

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ
И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Отчет подразделений
ИВМиМГ СО РАН
о выполнении плановых заданий 2020 г.

Новосибирск-2021

СОДЕРЖАНИЕ

Научно-организационная деятельность.....	4
Основные результаты научных исследований в 2021 г.	12
Лаборатория методов Монте-Карло.....	26
Лаборатория численного анализа стохастических дифференциальных уравнений	36
Лаборатория стохастических задач	45
Лаборатория вычислительной физики.....	60
Лаборатория математических задач химии	66
Лаборатория математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере	74
Лаборатория математического моделирования гидротермодинамических процессов в природной среде.....	96
Лаборатория численного анализа и машинной графики	112
Лаборатория математических задач геофизики	122
Лаборатория обратных задач естествознания.....	138
Лаборатория математического моделирования волн цунами	147
Лаборатория геофизической информатики	155
Лаборатория обработки изображений	165
Лаборатория системного моделирования и оптимизации	172
Лаборатория синтеза параллельных программ	188
Лаборатория суперкомпьютерного моделирования.....	197
Справочная информация	215

НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Награды сотрудников Института в 2020 г.:

– благодарностью и Почетной грамотой губернатора НСО награжден зам. директора по научной работе д.т.н. В. В. Ковалевский;

– почетное звание "Заслуженный ветеран Сибирского отделения РАН" присвоено к.ф.м.н. М. П. Бакулиной, к.ф.м.н. Г. А. Омаровой, к.ф.м.н. Е. В. Шкарупе, С. В. Долгополовой.

По итогам конкурса РФФИ проект № 17-05-00382 "Анализ прошлых и прогноз возможных изменений циркуляции Арктических морей России в условиях глобального потепления", выполненный коллективом сотрудников ИВМиМГ под руководством д.ф.-м.н. Г. А. Платова, попал в число избранных проектов и выставлен на сайте РФФИ в рубрике "Науки о Земле".

К.ф.-м.н. О. И. Криворотько стала лауреатом конкурса на присуждение премии мэрии города Новосибирска в сфере науки и инноваций в 2020 г., номинация "Лучший молодой исследователь в организациях науки", за разработку карты прогноза распространения социально значимых заболеваний в городе Новосибирске.

Проведено 7 заседаний Ученого совета института, на которых были рассмотрены научные, кадровые и организационные вопросы, заслушаны научные доклады сотрудников Института.

В ИВМиМГ СО РАН работают научные семинары "Высокопроизводительные вычисления", "Методы Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике", "Высокопроизводительные вычисления", "Математическое обеспечение высокопроизводительных вычислительных систем", "Численные методы прямого и обратного моделирования природных процессов" и "Объединенный семинар".

В рамках научной программы Совета по биоинформатике СО РАН на базе ИВМиМГ СО РАН прошел научный семинар для определения перспективных направлений междисциплинарного сотрудничества ФИЦ ИЦиГ СО РАН и ИВМиМГ СО РАН по биоинформатике и системной компьютерной биологии.

Подписано соглашение о сотрудничестве между тремя институтами Сибирского отделения РАН – Институтом математики им. С. Л. Соболева, Институтом вычислительной математики и математической геофизики, Институтом систем информатики им. А. П. Ершова – и компанией Huawei Technologies Co. Ltd.

Продолжена или начата работа по десяти грантам Российского научного фонда, руководители: д.ф.-м.н. Платов Г. А., д.ф.-м.н. Куликов И. М., к.ф.-м.н. Криворотько О. И., д.ф.-м.н. Сабельфельд К. К., д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М., к.ф.-м.н. Черных И. Г., к.ф.-м.н. Берендеев Е. А., д.ф.-м.н. Шишленин, д.ф.-м.н. М. А. Голубева Е. Н., к.ф.-м.н. Новиков Н. С.

В 2020 г. проводились работы по 25 проектам Российского фонда фундаментальных исследований, из них 18 инициативных, 4 региональных, 1 грант на поддержку проведения конференции, 1 международный, 1 грант "Аспиранты-2020".

В институте работают два совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук: Д 003.061.01 (председатель чл.-корр. РАН Михайлов Г. А.) и Д 003.061.02 (председатель чл.-корр. РАН Кабанихин С. И.). В 2020 г. состоялись три заседания по присуждению ученой степени кандидата наук, в том числе присуждена степень кандидат технических наук сотруднику ИВМиМГ Н. Ю. Зятькову.

Институт является базовым для семи кафедр университетов Новосибирска:

- четырех кафедр Новосибирского государственного университета (вычислительной математики, вычислительных систем, математических методов геофизики (механико-математический факультет), параллельных вычислений (факультет информационных технологий));
- двух кафедр Новосибирского государственного технического университета: параллельных вычислительных технологий (факультет прикладной математики и информатики) и сетевых информационных технологий (факультет автоматики и вычислительной техники));
- кафедры математического моделирования и высокопроизводительных вычислений Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

В Институте проводится обучение в аспирантуре по четырем образовательным программам (специальностям), в 2020 г. проходили обучение 13 аспирантов, из них два заочно.

На базе ИВМиМГ СО РАН работают Центр коллективного пользования "Сибирский суперкомпьютерный центр СО РАН", Фонд алгоритмов и программ СО РАН.

Издательская деятельность

- С 1993 г. издается журнал "Journal of Inverse and Ill-Posed Problems", периодичность шесть номеров в год. Главный редактор – директор ИВМиМГ СО РАН, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин. Ответственный редактор – д.ф.-м.н. М. А. Шишленин. Журнал индексируется в системах цитирования Web of Science и Scopus. Импакт-фактор журнала 0,926; квартиль журнала Q1.
- С 1998 г. издается "Сибирский журнал вычислительной математики", периодичность четыре номера в год. Главный редактор – директор ИВМиМГ СО РАН, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин. Заместители главного редактора: академик РАН А. Н. Коновалов, д.ф.-м.н. Ю. М. Лаевский. Журнал индексируется в системах цитирования Web of Science и Scopus.
- С 1995 г. издается журнал Monte Carlo Methods and Applications с периодичностью четыре номера в год. Главный редактор – д.ф.-м.н. К. К. Сабельфельд. Журнал индексируется в системе цитирования Scopus.
- С 2008 г. издается журнал "Проблемы информатики", периодичность четыре номера в год. Главный редактор – д.т.н. Малышкин В. Э. Заместители главного редактора: д.т.н. А. С. Родионов, к.ф.-м.н. В. В. Шахов. С 2019 г. журнал включен в перечень ВАК.
- С 1993 г. издается ежегодный журнал на английском языке "Bulletin of the Novosibirsk Computing Center". Серии журнала: Computer Science; Mathematical Modeling in Geophysics; Numerical Analysis; Numerical Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies. Главный редактор – д.ф.-м.н. Ю. М. Лаевский. Ответственный редактор – д.ф.-м.н. А. И. Роженко.

Международные конференции

В 2020 г. проведены три международных конференции:

1. Летняя 35-я Международная молодежная школа-конференция по параллельному программированию (дистанционно), Новосибирск, 6–17 июля 2020 г.
2. 16-я Международная Азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем" (дистанционный и очный форматы), 4 площадки: Республика Казахстан, Кыргызская республика, Россия 1 (Сибирский регион), Россия 2 (Западноевропейская часть), 26 июля – 5 августа 2020 г.

3. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

Международные соглашения, контракты, гранты

Выполнялись либо были заключены два меморандума о взаимопонимании, три договора, шесть соглашений:

1. Меморандум о взаимопонимании по проведению совместных исследований в области системного моделирования и оптимизации в информационных сетях между ИВМиМГ СО РАН и Сункьонкванским национальным университетом (Сункьонкван, Республика Корея).

Координаторы: от ИВМиМГ СО РАН – зав. лабораторией системного моделирования и оптимизации, д.т.н. А. С. Родионов; от Сункьонкванского национального университета – руководитель исследовательского центра по распознаванию образов Донгхо Вон.

Срок меморандума: 01.01.2007 г. – 31.12.2021 г.

2. Договор о научно-исследовательском сотрудничестве в области развития методов математического и компьютерного моделирования для целей рационального природопользования и охраны окружающей среды между ИВМиМГ СО РАН и Восточно-Казахстанским государственным техническим университетом им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск (Казахстан).

Координаторы: от ИВМиМГ СО РАН – директор, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин; от Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева – ректор Ж. К. Шаймарданов.

Срок договора: 23.10.2015 г. – 23.10.2025 г.

3. Меморандум о взаимном сотрудничестве в области вычислительной математики, информатики и математического моделирования между Международным казахско-турецким университетом им. Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан (Республика Казахстан) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от Международного казахско-турецкого университета – ректор У. С. Абдибеков; от ИВМиМГ СО РАН – директор, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин.

Срок меморандума: 28.10.2015 г. – 28.10.2025 г.

4. Соглашение о сотрудничестве № 170-1/15 по теме "Математическое и компьютерное моделирование" между АО "Международный университет информационных технологий", г. Алматы (Республика Казахстан) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от АО "Международный университет информационных технологий" – ректор Д. А. Шыныбеков; от ИВМиМГ СО РАН – директор, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин.

Срок соглашения: 02.11.2015 г. – 02.11.2025 г.

5. Соглашение о научном сотрудничестве по теме "Обратные задачи математической физики" между Школой математики Шанхайского университета финансов и экономики, г. Шанхай (Китай) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от Школы математики Шанхайского университета финансов и экономики – ректор Джин Ченг; от ИВМиМГ СО РАН – директор, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин.

Срок соглашения: 06.12.2016 г. – 06.12.2021 г.

6. Договор о научно-техническом сотрудничестве в области математической и экспериментальной геофизики между ИВМиМГ СО РАН и Институтом астрономии и геофизики Монгольской академии наук, г. Улаанбаатар (Монголия).

Координаторы: от ИВМиМГ СО РАН – зам. директора, д.т.н. В. В. Ковалевский; от Института астрономии и геофизики Монгольской академии наук – директор Д. Содномсамбуу.

Срок договора: 21.07.2017 г. – 21.07.2022 г.

7. Соглашение о сотрудничестве в сфере образования, науки, научно-технической и инновационной деятельности в области математического моделирования и параллельных вычислительных технологий между Международным университетом инновационных технологий, г. Бишкек (Кыргызстан) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от Международного университета инновационных технологий – ректор У. Т. Бегалиев; от ИВМиМГ СО РАН – директор, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин.

Срок соглашения: 10.10.2017 г. – 10.10.2022 г.

8. Соглашение о сотрудничестве в области интернационализации высшего образования по теме системного моделирования и оптимизации в информационных сетях и математического и компьютерного моделирования между университетом г. Пизы (Италия) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от университета г. Пизы – ректор П. М. Манкарелла; от ИВМиМГ СО РАН – директор, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин.

Срок соглашения: 10.01.2018 г. – 10.01.2023 г.

9. Договор о сотрудничестве по проведению исследований задач, возникающих при разведке и добычи нефти и газа в Республике Узбекистан между Каршинским государственным университетом, г. Карши (Республика Узбекистан) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от Каршинского государственного университета – ректор Б. А. Шоимкулов; от ИВМиМГ СО РАН – директор, д.ф.-м.н., проф. РАН М. А. Марченко.

Срок договора: 16.09.2019 г. – 15.09.2023 г.

10. Соглашение о сотрудничестве по проведению научных исследований по топологии и функциональному анализу, вычислительной математике, математическому моделированию и методам прикладной математики, теории обратных задач, экономико-математическим методам между ИВМиМГ СО РАН и Институтом математики национальной Академии наук Республики Кыргызстан, г. Бишкек.

Координаторы: от ИВМиМГ СО РАН – директор, д.ф.-м.н., проф. РАН М. А. Марченко; от Института математики национальной Академии наук Республики Кыргызстан – акад. НАН КР А. А. Борубаев.

Срок соглашения: 25.12.2019 г. – 25.12.2024 г.

11. Соглашение на единовременную инженерную работу по пилотному применению Приложения для высокопроизводительных вычислений PARMONC и системы ELSHOW на серверном решении Huawei TaiShan 200 между Компанией Хуавэй Технологии, ООО, г. Шеньчжэнь провинции Гуандун (Китай) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от Компании Хуавэй Технологии, ООО – президент международного компьютерного бизнеса Чэнь Сюэцзюнь (Chen Xuejun); от ИВМиМГ СО РАН – директор, д.ф.-м.н., проф. РАН М. А. Марченко.

Срок соглашения: с 21.10.2020 г. – до завершения проекта.

Выполнялись либо были получены гранты:

1. Грант № BR05236340 Каз_а «Создание высокопроизводительных интеллектуальных технологий анализа и принятия решения для системы "логистика – агломерация" в рамках формирования цифровой экономики Республики Казахстан».

Зарубежный участник – НИИ математики и механики Казахского национального университета им. Аль-Фараби, Алматы (Республика Казахстан).

Координаторы: руководитель проекта с казахской стороны – д.т.н., проф. Д. Ж. Ахмед-Заки; руководитель проекта с российской стороны – д.т.н., проф. В. Э. Малышкин.

Даты начала и окончания работ по теме: 01.02.2018 г. – 25.10.2020 г.

2. Грант № AP05134651 Каз_а "Разработка системы управления активными знаниями для автоматизации конструирования высокопроизводительных параллельных программ обработки неструктурированных данных и численного моделирования в задачах фильтрации".

Зарубежный участник – НИИ математики и механики Казахского национального университета им. Аль-Фараби, Алматы (Республика Казахстан).

Координаторы: руководитель проекта с казахской стороны – д.т.н., проф. Д. Ж. Ахмед-Заки; руководитель проекта с российской стороны – д.т.н., проф. В. Э. Малышкин.

Даты начала и окончания работ по теме: 01.02.2018 г. – 25.10.2020 г.

3. Грант РФФИ АНФ_а "Моделирование образования звезд на массивно параллельных суперкомпьютерах".

Зарубежный участник – университет города Вены (Австрия).

Координаторы: руководители проекта с австрийской стороны – проф. М. Юдель и проф. Эдуард Воробьёв; руководитель проекта с российской стороны – с.н.с., д.ф.-м.н. И. М. Куликов.

Даты начала и окончания работ по теме: 08.11.2019 г. – 31.12.2023 г.

Командирование по странам

В 2020 г. за рубеж командированы 2 сотрудника вместо 20 в 2019 г. Командировки осуществлялись для участия в международной конференции в г. Концепсьон (Чили).

ЧИЛИ

*1. Куликов И. М. с.н.с. Участие в международной конференции "Первые звезды VI" ("First Stars VI"), г. Концепсьон (Чили), с 22.02.2020 г. по 11.03.2020 г.

*2. Черных И. Г., с.н.с. Участие в международной конференции "Первые звезды VI" ("First Stars VI"), г. Концепсьон (Чили), с 22.02.2020 г. по 11.03.2020 г.

Прием зарубежных ученых и представителей фирм

В 2020 г. было принято 16 иностранных гостей из 4 стран: Китай – 5; Казахстан – 7; Узбекистан – 3; Кыргызстан – 1. Из них: научных сотрудников – 3 (дистанционная научная стажировка); студентов – 13 (5 из Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, Харбин (Китай)).

1. ЧЖЕН Пэнфэй / ZHENG Pengfei, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай.

Срок визита: 09.10.2019 г. – 30.06.2023 г.

Цель визита: обучение в аспирантуре по программе "Прикладная математика и информатика" ММФ НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН по специальности "Вычислительная математика".

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – заведующий лабораторией стохастических задач д.ф.-м.н. Каргин Б. А.

2. АКЕНТЬЕВА Марина, гражданка Казахстана, студентка ММФ НГУ.

Срок визита: 15.02.2018 г. – 10.09.2021 г.

Цель визита: обучение по программе бакалавриата ММФ НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН по специализации "Методы Монте-Карло", работа над дипломной работой по теме "Алгоритмы численного статистического моделирования метеорологических процессов".

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – г.н.с. лаборатории стохастических задач, д.-ф.-м.н. Огородников В. А.

3. ГОРШУНОВ Василий, гражданин Республики Казахстан, бакалавр НГУ.

Срок визита: 16.07.2018 г. – 16.06.2023 г.

Цель визита: научная работа по проекту "Высокопроизводительные методы и технологии моделирования электрофизических процессов и устройств".

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – г.н.с. лаборатории вычислительной физики, д.ф.-м.н. Ильин В. П.

4. МУКАТОВА Жадыры Саматовна, аспирантка НГУ, гражданка Республики Казахстан.

Срок визита: 08.09.2020 г. – 08.09.2021 г.

Цель визита: научная работа по проекту: "Обратное моделирование с оптимизацией структуры и функции неопределенности".

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – с.н.с. лаборатории математического моделирования гидродинамических процессов в природной среде, к.ф.-м.н. Пененко А. В.

5. МУ Цюань / MU Quan, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, Харбин (Китай).

Срок визита: 08.10.2018 г. – 31.08.2022 г.

Цель визита: прохождение обязательных и специальных курсов согласно учебной программе аспирантуры по специальности "Прикладная математика и информатика" и работа по подготовке кандидатской диссертационной работы по теме "Численное статистическое моделирование в задачах теории переноса с приложениями в области оптики атмосферы и океана".

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – зав. лабораторией стохастических задач, д.ф.-м.н. Каргин Б. А.

6. ЛЮ Шуан / LIU Shuang, магистр Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, Харбин (Китай).

Срок визита: 10.10.2018 г. – 30.06.2020 г.

Цель визита: прохождение курса магистерской программы ММФ НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН по направлению "Механика и математическое моделирование" со специализацией "Обратные задачи математической физики".

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственная – н.с. лаборатории обратных задач естествознания, к.ф.-м.н. Криворотько О. И.

7. СУ Юй / SU Yu, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, Харбин (Китай).

Срок визита: 11.10.2018 г. – 11.07.2020 г.

Цель визита: прохождение курса магистерской программы ММФ НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН по теме "Оптимальные, явно разрешимые дискретные модели с контролируемым дисбалансом тепловой энергии для параболических задач математической физики" (курс акад. А. Н. Коновалова).

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – зав. лабораторией численного анализа и машинной графики, д.ф.-м.н. Дебелов В. А.

8. ЛИ Чжаоян / LI Zhaoyang, студентка Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, Харбин (Китай).

Срок визита: 07.10.2019 г. – 31.08.2021 г.

Цель визита: обучение по магистерской программе ММФ НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН по специализации "Вычислительная математика".

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – г.н.с. лаборатории стохастических задач, д.ф.-м.н. Огородников В. А.

9. МАХМАСОАТОВ Мухиддин Гайрат угли, студент 1-го курса ММФ НГУ, гражданин Узбекистана.

Срок визита: 05.11.2019 г. – 30.07.2020 г.

Цель визита: обучение по спецкурсу "Численные алгоритмы усвоения данных" на базе ИВМиМГ СО РАН.

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – с.н.с. лаборатории математического моделирования гидродинамических процессов в природной среде, к.ф.-м.н. Пененко А. В.

10. ОСМОНОВА Айжан Рустамовна, студентка НГУ, гражданка Республики Кыргызстан.

Срок визита: 20.12.19 г. – 30.07.21 г.

Цель визита: выполнение бакалаврской дипломной работы на базе лаборатории системного моделирования и оптимизации ИВМиМГ СО РАН.

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – зав. лаборатории системного моделирования и оптимизации, д.т.н. Родионов А. С.

11. БАСУРМАНОВ Максим, магистрант НГУ, гражданин Казахстана.

Срок визита: 25.02.2020 г. – 30.06.2020 г.

Цель визита: прохождение обучения по бакалаврской программе ММФ НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН по теме "Усвоение данных в задачах переноса примесей в атмосфере". Подготовка дипломной работы.

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – с.н.с. лаборатории математического моделирования гидродинамических процессов в природной среде, к.ф.-м.н. Пененко А. В.

12. ГАЙНАЗАРОВА Гузаль Саидназаровна, гражданка Узбекистана, студентка ММФ НГУ.

Срок визита: 28.02.2020 г. – 30.06.2021 г.

Цель визита: прохождение обучения по бакалаврской программе ММФ НГУ на базе ИВ-МиМГ СО РАН по теме "Идентификация математических моделей экономики".

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – зав. лабораторией математических задач естествознания, д.ф.-м.н. Шишленин М. А.

13. МАХМАСОАТОВ Мухиддин, гражданин Узбекистана, студент ММФ НГУ.

Срок визита: 09.11.2020 г. – 31.07.2021 г.

Цель визита: прохождение спецкурса "Обратные задачи в приложениях (Шишленин М. А.), написание дипломной работы (руководитель Имомназаров Х. Х.).

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – с.н.с. лаборатории математического моделирования гидродинамических процессов в природной среде, к.ф.-м.н. Пененко А. В.

14. МУХАМЕТЖАНОВА Бигуль Олжабаевна, докторант Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева, г. Нур-Султан (Казахстан).

Срок визита: 19.10.2020 г. – 03.12.2020 г.

Цель визита: прохождение научной стажировки (дистанционно) по теме "Вычислительная техника и программное обеспечение".

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – с.н.с. лаборатории обработки изображений д.ф.-м.н. Казанцев И. Г.

15. ТУРЕБЕКОВ Рауан Жалгасбекулы, докторант Международного казахско-турецкого университета им. Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан (Казахстан).

Срок визита: 23.11.2020 г. – 07.12.2020 г.

Цель визита: прохождение научной стажировки (дистанционно) по теме "Моделирование регулярных текстур на изображениях с помощью преобразования Радона".

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – с.н.с. лаборатории обработки изображений д.ф.-м.н. Казанцев И. Г.

16. ЕГЕНОВА Алия Мейрамбековна, докторант Международного казахско-турецкого университета им. Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан (Казахстан).

Срок визита: 01.12.2020 г. – 15.12.2020 г.

Цель визита: прохождение научной стажировки (дистанционно) по теме "Моделирование и программное обеспечение алгоритмов обработки изображений".

Финансовые условия: за счет приезжающей стороны.

Ответственный – с.н.с. лаборатории обработки изображений д.ф.-м.н. Казанцев И. Г.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИВМИМГ СО РАН ЗА 2020 Г.

Метод модификации программ расчета физически корректных изображений 3D сцен для учета явления интерференции

Д.т.н. Дебелов В. А., к.ф.-м.н. Васильева Л. Ф.

Одна из основных тенденций исследований и разработок в области фотореалистической визуализации – обеспечение все большей степени физической корректности используемых математических моделей взаимодействия света с объектами сцены. Это выражается в более подробной спецификации материала объекта сцены, т. е. его оптических характеристик, включая источники освещения, и в соответствующем усложнении информационной нагрузки трассирующего луча для учета особенностей математической модели.

Для расчета изображений с интерференцией разработаны новые по сравнению с существующими реализациями спецификации оптических материалов и соответствующая информационная нагрузка трассирующего луча, которые учитывают когерентность лучей света, фазу колебаний световой волны, поляризацию. Предлагаемый метод модификации программ расчета изображений проверен для сцен с оптически изотропными и анизотропными объектами (рис. 1).

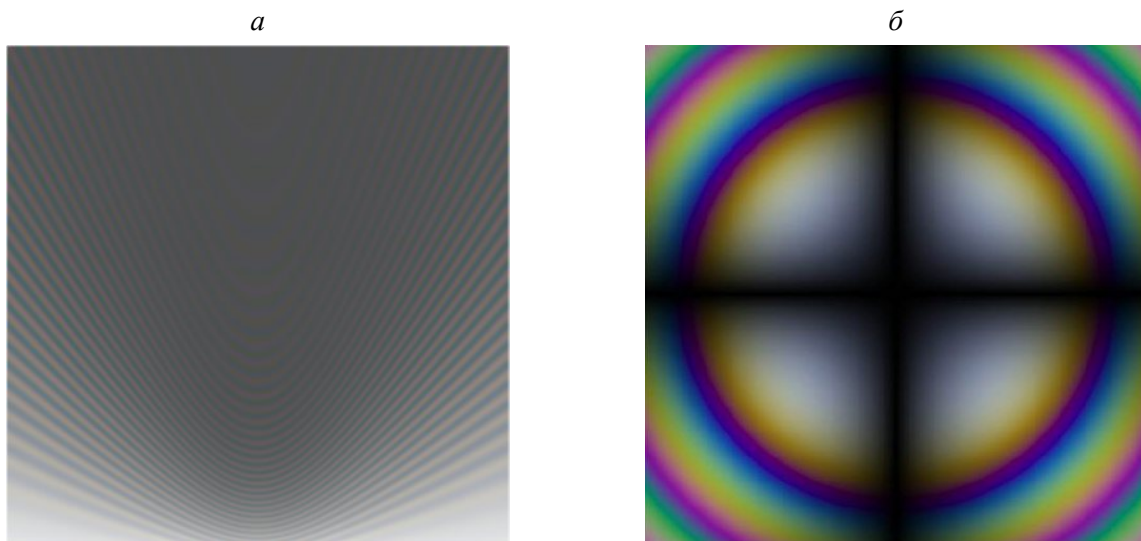


Рис. 1 – Интерференция в сцене с изотропным прозрачным объектом (а). Изображение сцены с оптически одноосным кристаллом кальцита (интерференционная коноскопическая фигура) (б)

Исследование асимптотики среднего потока частиц с размножением в случайной среде с приложением для анализа мировой статистики COVID-19

Чл.- корр. РАН Михайлов Г. А., к.ф.-м.н. Лотова Г. З.

Плотность потока частиц в размножающей среде асимптотически экспоненциальна по времени t с показателем Lt . Если среда случайна, то параметр L случаен и для оценки временной асимптотики среднего (по реализациям среды) потока частиц J_t можно осреднять экспоненту по распределению L . В предположении гауссовости этого распределения таким образом получается асимптотическая "сверхэкспоненциальная" оценка $J_t \sim \exp(t E L + t^2 DL/2)$. Для численной проверки такой оценки разработано вычисление логарифмической производной среднего потока и вероятностных моментов случайного параметра L методом Монте-Карло. Дано приложение указанной новой формулы к исследованию пандемии COVID-19.

