости во времени волновых процессов в средах без поглощения. Взаимодействие волнового поля с субсейсмическими неоднородностями рассматривается как процесс возникновения вторичных источников излучения, порождаемых включениями. Возникающие вторичные источники выступают индикаторами наличия в среде геологической неоднородности и локализуются методом зеркального обращения времени по записям системы возбуждения и регистрации на свободной поверхности. Верификация предложенного метода проведена с использованием синтетических данных для тестовых моделей, рассчитанных конечно-разностным методом на сдвинутых сетках для системы динамической теории упругости.

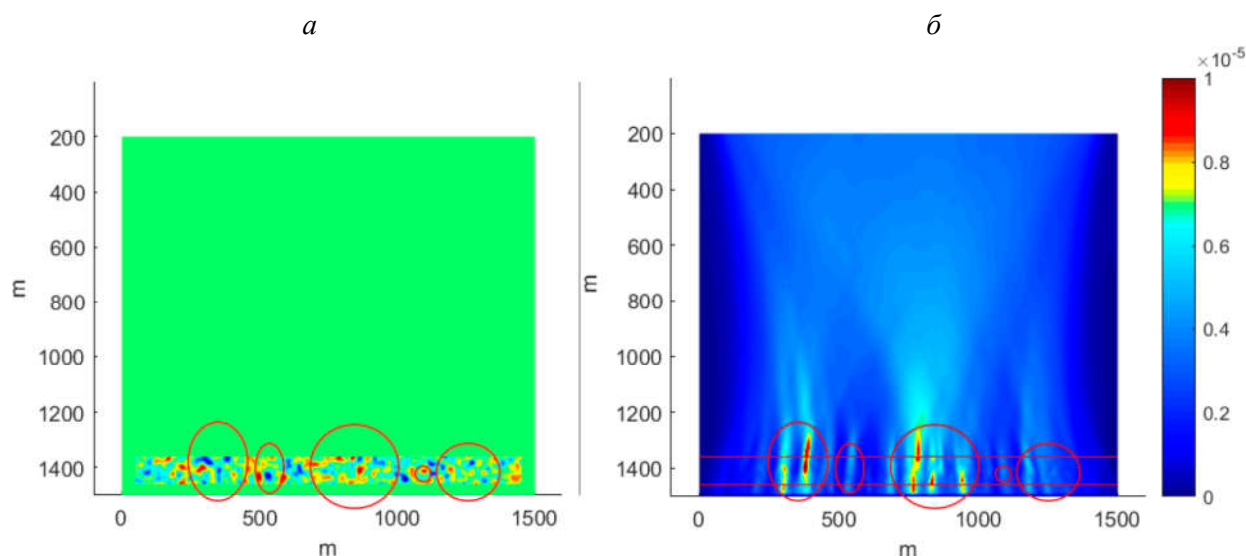


Рис. 12: Результаты моделирования:

a – начальное распределение скорости V_p в случайно неоднородном слое;
б – распределение полной энергии волнового поля методом TRM

Построение численной модели Камчатского цунами 4 ноября 1952 г.

Д.ф.-м.н. Марчук А. Г., д.ф.-м.н. Гусяков В. К.

Камчатское цунами 4 ноября 1952 г. было вызвано подводным землетрясением магнитудой 9.0, происшедшем на западном склоне Курило-Камчатской глубоководной впадины. На ближайшем побережье о-вов Парамушир и Шумшу высоты заплеска достигали 20–23 м. Волнами цунами был практически уничтожен г. Северо-Курильск. Точное число жертв этой катастрофы по современным оценкам составило от 10 до 14 тыс. человек, и до сих пор это событие остается крупнейшим стихийным бедствием на территории РФ. Землетрясение вызвало трансокеанское цунами, высоты которого достигали 9.1 м на Гавайях и до 2 м на побережье Чили.