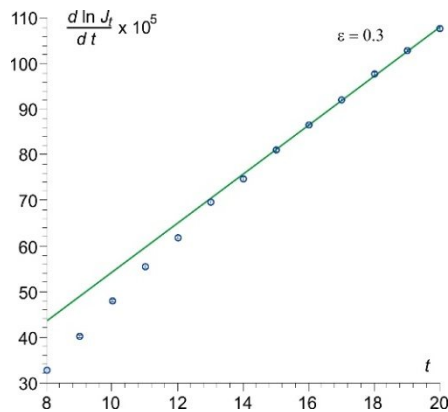


Рис. 2 – Оценки $d \ln J_i / dt$ и соответствующей регрессии $at + b$ для размножения частиц в случайно неоднородном шаре

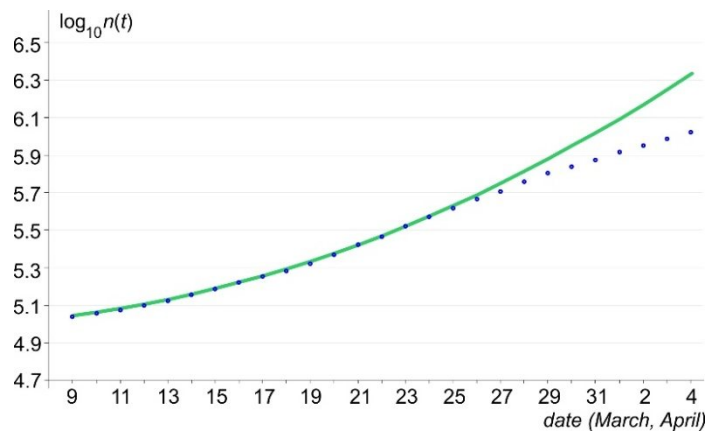


Рис. 3. Число заболевших COVID-19 в марте 2020 г. во всем мире (точки) и сверхэкспоненциальная оценка (зеленая линия)

Результаты исследований изложены в пленарном докладе на Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020", Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г.

Стохастический алгоритм моделирования диффузионных потоков частиц и времени их достижения экстремально малых целевых поверхностей на основе введения искусственного дрейфа.

Д.ф.-м.н. Сабельфельд К. К.

Задача о вычислении потока частиц на удаленные и экстремально малые целевые поверхности хорошо известна своей сложностью и встречается в самых разных прикладных областях, например в фотонике, при исследовании квантовой эффективности полупроводниковых материалов, в задачах иммунологии и клеточного обмена и многих других. В данной работе предложен стохастический алгоритм для расчета потоков и времени достижения частицами малых целевых объектов, основанный на введении искусственного дрейфа, направленного на эти объекты. Численные эксперименты показали высокую эффективность метода. Этим методом были решены задачи о нерадиационном захвате экситонов краевыми дислокациями в кристаллах (рис. 4а) и времена достижения рецепторов на поверхности Т-клеток антигенами и запуска процесса формирования антител (рис. 4б). Эти исследования опубликованы и поддержаны РНФ, проект 19-11-00019.

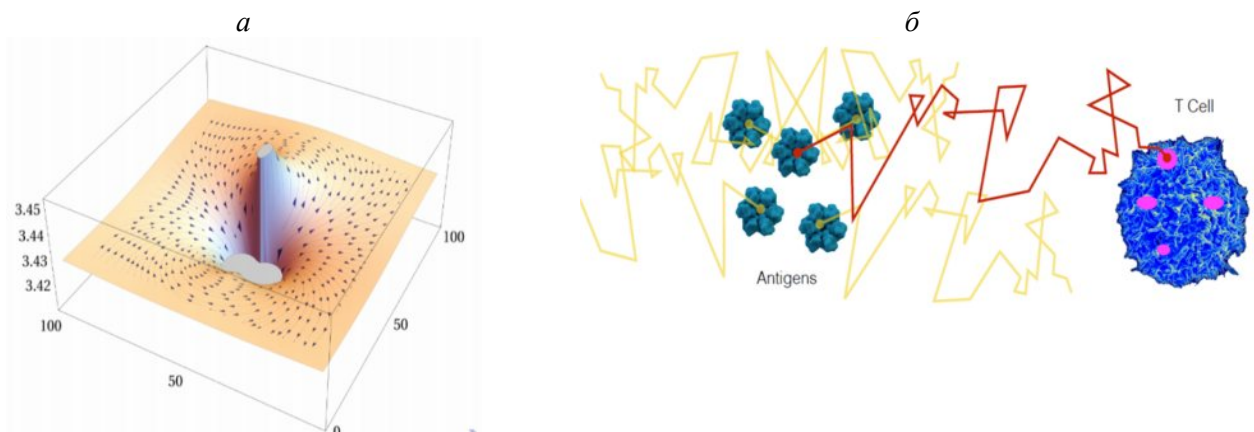


Рис. 4 – Иллюстрации к задаче о малых потоках: а – захват экситонов пьезоэлектрическим полем вокруг дислокаций в кристаллах; б – диффузионная подвижность антигенов с захватом на рецепторах Т-клеток

Создание и численное решение модели СДУ для теоретического исследования теплофизических параметров систем кабины экипажа самолета.

Д.ф.-м.н. Гусев С. А. (ИВМиМГ СО РАН), д.т.н., Николаев В. Н. (НГТУ)

Количественное и качественное усложнение бортового оборудования увеличивает значимость решения задачи определения теплового состояния кабины, при этом возрастает роль оценки теплофизических параметров систем кабины экипажа, таких как расход воздуха в системах кондиционирования и системы вентиляции, характеристики электротермической и струйной защиты от запотевания окна кабины, а также толщина изоляции в кабине. В данной работе выполнено математическое моделирование теплового состояния находящегося под давлением термически изолированного отсека (кабины экипажа) с сотовыми конструкциями. Для этого разработана новая модель СДУ для уравнения теплопроводности и предложено решение прямой и обратной задач теплообмена. Прямая задача решалась методом Галеркина с использованием кусочно-линейного базиса, численной схемы аппроксимации второго порядка типа Розенброка для неавтономных систем, комбинированного метода блуждания по сферам и модифицированного метода Эйлера. Решение обратной задачи теплопередачи проводилось квазиньютоновским методом Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно в сочетании с методом Ньютона. С помощью ковариационной матрицы ошибок оценки параметров и квантиля χ^2 -распределения вероятностей $1 - \alpha$ построены доверительные интервалы оценок параметрической идентификации.

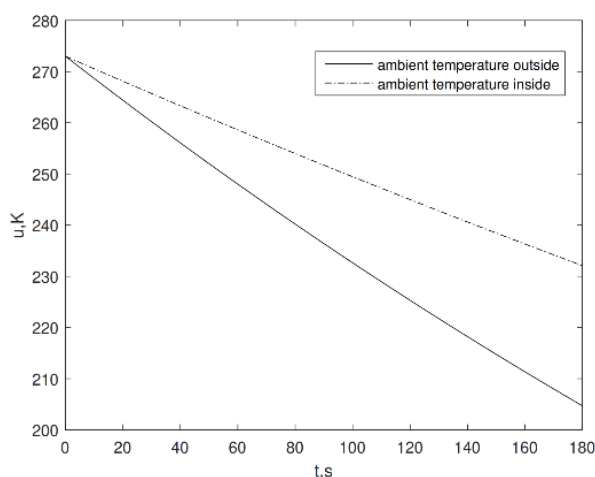


Рис. 5 – Изменение температур окружающей среды (сплошная линия) и внутренней температуры (пунктир)

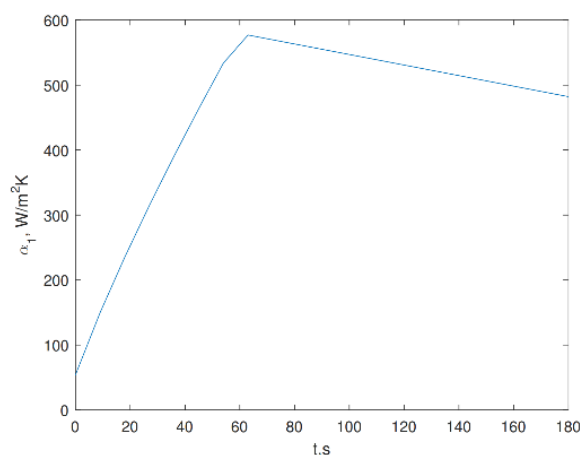


Рис. 6 – График изменение коэффициента теплопроводности

Новое аналитическое решение уравнения Клейна – Гордона. Объяснение эффекта возникновения мгновенного вступления при землетрясениях.

Д.ф.-м.н. Фатьянов А. Г., чл.-корр. РАН Собисевич А. Л. (ИФЗ РАН)

В периоды формирования очаговых структур крупных сейсмических событий и в момент начала землетрясения (главного толчка) современные измерительные системы фиксируют "мгновенное" возмущение, предваряющее Р-волны в точке наблюдения. Данный эффект в литературе объясняется возникновением гравитационных волн Эйнштейна, распространяющихся со скоростью света.

Известные уравнения сейсмогравитации сводятся к уравнению Клейна – Гордона. Получено новое аналитическое решение такого уравнения в резонансной области, состоящее из двух слагаемых: первое – мгновенное сейсмогравитационное возмущение; второе – сейсмогравитационная волна, распространяющаяся со скоростью сейсмического процесса (со скоростью Р-волн). На рис. 7 (слева) видно возникновение мгновенного вступления при $t=0$. Таким образом, получено рациональное объяснение этого эффекта в рамках известных моделей сейсмогравитации, в параметры которых скорость света не входит.

Новая физика явления открывает возможность повышения надежности предсказания крупных сейсмических катастроф с помощью регистрации длиннопериодных сейсмогравитационных возмущений, которые возникают гораздо раньше прямой Р-волны.

Результат получен совместно ИВМиМГ СО РАН и ИФЗ РАН.

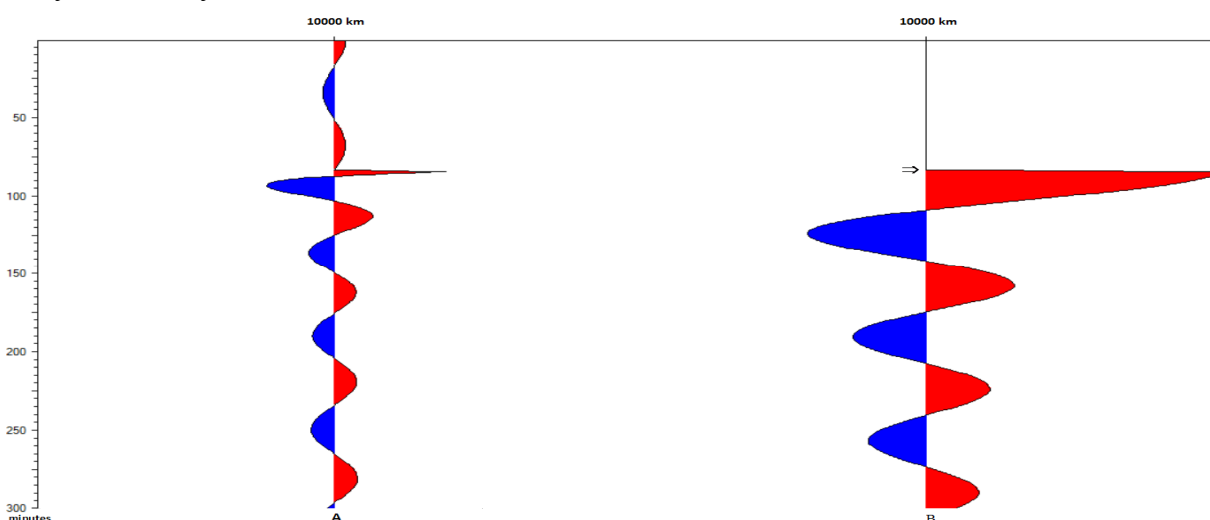


Рис. 7 – Полное сейсмогравитационное поле в резонансной зоне (слева) и волновое поле для среды без гравитации (справа) на расстоянии 10 тыс. км от главного толчка. Стрелкой обозначен момент прихода Р-волны. По вертикали время (возрастает вниз)

Новый алгоритм обнаружения угловых структур на изображениях с использованием иерархии масок свертки

Д.ф.-м.н. Казанцев И. Г.

Разработаны новые семейства масок свертки для выделения угловых структур на цифровых изображениях. В отличие от традиционных масок Кирша, Лапласа и др., разработанные семейства содержат маски произвольного размера, что позволяет выделять углы произвольной величины на зашумленных изображениях. Получены аналитические представления масок произвольных размеров для углов 45° , 90° , 135° , показана возможность представления маски для выделения заданного угла как линейной комбинации масок для других углов. Конструкция семейства масок делает возможным использование результата применения маски меньшего размера при применении маски большего размера, что позволяет эффективно обрабатывать изображение последовательностью масок. Результат может применяться для поиска точек интереса в машинном зрении, обработке данных аэрокосмосьемки и кристаллографии.

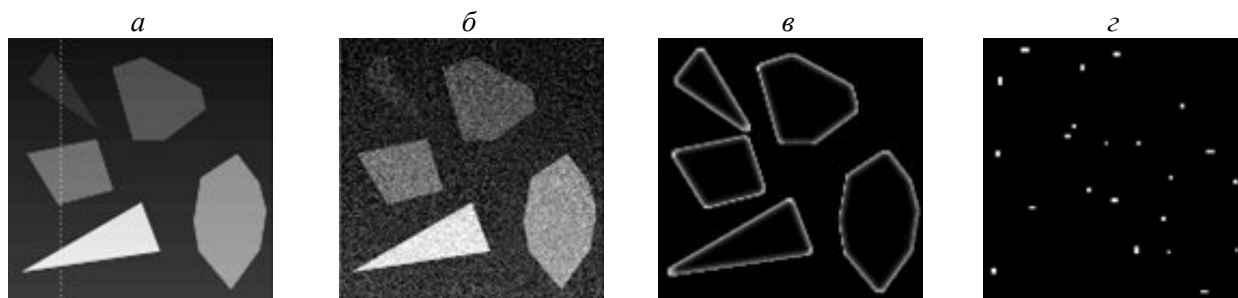


Рис. 8 – Выделение угловых структур различной яркости: *а* – тестовое 256-тоновое изображение; *б* – добавление к тестовому изображению равномерного случайного шума $\sigma = 25$; *в* – результат применения к зашумленному изображению маски для выделения угла 45° размером 7×7 пикселей; *г* – выделение пикселей, в которых значение оператора выделения угловой структуры превысило оптимальный порог

Оценка влияния неопределенности климатических данных для ледниковых циклов на анализ эволюции многолетнемерзлых грунтов.

К.ф.-м.н. Малахова В. В.

Для анализа эволюции многолетнемерзлых пород (ММП) и зоны стабильности гидратов метана арктического шельфа и оценки их современного состояния необходимо построение палеогеографических сценариев развития климатических условий в регионе. Между имеющимися реконструкциями температуры для ледниковых циклов плейстоцена имеются значительные количественные различия. Получены оценки чувствительности результатов численного моделирования термического состояния многолетнемерзлых грунтов к неопределенности палеоклиматических реконструкций температуры воздуха и уровня океана с использованием модели теплофизических процессов в грунте с учетом фазовых переходов. Неопределенность, связанная с выбором данных климатических палеореконовструкций, в терминах современной глубины нижней границы многолетнемерзлых грунтов на шельфе может достигать нескольких десятков метров (рис. 9). Несмотря на заметные различия между используемыми наборами данных,

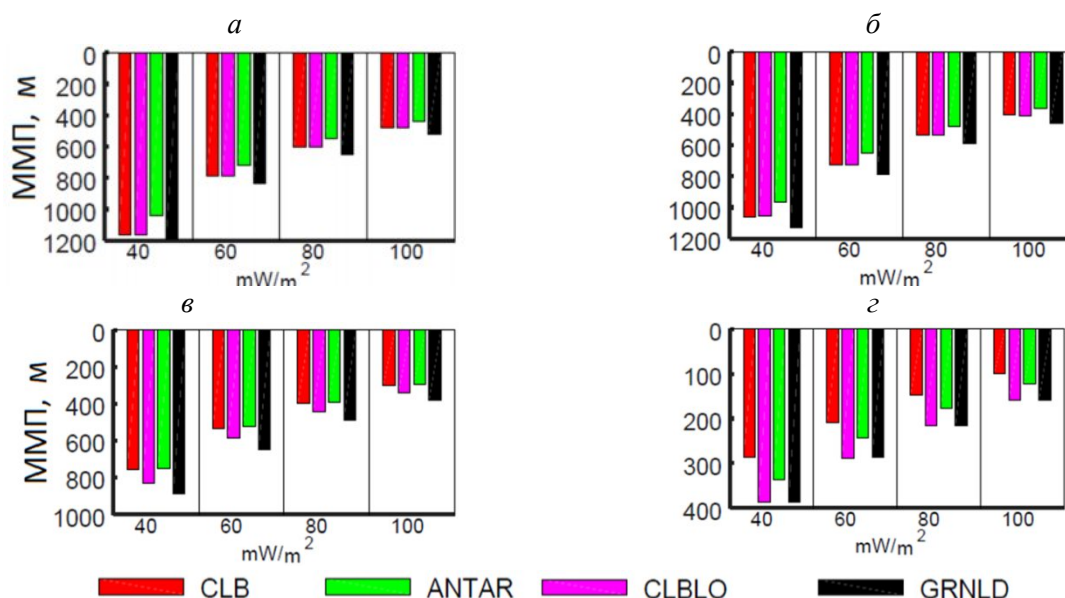


Рис. 9 – Оценки современной мощности мерзлоты шельфа, полученные при используемых палеогеографических сценариях для различных значений интенсивности геотермального теплового потока 40–100 мВт/м², глубина воды: *а* – 0 м; *б* – 10 м; *в* – 50 м; *г* – 100 м

коэффициент неопределенности отклика мощности многолетнемерзлого слоя и зоны стабильности метангидратов составил менее 0.3 за исключением изолированных интервалов времени и/или наиболее глубоких областей шельфа.

Алгоритм идентификации коэффициентов в нестационарных моделях продукции-деструкции на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений

К.ф.-м.н. Пененко А. В.

Модели продукции-деструкции применяются в различных приложениях, в том числе при моделировании нелинейных биологических и химических процессов. В прикладных задачах такие модели могут содержать неизвестные параметры, требующие уточнения по имеющимся данным измерений. Предлагаемый алгоритм является обобщением алгоритма на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений, разработанного для идентификации источников в моделях адвекции-диффузии-реакции и примененного для идентификации источников загрязнения атмосферы. При этом обратная задача представляется в виде семейства квазилинейных операторных уравнений, которые можно затем решать и анализировать любыми подходящими средствами, например методами сингулярного разложения. Вследствие ансамблевого характера алгоритма его выполнение можно естественно распараллелить. На рис. 10 показано применение алгоритма к модельной задаче идентификации коэффициентов модели Лоренц'63 по точечным измерениям элементов функции состояния. Кроме того, оператор чувствительности позволяет разложить функционал невязки обратной задачи для анализа его локальных минимумов (рис. 10б).

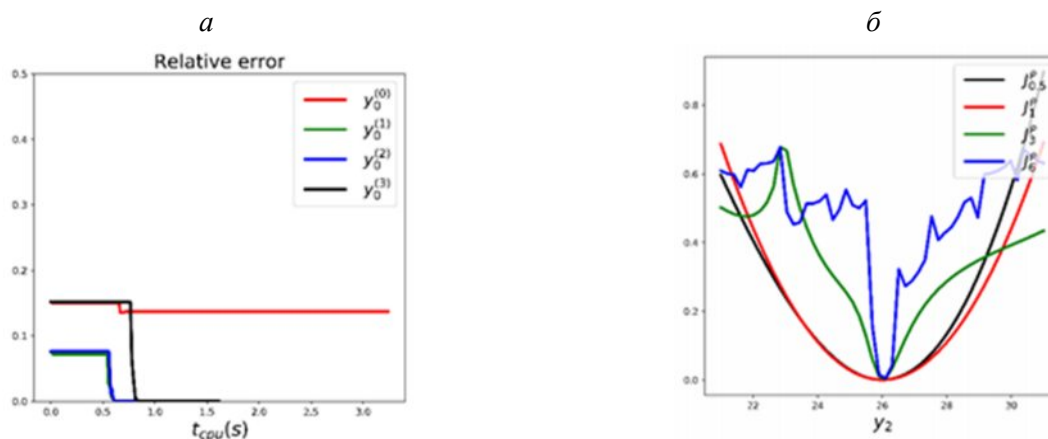


Рис. 10 – Идентификация коэффициентов модели Лоренц'63 по точечным измерениям элементов функции состояния. Убывание относительной ошибки итераций в зависимости от начального приближения для некоторого набора данных измерений (а); вид функционала невязки для одного из искомых параметров в зависимости от величины ансамбля решений сопряженных уравнений (количества учитываемой информации) (б)

Цифровой керн: моделирование акустической эмиссии в образцах керна

Д.ф.-м.н. Решетова Г. В.

В настоящее время в нефтегазовой отрасли для изучения свойств керна материала начинает активно применяться метод акустической эмиссии (АЭ). Это связано в первую очередь с появлением современных установок для лабораторных исследований, снабженных мно-

гоканальными системами регистрации. К сожалению, на российском рынке пока отсутствует доступное отечественное оборудование аналогичного типа. Данная работа выполнена совместно с АО "Геологика" (Новосибирск), занимающимся созданием подобных установок. Цель исследования заключается в оценке параметров, которые должны быть заложены при создании отечественной измерительной системы сбора данных акустической эмиссии, и разработке прототипа программного обеспечения для моделирования процесса АЭ на реальных образцах керн стандартного размера.

Реализован метод зеркального обращения времени, который обеспечил разработку нового подхода к локализации и определению момента "включения" источников акустической эмиссии на основе вычисления "накопленной" упругой энергии. Важной особенностью предложенной методики является ее устойчивость по отношению к шумам и высокая разрешающая способность, обеспечивающая возможность определения оптимальной геометрии приемников при проектировании.

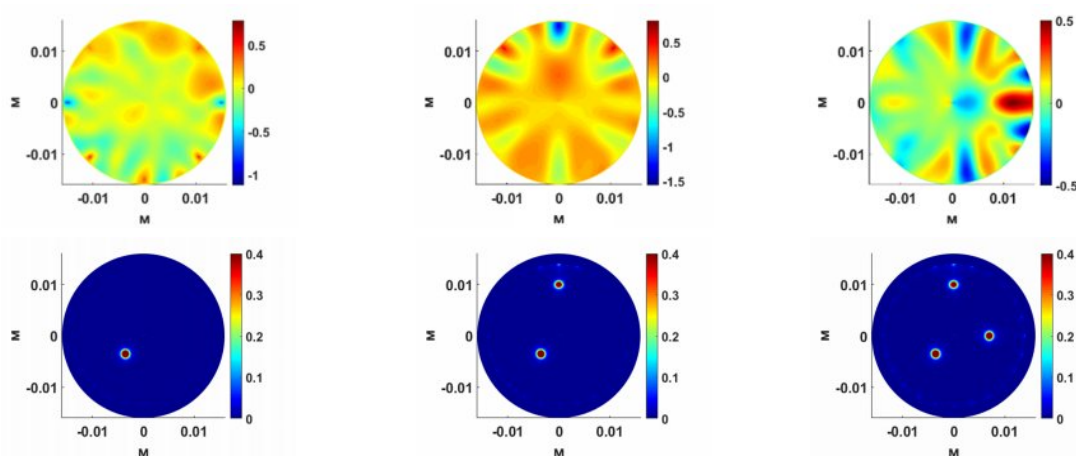


Рис. 11 – Результаты моделирования. Сравнение снимков волнового поля (вверху) и предложенного метода суммарной энергии (внизу) для локализации трех источников АЭ

Публикация Решетова Г. В., Анчугов А. В. Цифровой керн: моделирование акустической эмиссии в целях локализации ее источников методом обращения волнового поля в обратном времени // Геология и геофизика, 2020. заняла 2-е место в 25-м Междунар. конкурсе научных работ "РосНаука" по направлению "Научные статьи по наукам о Земле и космологии", состоявшемся 31 октября 2020 г.

Новые многомерные аналоги уравнений Гельфанда – Левитана – Крейна в геофизике и томографии: теория и комплексы программ

Чл.-корр. РАН Кабанихин С. И., д.ф.-м.н. Шишленин М. А., к.ф.-м.н. Новиков Н. С.

Получены новые многомерные аналоги уравнений Гельфанда – Левитана – Крейна в цилиндрической системе координат и реализованы новые алгоритмы решения многомерных задач определения коэффициентов для уравнений акустики и сеймики по площадным системам наблюдений, основанные на решении систем интегральных уравнений (подход Гельфанда – Левитана – Крейна). Разработаны вариации метода в прямоугольных и цилиндрических координатах, предназначенные для решения задач, возникающих в геофизике и акустической томографии соответственно. Особенности метода является отход от оптимизационной схемы решения задач идентификации параметров и возможность применения алгоритма без использования априорной информации, что является очень важным в приложениях.

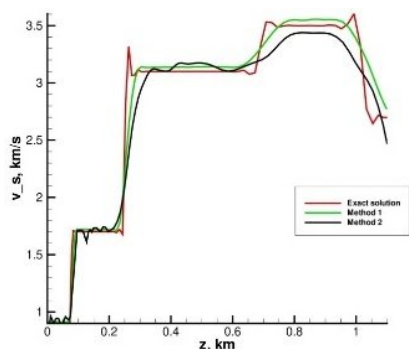


Рис. 12 – Пример: восстановление скоростного разреза среды

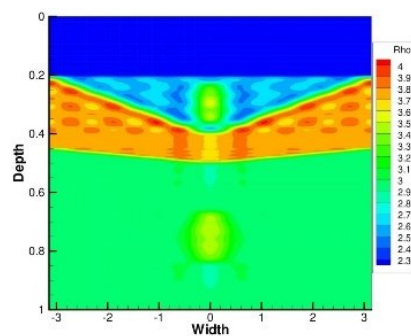


Рис. 13 – Пример: определение включений в среду из слоев, имеющих различное строение (двумерный срез)

Распределение годовых максимумов высот цунами в Мировом океане по типам источников

Д.ф.-м.н. Гусяков В. К.

Все существующие службы предупреждения о цунами ориентированы исключительно на прогноз цунами сейсмического происхождения, составляющих порядка 75 % от всех случаев цунами, зарегистрированных в Мировом океане за исторический период наблюдений (более 4000 лет). Между тем анализ содержания глобального каталога наблюдений цунами за инструментальный период (последние 120 лет) показывает, что среди годовых максимумов высот волн примерно 36 % (т. е. более одной трети) составляют цунами несейсмического происхождения (вулканогенные, обвальные и метеорологические). В частности, обвальные цунами ответственны за 90 % максимальных (более 50 м) наблюдавшихся высот. В некоторых районах, таких как, например, восточное побережье США, Желтое и Адриатическое моря, западное побережье Австралии, метеорологические цунами, наблюдаются намного чаще, чем сейсмогенные, и являются основным источником ущерба. Полученный результат анализа инструментального каталога показывает, что для обеспечения безопасности населения и снижения ущерба возможности служб оперативного прогноза цунами должны быть расширены путем создания средств и методов прогноза цунами несейсмического происхождения.