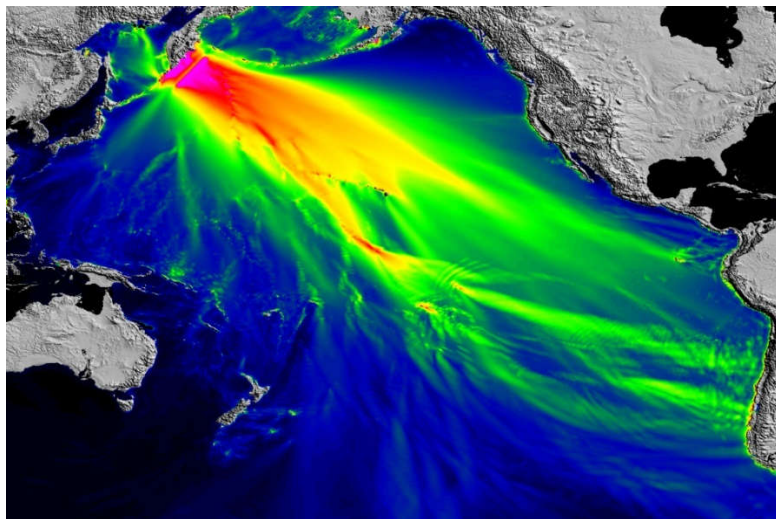


Рис. 13. Расчетная диаграмма
максимальных высот
Камчатского цунами
4 ноября 1952 г.

Построение численных моделей таких экстремальных событий имеет большое значение для правильной оценки уровня цунамиопасности для протяженных участков побережья Мирового океана. В данной работе для построения такой модели и ее реализации для всего тихоокеанского бассейна использован численный метод расчета цунами в рамках нелинейной модели мелкой воды с применением вентильной матрицы, программируемой пользователем (FPGA). Суть подхода заключается в использовании специализированной платы с учетом интенсивности потоков данных при расчете динамики волны по разностной схеме МакКормака. Адаптация алгоритма к FPGA осуществлена в сотрудничестве с ИАЭ СО РАН. Использование такой вычислительной архитектуры позволило достичь ускорения расчетов более чем в 200 раз по сравнению с моделированием на аналогичном компьютере без FPGA платы

Результаты исследований изложены в приглашенном докладе на 4-й Всероссийской научной конференции "Волны цунами: моделирование, мониторинг, прогноз", Москва, 15–16 ноября 2022 г.

Методика разработки масштабируемых энергетически эффективных программных кодов для моделирования лабораторной и космической плазмы

Д.ф.-м.н. Куликов И. М., к.ф.-м.н. Черных И. Г., к.ф.-м.н. Боронина М. А.

Использование современных суперЭВМ накладывает значительные ограничения на минимизацию межпроцессных коммуникаций при реализации программных кодов на архитектурах с распределенной памятью. С использованием технологии Coarray Fortran был разработан новый программный код, масштабируемость которого достигает 92 % при использовании 192 процессов, что соответствует MPI кодам. Характерное число потоков, выполняющихся над общим полем памяти в современных суперЭВМ, достигает нескольких сотен. Для повышения производительности многопоточной программы были использованы шаблоны компоновки данных Intel SDLT и средства автоматической векторизации современного стандарта OpenMP на основе технологий AVX-512. Их использование позволило на один порядок повысить производительность вычислений в рамках одного процесса. В то же время повышение производительности требует значительного увеличения энергопотребления процессора. Нами разработана пошаговая методология расчета энергопотребления с использованием аппаратных возможностей Intel и программного обеспечения Intel VTune с оценкой углеродного следа от высокопроизводительного оборудования с водяным

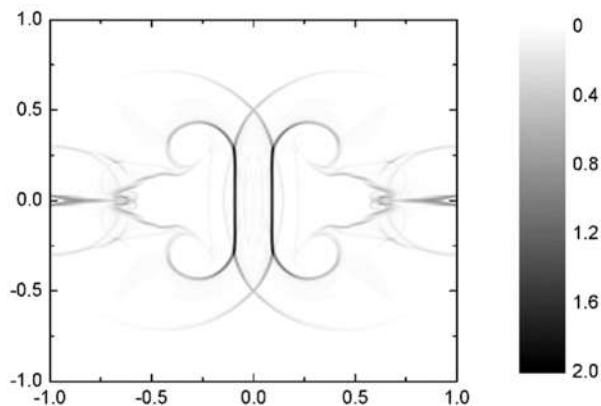


Рис 14. Шлирен безразмерной функции плотности в экваториальной плоскости при взаимодействии двух релятивистских джетов

охлаждением при его вычислительной нагрузке кодами для моделирования лабораторной и космической плазмы. Использование систем с жидкостным охлаждением позволило на 25 % снизить энергопотребление по сравнению с воздушным охлаждением. Использование методики расчета энергопотребления позволяет найти оптимальное с точки зрения значения Флопс/Ватт число ядер в каждом узле используемого суперкомпьютера для проведения вычислительных экспериментов.

Таким образом, разработана методика разработки масштабируемых программных кодов для моделирования лабораторной и космической плазмы с учетом оценки вклада в углеродный след.

Автоматическое конструирование высокопроизводительных параллельных программ для задач линейной алгебры с разреженными матрицами в системе LuNA

Беляев Н. А.

Автоматическое конструирование параллельной программы по описанию численного алгоритма целесообразно осуществлять с помощью применения специализированных системных алгоритмов. Это позволяет использовать хорошо зарекомендовавшие себя практики параллельного программирования, применяемые при ручной реализации программ для заданного класса численных алгоритмов, и автоматически конструировать параллельные программы, сравнимые по производительности с программами, разработанными экспертами предметной области.

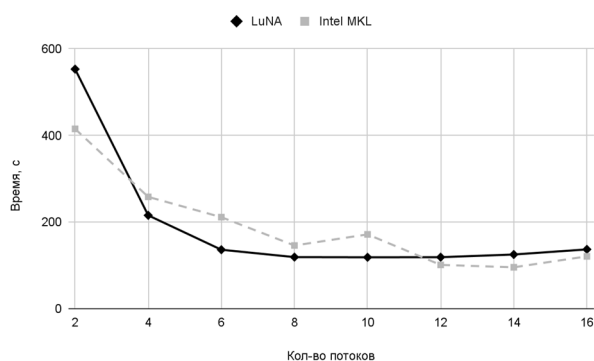


Рис. 15: Сравнение производительности параллельной программы, автоматически сконструированной системой LuNA, с библиотечной реализацией параллельного умножения разреженной матрицы на вектор в составе библиотеки Intel MKL

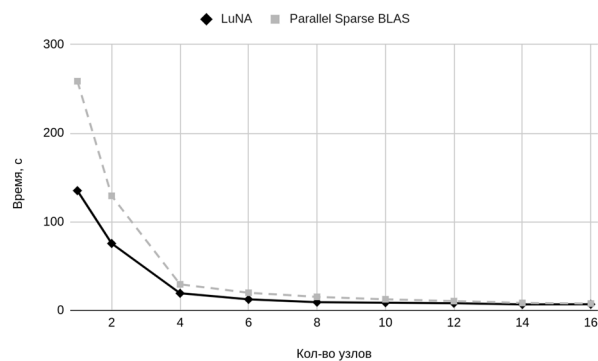


Рис. 16: Сравнение производительности параллельной программы, автоматически сконструированной системой LuNA, с библиотечной реализацией параллельного умножения разреженной матрицы на вектор в составе библиотеки Parallel Sparse BLAS

С целью реализации этого подхода к генерации программ в области задач линейной алгебры с разреженными матрицами создан набор модулей для системы фрагментированного программирования LuNA, включающий специализированные системные алгоритмы автоматического конструирования параллельной программы по заданному высокоуровневому описанию численного алгоритма. С использованием новых модулей для описания численного алгоритма умножения разреженной матрицы на вектор была автоматически сконструирована тестовая параллельная программа. Производительность автоматически сконструированной программы лишь незначительно уступает реализации этого численного алгоритма в библиотеке Intel MKL и превосходит производительность реализации в библиотеке Parallel Sparse BLAS.

Публикации

1. Ivanov, M. I., Kremer, I. A., Laevsky Yu. M. Solving the pure Neumann problem by a mixed finite element method // *Num. Analysis and Appl.* 2022. V. 15, iss. 4. P. 316–330. DOI: 10.1134/S1995423922040048. (IF 0,581).

2. Ivanov, M. I., Kremer, I. A., Laevsky Yu. M. On non-uniqueness of pressures in problems of fluid filtration in fractured-porous media // *J. Comput. and Appl. Math.* (IF 2,239).

3. Monakhova, E. A., Monakhov, O. G., Romanov, A. Yu. Routing algorithms in optimal degree four circulant networks based on relative addressing: Comparative analysis for networks-on-chip // *IEEE Trans. Network Sci. and Engin.* 2022. P. 1–13. DOI: 10.1109/TNSE.2022.3211985. (IF 5.033; WoS, Q1).