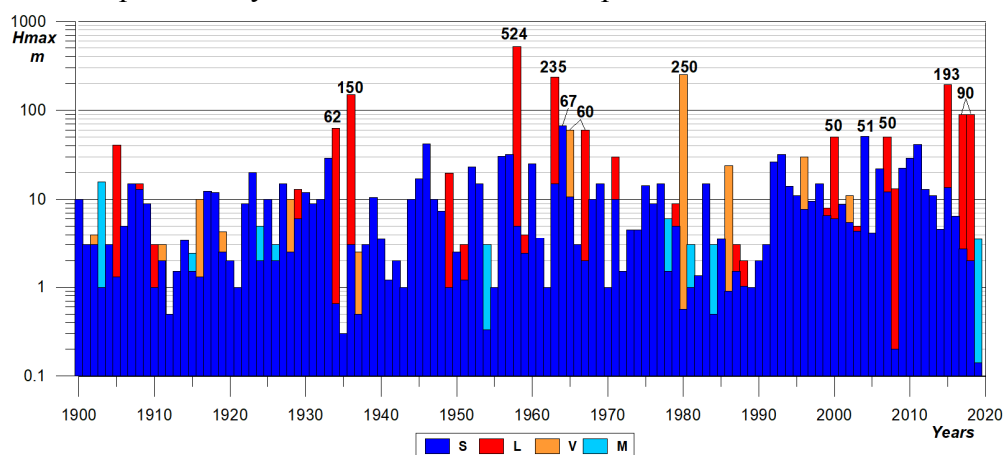


Рис. 14 – Распределение годовых максимумов высот цунами, наблюдавшихся в Мировом океане за инструментальный период (с 1900 по 2019 гг.). Цветом показан тип источника цунами:

S – сейсмогенные, L – обвальные, V – вулканогенные, M – метеорологические.

Для высот, превышающих 50 м, показаны точные значения (м)

Новые методы анализа и оптимизации беспроводных самоорганизующихся сетей

К.ф.-м.н. Шахов В. В., к.т.н. Соколова О. Д., Рудометов С. В., Ткачев К. В.

Для решения ряда задач анализа и оптимизации беспроводных самоорганизующихся сетей предложены новые методы, основанные на теории телетрафика, исследовании операций, теории графов, имитационном моделировании. Разработанные математические и программные средства, в отличие от ранее предложенных подходов, позволяют оптимизировать функционал сетевых узлов и протоколов при наличии интерференции, нестационарной топологии сети и конфликтующих целевых функций. Также обоснованы серьезные недостатки нескольких существующих математических моделей, используемых для анализа подобных сетей, предложены способы устранения указанных недостатков. Комплекс полученных методов позволяет повысить эффективность систем мониторинга промышленных и природных процессов, сетей VANET, технологий Интернета вещей. На рис. 15 показано несколько сценариев загрязнения городского воздуха, для которых проводится анализ эффективности системы мониторинга.

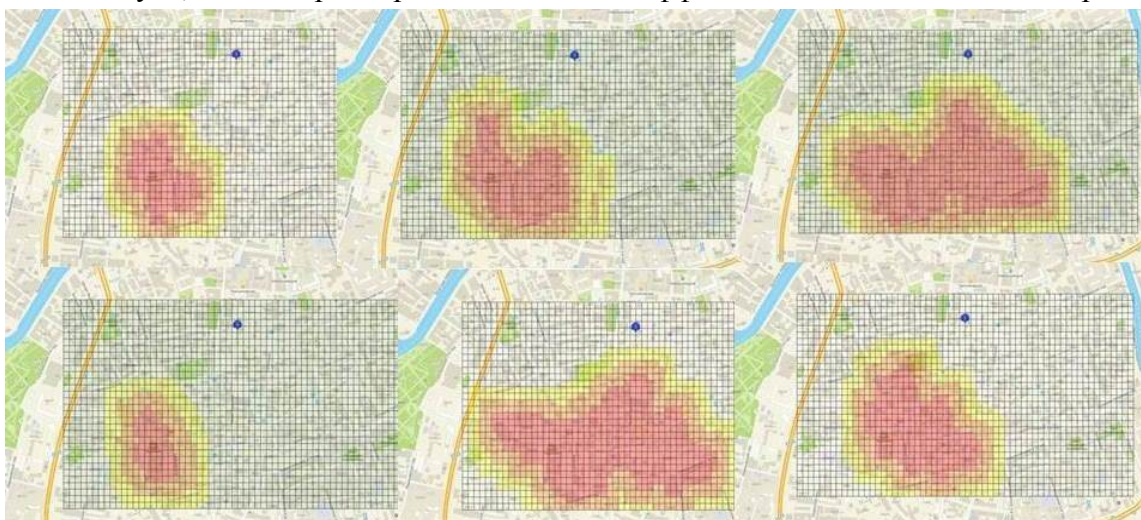


Рис. 15 – Анализ эффективности мобильных систем мониторинга городского воздуха

Модернизованы и реализованы новые алгоритмы генерации распределенных программ численного моделирования на мультикомпьютерах для системы LuNA

Д.т.н. Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.

Система LuNA обеспечивает автоматическое конструирование распределенных программ численного моделирования на мультикомпьютерах. Конструирование программы осуществляется в два этапа: 1) вывод алгоритма решения поставленной задачи в аксиоматической теории, частично описывающей предметную область; 2) генерация распределенной программы по выведенному алгоритму. Автоматическое конструирование программ в других предметных областях сводится к замене частичной аксиоматической теории описывающей предметную область. В 2020 г. модернизированы алгоритмы генерации программ, что позволило уменьшить время выполнения сгенерированных программ в 3–5 раз. Ускорение достигнуто за счет сокращения накладных расходов на работу исполнительных систем. Модернизированные алгоритмы сохраняют возможность автоматического обеспечения динамических свойств конструируемых программ, таких как динамическая балансировка нагрузки на вычислительные узлы мультикомпьютера. Достигнутое качество конструирования параллельных программ позволяет начать работы по реализации технологии активных знаний.

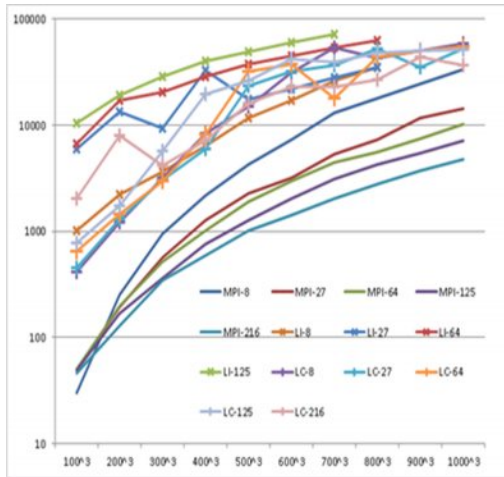


Рис. 16 – Сравнительные временные характеристики исполнения автоматически сгенерированных и написанных вручную программ, реализующих решение модельного уравнения теплопроводности в единичном кубе

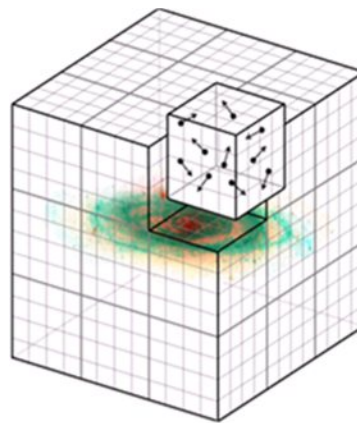


Рис. 17 – Схема описания задачи в виде частичной аксиоматической теории в терминах фрагментов данных и вычислений в системе LuNA

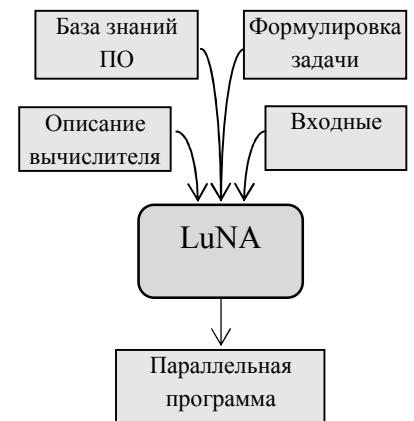


Рис. 18 – Схема конструирования параллельной программы системой LuNA

Явные противопотоковые схемы в нестационарных задачах фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости

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

Для задач фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости на классе разрывных решений предложен и обоснован явный противопоточковый численный метод, в котором отсутствуют нефизичные осцилляции на фронте разрыва. С точки зрения приложений речь идет о трехмерных задачах вытеснения нефти водой. Решены задачи для однопористой и трещиноватопористой модели среды, построена противопотоковая схема не только внутри каждой среды, но и при обмене двухфазной жидкостью между поровыми блоками и трещинами. Разработан явный вариант гибридной противопоточковой схемы (ЕНУ), и решена задача о гравитационной

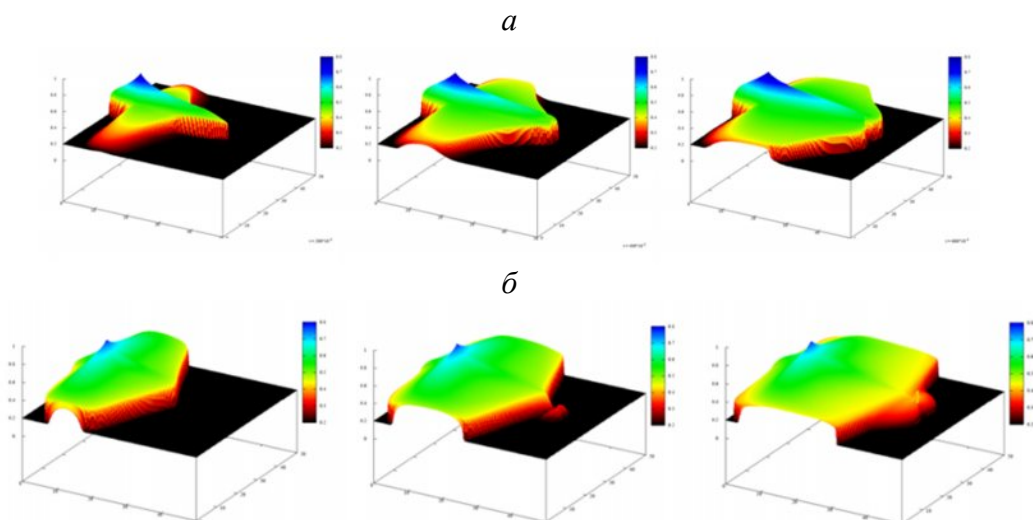


Рис. 19 – Водонасыщенности поровых блоков (а) и трещин (б) в моменты времени $2 \cdot 10^6$ с и $6 \cdot 10^6$ с при анизотропной проницаемости

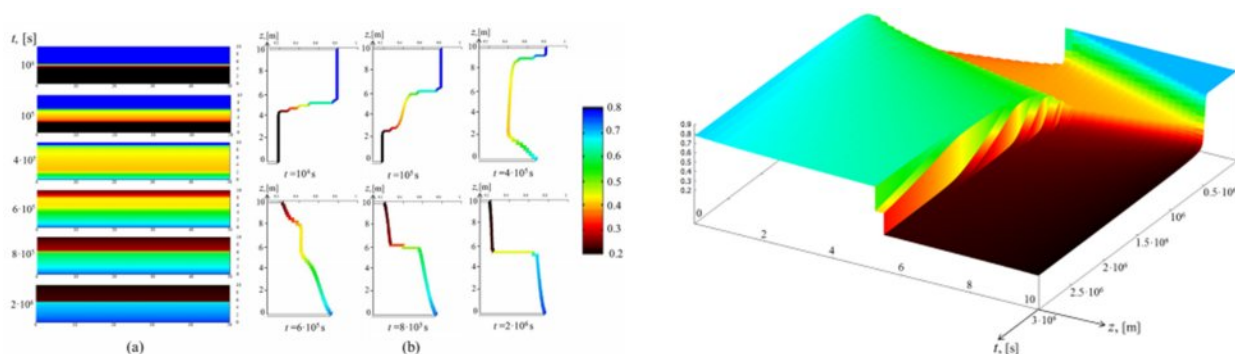


Рис. 20 – Водонасыщенность при гравитационной сегрегации легкой нефти при начальных данных; сверху – вода, снизу – нефть

сегрегации двухфазной жидкости. На решении ряда задач показаны преимущества ЕНУ схемы перед широко используемым в последние годы ИНУ (Implicit Hybrid Upwinding) подходом. Для всех построенных схем установлен принцип максимума с указанием условия Куранта – Фридрихса – Леви, зависящего от суммарной скорости потока, которая вместе с давлением вычисляется смешанным методом конечных элементов. Во всех рассмотренных задачах решена проблема неоднозначности давления для условий непротекания на границах пористой среды.

Новая схема четвертого порядка точности на основе интегрального тождества Марчука для решения прямой задачи рассеяния Захарова – Шабата

К.ф.-м.н. Горбенко Н. И., д.ф.-м.н. Ильин В. П., Крылов А. М.

Для построенной схемы проведено численное моделирование задачи рассеяния на примере двух характерных краевых задач с известными решениями. Расчеты подтвердили высокую точность предложенного алгоритма, необходимую в ряде практических приложений для оптического и акустического зондирования сред в прикладной оптике и геофизике.

Новая вычислительная модель белых карликов и взрыва сверхновых типа Ia

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

Построена вычислительная модель эволюции белых карликов и взрыва сверхновых типа Ia на модели гравитационной гидродинамики со звездным уравнением состояния. Для восстановления внутренней энергии белого карлика использованы уравнения для энтропии, что позволяет избежать сложного итерационного процесса для вычисления температуры. Кроме того, такая запись уравнений позволяет разработать эффективную программную реализацию с использованием векторных инструкций AVX-512. Для детального описания горения углерода в белом карлике используется технология вложенных сеток, когда гидродинамика взрыва моделируется на регулярной сетке, а подсеточные процессы горения углерода – в качестве отдельной гидродинамической задачи на вложенных сетках. Вычислительные эксперименты, проведенные на суперкомпьютере НКС-1П, оснащенный процессорами Intel Xeon Phi KNL, показали, что энергия взрыва варьируется в зависимости от ядерного горения углерода, что приводит к различию в кривых блеска, это, в свою очередь, говорит о ненадежности использования сверхновых типа Ia в виде "стандартных свечей" для измерения расстояний во Вселенной.

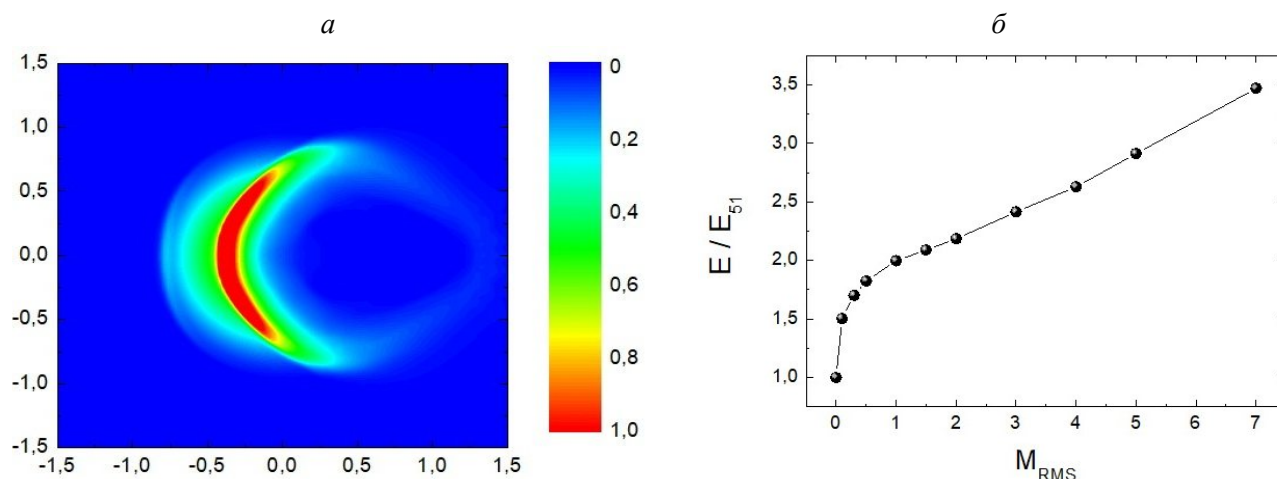


Рис. 21 – Относительная плотность газа белого карлика во время взрыва сверхновой типа Ia (а) и относительная зависимость энергии взрыва в зависимости от турбулентного горения углерода (б)

Публикации:

1. Debelov, V. A., Vasilieva, L. F. Visualization of interference pictures of 3D scenes including optically isotropic transparent objects // *Sci. Visual.* 2020. Vol. 12, No 3. P. 119–136. DOI: 10.26583/sv.12.3.11 (Scopus Q3)
2. Михайлов Г. А., Лотова Г. З. Алгоритмы метода Монте-Карло для исследования временной асимптотики потока частиц с размножением в случайной среде // *ДАН. Математика, информатика, процессы управления.* 2020. Т. 490, № 1. С. 47–50. DOI: 10.7868/S2686954320010051.
3. Lotova G. Z., Mikhailov G. A. The study of time dependence of particle flux with multiplication in a random medium // *RJNAMM.* 2020. Vol. 35, iss. 1. P. 11–20. DOI: 10.1515/rnam-2020-0002.
4. Lotova G. Z., Mikhailov G. A. Numerically statistical investigation of the partly super-exponential growth rate in the COVID-19 pandemic (throughout the world) // *J. of Inverse and Ill-posed Problems.* <https://doi.org/10.1515/jiip-2020-0043>.
5. Sabelfeld K. K. Stochastic simulation algorithms for solving narrow escape diffusion problems by introducing a drift to the target // *J. of Comput. Phys.* 2020. Vol. 410. Art. 109406.
6. Sabelfeld K. K. Mesh free stochastic algorithms for systems of diffusion-advection-reaction equations and anisotropic diffusion flux calculations // *Probab. Engin. Mechan.* 2020. Vol. 61. Art. ID 103065.
7. Gusev S. A., Nikolaev V. N. Numerical and statistical simulation technique for the aircraft wing thermal state in icing conditions // *Intern. conf. on the methods of aerophys. research : abstr., Novosibirsk, 1–7 Nov. 2020. Novosibirsk: Parallel, 2020. Pt. 1. P. 80–81 (Web of Science, Scopus).*
8. Gusev S. A., Nikolaev V. N. Theoretical studies of the cockpit systems thermophysical parameters using stochastic differential equations // *Intern. conf. on the methods of aerophys. research : abstr., Novosibirsk, 1–7 Nov. 2020. Novosibirsk: Parallel, 2020. Pt. 1. P. 78–79 (Web of Science, Scopus)*
9. Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Фатьянов А. Г. Длиннопериодные сейсмогравитационные процессы в литосфере. М.: ИФЗ РАН, 2020. 228 с.

10. Собисевич Л. Е., Фатьянов А. Г. Аналитический анализ длиннопериодных сейсмогравитационных процессов. Новые вызовы в сейсмологии. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020", Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г.
11. Kazantsev I. G.; Mukhamedzhanova B. O.; Iskakov K. T., Mirgalikyzy T. Detection of the corner structures in images by scalable masks // J. Appl. And Indust. Math. 2020. Vol. 14, iss. 1. P. 73–84. DOI: 10.1134/S1990478920010081.
12. Malakhova V. V., Eliseev A. V. Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments // Global and Planet. Change. 2020. 192: 103249. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103249> (WoS (IF 4.1, Q1)).
13. Penenko A. V., Mukatova Z. S., Salimova A. B. Numerical study of the coefficient identification algorithm based on ensembles of adjoint problem solutions for a production-destruction model // Intern. J. Nonlinear Sci. and Num. Simulation. Prepr. 2020. doi: 10.1515/ijnsns-2019-0088.
14. Penenko A. Convergence analysis of the adjoint ensemble method in inverse source problems for advection-diffusion-reaction models with image-type measurements // Inv. Probl. & Imaging. 2020. Vol. 14. P. 757–782. doi: 10.3934/ipi.2020035.
15. Решетова Г. В., Анчугов А. В. Цифровой керн: моделирование акустической эмиссии в целях локализации ее источников методом обращения волнового поля в обратном времени // Геол. и геофиз. 2020. DOI: 10.15372/GiG2020148 (WoS).
16. Решетова Г. В. Оценка разрешающей способности метода обращения времени при восстановлении событий акустической эмиссии в образцах керна // "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология" : Материалы 16-й Междунар. науч. конф. в рамках Интерэкспо "ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 20–24 апр. 2020 г. С. 579–589. DOI: 10.18303/B978-5-4262-0102-6-2020-063. (РИНЦ)
17. Решетова Г. В., Анчугов А. В., Поздняков В. А. Реконструкция событий акустической эмиссии в образцах керна с помощью метода зеркального обращения времени // Санкт-Петербург 2020. Геонауки: трансформируем знания в ресурсы : труды 9-й Междунар. геол.-геофиз. конф., Санкт-Петербург, 16–19 нояб. 2020 г. (Scopus).
18. Izzatullah M., Peter D., Kabanikhin S., Shishlenin M. Bayes meets Tikhonov: Understanding uncertainty within Gaussian framework for seismic inversion // Studies in Syst., Decision and Control. 2021. Vol. 320. P. 121–145.
19. Kabanikhin S. I., Shishlenin M. A., Novikov N. S. Gelfand – Levitan – Krein method in one-dimensional elasticity inverse problem // J. Phys. Conf. Ser.: Inverse Probl. 2020 (to appear).
20. Shishlenin M. A., Izzatullah M., Novikov N. S. Comparative study of acoustic parameter reconstruction by using optimal control method and inverse scattering approach // J. Phys. Conf. Ser.: Inverse Probl. 2020 (to appear).
21. Gusiakov V. K. Global occurrence of large tsunamis and tsunami-like waves within the last 120 years (1900–2019) // Pure Appl. Geophys. 2020, 177, 1261–1266. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02437-9>.
22. Shakhov V., Sokolova O., Koo I. A criterion for IDS deployment on IoT edge nodes // Spr. Lect. Notes in Comput. Sci. 2020. Vol. 12249. P. 546–556 (Q2 SJR).

23. Lin K., Chen H., Ai X., Shakhov V., Ni L., Yu J., Li Y. EUMD: Efficient slot utilization based missing tag detection with unknown tags // J. Network and Comput. Appl. 2020. Vol. 160, art. 102640 (WoS Q1).
24. Соколова О. Д., Шахов В. В. Вопросы обеспечения безопасности интернета транспортных средств. Обзор исследований // Информ. проц. 2020. Т. 20, № 3. С. 231–253 (WoS RSCI/Q4).
25. Тарханова О. Ю., Шахов В. В. К вопросу оценки эффективности беспроводных сенсорных сетей // Пробл. информ. 2020. № 1 (46). С. 35–65 (БАК).
26. Шахов В. В., Соколова О. Д. Анализ сетей с нестационарной топологией. Обзор исследований // Пробл. информ. 2020. № 4 (49). С. 27–42. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10014 (БАК).
27. Rudometov S., Sokolova O., Materukhin A. Optimization of mobile sink movement in the gathering spatio-temporal data process from air pollution sensors // Intern. Russ. Autom. Conf. (RusAutoCon 2020), Sochi, Sept. 6–12, 2020. P. 648–652 (Scopus).
28. Malyshkin V., Akhmed-Zaki D., Perepelkin V. Parallel programs execution optimization using behavior control in LuNA system // J. of Supercomput. (В печати)
29. Ivanov M. I., Kremer I. A., Laevsky Yu. M. Computational model of fluid filtration in fractured porous media // Num. Analysis and Appl. 2021. Vol. 14, iss. 2.
30. Ivanov M. I., Kremer I. A., Laevsky Yu. M. Numerical model of gravity segregation of two-phase fluid in porous media based on hybrid upwinding // RJNAMM. 2021. Vol. 36, iss. 1.
31. Горбенко Н. И., Ильин В. П., Крылов А. М., Фрумин Л. Л. О численном решении прямой задачи рассеяния Захарова – Шабата // СибЖВМ. 2020. Т. 23, № 2. С. 117–125. DOI: 10.15372/SJNM20200201.
32. Kulikov I. M., Chernykh I. G., Sapetina A. F., Lomakin S. V., Tutukov A. V. A new Rusanov-type solver with a local linear solution reconstruction for numerical modeling of white dwarf mergers by means massive parallel supercomputers // Lobachevskii J. Math. 2020. Vol. 41, iss. 8. P. 1485–1491. (Q2)
33. Kulikov I., Chernykh I., Tutukov A. A new hydrodynamic code with explicit vectorization instructions optimizations, dedicated to the numerical simulation of astrophysical gas flow. I. Numerical method, tests and model problems // The Astrophys. J. Suppl. Ser. 2019. V. 243. Art. Num. 4. (Q1)
34. Kulikov I., Chernykh I., Karavaev D., Berendeev E., Protasov V. HydroBox3D: Parallel & distributed hydrodynamical code for numerical simulation of supernova Ia // Lect. Notes in Comput. Sci. 2019. Vol. 11657. P. 187–198. (Q2)
35. Kulikov I. M., Chernykh I. G., Glinskiy B. M., Protasov V. A. An efficient optimization of Hll method for the second generation of Intel Xeon Phi processor // Lobachevskii J. Math. 2018. Vol. 39, iss. 4. P. 543–551. (Q2)
36. Kulikov I. M., Chernykh I. G., Tutukov A. V. A New parallel Intel Xeon Phi hydrodynamics code for massively parallel supercomputers // Lobachevskii J. Math. 2018. V. 39, iss. 9. P. 1207–1216. (Q2).

ЛАБОРАТОРИЯ МЕТОДОВ МОНТЕ-КАРЛО

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Рогазинский С. В.

Важнейшие достижения

Исследование асимптотики среднего потока частиц с размножением в случайной среде с приложением для анализа мировой статистики COVID-19

Чл.- корр. РАН Михайлов Г. А., к.ф.-м.н. Лотова Г. З.

Плотность потока частиц в размножающей среде асимптотически экспоненциальна по времени t с показателем Lt . Если среда случайна, то параметр L случаен, и для оценки временной асимптотики среднего (по реализациям среды) потока частиц J_t можно осреднять экспоненту по распределению L . Таким образом, в предположении гауссовости этого распределения получается асимптотическая "сверхэкспоненциальная" оценка $J_t \sim \exp(tEL + t^2 DL/2)$. Для численной проверки такой оценки разработано вычисление логарифмической производной среднего потока и вероятностных моментов случайного параметра L методом Монте-Карло. Дано приложение указанной новой формулы к исследованию пандемии COVID-19.

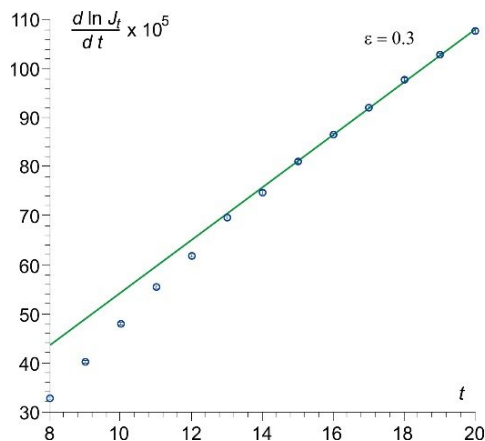


Рис. 1 – Оценки $d \ln J_t / dt$ и соответствующей регрессии $at + b$ для размножения частиц в случайно неоднородном шаре

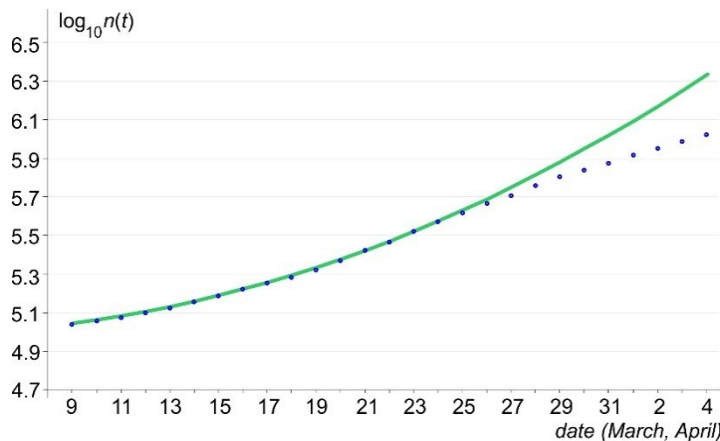


Рис. 2 – Число заболевших COVID-19 в марте 2020 г. во всем мире (точки) и сверхэкспоненциальная оценка

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Михайлов Г. А., Лотова Г. З. Алгоритмы метода Монте-Карло для исследования временной асимптотики потока частиц с размножением в случайной среде // ДАН. Математика, информатика, процессы управления. 2020. Т. 490, № 1. С. 47–50. DOI: 10.7868/S2686954320010051.
2. Lotova G. Z., Mikhailov G. A. The study of time dependence of particle flux with multiplication in a random medium // RJNAMM. 2020. Vol. 35, iss. 1. P. 11–20. DOI: 10.1515/rnam-2020-0002.
3. Lotova G. Z., Mikhailov G. A. Numerically statistical investigation of the partly super-exponential growth rate in the COVID-19 pandemic (throughout the world) // J. Inverse and Ill-posed Probl. 2020. Vol. 28, iss. 6. P. 877–879. DOI: 10.1515/jiip-2020-0043.

Результаты исследований представлены на конференции "Марчуковские научные чтения 2020", Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Разработка весовых параметрических алгоритмов метода Монте-Карло для суперкомпьютерного решения многомерных задач в естественных и технических науках".

Номер госрегистрации НИР 0315-2019-0002.

Руководитель – чл.-корр. РАН Михайлов Г. А.

Этап 2020 г.

1. Построена комбинированная (ядерно-проекционная) статистическая оценка двумерной плотности распределения: по первой (основной) переменной – ядерная, по второй – проекционная. При этом для каждого определенного по микровыборке "ядерного" интервала статистически оцениваются коэффициенты некоторого ортогонального разложения условной плотности на основе предварительных соответствующих результатов для "микроинтервалов". Проведена оптимизация такой оценки при сделанных предположениях о скорости сходимости используемого ортогонального разложения. Реализована верификация построенной оценки для двуправленного распределения потока излучения, прошедшего через слой рассеивающего и поглощающего вещества.

Комбинированная ядерно-проекционная статистическая оценка двумерной плотности $x \in (x_1, x_2)$, $y \in (y_1, y_2)$, при $x_2 - x_1, y_2 - y_1 < +\infty$ была построена в предположении, что справедливо "ортотпроекционное" разложение

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i(x) \psi_i(y), \text{ где } (\psi_i, \psi_j) = \int_{y_1}^{y_2} \psi_i(y) \psi_j(y) dy = J_{i,j}$$

($J_{i,j}$ – символ Кронекера). При этом

$$\psi_0(y) \equiv 1/\sqrt{y_2 - y_1}, \quad f_1(x) = \int_{y_1}^{y_2} f(x, y) dy = a_0(x) \sqrt{y_2 - y_1}.$$

Соответствующая статистическая оценка функции $f(x, y)$ с учетом численно-статистической реализации проекционного разложения имеет вид:

$$\tilde{f}^{(m)}(x, y) = \sum_{i=0}^m \frac{\sum_{k=1}^N I_{\Delta(x)}(\xi_k) \psi_i(\eta_k)}{N\delta} \psi_i(y), \quad E\tilde{f}^{(m)}(x, y) \approx \sum_{i=0}^m a_i(x) \psi_i(y),$$

где $\{\xi_k, \eta_k\}$ ($k=1, \dots, N$) – выборка случайных значений параметра (x, y) .

Среднеквадратическая погрешность оценки $\tilde{f}^{(m)}(x, y)$ определяется следующим образом:

$$L(N, \delta, m) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} E \left(\tilde{f}^{(m)}(x, y) - f(x, y) \right)^2 dx dy = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \left[(E\tilde{f}^{(m)} - f)^2 + D\tilde{f}^{(m)} \right] dx dy.$$

Ранее в предположении, что коэффициенты $a_i''(x)$, как и $a_i(x)$, убывают при $i \rightarrow \infty$ достаточно быстро и приближенно равномерно в интервале (x_1, x_2) и $0 < C^{(1)} < \frac{f(x, y)}{f_1(x)} < C^{(2)} < +\infty$, нами

было показано, что

$$L(N, \delta, m) = F_0 \frac{m}{N\delta} + F_1 \delta^4 + F_2 S_m^2 = \varepsilon^2, \quad (1)$$

где константы определяются из соотношений

$$F_1 = \frac{C_1 \int_{x_1}^{x_2} (f_1''(x))^2 dx}{576}, \quad \text{где } C_1 = \frac{C}{y_2 - y_1}, \|f_{xx}\|_{L_{2,y}}^2 \lesssim C |a_0''|^2 = C |f_1''|^2 / (y_2 - y_1);$$

$$\int_{x_1}^{x_2} F^2(x) dx = \frac{F_2}{y_2 - y_1} < +\infty, S_m \xrightarrow{m \rightarrow \infty} 0, \quad \text{где } \left| \sum_{i=m+1}^{\infty} a_i(x) \psi_i(y) \right| \lesssim F(x) \cdot S_m;$$

$$F_0 = F^{(0)} \int_{x_1}^{x_2} f_1(x) dx, \quad \text{где } \int D \tilde{f}^{(m)} dy \lesssim \frac{F^{(0)} m f_1(x)}{N \delta}, \quad F^{(0)} = 0,5 (C^{(1)} + C^{(2)}).$$

Для оптимизации алгоритма необходимо минимизировать величину среднего числа вычислительных операций вида $T = a \cdot m + b$ при условии (1).

Поскольку оптимизация по δ осуществляется на основе микрогруппированной выборки, то при надлежащей организации вычислений значение T практически не зависит от δ . Оптимизация трудоемкости по δ , таким образом, сводится к минимизации величины $L(N, \delta, m)$ по δ , которая, соответственно теории ядерных оценок, дает величину

$$L_0(N, m) = \frac{5}{4} \left(F_0 \frac{m}{4NF_1} \right)^{\frac{1}{5}} \frac{mF_0}{N} + F_2 S_m^2 = F \cdot \left(\frac{m}{N} \right)^{\frac{4}{5}} + F_2 S_m^2, \quad F = 5 \cdot 4^{\frac{4}{5}} F_0^{\frac{4}{5}} F_1^{\frac{1}{5}}, \quad (2)$$

причем

$$\delta_{opt} = \left(F_0 \frac{m}{4NF_1} \right)^{\frac{1}{5}}. \quad (3)$$

Проведенные исследования показали, что условная минимизация по m величины $am+b$ при условии $L_0(N, m) = \varepsilon^2$ для реальных сложных задач весьма затруднительна. Поэтому была проведена оптимизация в предположении, что свойства задачи и организация вычислений позволяют предположить, что среднее число операций практически не зависит от m , т. е. $am/b \ll 1$. Такая оптимизация сводится к минимизации величины $L_0(N, m)$ по m .

Для $S_m \approx O(m^{-(r-1)})$ получено оптимальное значение

$$m_{opt}^{(1)} = \left[\frac{5}{2} \frac{F_2}{F} (r-1) \right]^{\frac{1}{2r-1,2}} \cdot N^{\frac{4}{10r-6}}.$$

Для $S_m = O(e^{-\lambda m})$ получено оптимальное значение $m_0 \approx \frac{2 \ln N}{5 \lambda} = \frac{2 \ln N}{5 |\ln q|}$.

При этом, согласно (2), (3), $\delta_{opt} = \left(\frac{F_0}{10F_1 |\ln q|} \frac{\ln N}{N} \right)^{\frac{1}{5}}$, $L_0(N, m_0) \approx F \cdot \left(\frac{2}{5 |\ln q|} \frac{\ln N}{N} \right)^{\frac{4}{5}}$, в то время как порядок оптимальной двумерной ядерной оценки с равномерным ядром определяется величиной $\frac{1}{N^{\frac{2}{3}}}$.

2. Одним из классических способов уменьшения трудоемкости вычислений для оценки малых вероятностей прохождения частиц сквозь толстый слой вещества $0 < z < H$ является метод

экспоненциального преобразования длины свободного пробега l . В этом весовом алгоритме вместо заданного полного сечения σ для моделирования длины свободного пробега используется $\sigma' = \sigma - c \cos v$, т. е. используется переходная плотность

$$p(l, \sigma, c) = (\sigma - c \cos v) e^{-l(\sigma - c \cos v)},$$

а после каждого столкновения в случае рассеяния вспомогательный вес частицы умножается на

$$\frac{\sigma e^{-lc^* \cos v}}{\sigma - c^* \cos v},$$

где v – это угол между направлением пробега в точке столкновения ω и осью Oz , т. е. $\cos v = (\omega, Oz) = \omega_z$. Корректное значение параметра $c \in (0, \sigma)$ рекомендуется выбирать так, чтобы дисперсия соответствующей весовой оценки была конечна. В реальных физических задачах величина полного сечения может зависеть от скоростей частицы до и после рассеяния, пространственных координат, энергий E, E' (до и после рассеяния) и т. д. В частности, для переноса гамма-квантов сечение комптоновского рассеяния σ_k зависит от E , а индикатриса рассеяния $w(.,.)$ зависит от E и E' . В этом случае задача определения корректного значения параметра c экспоненциального преобразования требует отдельного трудоемкого теоретического и вычислительного исследования. Для задач переноса гамма-квантов с учетом комптоновского рассеяния и поглощения (для малых значений E и E') впервые был теоретически определен "корректный" интервал $(0, \sqrt{\sigma(E)\sigma_c(E)})$ для параметра c , где $\sigma_c(E)$ – сечение поглощения. На примере переноса гамма-излучения сквозь толстый слой воды было проведено численное исследование "корректного" алгоритма экспоненциального преобразования (при $c = \sqrt{\sigma(E)\sigma_c(E)}$) и его рандомизированной модификации с ветвлением траектории цепи Маркова в среднем на $\sigma(E)/(\sigma(E) - c^* \cos v)$ ветвей в случае рассеяния по сравнению со стандартным алгоритмом моделирования. Здесь и далее результаты расчетов продемонстрировали высокую эффективность использования построенного алгоритма экспоненциального преобразования и его рандомизированной модификации с ветвлением траектории цепи Маркова по сравнению со стандартным алгоритмом моделирования. Дополнительно было проведено исследование влияния стохастичности среды на вероятность прохождения гамма-квантов сквозь толстый слой воды с "пустыми" ($\sigma \equiv 0$) шарами или слоями, координаты центров которых образовывали однородный пуассоновский поток. Полученные результаты расчетов показали, что трехмерная стохастичность (с пустыми шарами) среды существенно увеличивает среднюю вероятность прохождения сравнительно с одномерной (с пустыми слоями). Отметим, что для стохастичных сред был использован метод максимального сечения, в котором алгоритм экспоненциального преобразования длины пробега применялся только после физического столкновения, так как поглощение кванта необходимо для конечности дисперсии соответствующей весовой оценки.

3. Активно развиваемым направлением науки на современном этапе является использование взаимодействия газа с поверхностями как с целью их модификации, так и для "активации" газа, основанной на каталитических свойствах поверхностей. Широкие возможности для моделирования течений разреженного газа в подобных задачах предоставляет метод прямого статистического моделирования (ПСМ). При этом возникает необходимость моделирования в рамках метода гетерогенных реакций. В силу структуры метода ПСМ принципиальным является использование для моделирования гетерогенной реакции при столкновении частицы с поверхностью микроскопической вероятности. Используются подходы различной степени сложности: использование микроскопической вероятности, полученной на основе экспериментальных и

теоретических данных; учет скорости подлетающих частиц; учет заселенности активационных центров поверхности; адсорбция и десорбция частиц; возможность взаимодействия адсорбированных частиц с последующей десорбцией в газовую фазу. При этом возникают погрешности различной природы, в частности смещение.

В отчетном периоде проведен сравнительный анализ двух подходов к моделированию гетерогенных реакций методом ПСМ на примере разложения водорода на поверхности нагретого тантала. Рассматривалось моделирование реакций диссоциации-рекомбинации водорода на основе двухступенчатой модели. В рамках этой модели рассматривались две обратимые газоповерхностные реакции: $S^* + H_2 \leftrightarrow SH + H$ и $SH \leftrightarrow H + S^*$. Здесь S^* – свободный поверхностный центр на поверхности твердого тела; H_2 и H – молекула и атом водорода в газовой фазе; SH – атом водорода, присоединенный к поверхностному центру. Молекула водорода при попадании на свободный поверхностный центр с некоторой вероятностью диссоциировала на два атома водорода, один из которых возвращался в газовую среду, а второй на некоторое время оставался присоединенным к поверхностному центру. При столкновении атома водорода с "занятым" поверхностным центром с некоторой вероятностью происходила рекомбинация.

Для моделирования двухступенчатой модели использован подход к моделированию каталитических реакций методом ПСМ с учетом скорости подлетающих частиц и без учета их скорости. Первый подход в силу построения является смещенным. Исходя из предположения, что вблизи поверхности функция распределения частиц по скоростям максвелловская, получено аналитическое выражение для относительного смещения. Также разработана методика, позволяющая уменьшить это смещение. Второй подход заключается в использовании макроскопической вероятности в качестве микроскопической. Для его реализации требуются данные о температуре газа вблизи поверхности. Отметим, что в рамках первого подхода вероятность вступить в реакцию у частиц с меньшей скоростью больше, чем у частиц с высокой скоростью, а во втором частицы вступают в реакцию равновероятно.

Численное исследование рассматриваемых подходов было выполнено на примере бесконечной нагретой проволоки, помещенной в атмосферу водорода. При реализации второго подхода использовались данные о температуре, полученные в ходе предварительных расчетов. В ходе исследования было изучено влияние рассматриваемых подходов на скорость получения атомарного водорода и уровень заселенности поверхности. Показано, что оба подхода дают похожие результаты. Проведенные расчеты также подтвердили аналитические данные о величине смещения первого подхода и возможности разработанной методики существенно уменьшать величину смещения.

КНП "Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории".

Блок 2.1 "Статистическое моделирование метеорологических и гидрологических процессов".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2018-0010.

Исполнители: д.ф.-м.н. Марченко М. А., д.ф.-м.н. Рогазинский С. В.

Разработана вероятностная модель образования и динамики спектра атмосферных аэрозолей с учетом пространственной неоднородности с параметрами, зависящими от региональной специфики, а также создан алгоритм прямого статистического моделирования для реализации модели.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 18-01-00356 "Разработка рандомизированных весовых алгоритмов численного статистического моделирования с ветвлением траекторий для построения параметрических оценок функционалов от решений многомерных линейных и нелинейных кинетических уравнений"

Руководитель проекта – чл.-корр. РАН Михайлов Г. А.

Разработаны новые алгоритмы весового "метода экспоненциального преобразования" с дополнительным рандомизированным ветвлением траекторий цепи столкновений частицы для "плоского" и "сферического" случаев. Эти алгоритмы были использованы для оценки влияния стохастичности неоднородной среды на прохождение гамма-излучения.

Предложена комбинированная (ядерно-проекционная) статистическая оценка двумерной плотности распределения: по первой (основной) переменной (условной плотности) – ядерная, по второй – проекционная. При этом для каждого определенного по микровыборке "ядерного" интервала использовались статистически оцененные коэффициенты некоторого ортогонального разложения условной плотности на основе предварительных соответствующих результатов для "микроинтервалов". Важным результатом работы является среднеквадратическая оптимизация такой оценки при сделанных предположениях о скорости сходимости используемого ортогонального разложения. Верификация оценки реализована для двунаправленного распределения потока излучения, прошедшего через слой вещества.

Проект РФФИ № 18-01-00599 "Разработка алгоритмов численного статистического моделирования и комплексов программ для суперкомпьютеров с целью оценки вероятностных характеристик природных и финансовых процессов".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Рогзинский С. В.

Разработаны алгоритмы метода Монте-Карло для оценки вероятностных моментов параметра временной экспоненциальной асимптотики потока частиц с размножением в случайной среде. Аналитически и численно показано, что асимптотика среднего числа частиц может быть близкой к экспоненциальной с показателем, содержащим слагаемое, пропорциональное квадрату времени.

Исследованы флуктуации числа частиц, рассеивающихся и размножающихся в случайной среде, в зависимости от времени. С этой целью построены рандомизированные алгоритмы метода Монте-Карло для оценки вероятностных моментов параметра соответствующей экспоненциальной асимптотики. При этом реализованы оценки логарифмической производной на основе функции Грина по временному параметру. Численные результаты, полученные для односкоростного процесса переноса частиц в сферически симметричной случайной среде, подтверждают возможность использования построенных алгоритмов для решения практических задач.

Число частиц в размножающей среде при достаточно широких условиях асимптотически экспоненциально по времени t с некоторым параметром L , т. е. с показателем Lt . Если среда случайна, то параметр L – случайная величина и для оценки временной асимптотики среднего (по реализациям среды) числа частиц можно в некотором приближении осреднять экспоненту по распределению L . В предположении гауссовости этого распределения получена асимптоти-

ческая "сверхэкспоненциальная" оценка среднего потока, выражаемая экспонентой с показателем $tEL + t^2DL/2$. Дано приложение указанной новой формулы к исследованию пандемии COVID-19.

Разработан новый стохастический параллельный алгоритм поиска коэффициентов многофакторной логистической регрессии. Известно, что итерационный метод Ньютона – Рафсона является численно неустойчивым вследствие "плохого" начального приближения и существования локальных минимумов. Ограничение "плохого" начального приближения снимается с помощью параллельного решения однофакторных логистических регрессий. Начальное приближение в предлагаемом алгоритме строится из слабо коррелируемых коэффициентов ковариантов с установленным достигнутым уровнем значимости. Стохастический поиск значений коэффициентов позволяет избежать попаданий в локальные минимумы при решении оптимизационной задачи для критерия максимального правдоподобия в многофакторной логистической регрессии.

Рассмотрен массоперенос в коллекторе трещиновато-порового типа во время проведения гидродинамического исследования (ГДИС) методом кривой восстановления давления. Математическая модель данного процесса описывается системой дифференциальных уравнений с частными производными. Для численного решения данной системы используется неявная конечноразностная схема. Полученная в результате этого система векторных уравнений с блочно-трехдиагональными матрицами решается методом матричной прогонки. Для ускорения трудоемких расчетов применяется параллельный алгоритм матричной прогонки. Представлены результаты численного моделирования на суперкомпьютере.

Разработаны новые многоуровневые параллельные алгоритмы, реализованные на суперкомпьютере для задачи движения вихревых нитей в сверхтекучем гелии с учетом случайного воздействия Ланжевена, которое описывается с помощью системы стохастических дифференциальных уравнений. Методом Монте-Карло оцениваются различные функционалы от решения этой системы с высокой точностью. Расчеты проведены на кластерах НКС-30Т и НКС-1П.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Mikhailov G. A., Lotova G. Z. Monte Carlo algorithms for estimating time asymptotics of multiplication particle flow in a random medium // *Doklady Math.* 2020. Vol. 101. No 1. P. 40–42. DOI: 10.1134/S1064562420010056.
2. Lotova G. Z., Mikhailov G. A. The study of time dependence of particle flux with multiplication in a random medium // *RJNAMM.* 2020. Vol. 35, iss. 1. P. 11–20. DOI: 10.1515/mam-2020-0002.
3. Lotova G. Z., Mikhailov G. A. Numerically statistical investigation of the partly super-exponential growth rate in the COVID-19 pandemic (throughout the world) // *J. Inverse and Ill-posed Probl.* 2020. Vol. 28, iss. 6. P. 877–879. DOI: 10.1515/jiip-2020-0043.
4. Mikhailov G. A., Tracheva N. V., Ukhinov S. A. A new kernel-projective statistical estimator in the Monte Carlo method // *RJNAMM.* 2020. V. 35. No 6. P. 341–353. DOI: 10.1515/mam-2020-0028.
5. Mikhailov G. A., Tracheva N. V., Ukhinov S. A. Randomized new statistical kernel-projection estimator in the Monte Carlo Method // *Doklady Math.* 2020. Vol. 102, No 1. P. 313–317. DOI: 10.1134/S1064562420040122.

6. Medvedev I. N., Mikhailov G. A. Randomized exponential transformation algorithm for solving the stochastic problems of gamma-ray transport theory // RJNAMM. Vol. 35, iss. 3. P. 153–162. DOI: 10.1515/rnam-2020-0012.

7. Burmistrov A., Korotchenko M. Double randomization method for estimating the moments of solution to vehicular traffic problems with random parameters // RJNAMM. V. 35, iss. 3. P. 143–152. DOI: 10.1515/rnam-2020-0011.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Plotnikov M. Yu., Shkarupa E. V. Comparison of different approaches to simulation of heterogeneous reactions by DSMC method // J. of Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1677. 012147 (7 p.). DOI:10.1088/1742-6596/1677/1/012147.

2. Gorbachev Yu. E., Leschev D. V., Plotnikov M. Yu., Shkarupa E. V. Employing one-dimensional approach to calculate mixture composition evolution caused by gas-phase reactions for the gas flowing through a cylindrical channel // J. of Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1677. 012132 (6 p.). DOI:10.1088/1742-6596/1677/1/012132.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Михайлов Г. А., Трачева Н. В., Ухинов С. А. Применение проекционных оценок для исследования угловых характеристик поляризованного излучения // Физика окружающей среды : материалы 14-й Междунар. школы молодых ученых им. А. Г. Колесника, Томск, 1–5 июля 2020 г. Томск: STT, 2020. ISBN 978-5-93629-654-3. С. 56–59.

2. Михайлов Г. А., Лотова Г. З. Численно-статистическое и аналитическое исследование асимптотики среднего числа частиц, размножающихся в случайной среде // Марчуковские научные чтения : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 47. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10086.

3. Bulgakova T. E., Tracheva N. V., Voytishek A. V. Usage of the randomized kernel functional numerical algorithm // Abst. of the 3rd Intern. conf. on mathematics and statistics, Sharjah (UAE), Feb. 6–9, 2020. American University of Sharjah, 2020. P. 111.

4. Рогазинский С. В. Рандомизированный проекционный метод для решения нелинейного уравнения Больцмана в трехмерном случае // Марчуковские научные чтения : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 51. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10094.

5. Корда А. С. Численные статистические алгоритмы решения обратных задач теории переноса излучения в атмосфере с учетом поляризации // Марчуковские научные чтения : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 43. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10391.

6. Михайлов Г. А., Роженов С. А. Новый алгоритм стохастической гомогенизации для оценки моментов коэффициента K размножения частиц в случайной среде // Марчуковские научные чтения : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 48. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10087.

7. Антюфеев В. С. Расчет переноса излучения для атмосферы малой оптической толщины // Марчуковские научные чтения : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 35. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10960.

8. Бурмистров А. В., Коротченко М. А. Метод двойной рандомизации для оценки моментов решения уравнения коагуляции // Марчуковские научные чтения : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 36. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10061.

9. Лотова Г. З. Численное статистическое исследование потока частиц с размножением в случайной среде // Марчуковские научные чтения : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 45. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10080.

10. Медведев И. Н. Рандомизированный алгоритм экспоненциального преобразования для решения стохастических задач теории переноса гамма-квантов // Марчуковские научные чтения : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 46. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10083.

11. Михайлов Г. А., Трачева Н. В., Ухинов С. А. Новая ядерно-проекционная статистическая оценка с приложениями к исследованию интенсивности поляризованного излучения // Марчуковские научные чтения : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 48. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10088.

12. Плотников М. Ю., Шкарупа Е. В. Моделирование синтеза алмазных структур при газоструйном осаждении // Марчуковские научные чтения : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 49. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10091.

13. Трачева Н. В., Ухинов С. А. Численное исследование сходимости проекционных оценок интенсивности поляризованного излучения // Марчуковские научные чтения : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 54. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10100.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. – 11 докладов, из них 1 пленарный (Антюфеев В. С., Корда А. С., Коротченко М. А., Лотова Г. З., Медведев И. Н., Михайлов Г. А., Рогазинский С. В., Трачева Н. В., Ухинов С. А., Шкарупа Е. В.).

2. Всероссийская конференция "36-й Сибирский теплофизический семинар", Новосибирск, 5–7 октября 2020 г. – 2 постерных доклада (Шкарупа Е. В.).

3. 14-я Международная школа молодых ученых "Физика окружающей среды" им. А. Г. Колесника, Томск, 1–5 июля 2020 г. – 1 доклад (Трачева Н. В.).

4. The 14th International conference in Monte Carlo & Quasi-Monte Carlo methods in scientific computing, Oxford (UK), August 10–14, 2020 – 1 доклад (Трачева Н. В.)

Участие в оргкомитетах конференций

1. Медведев И. Н. – член оргкомитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;

2. Усов А. Г. – член оргкомитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;

3. Михайлов Г. А. – председатель программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;

4. Трачева Н. В. – член оргкомитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 7

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 9

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 22

Докладов на конференциях – 15, в том числе 1 пленарный

Членов организационных или программных комитетов конференций – 4

Кадровый состав

- | | | | |
|-----|-------------------|--------------------|---------------|
| 1. | Рогазинский С. В. | зав. лаб. | д.ф.-м.н. |
| 2. | Антюфеев В. С. | с.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 3. | Корда А. С. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 4. | Коротченко М. А. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 5. | Лотова Г. З. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 6. | Медведев И. Н. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 7. | Михайлов Г. А. | советник РАН | чл.-корр. РАН |
| 8. | Роженко С. А. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 9. | Соболева О. Н. | с.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 10. | Трачева Н. В. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 11. | Ухинов С. А. | в.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 12. | Усов А. Г. | ведущ. программист | |
| 13. | Шкарупа Е. В. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |

Роженко С. А. – молодой научный сотрудник.

Педагогическая деятельность

- Михайлов Г. А. – профессор НГУ;
Рогазинский С. В. – профессор НГУ;
Ухинов С. А. – профессор НГУ;
Антюфеев В. С. – профессор НГУ, ВКИ НГУ, СУНЦ НГУ;
Медведев И. Н. – доцент НГУ;
Лотова Г. З. – ст. преподаватель НГУ;
Усов А. Г. – ст. преподаватель НГУ, зам. декана ММФ НГУ;
Трачева Н. В. – ст. преподаватель НГУ.