4. Монахова, Э. А., Монахов, О. Г. Построение серий семейств циркулянтных сетей степени шесть // *Дискр. анализ и исслед. опер.* 2022. Т. 29, № 4. С. 59–76. DOI: 10.33048/daio.2022.29.743. (IF 0.294; WoS RSCI, Scopus Q2).

5. Монахова, Э. А., Монахов, О. Г. Эффективный алгоритм поиска кратчайших путей в плотных Гауссианских сетях // *Прикл. дискр. матем.* 2022. № 58. С. 94–104. DOI 10.17223/20710410/58/9. (IF 0.408; WoS, Scopus Q4).

6. Monakhova, E., Monakhov, O., Lezhnev, E., Romanov, A. Optimal routing algorithm in dense Gaussian networks-on-chip // *Intern. Conf. on Elect., Commun. and Mechatron. Engin. (ICECCME)*, Maldives, Nov. 16–18, 2022. (Scopus).

7. Monakhov, O., Monakhova, E. Parallel genetic algorithm for synthesis of optimal circulant networks on Kunpeng processors // *Intern. Conf. IEEE SIBIRCON 2022 (OPCS 2022)*, Novosibirsk, Nov. 2022. (Scopus).

8. Krivorotko, O., Zyatkov, N. Y. Data-driven regularization of inverse problem for SEIR-HCD model of COVID-19 propagation in Novosibirsk region // *Euras. J. Math. and Comput. Appl.* 2022. V. 10, iss. 1. P. 51–68. <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2022-10-1-51-68>.

9. Petrakova, V., Krivorotko, O. Mean field game for modeling of COVID-19 spread // *J. Math. Analysis and Appl.* 2022. V. 514, iss. 1. [126271]. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2022.126271>.

10. Свидетельство № 2022664244. Программа для ЭВМ "Автоматизированная программа для прогнозирования распространения COVID-19 в регионах Российской Федерации на основе усвоения данных в модели SEIR-HCD" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Зятков Н. Ю., Криворотко О. И., Неверов А. В. Дата регистрации 27.07.2022.

11. Свидетельство № 2022662669. Программа для ЭВМ "Моделирование распространения COVID-19 на основе модели игры среднего поля" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Петракова В. С., Криворотько О. И. Дата регистрации 21.07.2022.
12. Михайлов, Г. А., Корда, А. С., Рогазинский, С. В. Построение эффективных рандомизированных проекционных оценок решений интегральных уравнений на основе полиномов Лежандра // Доклады РАН. Математика, информатика, процессы управления. 2022. Т. 506. № 6. (Wos, Scopus).
13. Korda, A. S., Mikhailov, G. A., Rogasinsky, S. V. Construction and optimization of numerically-statistical projection algorithms for solving integral equations // RJNAMM. 2022. V. 37. No 5. P. 213–219. <https://doi.org/10.1515/rnam-2022-0018>. (Wos, Scopus).
14. Jahn, U. V., Kaganer, M., Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E., Laehnemann, J., Pfueller, C., Cheze, C., Biermann, K., Calarco, R., Brandt O. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. I: Temperature-dependent generation volume // Phys. Rev. Appl. 2022. V. 17. Art. 024017.
15. Brandt, O., Kaganer, V. M., Laehnemann, J., Flissikowski, T., Pfueller, C. K., Sabelfeld, K., Kireeva, A. E., Cheze, C., Calarco, R., Grahn, H., Jahn, U. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. II: Ambipolar versus exciton diffusion // Phys. Rev. Appl. 2022. V. 17. Art. 024018. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.024018.
16. Laehnemann, J., Kaganer, V. M., Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E., Jahn, U., Cheze, C., Calarco, R., Brandt O. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. III: Nature of non-radiative recombination at threading dislocations // Phys Rev. Appl. 2022. V. 17. Art. 024019. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.024019.
17. Гусев С. А. О дисперсии оценки функционала от диффузионного процесса в области с отражающей границей // СибЖВМ. 2022. Т. 25, № 4. С. 359–369.
18. Gochakov, A. V., Antokhina, O. Yu., Krupchatnikov, V. N., Martynova, Yu. V. Long-term variability of Rossby wave breaking in the subtropical jet stream area // Rus. Meteorol. and Hydrol. 2022. V. 47, No. 2. P. 79–88.
19. Martynova, Yu. V., Krupchatnikov, V. N, Gochakov, A. V., Antokhina O. Yu. Relationship between anomalies of the rate of snow cover formation in Western Siberia and atmospheric dynamics in the Northern Hemisphere in the autumn–winter season // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58, No. 1, P. 95–109.
20. Penenko, A., Rusin, E. Parallel implementation of a sensitivity operator-based source identification algorithm for distributed memory computers // Math. 2022. V. 10, 4522. <https://doi.org/10.3390/math10234522>.
21. Григорюк, А. П., Брагинская, Л. П., Ковалевский, В. В., Семинский, И. К. Цифровая платформа для комплексного геофизического мониторинга Байкальской природной территории // Материалы 1-й Всерос. науч. конф. "Добрецовские чтения: наука из первых рук", Новосибирск, 1–5 авг. 2022 г. С. 31–34.
22. Григорюк, А. П., Брагинская, Л. П., Семинский, И. К., Семинский, К. Ж., Ковалевский, В. В. Цифровая платформа для интеграции и анализа данных геофизического мониторинга Байкальской природной территории // Электронные библиотеки. 2022. № 5. DOI: <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2022-25-4-303-316>.
23. Козырев, А. Н., Свешников В. М. Математическое моделирование интенсивных пучков заряженных частиц в протяженных электронно-оптических системах // Матем. моделир. 2022. Т. 34, № 3. С. 71–85.