Опубликовано учебное пособие для университетов

Михайлов Г. А., Войтишек А. В. Статистическое моделирование. Методы Монте-Карло: учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. М.: Издательство Юрайт, 2020. 323 с. (учебное пособие для вузов). ISBN: 978-5-534-11518-5.

ЛАБОРАТОРИЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА СТОХАСТИЧЕСКИХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Зав. лабораторией к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.

Важнейшие достижения

Создание и численное решение модели СДУ для теоретического исследования теплофизических параметров систем кабины экипажа самолета

Д.ф.-м.н. Гусев С. А., д.т.н. Николаев В. Н.

Количественное и качественное усложнение бортового оборудования увеличивает значимость решения задачи определения теплового состояния кабины самолета, при этом возрастает роль оценки теплофизических параметров систем кабины экипажа, в том числе расхода воздуха в системах кондиционирования и системы вентиляции, характеристики электротермической и струйной защиты от запотевания окна кабины, а также толщина изоляции в кабине. В данной работе проведено математическое моделирование теплового состояния находящегося под давлением термически изолированного отсека (кабины экипажа) с сотовыми конструкциями. Для этого разработана новая модель СДУ для уравнения теплопроводности и предложено решение прямой и обратной задач теплообмена. Прямая задача решалась методом Галеркина с использованием кусочно-линейного базиса, численной схемы аппроксимации второго порядка типа Розенброка для неавтономных систем, комбинированного метода блуждания по сферам и модифицированного метода Эйлера. Решение обратной задачи теплопередачи проводилось квазиньютоновским методом Бройдена – Флетчера – Гольдфарба – Шанно в сочетании с методом Ньютона. С помощью ковариационной матрицы ошибок оценки параметров и квантиля χ^2 -распределения вероятностей $1 - \alpha$ построены доверительные интервалы оценок параметрической идентификации.

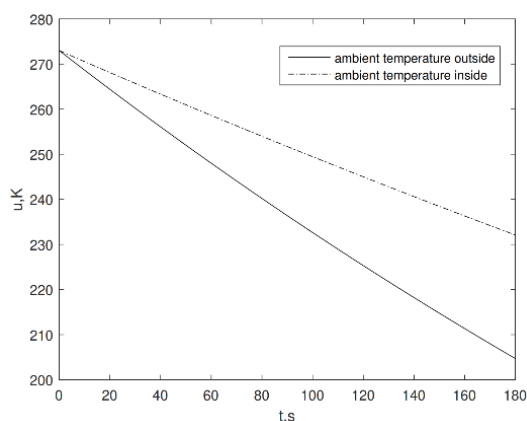


Рис. 1. Изменение температур окружающей среды (сплошная линия) и внутренней температуры (пунктир)

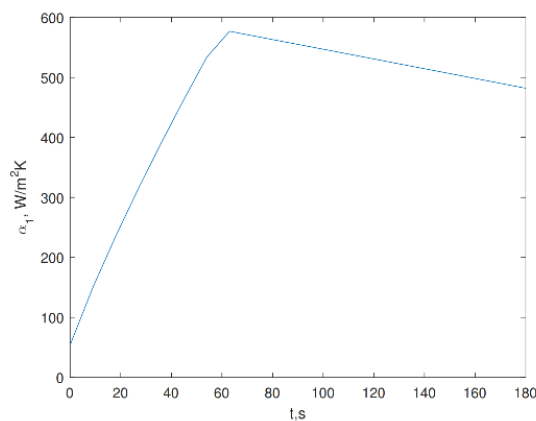


Рис. 2 – График изменение коэффициента теплопроводности

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Gusev S. A., Nikolaev V. N. Numerical and statistical simulation technique for the aircraft wing thermal state in icing conditions // AIP Conf. Proc. 2020 (в печати, Web of Science, Scopus).

2. Gusev S. A., Nikolaev V. N. Theoretical studies of the cockpit systems thermophysical parameters using stochastic differential equations // AIP Conf. Proc. 2020 (в печати, Web of Science, Scopus).

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. 20-я Международная конференция по методам аэрофизических исследований "ICMAR 2020", Новосибирск, 1–7 нояб. 2020 г.
2. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Разработка весовых параметрических алгоритмов метода Монте-Карло для суперкомпьютерного решения многомерных задач в естественных и технических науках".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2019-0002.

Руководитель – д.ф.-м.н., член-корр. РАН Михайлов Г. А.

Этап 2020 г.

Рассмотрена задача оптимального оценивания (задача нелинейной фильтрации, интерполяции и экстраполяции) методом частиц для систем диффузионно-скачкообразного типа. Построены три статистических алгоритма, которые различаются способом моделирования пуассоновской составляющей, входящей в уравнение объекта наблюдения. Первый из них основан на свойстве ординарности неоднородного пуассоновского процесса, второй – на методе максимального сечения, а третий – на более экономичной модификации метода максимального сечения. На примере оценивания траекторий процесса Орнштейна – Уленбека со скачками показано, что применение метода максимального сечения, особенно его модификации, позволяет сократить число обращений к датчику псевдослучайных чисел при моделировании пуассоновского потока и тем самым уменьшить время счета.

На рис. 3 представлены траектория объекта наблюдения (красная линия) и измерения (синяя линия). На рис. 4 – та же траектория объекта наблюдения (красная линия), результат фильтрации (зеленая линия), результаты интерполяции (для t из $[0, 0.25]$) и экстраполяции (для t из $[0.75, 1]$) (синяя линия).

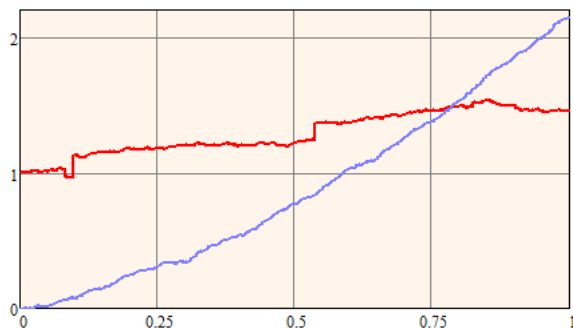


Рис. 3 – Траектория объекта наблюдения (красная линия); измерения (синяя линия)



Рис. 4 – Траектория объекта наблюдения (красная линия); результаты фильтрации (зеленая линия); интерполяции (для t из $[0, 0.25]$ синяя линия); экстраполяции (для t из $[0.75, 1]$ синяя линия); математическое ожидание (серая линия)

Проведены исследования стохастических осцилляторов с полиномиальной нелинейностью, в частности осцилляторов Ван-дер Поля и Дуффинга, при наличии нормального белого или пуассоновского шума. Продолжены работы по исследованию влияния пуассоновского шума на поведение осциллятора Ван-дер-Поля и на оценки функционалов от численного решения СДУ, задающего осциллятор, с помощью обобщенного явного метода Эйлера. В численной схеме решения СДУ на основе обобщенного явного метода Эйлера используется адаптированная к скачкам временная сетка, представляющая собой суперпозицию заданной равномерной временной сетки $\{t_n\}$, $n = 0, \dots, Nh$, $t_0 = 0$, $t_N = T$ с постоянным шагом $h = T/Nh$ и множества моментов скачков моделируемой траектории решения. Величины скачков моделируются постоянными ($m_\xi > 0$) либо случайными нормальными с математическим ожиданием m_ξ и дисперсией σ^2_ξ . Численно исследовано влияние параметров СДУ на характер колебаний первого и второго моментов решения СДУ и влияние размеров шага интегрирования численной схемы и ансамбля моделируемых траекторий решения СДУ на точность оценок моментов решения в случае большой постоянной величины скачков пуассоновской составляющей, приводящей к появлению высокочастотных осцилляций на фоне основных колебаний оценок моментных функций.

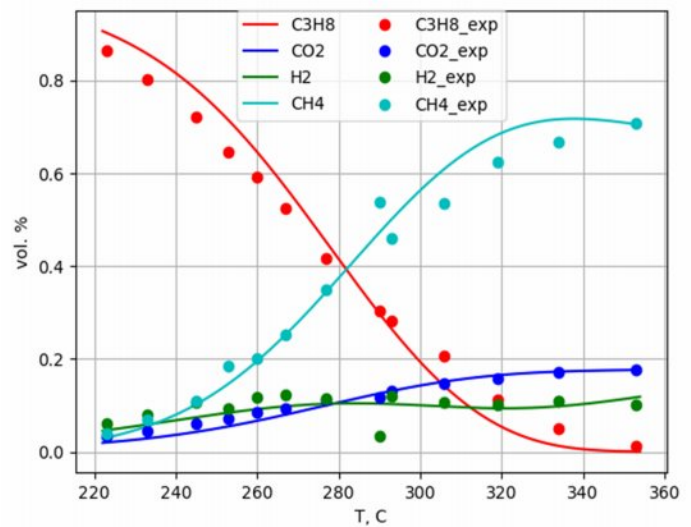
Разработаны параллельные алгоритмы метода Монте-Карло для численного исследования движения электрических зарядов в постоянном неоднородном магнитном поле на суперкомпьютере. Исследована возможность удержания частиц в магнитных ловушках, имеющих различные конфигурации магнитных полей. Модель пространственного движения нерелятивистского электрического заряда в постоянном неоднородном магнитном поле напряженностью $\tilde{H}(\tilde{r})$ при заданных начальных условиях $(\tilde{R}_0, \tilde{v}_0)$ определялась известной системой дифференциальных уравнений Максвелла. Для учета внутренних и внешних случайных возмущений при соответствующей замене переменных исходная система приводилась к соответствующей системе СДУ. Исследованы возможные режимы движения заряда. Показано, что происходит изменение амплитуды колебаний заряда: при одном и том же интервале интегрирования в детерминированном случае заряд прошел практически полный оборот и вернулся в начальное положение, тогда как под воздействием случайного аддитивного шума заряд до начального положения не доходит. Расчеты показывают экспоненциальный рост оценки дисперсии траекторий на всем интервале интегрирования. Показано, что наличие даже небольших шумов делает движение заряда неустойчивым.

Проведены численные эксперименты по статистическому моделированию электромагнитных "биений" на суперкомпьютере. Рассмотрено дифференциальное уравнение обобщенного осциллятора Дуффинга под внешним гармоническим и случайным внутренним возмущениями в виде системы СДУ. Исследовано явление перемежаемости, представляющей непрерывный переход от регулярного движения к хаотическому. Сравнение графиков смоделированной траектории компоненты решения обобщенного осциллятора Дуффинга без шума и с шумом интенсивности $\sigma = 2$, показывает, что случайные шумы большой интенсивности на данной траектории вызывают неустойчивый рост амплитуды колебаний, "биения" пропадают с продвижением по интервалу интегрирования. Численная оценка математического ожидания траектории решения системы СДУ Дуффинга показала, что "биения в среднем" не наблюдаются, оценка матема-

тического ожидания стремится к нулю с ростом t , в то время как оценка дисперсии решения со временем растет, что говорит о неустойчивости решения системы СДУ. Расчеты проводились с шагом интегрирования $h = 10^{-8}$, при котором устранен эффект численной неустойчивости схемы Эйлера.

Для расчетов динамики скоростей химических реакций паровой конверсии и метанирования в промышленно важном процессе предформинга пропана использовалась модель Ленгмюра – Хиншелвуда в виде задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Определение неизвестных кинетических параметров стадий реакции проводилось путем решения обратной задачи химической кинетики, в которой требуемый минимум функционала отклонения расчетных значений от экспериментальных рассчитывался с помощью модификации известного алгоритма стохастического гравитационного поиска. При этом большая трудоемкость и вычислительная сложность алгоритма стохастического гравитационного поиска нивелировалась высокой степенью встроенного параллелизма по причине отсутствия зависимостей вычислений по данным. В результате решения обратной задачи химической кинетики найдены оптимальные значения параметров, входящих в выражение скоростей реакции, которые были использованы для решения прямой задачи химической кинетики. На рис. 5 представлены результаты расчетов экспериментов по предварительной формовке пропана. Модель достоверно описывает имеющиеся экспериментальные данные.

Рис. 5 – Температурные зависимости выходных концентраций пропана C_3H_8 , метана CH_4 , водорода H_2 и CO_2 в процессе предварительной формовки пропана; точки – экспериментальные данные, линии – результаты численного моделирования



Исследована динамика вихревых нитей методом численного статистического моделирования. Изучение стохастической динамики квантовых вихревых нитей является одним из важнейших направлений в физике квантовых жидкостей. Сфера применения необычайно широка: от теории фазовых переходов до свойств бозе-эйнштейновского конденсата. Рассматривался случай с трением. Положение вихревой точки в пространстве задавалось с помощью системы стохастических дифференциальных уравнений в смысле Ито следующего вида:

$$d\vec{S}_p(t) = \left(\vec{V}_{si} - \alpha \vec{s}' \times \vec{V}_{si} \right) dt + D d\vec{W}(t),$$

где $\vec{S}_p$ – радиус-вектор, проведенный из начала координат в эту точку; $p = 1, \dots, P$; $\vec{V}_{si}$ – наведенная скорость от конфигурации всех нитей; $\vec{s}'$ – первая производная по параметру L ; $\vec{s}''$ –

вторая производная по параметру L ; параметр L – длина дуги; α – коэффициент трения. Наведенная скорость $\vec{V}_{si}$ от конфигурации всех нитей определяется выражением следующего вида:

$$\vec{V}_{si} = \beta \vec{s}' \times \vec{s}'' + \frac{k}{4\pi} \int_C \frac{(s_i - s_j) \times ds_j}{|s_i - s_j|^3},$$

где $\beta = \frac{k}{4\pi} \ln \left(\frac{2\sqrt{s_+ s_-}}{\sqrt[4]{e} a_0} \right)$; $k = h/m_{He}$ – квант циркуляции; h – постоянная Планка; m_{He} – масса атома гелия; C означает, что интегрирование ведется по всей конфигурации вихревых нитей, исключая прилежащие сегменты нити к точке s_i , $s_+ = s_{i+1} - s_i$, $s_- = s_i - s_{i-1}$, индексы i и j – метки точек на линии; a_0 – радиус ядра вихревой нити; $\vec{W}(t)$ – винеровский случайный процесс; D – интенсивность силы Ланжевена.

Для численного решения системы стохастических дифференциальных уравнений использовался метод Эйлера – Маруямы. Получаем соответственно разностные схемы следующего вида:

$$\vec{S}_{p_{n+1}} = \vec{S}_{p_n} + (\vec{V}_{si_n} - \alpha \vec{s}'_n \times \vec{V}_{si_n}) h_t + \sum_{j=1}^m D_{ij} (\vec{S}_{p_n}, t_n) \Delta W_j(t_n),$$

где $\Delta W_j(t_n) = W_j(t_{n+1}) - W_j(t_n) = \sqrt{h_t} Z_n$; h_t – шаг интегрирования численного метода Эйлера – Маруямы; Z_n – последовательность независимых стандартных нормальных случайных величин.

Расчеты динамики конфигурации вихревой нити в отсутствие и при наличии случайного воздействия силы Ланжевена на временном интервале $t \in [0, 1]$ с шагом $h_t = 10^{-4}$, начальная конфигурация вихревых нитей при $t = 0$ – эллипса, который имеет $N_{points} = 60$ точек, приведены на рис. 6, 7 соответственно.

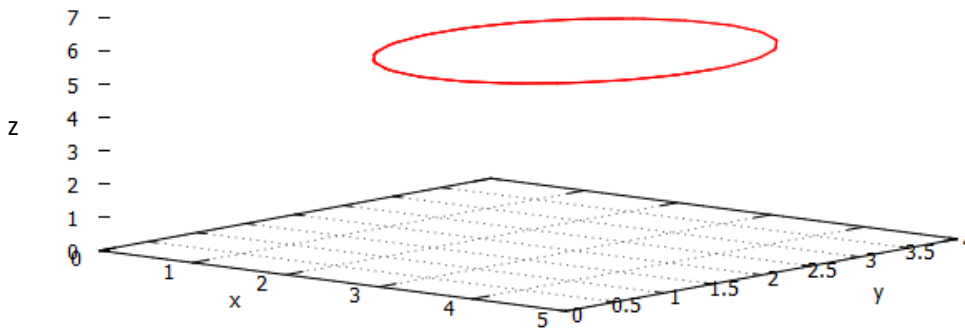


Рис. 6 – Одна реализация без случайного воздействия Ланжевена

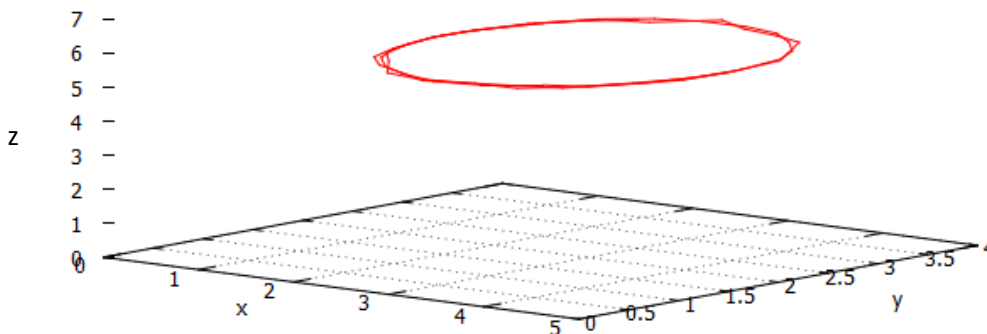


Рис. 7 – Одна реализация при случайном воздействии Ланжевена

Публикации**Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science**

1. Burnistrov A., Korotchenko M. Double randomization method for estimating the moments of solution to vehicular traffic problems with random parameters // RJNAMM. 2020. Vol. 35, iss. 3. P. 143–152. DOI: <https://doi.org/10.1515/rnam-2020-0011>.
2. Averina T. A., Rybakov K. A. Using maximum cross section method for filtering jump-diffusion random processes // RJNAMM. 2020. Vol. 35, iss. 2. P. 55–67. DOI: <https://doi.org/10.1515/rnam-2020-0005>.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Enikeeva L., Marchenko M., Smirnov D., Gubaydullin I. Parallel gravitational search algorithm in solving the inverse problem of chemical kinetics // Voevodin V., Sobolev S. (eds) Supercomputing. RuSCDays 2020. Commun. in Comp. and Inform. Sci. Vol. 1331. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-64616-5_9.
2. Averina T., Rybakov K. Statistical filtering algorithms based on the maximum cross section-method for stochastic systems with regime switching // J. of Phys.: Conf. Ser. 1715. 2021. 012060. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012060.
3. Yakunin M. A. Parametric analysis of stochastic oscillators by the statistical modeling method // Num. Analysis and Appl. 2020. Vol. 13. No. 3. P. 282–292. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995423920030088>.
4. Baykov E. S., Krutko A. V., Lukinov V. L., Sanginov A. J., Leonova O. N. The effectiveness of the system for predicting the results of surgical treatment of patients with lumbar disc herniation // Hirurgia Pozvonochnika. 2020. Vol. 17, iss. 1. P. 87–95. DOI: 0.14531/SS2020.1.87-95.
5. Ivanova A., Mikhaylovskiy M., Novikov V., Vasyura A., Lukinov V., Lebedeva M. The effect of Smith – Peterson osteotomy on blood loss during surgical correction of adolescent idiopathic scoliosis // Folia Medica. 2020. Vol. 62, iss. 3. P. 503–508 DOI: <https://doi.org/10.3897/folmed.62.e47790>.
6. Kozlov B. N., Panfilov D. S., Sonduev E. L., Lukinov V. L. Ascending aortic aneurysm: Propensity score matching analysis of hemiarch and non-hemiarch replacement // Rus. J. of Cardiol. 2020. Vol. 25, iss. 10. 3887. <https://doi.org/10.15829/1560-4071-2020-3887>.
7. Holtzer S. V., Ivanov A. A. A modified algorithm of latent semantic analysis for text processing in Russian // J. Phys.: Conf. Ser. 1715. 2021. 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012009.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Аверина Т. А., Рыбаков К. А. Статистические алгоритмы фильтрации для систем со случайно изменяющейся структурой // Вестн. рос. ун-в. Математика. 2020. Т. 25, № 30. С. 109–122. DOI: 10.20310/2686-9667-2020-25-130-109-122.
2. Аверина Т. А., Рыбаков К. А. Статистические алгоритмы фильтрации для систем со случайно изменяющейся структурой // Материалы 9-й Междунар. науч. конф. "Колмогоровские чтения. Общие проблемы управления и их приложения" (ОПУ-2020), Тамбов, 12–16 окт. 2020 г. С. 11–14. Тамбов: ИД "Державинский", 2020.
3. Аверина Т. А., Рыбаков К. А. Статистические алгоритмы оценивания состояний систем со случайной структурой // Марчуковские научные чтения – 2020 : тез. Междунар. конф., по-

свящ. 95-летию со дня рожд. акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 34. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-1019.

4. Гусев С. А. Численное решение стохастической краевой задачи для уравнения теплопроводности // Марчуковские чтения – 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рожд. акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 37. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10064.

5. Иванов А. А. Модифицированный алгоритм латентно-семантического анализа текстов на живом языке // Марчуковские научные чтения – 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рожд. акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 153. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10267.

6. Lukinov V. L., Stochastic search algorithm for multivariate logistic regression // Марчуковские научные чтения – 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рожд. акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 45. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10081.

7. Смирнов Д. Д., Кондаурова Л. П. Моделирование движения вихревых нитей в сверхтекучем гелии с учетом случайного воздействия Ланжевена методом Монте-Карло на суперкомпьютере // Марчуковские научные чтения – 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рожд. акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 45. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10081.

8. Смирнов Д. Д., Бобренёва Ю. О., Мазитов А. А., Марченко М. А., Губайдуллин И. М., Черных И. Г. Параллельный алгоритм численного метода моделирования массопереноса в трещиновато-поровом коллекторе на суперкомпьютере // Параллельные вычислительные технологии : короткие статьи и описания плакатов 14-й Международной конференции "ПаВТ'2020", Пермь, 31 марта – 2 апреля 2020 г. Челябинск: ИЦ ЮУрГУ, 2020. С. 340. DOI: <https://doi.org/10.14529/pct2020>.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. – 5 докладов (Аверина Т. А., Гусев С. А., Иванов А. А., Лукинов В. Л., Смирнов Д. Д.).

2. 14-я Международная конференция "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ'2020), Пермь, 31 марта – 2 апреля 2020 г. – 1 доклад (Смирнов Д. Д.).

3. Международная конференция "Суперкомпьютерные дни в России-2020", Москва, 21–22 сентября 2020 г. – 1 доклад (Смирнов Д. Д.).

4. Конгресс Российского общества рентгенологов и радиологов, Москва, 9–11 ноября 2020 г. – 1 пленарный доклад (Лукинов В. Л.).

5. 9-я Международная конференция "Колмогоровские чтения. Общие проблемы управления и их приложения" (ОПУ – 2020), посвященная 70-летию со дня рождения А. И. Булгакова и 90-летию Института математики, физики и информационных технологий Тамбовского государственного университета им. Г. Р. Державина, Тамбов, 12–16 октября 2020 г. – 1 доклад (Аверина Т. А.).

6. 20-я Международная конференция по методам аэрофизических исследований (ICMAR 2020), Новосибирск, 1–7 ноября 2020 г. – 2 доклада (Гусев С. А.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Лукинов В. Л. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

2. Смирнов Д. Д. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

3. Иванов А. А. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 9

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 17

Докладов на конференциях – 11, в том числе 1 пленарный

Членов организационных или программных комитетов конференций – 3

Кадровый состав

- | | | |
|---------------------|-------------------|-----------|
| 1. Лукинов В. Л. | зав. лабораторией | к.ф.-м.н. |
| 2. Аверина Т. А. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 3. Бурмистров А. В. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 4. Гусев С. А. | с.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 5. Иванов А. А. | м.н.с. | |
| 6. Махоткин О. А. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 7. Смирнов Д. Д. | м.н.с. | |
| 8. Якунин М. А. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |

Иванов А. А., Смирнов Д. Д. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

- | | |
|---------------------|-------------------------------|
| 1. Аверина Т. А. | – доц. НГУ |
| 2. Бурмистров А. В. | – ст. преп. НГУ |
| 3. Гусев С. А. | – проф. НГТУ |
| 4. Лукинов В. Л. | – доц. СибГУТИ, ассистент НГУ |
| 5. Махоткин О. А. | – доц. НГУ |

Руководство студентами

- | | |
|--------------------|---|
| 1. Юзов Д. А. | – 1-й курс магистратуры СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л. |
| 2. Наискулов Д. А. | – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л. |
| 3. Рылова П. М. | – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л. |
| 4. Ищенко И. О. | – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л. |

5. Филатов А. В. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
6. Щербакова Ю. С. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
7. Лоскутов С. Д. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
8. Береснев А. В. – 4-й курс ВКИ НГУ, руководитель Лукинов В. Л.
9. Востриков И. А. – 4-й курс ВКИ НГУ, руководитель Лукинов В. Л.
10. Ерешков Д. М. – 4-й курс ВКИ НГУ, руководитель Лукинов В. Л.
11. Мельников А. В. – 4-й курс ВКИ НГУ, руководитель Лукинов В. Л.
12. Богданов К. А. – 4-й курс ВКИ НГУ, руководитель Лукинов В. Л.

Защита дипломов

1. Жумадилова Д. Б. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
2. Иманбаева А. Ж. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
3. Крылов М. А. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
4. Толоконникова Н. А. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
5. Магда А. П. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
6. Юзов Д. А. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
7. Васильев А. А. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
8. Степаненко П. – бакалавр ВКИ НГУ, руководитель Лукинов В. Л.

ЛАБОРАТОРИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Каргин Б. А.

Важнейшие достижения

Стохастический алгоритм моделирования диффузионных потоков частиц и времени достижения ими экстремально малых целевых поверхностей на основе введения искусственного дрейфа.

Д.ф.-м.н. Сабельфельд К. К.

Задача о вычислении потока частиц на удаленные и экстремально малые целевые поверхности хорошо известна своей сложностью и встречается в самых разных прикладных областях, например в фотонике, при исследовании квантовой эффективности полупроводниковых материалов, в задачах иммунологии и клеточного обмена и многих других. Предложен стохастический алгоритм для расчета потоков и времени достижения частицами малых целевых объектов, основанный на введении искусственного дрейфа, направленного на эти объекты. Численные эксперименты показали высокую эффективность метода. С его помощью были решены задачи о нерадиационном захвате экситонов краевыми дислокациями в кристаллах (рис. 1а), а также о времени достижения рецепторов на поверхности Т-клеток антигенами и запуска процесса формирования антител (рис. 1б). Исследования опубликованы и поддержаны РНФ, проект 19-11-00019.

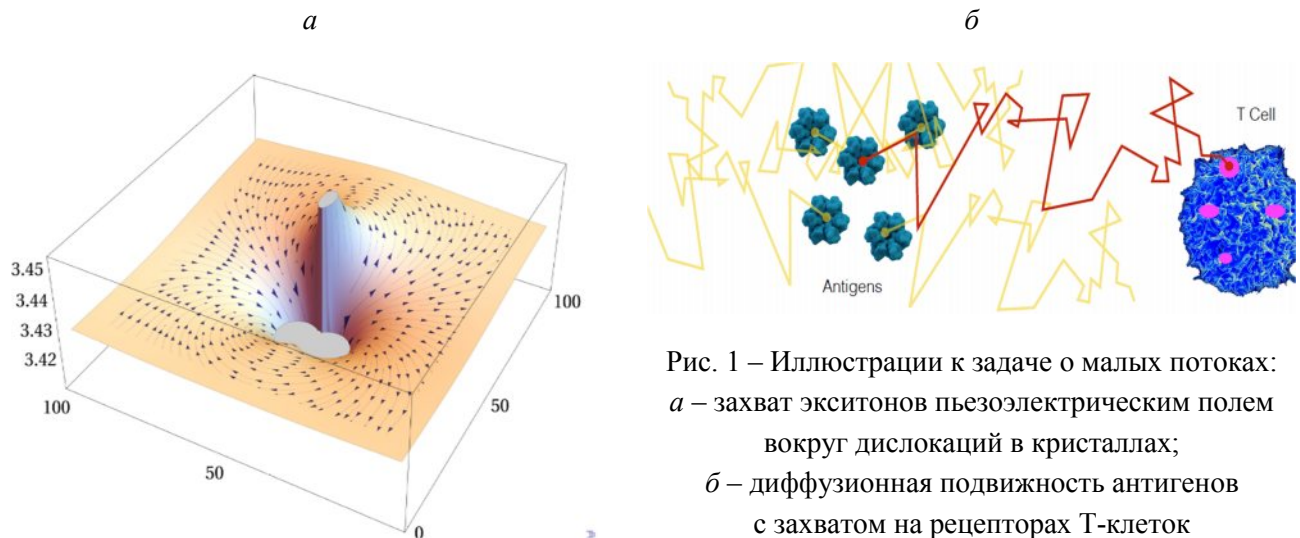


Рис. 1 – Иллюстрации к задаче о малых потоках:
а – захват экситонов пьезоэлектрическим полем
 вокруг дислокаций в кристаллах;
б – диффузионная подвижность антигенов
 с захватом на рецепторах Т-клеток

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Sabelfeld K. K. Stochastic simulation algorithms for solving narrow escape diffusion problems by introducing a drift to the target // J. of Comput. Phys. 2020. V. 410. Art. ID 109406.
2. Sabelfeld K. K. Mesh free stochastic algorithms for systems of diffusion-advection-reaction equations and anisotropic diffusion flux calculations // Probab. Engin. Mechan. 2020. V. 61. Art ID 103065.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Разработка весовых параметрических алгоритмов метода Монте-Карло для суперкомпьютерного решения многомерных задач в естественных и технических науках".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2016-0002.

Руководитель – д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Михайлов Г. А.

Разработан алгоритм метода Монте-Карло решения стационарного кинетического уравнения Больцмана для транспорта заряженных частиц в полупроводниках. Выписаны выражения для вероятностей рассеяния и распределений угла рассеяния электронов на полярных оптических фононах, акустическом деформационном потенциале, междолинных фононах. Предложен алгоритм статистического моделирования угла рассеяния электрона методом исключения с кусочно-линейной мажорантой, который повышает эффективность моделирования по сравнению с моделированием методом Неймана.

Вычислены зависимости дрейфовой скорости от энергии внешнего поля E_x для полупроводниковой структуры AlGaIn/GaN в предположении, что электроны движутся во всех направлениях в 3-мерном пространстве. Это предположение является оправданным для достаточно больших энергий электронов. Проведено сравнение численных результатов с экспериментальными данными и оценено положение ближайшей боковой долины в структуре энергетических зон полупроводника. Вычисленные зависимости дрейфовой скорости от энергии поля аппроксимируют экспериментальные результаты при положении ближайшей боковой долины M-L, на 0,7 эВ превышающей минимум основной Γ -долины. Зависимость средней дрейфовой скорости электронов и скорости электронов в различных долинах представлены на рис. 2. Согласно результатам статистического моделирования, при напряженности электрического поля, превышающей 300 кВ/см, практически все электроны находятся в долине M-L и проводимость обусловлена только электронами этой долины (рис. 3). При этом, как видно на рис. 2, полевая зависимость усредненной дрейфовой скорости совпадает с полевой зависимостью дрейфовой скорости электронов в M-L долине.

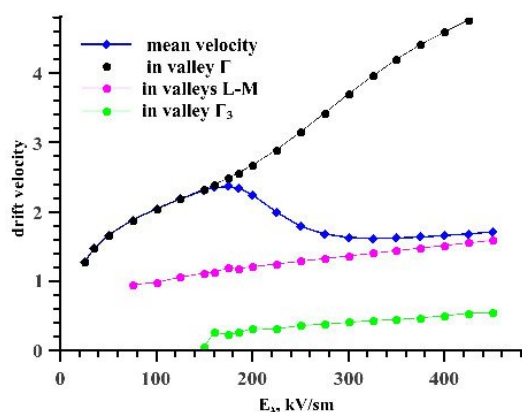


Рис. 2 – Средняя дрейфовая скорость электронов в полупроводнике (*mean velocity*) и дрейфовые скорости электронов в долинах Γ , M-L, Γ_3

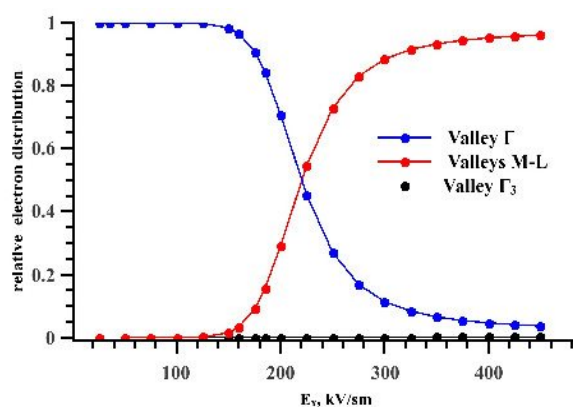


Рис. 3 – Относительное распределение электронов в основной Γ -долине и боковых M-L и Γ_3 -долинах

Предложен новый алгоритм случайного блуждания для решения общих эллиптических и параболических уравнений на основе дискретного варианта сопряженного глобального алгоритма и сопряженной симметрии функции Грина.

Продолжены исследования корреляционной структуры периодически коррелированного процесса, построенного с помощью приближенной спектральной модели, основанной на реальных данных. Численно получены зависимости корреляционной функции этого процесса от способа интерполяции измеренных значений внутри интервала длиной, равной периоду коррелированности реального процесса.

Продолжены исследования свойств корреляционной функции кусочно-линейного негауссовского процесса на пуассоновских потоках точек. Численно показано, что асимптотически процесс является стационарным и, в отличие от кусочно-постоянного процесса, корреляционная функция кусочно-линейного процесса имеет точку перегиба. Проведено теоретическое обоснование этого свойства корреляционной функции.

Проведены численные эксперименты по исследованию устойчивости различных алгоритмов моделирования векторных стационарных процессов и соответствующих методов регуляризации алгоритмов. В частности, проведены исследования алгоритма моделирования стационарных векторных последовательностей конечной длины, использующего разложение Холецкого блочно-тёплицевой корреляционной матрицы большого размера. Разработаны соответствующие вычислительные программы

Построены численные стохастические модели временных рядов и пространственно-временных полей индекса холодового стресса (ИХС), учитывающие пространственную неоднородность и временную нестационарность полей на нерегулярной сети станций. На основе модельных траекторий были изучены некоторые статистические свойства редких и неблагоприятных погодных явлений, например, таких как длительные периоды времени с низким индексом холодового стресса. Модель также была использована для исследования зависимости статистических свойств временных рядов ИХС от изменений климата. Построенные модели безусловных временных рядов ИХС были трансформированы в модели условных рядов, которые использовались для стохастического прогнозирования рассматриваемого индекса. Результаты численных экспериментов показали, что точность краткосрочных прогнозов достаточно высока.

Разработан и исследован ряд алгоритмов моделирования периодически коррелированных кусочно-постоянных и кусочно-линейных процессов непрерывного аргумента на основе регулярных случайных потоков, в том числе на основе стационарных случайных процессов дискретного аргумента. Получены аналитические формулы для одномерных распределений моделируемых процессов и их корреляционных функций. Также были рассмотрены кусочно-постоянная и кусочно-линейная интерполяции периодически коррелированного случайного процесса дискретного времени. Показано, что при таких видах интерполяции построенный процесс непрерывного времени также является периодически коррелированным.

Разработана теория условной оптимизации функционального ядерного вычислительного алгоритма приближения вероятностных плотностей по заданной выборке.

Разработана специальная компьютерная система моделирования вероятностных одномерных распределений NMPUD.

Реализован алгоритм локальной оценки интенсивности излучения с нестационарным источником в системе "океан – атмосфера" с учетом волнения, изучена зависимость временного распределения интенсивности от скорости ветра на морской поверхности. На рис. 4 представлены расчеты для условий: высота источника, совмещенного с приемником, 10 тыс. м; глубина воды 10 м; направление излучения вертикально вниз; скорости ветра 1 м/с (сплошная линия), 4 м/с (длинный пунктир), 7 м/с (короткий пунктир).

Проанализировав результаты вычислений, можно заметить на графике в каждом случае два пика и сделать предположение, что первый пик – это интенсивность излучения, которое не достигло водной поверхности либо отразилось от границы раздела сред (водной поверхности).

Далее можно заметить, что с увеличением скорости ветра интенсивность излучения, фиксируемого детектором, увеличивается. Можно также предположить, что это обусловлено конкретным расположением источника и приемника. Поскольку при статической плоской поверхности не рассеянный в атмосфере свет, достигающий границы раздела в направлении, перпендикулярном границе, с вероятностью 1 попадает в воду, вероятность отражения при этом равна 0. При увеличении скорости ветра эта вероятность в данном случае увеличивается.

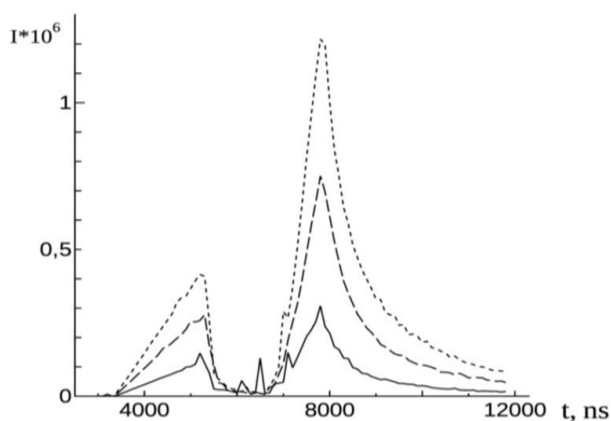
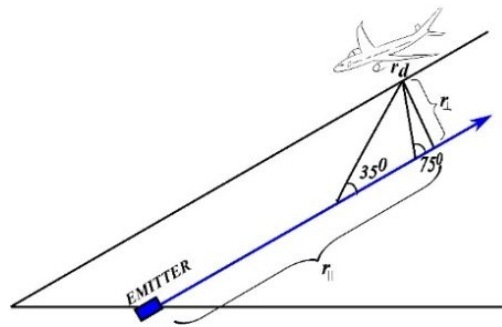


Рис. 4

Методом Монте-Карло решалась задача распространения излучения в замутненной среде (в туманах) для навигационной системы посадки летательных аппаратов. В системе навигации стационарное лазерное излучение совпадает по направлению с глиссадой. На борту самолета размещены два фотоприемных блока, направленных к линии глиссады под различными углами, что позволяет определять положение луча и глиссады в системе координат самолета и оценивать расстояние до точки касания летательного аппарата со взлетно-посадочной полосой в условиях плохой видимости.

Построены статистические оценки потока стационарного лазерного излучения в фиксированную точку, расположенную на заданных расстояниях от луча навигационной системы $r_{\perp}$ и от положения источника излучения $r_{\parallel}$ (рис. 5), вычислены оценки угловых распределений потока лазерного излучения в фиксированных плоскостях α_{35} и α_{75} обзора фотоприемной матрицы. Плоскости α_{35} и α_{75} наклонены под углами $\psi = 35^\circ$ и $\psi = 75^\circ$ к прямой, содержащей луч лазера (рис. 4). Получены оценки угловых распределений направлений движения фотонов с различной кратностью рассеяния в плоскостях α_{35} и α_{75} . Для решения задачи использованы два вида статистических оценок: в первом случае строилась оценка по столкновениям в некоторой области V_d , содержащей приемник излучения и расположенной на расстоянии $r_{\perp}$ от луча лазера и на рас-

стоянии $r_{\parallel}$ от источника излучения. Во втором случае вычислялась локальная оценка потока излучения в точку приемника. На рис. 5 представлены угловые распределения полного потока излучения и потока излучения для различных кратностей рассеяния. Данные исследования необходимы для интерпретации показаний фотоприемной матрицы навигационной системы, определения положения лазерного луча и глассады в системе координат самолета и для оценки расстояния до точки касания летательного аппарата со взлетно-посадочной полосой в условиях плохой видимости.



Геометрическая схема задачи

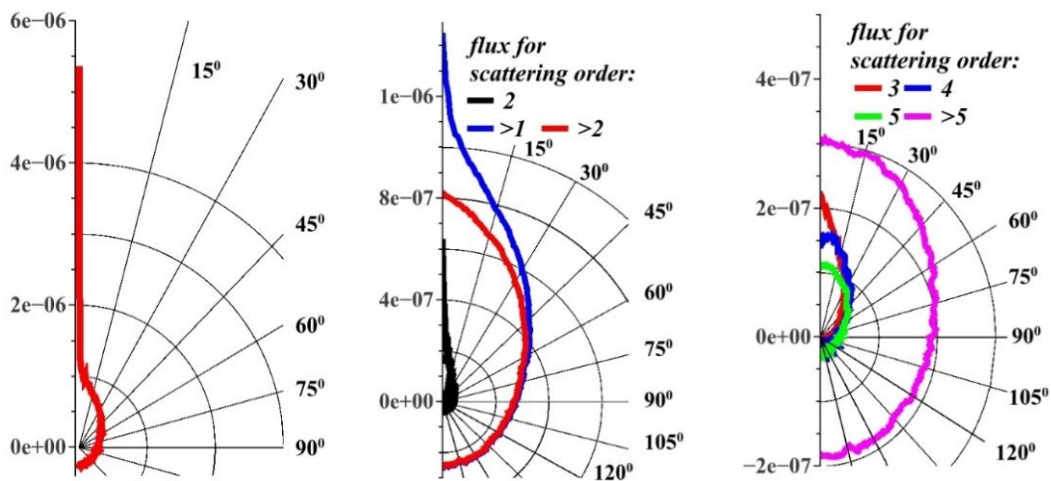


Рис. 5 – Для параметров задачи $\tau_{\parallel} = 5$, $\psi = 75^\circ$ представлены угловые распределения полного потока излучения $I(r_d)$ (слева), потока двукратно рассеянного излучения (черная линия), излучения с кратностью более 1 (синяя линия) и более 2 (красная линия) (в центре), излучения с порядками рассеяния 3, 4, 5 и более 5 (справа)

Методом Монте-Карло в приближении геометрической оптики построены индикатрисы рассеяния для видимого и ближнего инфракрасного спектрального диапазона солнечного излучения на облачных крупных ледяных частицах. Для этого разработан алгоритм прямого статистического моделирования. Особенностью данного подхода является возможность получения рассеивающих характеристик солнечного излучения кристаллическими частицами различных форм, ориентаций и концентраций в одном расчете. Кроме того, в алгоритме моделируются частицы с гладкой и с шероховатой поверхностью граней. Рассеяние излучения на кристаллах с шероховатой поверхностью учитывает эффекты затенения и переотражения, для моделирования шероховатости используется факетная модель случайной двумерной поверхности.

Исследована сходимость спектральных и условных спектральных моделей, которые используются для моделирования стохастической структуры поверхности морского волнения и гигантских океанических волн. Изучается сходимость пространственно-временных и пространственных моделей.

Разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать индикатрисы рассеяния оптического излучения в полидисперсных средах, состоящих из сферических частиц, на основе теории рассеяния Ми и осуществлять компьютерную визуализацию таких явлений, как радуги, глории и венцы. Для увеличения скорости расчета индикатрис рассеяния используется специальный прием, позволяющий существенно ускорить интегрирование по радиусу рассеивающих частиц. С помощью разработанного программного обеспечения проведен подробный анализ индикатрис рассеяния для большого числа известных моделей облачности и туманов, а также построены компьютерные изображения характерных для рассмотренных моделей оптических явлений (радуг, глорий и венцов).

Разработаны алгоритмы для быстрого вычисления облачных индикатрис рассеяния и статистического моделирования таких атмосферных оптических явлений, как глории, венцы и гало. С использованием разработанных вычислительных алгоритмов и программного обеспечения проведен анализ оптических явлений для распространенных моделей облачности и туманов.

Разработано программное обеспечение для быстрого вычисления индикатрис рассеяния и визуализации оптических явлений в жидкокапельных облаках и туманах. Для увеличения скорости расчетов вместо большого числа монодисперсных индикатрис рассеяния с малым шагом по радиусу капель используется вспомогательный массив предварительно осредненных индикатрис рассеяния, построенный методом скользящего среднего. С помощью разработанного программного обеспечения произведен расчет индикатрис рассеяния и осуществлена компьютерная визуализация глорий, белых радуг и венцов для известных моделей облачности и туманов. Примеры компьютерного моделирования и визуализации оптических явлений с учетом однократного рассеяния представлены на рис. 6. В реальности за счет многократного рассеяния света изображения венцов, глорий и белых радуг могут сильно размываться и становиться практически незаметными (рис. 7, 8).

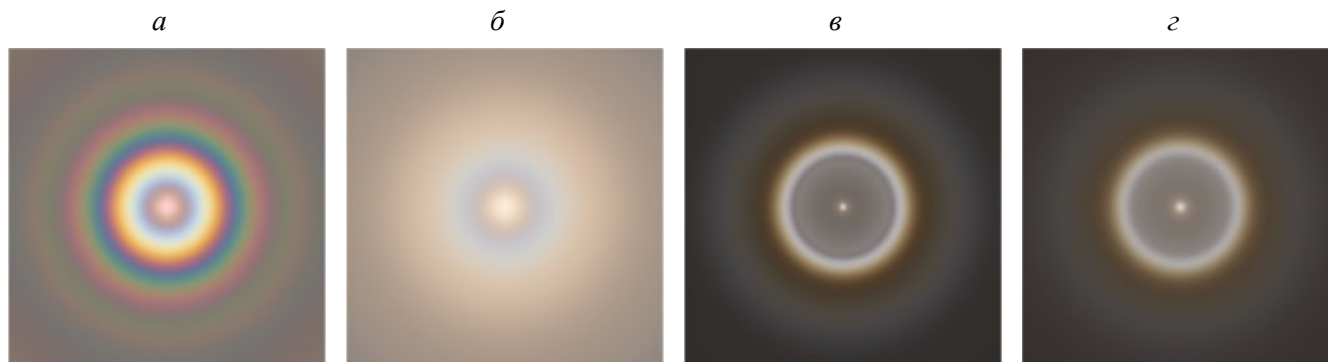


Рис. 6 – Глории для моделей Cloud C4 (а) и Radiation Fog (moderate) (б); первичные и вторичные белые радуги для моделей OPAC Cumulus (maritime) (в) и MODTRAN Cumulus (г); угловой радиус изображений (а), (б) – 15° , (в), (г) – 65° . Представлены результаты моделирования с учетом однократного рассеяния

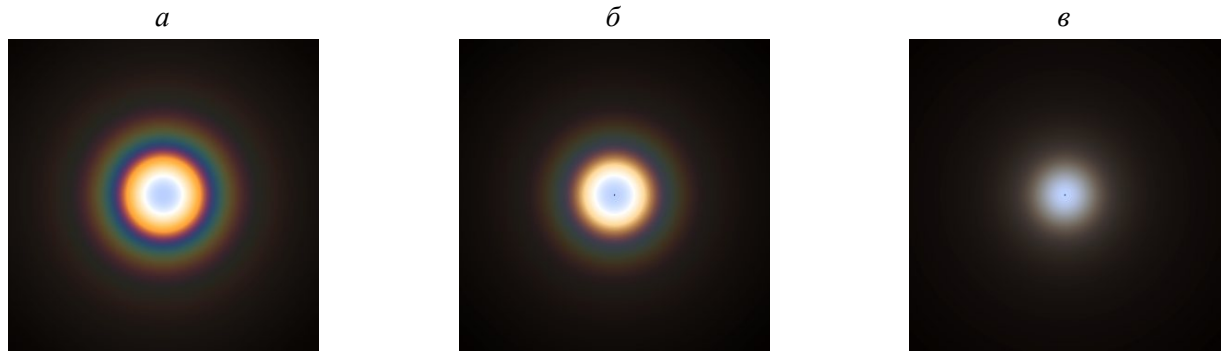


Рис. 7 – Компьютерная визуализация венцов для модели облака С4 без учета многократного рассеяния (а) и с учетом многократного рассеяния облачным слоем оптической толщины 1 (б) и 5 (в)

На рис. 7, 8 представлена область с угловым радиусом 15° .

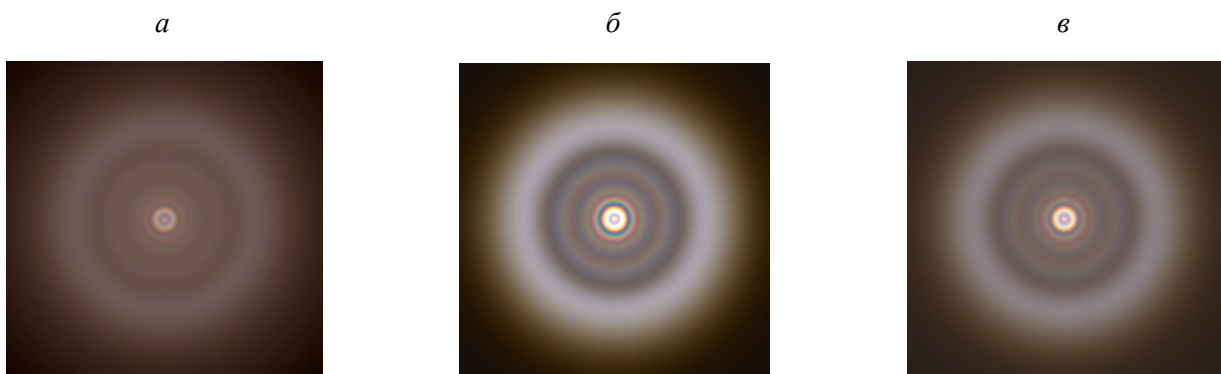


Рис. 8 – Компьютерная визуализация глории для модели облака С4 без учета многократного рассеяния (а) и с учетом многократного рассеяния облачным слоем оптической толщины 1 (б) и 5 (в); угловой радиус 50° . Наряду с глорией в центре наблюдается белая радуга с угловым радиусом в районе 40°

Представлена оптимальная форма записи методов типа Розенброка с точки зрения числа ненулевых параметров и вычислительных затрат на шаге. Обоснована процедура получения (m,k) -методов из общеизвестных методов типа Розенброка. Приведены формулы преобразования параметров (m,k) -схем для двух канонических форм записи и нахождения вида функции устойчивости схем. Разработан L-устойчивый $(3, 2)$ -метод третьего порядка, для которого требуются два вычисления функции, одно вычисление матрицы Якоби и одна LU-декомпозиция на шаге.

На базе метода сформулирован алгоритм интегрирования переменного шага, позволяющий решать как явные, так и неявные системы ОДУ. Приведены численные результаты, подтверждающие эффективность нового алгоритма.

Изучены приемы расширения возможностей явных методов Рунге – Кутты при решении задачи Коши для жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Особое внимание уделено контролю точности и устойчивости численных схем, а также созданию алгоритмов переменного порядка на основе явных методов Рунге – Кутты. Рассмотрены вопросы конструирования областей устойчивости. Сформулирован параллельный алгоритм на основе явного метода Эйлера. Проведенные расчеты подтверждают эффективность алгоритмов переменного порядка.

Представлена форма записи безитерационных (m,k) -схем решения задачи Коши для дифференциально-алгебраических систем индекса 2. Исследованы условия согласованности и устойчивости. Приведены формулы преобразования параметров (m,k) -схем для двух канонических форм записи и нахождения вида функции устойчивости схем.

Разработан L-устойчивый (3,2)-метод второго порядка, для которого требуются два вычисления функции, одно вычисление матрицы Якоби и одна LU-декомпозиция на шаге. На базе метода сформулирован алгоритм интегрирования переменного шага, позволяющий решать как явные, так и неявные системы ОДУ индекса не выше двух. Полученные численные результаты подтверждают работоспособность нового алгоритма.

Реализован стохастический алгоритм моделирования транспорта электронов и дырок в полупроводнике для двумерной области. Транспорт зарядов описывается нелинейной системой нестационарных уравнений дрейфа – диффузии – Пуассона, включающей уравнения изменения концентрации электронов и дырок под воздействием дрейфа и диффузии и уравнение Пуассона для потенциала, градиент которого входит в уравнения дрейфа – диффузии как скорость дрейфа. Нелинейная система дрейфа – диффузии – Пуассона решается с помощью итерационной процедуры, включающей попеременное моделирование процессов дрейфа – диффузии и вычисление градиента решения уравнения Пуассона. Диффузия и дрейф электронов и дырок моделируются стохастическим клеточным автоматом. Производные решения уравнения Пуассона во всех точках области вычисляются с помощью глобального Монте-Карло алгоритма случайного блуждания по сферам. Реализована параллельная версия программы для моделирования транспорта зарядов на суперкомпьютере. Проведены вычислительные эксперименты для различных источников: точечного, объемного, мгновенного и стационарного. Изучено влияние концентрации дефектов в легированном полупроводнике на дрейфовую скорость и концентрации электронов и дырок. Обнаружено, что с увеличением числа дефектов скорость дрейфа возрастает, в то время как поле распределения скорости не меняется, концентрация зарядов возрастает в центре области, при этом становится ярко выраженной анизотропия распределения зарядов (рис. 9).