24. Reshetova, G., Galaktionova, A. Reconstruction of subsurface scattering objects by the time reversal mirror // *Sib. Electron. Math. Rep.* 2022. V. 19, iss. 2. P. 517–527.
25. Галактионова, А. А., Решетова, Г. В. Реконструкция рассеивающих объектов путем зеркального обращения времени // *Геофизика.* 2022. № 3. С. 76–81.
26. Галактионова, А. А., Решетова, Г. В. Реконструкция рассеивающих объектов путем зеркального обращения времени // *Труды 5-й Международной геолого-геофизической конференции "ГеоЕвразия-2022. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес"*, Москва, 30 марта – 1 апреля 2022 г. Тверь: ПолиПРЕСС, 2022.
27. Галактионова, А. А., Решетова, Г. В. Метод зеркального обращения времени в применении к задаче реконструкции рассеивающих объектов // *Тез. Междунар. конф. "Марчужковские научные чтения-2022"*, 3–7 октября 2022 г. С. 66–67.
28. Галактионова, А. А. Применение метода зеркального обращения времени для реконструкции рассеивающих объектов // *23-я Уральская молодежная научная школа по геофизике : Сб. науч. материалов.* Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2022.
29. Lavrentiev, M., Lysakov, K., Marchuk, An., Oblaukhov, K., Shadrin, M. Hardware/software solution for low power evaluation of tsunami danger // *J. Low Power Electron. and Appl.* 2022. V. 12, iss. 1. <https://doi.org/10.3390/jlpea12010006>.
30. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Prigarin, V., Sapetina, A., Ulyanichev, I., Zavyalov, O. A new parallel code based on a simple piecewise parabolic method for numerical modeling of colliding flows in relativistic hydrodynamics // *Math.* 2022. V. 10, iss. 11. Art. 1865. DOI: 10.3390/math10111865.
31. Akimova, E., Misilov, V., Kulikov, I., Chernykh, I. OMPEGAS: optimized relativistic code for multicore architecture // *Math.* 2022. V. 10, iss. 11. Art. 2546. DOI: 10.3390/math10142546.
32. Chernykh, I., Kulikov, I., Vshivkov, V., Genrikh, E., Weins, D., Dudnikova, G., Chernoshtanov, I., Boronina, M. Energy efficiency of a new parallel PIC code for numerical simulation of plasma dynamics in open trap // *Math.* 2022. V. 10, iss. 11. Art. 3684. DOI: 10.3390/math10193684.
33. Беляев, Н. А. Автоматическое конструирование высокопроизводительных параллельных программ для задач разреженной линейной алгебры в системе LuNA // *Пробл. информ.* 2022, № 3. С. 46–60. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-3-46-60.