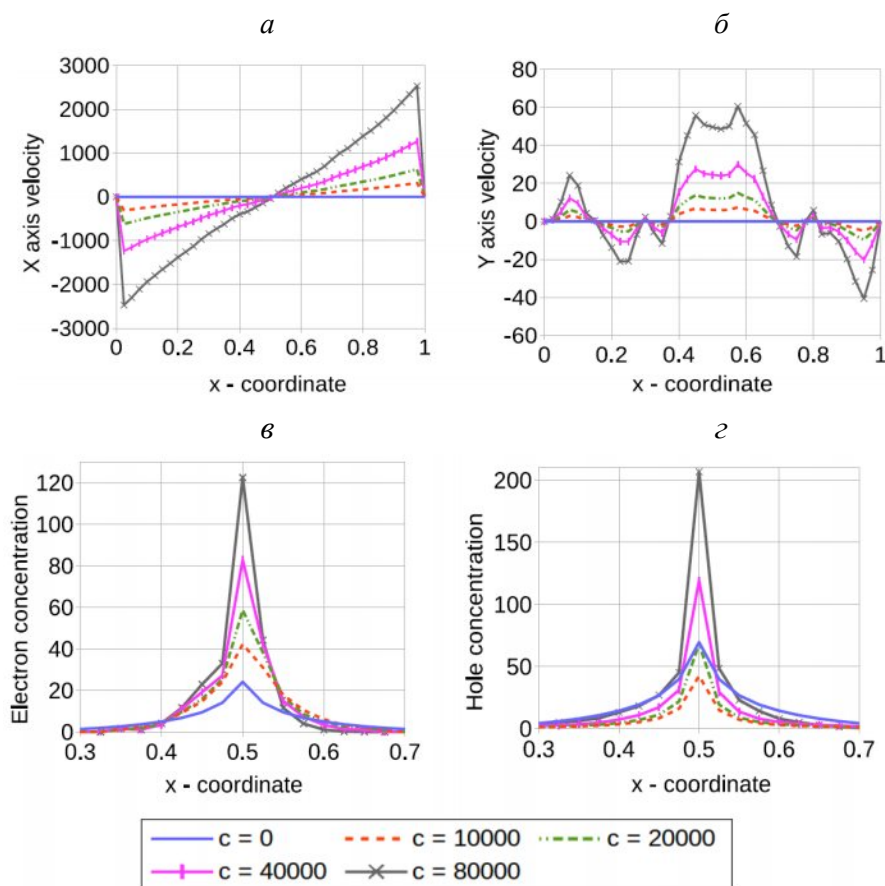


Рис. 9 – Скорость дрейфа и концентрация зарядов при различных количествах дефектов c

Реализованы стохастические алгоритмы моделирования уравнения дрейфа – диффузии – рекомбинации для трехмерной области. Уравнение моделируется с помощью двух подходов: глобального Монте-Карло алгоритма блуждания по сферам и клеточно-автоматного алгоритма. Выполнена верификация алгоритмов путем сравнения результатов моделирования с точным решением для точечного и объемного источников (рис. 10). Проведен сравнительный анализ точности и времени вычислений для обоих алгоритмов. Реализованы параллельные версии алгоритмов для моделирования дрейфа – диффузии – рекомбинации на суперкомпьютере.

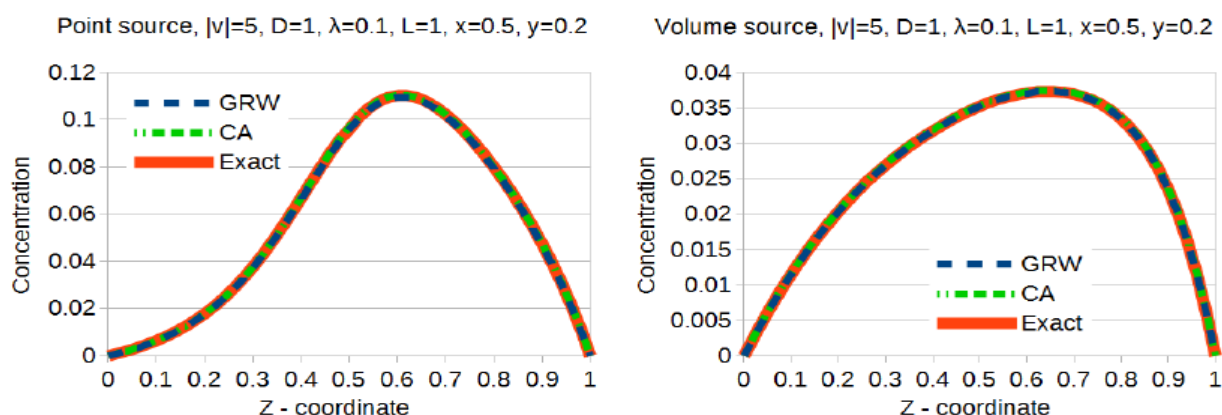


Рис. 9. Сравнение результатов моделирования, полученных с помощью глобального алгоритма блуждания по сферам (GRW) и клеточно-автоматного алгоритма (CA), с точным решением уравнения дрейфа – диффузии – Пуассона (*Exact*)

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ 18-01-00149 "Численное стохастическое моделирование комплексов нестационарных негауссовских метеорологических процессов для исследования экстремальных метеорологических явлений".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Огородников В. А.

Разработана численная стохастическая модель совместных пространственных полей среднесуточной температуры воздуха и суточных сумм жидких осадков на регулярной сетке по данным многолетних наблюдений на ряде метеостанций, расположенных в средних широтах западной части территории России. Проведены исследования степени неоднородности этих полей на основе специально разработанного критерия однородности совместных полей и проверки соответствующих гипотез для различных уровней значимости. В результате модель построена в приближении неоднородности совместных полей по одномерным распределениям и корреляциям. Предложен способ учета неоднородности по корреляциям и одномерным распределениям на основе методов стохастической интерполяции, сохраняющей неоднородность поля на станциях и не требующей специальной аппроксимации авто- и взаимных корреляционных функций. На основе модели исследованы пространственные распределения статистических характеристик некоторых неблагоприятных метеорологических явлений.

Разработаны и исследованы алгоритмы моделирования периодически коррелированных кусочно-постоянных и кусочно-линейных процессов непрерывного аргумента на основе регулярных случайных точечных потоков, в том числе на основе стационарных случайных процессов дискретного аргумента. Получены аналитические формулы для одномерных распределений мо-

делируемых процессов и их корреляционных функций. Рассмотрены вопросы, связанные с кусочно-постоянной и кусочно-линейной интерполяцией периодически коррелированного случайного процесса дискретного времени. Показано, что при таких видах интерполяции построенный процесс непрерывного времени также является периодически коррелированным.

Проект РФФИ 19-41-543001 "Стохастическое моделирование временных рядов показателей теплосодержания атмосферного воздуха и его теплового воздействия на человека в условиях изменяющегося климата".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Каргаполова Н. А.

Разработана, численно реализована и верифицирована полупараметрическая стохастическая модель пространственно-временного поля индекса жары на территории юга России. На основе построенной модели выполнено исследование вероятностных свойств ряда экстремальных метеособытий, связанных с волнами жары.

Для полей индекса холодового стресса было проведено сравнение методов пространственной интерполяции значений индекса с метеостанций в точки, где метеонаблюдения не производятся. Проведены теоретические исследования различных характеристик случайного поля рассмотренного биоклиматического индекса, построенного на регулярной сетке при использовании стохастической интерполяции со станций в узлы сетки.

Грант РФФИ 19-11-00019 "Рандомизация суперкомпьютерных вычислений и стохастическое моделирование процессов транспорта и рекомбинаций в полупроводниках, нуклеации и роста наноразмерных структур и их катодолюминесцентной визуализации".

Руководитель – д.ф.-м.н. Сабельфельд К. К.

Построены оптимальные варианты алгоритмов стохастического моделирования, разработанных в данном проекте, и их гибридные варианты с клеточно-автоматными реализациями для решения систем уравнений транспорта в полупроводниках.

По данному направлению исследований были предложены два подхода к решению задачи о стохастическом моделировании транспорта и рекомбинации электронов и дырок в полупроводниках и разрабатываемых гетероструктурных электронных устройствах как двумерных, так и трехмерных. При первом подходе решение нелинейной системы уравнений дрейфа – диффузии – Пуассона строится с помощью новых глобальных алгоритмов случайного блуждания и их гибридных вариантов с клеточно-автоматными алгоритмами. При втором подходе построение алгоритмов стохастического моделирования транспорта электронов и дырок осуществляется на основе решения уравнения Больцмана с помощью кинетического метода Монте-Карло с учетом квантовых рассеяний электронов и междолинных взаимодействий. Результаты исследований в рамках первого подхода опубликованы в журналах "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications" (квартиль Q2) и Springer Nature Switzerland AG.

Предложен новый метод стохастического моделирования для систем транспортных уравнений с учетом дрейфа – диффузии, позволяющий эффективно решать задачу о захвате частиц мишенями асимптотически малого размера, – такие задачи актуальны во многих практических проблемах химии и биологии. Суть подхода может быть сформулирована достаточно просто: для того чтобы получить более богатую статистику траекторий, достигающих нужные мишени

малого размера, мы вводим искусственным образом дрейф, направленный в сторону этой мишени. Решение исходной задачи вычисляется на основе установленного аналитического соотношения между решениями уравнения чистой диффузии и уравнения дрейфа – диффузии – комбинаций. Построенный алгоритм показал кардинальное улучшение эффективности на примерах решения трехмерных задач. Данные исследования опубликованы в журналах "Journal of Computational Physics" (квартиль Q1) и "Monte Carlo Methods and Applications". В публикациях проведена серия численных экспериментов по выявлению оптимального выбора значения дрейфа и получено экспериментальное подтверждение высокой эффективности метода при решении таких задач. Разработанные алгоритмы расчета потоков на мишени малого размера и вычисления времени достижения частицами таких мишеней применены к решению задачи о коррозионной стабильности пористого углерода, а также к задачам внутриклеточного транспорта.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Пригарин С. М., Миронова Д. Э. Моделирование рассеяния лазерных импульсов в облачных и водных средах. Lambert Academic Publishing, 2020, 47 с. ISBN 978-620-0-78503-9.
2. Новиков А. Е., Новиков Е. А., Левыкин А. И. Вычислительная математика. Алгоритмы интегрирования на явных одношаговых схемах. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 64 с. ISBN 978-5-7638-4328-6 (учебное пособие СФУ).

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Shalimova I., Sabelfeld K. K. Random walk on ellipsoids method for solving elliptic and parabolic equations // Monte Carlo Meth. and Appl. 2020. Vol. 26, iss. 4. P. 335–353. DOI: 10.1515/mcma-2020-2078.
2. Sabelfeld K. K., Kireeva A. Parallel implementation of stochastic simulation algorithm for nonlinear systems of electron-hole transport equations in a semiconductor // Parallel Computational Technologies. PCT 2020. Commun. in Comput. and Inform. Sci. 2020. Vol. 1263 / Sokolinsky L., Zymbler M. (eds.). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-55326-5_18.
3. Kargapolova N. Numerical stochastic model of non-stationary time series of the wind chill index // Meth. and Comput. in Appl. Probab. 2021. Vol. 23. P. 257–271. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11009-020-09778-x>.
4. Kargapolova N (2020) Stochastic model of spatial fields of the average daily wind chill index // Information. 2020. Vol. 11, iss. 4. Art. num. 177. DOI: <https://doi.org/10.3390/info11040177>.
5. Nina Kargapolova. Stochastic simulation of the spatio-temporal field of the average daily heat index in Southern Russia // Climate Research. 2020. Vol. 82. P. 149–160. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr01623>.
6. Levykin A. I., Novikov A. E., Novikov E. A. Schemes of (m,k)-type for solving differential-algebraic and stiff systems // Num. Analysis and Appl. 2020. Vol. 13, No 1. P. 34–44. doi/10.1134/S1995423920010036.
7. Sabelfeld K. K. Mesh free stochastic algorithms for systems of diffusion-advection-reaction equations and anisotropic diffusion flux calculations // Probab. Engin. Mechan. 2020. V. 61. Art. ID 103065. doi: 10.1016/j.probengmech.2020.103065.
8. Sabelfeld K. K. Stochastic simulation algorithms for solving narrow escape diffusion problems by introducing a drift to the target // J. of Comput. Phys. 2020. Vol. 410. Art. ID 109406. doi.org/10.1016/j.jcp.2020.109406.

9. Sabelfeld K., Kireeva A. A new global random walk algorithm for calculation of the solution and its derivatives of elliptic equations with constant coefficients in an arbitrary set of points // Appl. math. Lett. 2020. Vol. 107. Art. num. 106466. doi: 10.1016/j.aml.2020.106466.
10. Sabelfeld K. K., Popov N. Monte Carlo tracking drift-diffusion trajectories algorithm for solving narrow escape problems // Monte Carlo Meth. and Appl. 2020. Vol. 26, iss. 3. P. 177–191. doi: 10.1515/mcma-2020-2073.
11. Sabelfeld K. K., Kireeva A. Stochastic simulation algorithms for solving a nonlinear system of drift–diffusion Poisson equations of semiconductors // Phys. A: Stat. Mechan. and its Appl. 2020. Vol. 556. Art. num. 124800. doi: 10.1016/j.physa.2020.124800.
12. Kablukova E., Sabelfeld K., Protasov D., Zhuravlev K. Drift velocity in GaN semiconductors: Monte Carlo simulation and comparison with experimental measurements // Monte Carlo Meth. and Appl. 2020. Vol. 26, iss. 4. P. 263–271. doi: 10.1515/mcma-2020-2077.
13. Litvenko K. V., Prigarin S. M. Convergence of numerical spectral models of sea surface undulations // Num. Analysis and Appl. 2020. V. 13. P. 45–56. DOI: 10.1134/S1995423920010048.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Kablukova E. G., Prigarin S. M. Stochastic simulation of radiation transfer in inhomogeneous cloud layers with optical thickness based on experimental data // Proc. SPIE 11560, 26th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Opt., Atmosph. Phys. 115601L, Nov. 12. 2020. DOI: 10.1117/12.2575480.
2. Kablukova E. G., Prigarin S. M., Oshlakov V. G. Monte Carlo simulation of a laser beam image in the landing navigation system // Proc. SPIE 11560, 26th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Opt., Atmosph. Phys. 115601L, Nov. 12. 2020. DOI: 10.1117/12.2575497.
3. Zakovryashin A. V., Prigarin S. M. Fast calculation of phase functions and study of optical phenomena for various cloud and fog models using numerical simulation Proc. SPIE 11560, 26th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Opt., Atmosph. Phys. 115601L, Nov. 12. 2020. DOI: 10.1117/12.2575488.
4. Zakovryashin A. V., Prigarin S. M. Numerical simulation of optical phenomena in atmospheric clouds and fogs // Russ. J. Num. Analysis Math. Modelling. 2020. V. 35, No 6. P. 367–375. DOI: 10.1515/rnam-2020-0030.
5. Kablukova E. G., Prigarin S. M., Oshlakov V. G. Monte Carlo simulation of a laser beam image in the landing navigation system // Proc. SPIE 11560, 26th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Opt., Atmosph. Phys. 115601L, Nov. 12. 2020. doi: 10.1117/12.2575497.
6. Kablukova E. G., Prigarin S. M. Stochastic simulation of radiation transfer in inhomogeneous cloud layers with optical thickness based on experimental data // Proc. SPIE 11560, 26th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Opt., Atmosph. Phys. 115601L, Nov. 12. 2020. doi: 10.1117/12.2575480.
7. Mu Q., Kargin B. A., Kablukova E. G. Calculation by the Monte-Carlo method of optical radiation scattering by cirrus crystals in the geometric optics approximation // Proc. SPIE 11560, 26th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Opt., Atmosph. Phys. 115601L, Nov. 12. 2020. doi: 10.1117/12.2576362.
8. Kablukova E., Sabelfeld K., Protasov D. Y., Zhuravlev K. S. Drift velocity in GaN semiconductors: Monte Carlo simulation and comparison with experimental measurements // Monte Carlo Meth. and Appl. 2020. V. 26, iss. 4. DOI: <https://doi.org/10.1515/mcma-2020-2077>.
9. Sabelfeld K. K., Kireeva A. Electron-hole transport in semiconductors: stochastic dynamics simulation // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1680. Art. Num. 012044. DOI: 10.1088/1742-6596/1680/1/012044.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Пригарин С. М. Статистическое моделирование многомерных гауссовских распределений. М.: Издательство Юрайт, 2020. 83 с. ISBN 978-5-534-10209-3.
2. Литвенко К. В., Пригарин С. М. Сходимость численных спектральных моделей поверхности морского волнения // Сиб. матем. журн. 2020. Т. 23, № 1. С. 53–67.
3. Абдразакова А. Р., Войтишек А. В. Вычислимые моделируемые преобразования декартовых координат для случайных векторов // Выч. технol. 2020. Т. 25, № 6. С. 62–84. DOI:10.25743/ICT.2020.25.6.004.
4. Voytishchek A. V., Bulgakova T. E. Optimization of kernel estimators of probability densities // Optim. and Appl. OPTIMA 2019. Jacimovic M., Khachay M., Malkova V., Posypkin M. (eds). Commun. in Comput. and Inform. Sci. 2020. Springer, Cham. Vol. 1145. P. 254–266. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38603-0_19.

Участие в конференциях и совещаниях

1. The 3rd International conference on mathematics and statistics, Шарджа (ОАЭ), 6–9 февраля 2020 г. – 1 доклад (Войтишек А. В.).
2. Международная конференция "Марчуковские чтения 2020", посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука; Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, 19–23 октября 2020 г. – 17 докладов, из них 2 пленарных (Войтишек А. В., Каргин Б. А., Сабельфельд К. К., Каблукова Е. Г., Пригарин С. М., Ухинова О. С., Заковряшин А. В., Шалимова И. А., Киреева А. Е., Огородников В. А., Сересева О. В., Каргаполова Н. А., Левыкин А. И.).
3. XIX Международная конференция имени А. Ф. Терпугова "Информационные технологии и математическое моделирование"; Томск, ТГУ 2–5 декабря 2020 года – 1 доклад (Войтишек А. В.).
4. The 12-th International scientific conference and young scientist school "Theory and computational methods for inverse and ill-posed problems", Novosibirsk, 4–12 October, 2020 – 1 доклад (Сабельфельд К. К.).
5. The 13th International conference "Computer-aided technologies in applied mathematics" (ICAM 2020), Tomsk, September 7–9, 2020 – 2 доклада (Сабельфельд К. К., Киреева А. Е.).
6. 18-я Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, ИКИ РАН, 16–20 ноября 2020 г. – 1 доклад (Каргин Б. А., Ухинова О. С.).
7. Международная научная конференция "Параллельные вычислительные технологии 2020" (14-th Parallel Computational Technologies (PCT 2020)) – 1 доклад (Сабельфельд К. К., Киреева А. Е.).
8. 26-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 6–10 июля 2020 г. – 4 доклада (Каблукова Е. Г., Пригарин С. М., Каргин Б. А.).
9. 27-я Конференция "Аэрозоли Сибири", Томск, 24–27 ноября 2020 г. – 2 доклада (Каблукова Е. Г., Пригарин С. М., Каргин Б. А.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Войтишек А. В.:
– член программного комитета 58-й Международной студенческой научной конференции МНСК-2020, Новосибирск, 10–13 апреля 2020 г.,

- член программного комитета 19-й Международной конференции им. А. Ф. Терпугова "Информационные технологии и математическое моделирование", Томск, 2–5 декабря 2020 г.;
- 2. Каблукова Е. Г. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские чтения 2020", посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;
- 3. Каргаполова Н. А. – член программного комитета The 10th International conference on simulation and modeling methodologies, technologies and applications, Франция, 8–10 июля 2020 г., (on-line)
- 4. Каргин Б. А. – член программного комитета Международной конференции "Марчуковские чтения 2020", посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;
- 5. Киреева А. Е. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские чтения 2020", посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;
- 6. Огородников В. А. – член программного комитета 58-й Международной студенческой научной конференции МНСК-2020, 10–13 апреля 2020 г.;
- 7. Пригарин С. М. – член программного комитета 58-й Международной студенческой научной конференции МНСК-2020, 10–13 апреля 2020 г.;
- 8. Сабельфельд К. К.:
 - член программного комитета 58-й Международной студенческой научной конференции МНСК-2020, 10–13 апреля 2020 г.,
 - член программного комитета Международной конференции "Марчуковские чтения 2020", посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;
- 9. Ухинова О. С. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские чтения 2020", посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Монографий, глав в монографиях – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 13

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 9

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 26

Докладов на конференциях – 30, в том числе 3 пленарных.

Членов организационных или программных комитетов конференций – 11

Кадровый состав

- | | | |
|----------------------|----------------|-----------|
| 1. Каргин Б. А. | зав. лаб. | д.ф.-м.н. |
| 2. Войтишек А. В. | в.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 3. Заковряшин А. В. | инженер | |
| 4. Каблукова Е. Г. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 5. Каргаполова Н. А. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 6. Каргин А. Б. | ведущ. инженер | |

- | | | |
|-----------------------|--------|-----------|
| 7. Киреева А. Е. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 8. Левыкин А. И. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 9. Огородников В. А. | г.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 10. Пригарин С. М. | в.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 11. Сабельфельд К. К. | г.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 12. Сересева О. В. | м.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 13. Ухинова О. С. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 14. Шалимова И. А. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |

Киреева А. Е., Каргаполова Н. А. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

- | | |
|-------------------|---------------------------------|
| Войтишек А. В. | – профессор НГУ |
| Каргин Б. А. | – профессор НГУ |
| Пригарин С. М. | – профессор НГУ |
| Огородников В. А. | – профессор НГУ |
| Сабельфельд К. К. | – профессор НГУ |
| Левыкин А. И. | – доцент НГУ |
| Каргаполова Н. А. | – доцент НГУ |
| Шалимова И. А. | – доцент НГУ |
| Ухинова О. С. | – старший преподаватель ВКИ НГУ |

Руководство студентами

- | | |
|-----------------|--|
| Попов Н. А. | – 1-й год магистратуры ММФ НГУ, руководители Сабельфельд К. К., Шалимова И. А. |
| Ли Ч. | – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пригарин С. М. |
| Ли Ц. | – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пригарин С. М. |
| Чжан С. | – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пригарин С. М. |
| Гао Ди | – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Огородников В. А. |
| Акентьева М. С. | – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Огородников В. А. |

Руководство аспирантами

- | | |
|-------------------|--|
| Миронова Д. Э. | – 4-й год, ИВМиМГ, руководитель Пригарин С. М. |
| Заковряшин А. В. | – 4-й год, НГУ, руководитель Пригарин С. М. |
| Абдразакова А. Р. | – 1-й год, НГУ, руководитель Войтишек А. В. |
| Му Цюань | – 3-й год, НГУ, руководители Каргин Б. А., Каблукова Е. Г. |
| Чжэн Пэнфэй | – 2-й год, НГУ, руководители Каргин Б. А., Каблукова Е. Г. |

Защита дипломов

- | | |
|-------------------|--|
| Абдразакова А. Р. | – магистр ММФ НГУ, руководитель Войтишек А. В. |
|-------------------|--|

Опубликовано учебное пособие для университетов

Михайлов Г. А., Войтишек А. В. Статистическое моделирование. Методы Монте-Карло: учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. М.: Издательство Юрайт, 2020. 323 с. (учебное пособие для вузов). ISBN: 978-5-534-11518-5.

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ

И. о. зав. лабораторией к.ф.-м.н. Горбенко Н. И.

Важнейшие достижения**О численном решении прямой задачи рассеяния Захарова – Шабата**

К.ф.-м.н. Горбенко Н. И., д.ф.-м.н. Ильин В. П., Крылов А. М., д.ф.-м.н. Фрумин Л. Л. (ИАиЭ СО РАН)

Предложена новая схема четвертого порядка точности на основе интегрального тождества Марчука для решения прямой задачи рассеяния Захарова – Шабата. Для построенной схемы было проведено численное моделирование задачи рассеяния на примере двух характерных краевых задач с известными решениями. Расчеты подтвердили высокую точность предложенного алгоритма, необходимую в ряде практических приложений для оптического и акустического зондирования сред в прикладной оптике и геофизике.

Результаты исследований опубликованы в работе

Gorbenko N. I., Il'in V. P., Krylov A. M., Frumin L. L. Numerical solution of the direct Zakharov – Shabat scattering problem // Num. Analysis and Appl. 2020. Vol. 13, iss. 2. P. 95–102.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершающимся в 2019 г.**в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Математическое моделирование комплексных многомерных процессов естествознания на суперЭВМ".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2019-0008.

Руководители: д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М., д.ф.-м.н. Свешников В. М.

Этап 2019 г.

1. Проведено численное экспериментальное исследование решения 2D краевых задач на регулярных подсетках квазиструктурированных прямоугольных сеток.
2. Предложен и экспериментально исследован новый комбинированный метод решения двумерных краевых задач на подсетках с малым числом узлов.
3. Разработаны новые алгоритмы расчета напряженности электрического поля повышенной точности при моделировании движения интенсивных пучков заряженных частиц в самосогласованных задачах сильноточной электроники в сложных областях на квазиструктурированных сетках.
4. Изучен магнитный момент шарового сверхпроводника, расположенного на оси внешнего осесимметричного магнитного поля. Доказано, что магнитный момент полностью определен значением внешнего поля в центре шара.
5. Предложена новая схема четвертого порядка точности для решения прямой задачи рассеяния Захарова – Шабата.
6. Исследованы проблемы искусственного интеллекта в математическом моделировании процессов и явлений, представляемых междисциплинарными прямыми и обратными начально-краевыми задачами с реальными данными и составляющих основу технологии получения фундаментальных и прикладных знаний в различных отраслях.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 18-01-00295 "Высокопроизводительные параллельные алгоритмы и технологии для решения больших разреженных СЛАУ".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Ильин В. П.

Разработаны, исследованы и экспериментально апробированы новые вычислительные методы и параллельные технологии решения симметричных и несимметричных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) высоких порядков с разреженными матрицами, возникающими при аппроксимациях многомерных начально-краевых задач на неструктурированных сетках и хранящихся в сжато-разреженных форматах в распределенной и иерархической общей памяти многопроцессорной вычислительной системы (МВС). Общий подход заключается в построении предобусловленных итерационных алгоритмов в подпространствах Крылова с обеспечением масштабируемого параллелизма и высокой производительности средствами гибридного программирования на МВС гетерогенной архитектуры. Рассмотрены комбинированные методы аддитивного чебышевского ускорения и алгоритмов сопряженных или полусопряженных направлений в подпространствах Крылова, позволяющие предотвращать стагнацию процессов при неизбежном использовании рестартовых процедур для сокращения длины итерационных рекурсий.

Предложен двухуровневый метод градиентной регуляризации для решения СЛАУ с седловой точкой, возникающих из смешанной постановки для трехмерной задачи фильтрации. Исследован ряд вариантов алгебраического многосеточного метода. Разработаны параллельные алгоритмы ILU-разложения и аддитивной декомпозиции областей в подпространствах Крылова в рамках технологий многопоточковых вычислений. Рассмотрены особенности итерационных процессов с оптимизированным выбором начальных приближений на каждом временном шаге при решении начально-краевых задач по неявным схемам различных порядков точности. Разработаны концепция, общая структура и структуры данных интегрированного вычислительного окружения для решения алгебраических задач на базе библиотеки параллельных решателей KRYLOV, ориентированного на гибкое расширение состава математических моделей и применяемых алгоритмов, адаптацию к эволюции компьютерных архитектур, эффективные переиспользование внешних программных продуктов и согласованное участие различных групп разработчиков, что в совокупности должно обеспечить длительный жизненный цикл проекта и его востребованность конечными пользователями. Общая идея проекта по созданию математического и программного обеспечения нового поколения – суперкомпьютерное моделирование в эпоху больших данных и искусственного интеллекта.

Проект РФФИ № 19-11-50073 "Итерационные предобусловленные методы в подпространствах Крылова".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Ильин В. П.

Подготовлен аналитический обзор основных проблем, а также новых математических и технологических находок в развитии методов решения СЛАУ. Данная стадия математического моделирования становится "узким горлышком" вследствие нелинейного роста объемов вычислительных ресурсов с увеличением числа степеней свободы задачи. Важно отметить, что эф-

фективность и производительность вычислительных методов и технологий в значительной степени зависит от учета специфики класса решаемых прикладных проблем: задачи электромагнетизма, гидрогазодинамики, упруго-пластичности, многофазной фильтрации, тепломассопереноса и т. д. Развитие крыловских итерационных процессов ориентировано главным образом на построение двухуровневых алгоритмов с различными ортогональными, проекционными, вариационными и спектральными свойствами, включая аппарат не только полиномиальных, но и рациональных или гармонических приближений. Дополнительное ускорение таких алгоритмов осуществляется на основе подходов дефляции или агментации с использованием некоторых систем базисных векторов. Исследования направлены на конструирование экономичных предобусловливающих операторов на основе многообразных принципов: новые многосеточные схемы и параллельные методы декомпозиции областей, мультипредобусловливание, вложенные и попеременно-треугольные факторизации, малоранговые и другие алгоритмы аппроксимации обратных матриц и т. д. Достижение высокой производительности и масштабируемого распараллеливания базируется на средствах гибридного программирования с использованием инструментов межузловых сообщений, многопоточковых вычислений, векторизации операций и графических ускорителей. Современные тенденции математического и программного обеспечения заключаются в создании интегрированного инструментального окружения, ориентированного на длительный жизненный цикл и массовые инновации в актуальных приложениях.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Gorbenko N. I., Il'in V. P., Krylov A. M. et al. Numerical solution of the direct Zakharov – Shabat scattering problem // Num. Analys. Appl. 2020. Vol. 13. P. 95–102. DOI: 10.1134/S1995423920020019.
2. Il'in V. P. On moment methods in Krylov subspaces // Doklady Mathematics. 2020, Vol. 102, iss. 3. P. 478–482. DOI: 10.1134/S1064562420060241.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Il'in V. P., Kazantsev G. Y. Iterative solution of saddle-point systems of linear equations // J. Math. Sci. 2020. Vol. 249. P. 199–208. DOI: 10.1007/s10958-020-04934-7.
2. Gurieva Y. L., Il'in V. P., Petukhov A. V. On multigrid methods for solving two-dimensional boundary-value problems // J. Math. Sci. 2020. Vol. 249. P. 118–127. DOI: 10.1007/s10958-020-04926-7.
3. Il'in V. Integrated computational environment for grid generation parallel technologies // Springer Nature Switzerland AG 2020 / L. Sokolinsky, M. Zymbler (Eds.). PCT 2020, CCIS 1263. 2020. P. 58–68. DOI: 10.1007/978-3-030-55326-5_5.
4. Krutko A. V., Akhmetyanov S. A., Orlov K. Yu., Gladkikh V. S., Moskalev A. V. Aspects of the use of propensity score matching methods in neurosurgery // Coluna/Columna [Electron. resource]. 2020. Vol. 19, No 2. P. 154–159. DOI: 10.1590/s1808-185120201902224291.
5. Gurieva Y. L., Il'in V. P. Parallel combined Chebyshev and least squares iterations in the Krylov subspaces // Parallel Computational Technologies : Revised Selected Papers of the 14th Intern. conf. "Parallel Comput. Technol." (PCT 2020), Perm, March 31 – April 2, 2020. P. 162–177. DOI: 10.1007/978-3-030-55326-5_12.

6. Il'in V. P. On an integrated computational environment for numerical algebra // *Parallel Computational Technologies : Revised Selected Papers of the 13th Intern. conf. (PCT 2019)*, Kaliningrad, Apr. 2–4, 2019. Springer Nature Switzerland AG 2019. CCIS 1063. P. 91–106. DOI: 10.1007/978-3-030-28163-2_7.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Ильин В. П. Параллельные посменно треугольные итерационные методы в подпространствах Крылова // *Записки научных семинаров ПОМИ*. 2020. Т. 496. С. 104–119.
2. Гурьева Я. Л. О методах сопряженных направлений для многократного решения СЛАУ // *Записки научных семинаров ПОМИ*. 2020. Т. 496. С. 26–42.
3. Горбенко Н. И. Эффективный численный метод для синтеза решеток Брэгга // *Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 118.
4. Гололобов С. В., Ильин В. П., Крылов А. М., Петухов А. В. Параллельные переменнотреугольные методы вложенных факторизаций // *Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 28.
5. Горшунов В. С., Голубева Л. А., Ильин В. П. Решение задач математической физики на основе вычислительной системы ФМКИТ // *Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 141.
6. Козырев А. Н., Свешников В. М. О решателях в подобластях 2D краевых задач на подсетках квазиструктурированных прямоугольных сеток // *Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 30.
7. Климонов И. А., Свешников В. М. О параллельных решателях в подобластях 3D краевых задач на подсетках квазиструктурированных параллелепипедальных сеток. // *Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 0.
8. Перевозкин Д. В., Омарова Г. А. Алгебраические многосеточные методы для решения разреженных СЛАУ // *Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 31.
9. Савченко А. О. Магнитный момент сверхпроводящего шара в неоднородном магнитном поле // *Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 21.
10. Il'in V. P. Two-level iterative methods for solving the saddle point problem // *Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 29.
11. Гладких В. С., Петухов А. В. Особенности реализации программ моделирования тепловых полей в многолетнемерзлых грунтах // *Актуальные проблемы прикладной математики и механики : тез. Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 7–9 дек. 2020 г.* С. 19–20.

12. Ильин В. П. О методах моментов в подпространствах Крылова // ДАН. Математика, Информатика, Процессы управления. 2020. Т. 495. С. 38–43. DOI: 10.31857/S2686954320060223.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения-2020", посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. – 8 докладов, из них 1 пленарный (Ильин В. П., Свешников В. М., Горбенко Н. И., Савченко А. О., Гурьева Я. Л., Омарова Г. А., Перевозкин Д. В., Гладких В. С., Петухов А. В., Крылов А. М., Козырев А. Н.).

2. 10-я Всероссийская конференция "Актуальные проблемы прикладной математики и механики" с международным участием, посвященная памяти академика А. Ф. Сидорова и 100-летию УрФУ, Абрау-Дюрсо, 1–6 сентября 2020 г., – 1 доклад (Гладких В. С., Петухов А. В.).

Участие в оргкомитетах конференций

Ильин В. П.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения-2020", Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;

– член программного комитета Международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии 2020", Пермь, 31 марта – 2 апреля 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 8

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 21

Докладов на конференциях – 9, в том числе 1 пленарный

Членов организационных или программных комитетов конференций – 2

Кадровый состав

1. Горбенко Н. И. и. о. зав. лаб. к.ф.-м.н.

2. Гладких В. С. инженер 1-й катег.

3. Горшунов В. С. инженер

4. Гурьева Я. Л. с. н. с. к.ф.-м.н.

5. Ильин В. П. г. н. с. д.ф.-м.н.

6. Ицкович Е. А. ведущ. программист

7. Козырев А. Н. н. с.

8. Крылов А. М. инженер.

9. Омарова Г. А. м. н. с. к.ф.-м.н.

10. Перевозкин Д. В. м. н. с.

11. Петухов А. В. м. н. с.

12. Свешников В. М. г. н. с. д.ф.-м.н.

13. Савченко А. О. с. н. с. к.ф.-м.н.

14. Чимаева Е. В. ведущ. программист

Горшунов В. С., Крылов А. М. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

Свешников В. М. – проф. НГУ
Ильин В. П. – проф. НГУ
Горбенко Н. И. – доц. НГУ, ВКИ
Омарова Г. А. – ст. преп. НГУ

Руководство студентами

Крылов А. М. – магистрант 2 года ММФ НГУ, руководитель Ильин В. П.
Овсянкин А. Э. – магистрант 2 года ММФ НГУ, руководитель Ильин В. П.
Козлов Д. И. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Ильин В. П.
Плуговая В. С. – 3-й -й курс ММФ НГУ, руководитель Ильин В. П.

Руководство аспирантами

Климонов И. А. – 3-й год, ИВМиМГ, руководитель Свешников В. М.
Казанцев Г. Ю. – 2-й год, ИВМиМГ, руководитель Ильин В. П.

Защита диссертации

Савченко А. О. – защита докторской диссертации "Численные и аналитические методы расчета воздействия электромагнитного поля на проводящее тело" по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, 16.06.2020 (консультант Ильин В. П.)

ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ХИМИИ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

Важнейшие достижения

Явные противопотоковые схемы в нестационарных задачах фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости

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

Для задач фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости с разрывными решениями предложены вычислительные алгоритмы, основанные на явной противопотоковой аппроксимации интегральных законов сохранения. С точки зрения приложений речь идет о процессах вытеснения нефти водой. Построена явная схема для двухпористой 3D модели трещиновато-пористой среды, в которой противопотоковый подход реализуется не только внутри каждой среды, но и при обмене двухфазной жидкостью между поровыми блоками и трещинами. Предложена явная схема для задачи с разнонаправленными потоками фаз, являющейся основой описания процесса гравитационной сегрегации двухфазной жидкости в пористой среде. Для построенных схем установлен принцип максимума и решена проблема однозначной разрешимости сеточных задач с условиями непротекания на внешней границе области и с заданными дебитами на нагнетательных и добывающих скважинах.

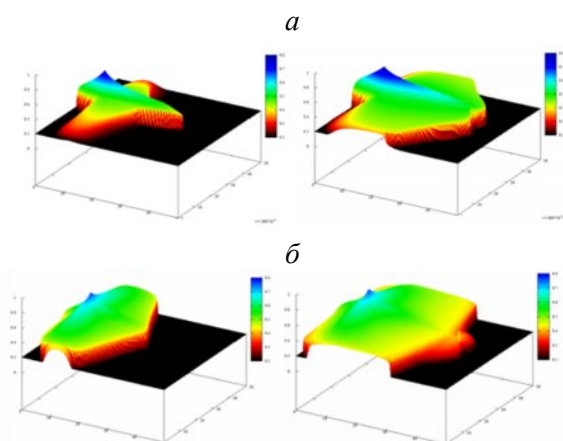


Рис. 1 – Водонасыщенности поровых блоков (а) и трещин (б) в моменты времени $2 \cdot 10^6$ с и $6 \cdot 10^6$ с при анизотропной проницаемости

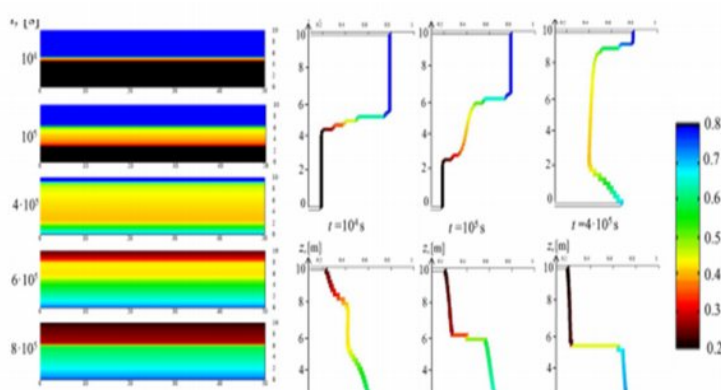


Рис. 2 – Водонасыщенность в задаче о гравитационной сегрегации легкой нефти при начальных данных: сверху – вода, снизу – нефть

Результаты исследований изложены в работах:

1. Ivanov M. I., Kremer I. A., Laevsky Yu. M. Oil reservoir simulation based on the conservation laws in integral form // AIP Conf. Proc. 2312, 050008 (2020).
2. Ivanov M. I., Kremer I. A., Laevsky Yu. M. Computational model of fluid filtration in fractured porous media // Num. Analysis and Appl. 2021. Vol. 14, iss. 2 (to be published).
3. Ivanov M. I., Kremer I. A., Laevsky Yu. M. Numerical model of gravity segregation of two-phase fluid in porous media based on hybrid upwinding // RJNMM. 2021. V. 36, iss. 1 (to be published).

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. 10-я Всероссийская конференция "Актуальные проблемы прикладной математики и механики" с международным участием, посвященная памяти акад. А. Ф. Сидорова и 100-летию УрФУ, пос. Абрау-Дюрсо, 1–6 сентября 2020 г.

2. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 9–23 октября 2020 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершнным в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Математическое моделирование комплексных многомерных процессов естествознания на суперЭВМ".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2019-0008.

Соруководитель – д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

Этап 2020 г.

В 2020 году были рассмотрены варианты решения вырожденной 3D задачи линейной теории упругости методом конечных элементов. Решения краевых задач линейной теории упругости с заданными граничными нагрузками определены с точностью до множества жестких перемещений, в 3D случае его размерность равна 6. В ряде известных работ приводятся и обосновываются варианты условий однозначной разрешимости такой краевой задачи. Также показан способ получения обобщенных постановок краевых задач на основе разложения жестких перемещений в сумму поступательного и вращательного движений. В качестве альтернативного подхода в отчетном году получена невырожденная расширенная постановка задачи упругости, решение которой автоматически удовлетворяет ограничениям на ротор поля перемещений. Описана конечноэлементная технология получения соответствующей СЛАУ, предложен алгоритм ее решения. На примерах решения модельных задач исследованы свойства предложенного алгоритма.

Большое внимание в отчетном году уделено задачам фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости для модели Баклея – Леверетта (без учета капиллярной диффузии). В рамках данного проекта разработаны постановки ряда задач, детальное изучение которых, включая построение противопотоковых схем, а также проведение соответствующих численных экспериментов, осуществлялось в проекте РНФ. Краткая информация о полученных результатах содержится в разделе "Важнейшие достижения". Более подробное описание будет приведено в разделе о результатах работы по проекту РНФ.

В 2020 г. опубликованы результаты исследований для задачи фильтрационного горения газа (ФГГ) в режиме низких скоростей в случае однородной среды. В частности, в статье описана схема расщепления для решения многомерной задачи. Разработанные алгоритмы реализованы в виде программ на языке C для последовательного и параллельного исполнений на современных вычислительных системах. Изложены результаты анализа эффективности работы как самих программ, так и лежащих в их основе вычислительных алгоритмов. Приведены результаты численных экспериментов, описывающих различные закономерности и особенности процесса ФГГ, полностью соответствующие теоретическим и экспериментальным данным. Приведены результаты вычислений на суперЭВМ с использованием технологии MPI.

Также в отчетном году разработаны вычислительные алгоритмы для численного моделирования ФГГ в неоднородных пористых средах, объясняющие неприменимость балансных соотношений при наличии фиксированного скачка теплофизических характеристик пористой среды. Для одномерных уравнений сформулированы задачи в неоднородных средах при скачке теплоемкости и пористости химически инертного каркаса. Соответствующие уравнения тепломассопереноса выписаны в смешанной обобщенной постановке, что естественным образом приводит к использованию смешанного метода конечных элементов пространственной аппроксимации задачи. Вопросы разработки программных кодов, проведения численных экспериментов и анализа полученных результатов рассматривались в рамках работ по проекту РНФ и будут обсуждаться в соответствующем разделе данного отчета.

В 2020 г. разработан алгоритм поиска наилучших кубатурных формул на сфере, инвариантных относительно общей группы вращений диэдра D_4 . Эта группа является подгруппой ранее изученной группы D_{4h} , а также подгруппой группы вращений октаэдра. В разработанном алгоритме сначала вводятся три базисные инвариантные формы, представляющие собой многочлены второй, четвертой и пятой степеней, а затем строится пространство инвариантных относительно данной группы многочленов в виде многочленов от базисных инвариантных форм. Этот прием, впервые использованный В. И. Лебедевым для группы вращений октаэдра с инверсией, позволяет существенно упростить решаемую систему нелинейных алгебраических уравнений. Отличительной особенностью нашего подхода к решению полученных систем уравнений является то, что мы не ориентируемся (в отличие от работ В. И. Лебедева) на системы, которые разбиваются на подсистемы. Возникающие системы уравнений решаются по единой схеме для всех исследованных нами групп симметрии. Наша основная цель – получить оптимальную кубатурную формулу в рамках данной группы симметрии. С помощью предложенного нами алгоритма проведены обширные численные расчеты с использованием вычислительной техники Сибирского суперкомпьютерного центра. В результате были получены все наилучшие кубатурные формулы данного вида симметрии до 35-го алгебраического порядка точности n . При этом для всех n от 1 до 9 и для $n = 11$ были найдены точные значения параметров наилучших кубатур, а для остальных n – приближенные, полученные путем численного решения систем нелинейных алгебраических уравнений методом ньютоновского типа.

Исследована возможность использования функций библиотеки Intel® MKL для решения больших систем ОДУ с разреженной матрицей Якоби нерегулярной структуры. Разработан интерфейс библиотеки, который позволяет пользователю использовать любой метод решения систем линейных уравнений для любых форматов данных. Исследования возможности ускорения вычислений библиотеки за счет использования многоядерности современных компьютерных архитектур показали, что это имеет смысл делать на этапе решения систем линейных уравнений. Использование реализации этой функциональности из указанной выше библиотеки Intel® MKL решило эту проблему. Функциональное развитие библиотеки и ее тестирование на достаточно сложных системах, включая уравнения с частными производными, осуществлено в рамках исследований по проекту РНФ.

Результаты работ по проекту РНФ

Проект РНФ № 19-11-00048 "Вычислительные модели процессов нефтедобычи в районах Северо-Восточной Сибири и их реализация в виде высокопроизводительного программного обеспечения на суперЭВМ для задач фильтрации многофазной жидкости, задач фильтрационного горения газа и задач теплопереноса при наличии фазовых переходов".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

В отчете рассмотрены результаты по проекту РНФ, полученные только сотрудниками лаборатории МЗХ. В рамках данного проекта в 2020 г. получен ряд результатов по созданию нового поколения вычислительных моделей и алгоритмической базы математического моделирования процессов нефтедобычи в районах вечной мерзлоты и их реализации на высокопроизводительных многоядерных кластерах. Речь идет о решении многомерных задач фильтрации многофазной жидкости, задач тепломассопереноса с учетом фазовых переходов, фильтрационного горения газа. Предложены новые экономичные вычислительные алгоритмы для ряда задач фильтрации двухфазной жидкости в пористых и трещиновато-пористых средах. Особенностью рассмотренных задач является наличие разрывных решений, что не позволяет рассматривать математическую модель в виде системы дифференциальных уравнений во всей области. Нами была рассмотрена модель в виде интегральных законов сохранения массы и импульса в произвольных подобластях. В частности, закон Дарси сформулирован в обобщенном виде для суммарной скорости, а фазовые скорости задаются произведением суммарной скорости на некоторые, вообще говоря, разрывные функции. Полученная постановка естественным образом приводит к пространственной аппроксимации смешанным методом конечных элементов для вычисления суммарной скорости и давления и центрированным методом конечных объемов для вычисления фазовых насыщенностей. Аппроксимация по времени уравнения для насыщенности осуществляется на основе явной противопотоковой схемы Эйлера. Данный подход развит как для однопористой, так и для двухпористой модели, описывающей течение в трещиновато-пористых средах с использованием функции массообмена между поровыми блоками и трещинами. В случае двухпористой модели противопотоковая схема была построена не только внутри каждой среды (в поровых блоках и трещинах), но и при реализации массообмена между средами. Принцип построения такой схемы проиллюстрирован на рис. 3.

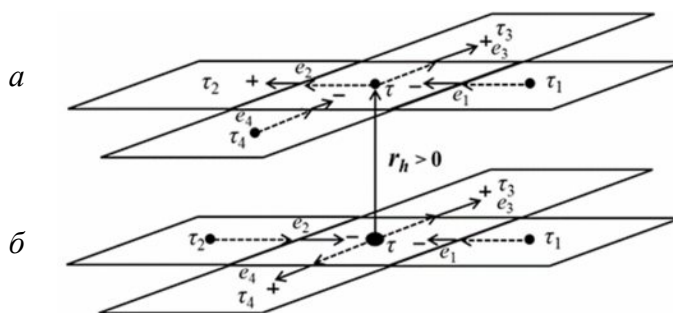


Рис. 3 – "Противопотоковая" схема перетока флюида из трещин (а) в поровые блоки (б)

Кроме того, для двухпористой среды получен ответ на вопрос о единственности решения задачи Неймана (непротекание флюида как в порах, так и в трещинах на внешней границе области и с заданными интегральными расходами на скважинах). Установлено, что условием единственности решения является ортогональность константе суммы давлений в порах и трещинах. Иллюстрация результатов приведена на рис. 1.

Рассмотрена задача о гравитационной сегрегации двухфазной жидкости в пористой среде. Интерес к этой задаче вызван тем фактом, что надежно работающие алгоритмы решения задачи о вытеснении нефти водой не обеспечивают адекватные численные результаты при наличии силы тяжести. В результате построена новая вычислительная схема решения многомерной задачи гравитационной сегрегации двухфазной жидкости в пористой среде. В отличие от хорошо известного в настоящее время подхода IHU (Implicit Hybrid Upwinding), предложенного американскими учеными в 2015 г., нами разработан явный вариант этого подхода (EHU), не уступающий IHU по точности и существенно превосходящий по производительности. Суть подхода состоит в учете однонаправленности суммарного потока и противоположной направленности потоков фаз. Алгоритм со стандартной противопотоковой аппроксимацией оказывается неспособным адекватно воспроизвести процесс фильтрации. Для построенного нами метода получено доказательство слабого принципа максимума с явным указанием условия Куранта – Фридрихса – Леви, обеспечивающего устойчивость и монотонность схемы. При этом для модели Баклея – Леверетта, в которой динамика насыщенности описывается гиперболическим уравнением, полученные условия не являются обременительными с точки зрения величины шага по времени, а лимитирующим шаг фактором является точность. Именно этот факт обеспечивает конкурентоспособность EHU по отношению к IHU для указанного класса задач. На рис. 4 проиллюстрирована неустойчивость подхода, не учитывающего разнонаправленность потоков фаз, а на рис. 5 в дополнение к рис. 2 приведены результаты для 3D модели.

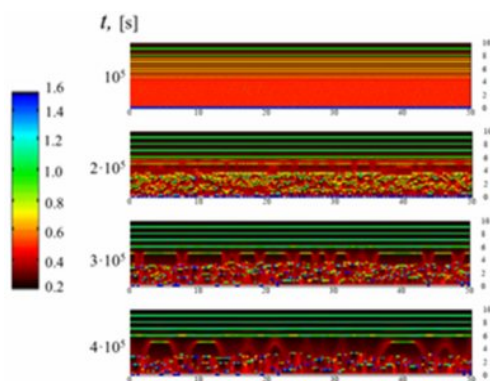


Рис. 4 – Неустойчивость

"стандартной" противопотоковой схемы

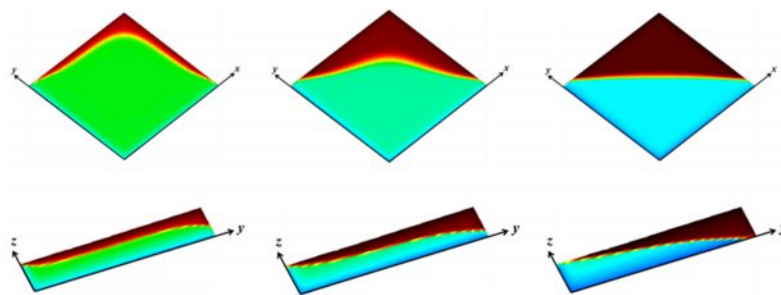


Рис. 5 – 3D модель процесса сегрегации

Исследован процесс фильтрационного горения газа в неоднородных пористых средах в случае скачка теплоемкости каркаса и скачка пористости. В случае скачка теплоемкости показано, что вдали от границы сред формула для мгновенной скорости фронта работает адекватно, т. е. отражает реальную картину происходящего до и после разрыва физических характеристик; при приближении к границе фронт горения замедляется и после перехода в новую среду выходит на новое постоянное значение скорости. При этом стабилизация процесса не наступает (скорость фронта горения отлична от нуля). В случае скачка пористости наблюдается его стабилизация: при некотором критическом значении скачка пористости фронт скачкообразно останавливается. При этом балансное соотношение, использующее инвариантность процесса относительно сдвига, перестает работать по естественным причинам: при наличии скачка параметров каркаса исчезает инвариантность задачи относительно сдвига. На рис. 6 показаны результаты вычислений в случае скачка пористости.

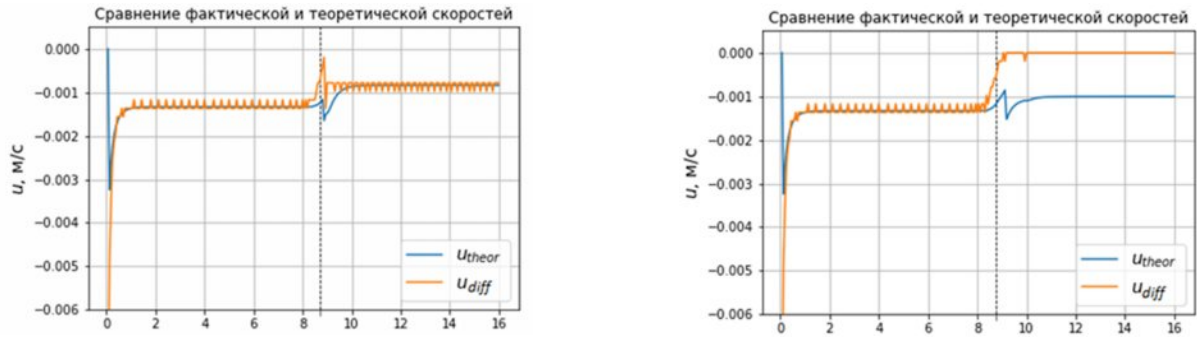


Рис. 6 – Скорость фронта при переходе через границу сред с пористостью 0.6 и 0.65

И, наконец, в рамках работ над библиотекой для решения систем ОДУ исследована возможность использования функций библиотеки Intel® MKL для решения больших систем ОДУ с разреженной матрицей Якоби нерегулярной структуры. Разработан интерфейс библиотеки, позволяющий пользователю применять любой метод решения систем линейных уравнений для любых форматов данных. Исследована применимость решателя для больших систем ОДУ, возникающих из аппроксимации дифференциальных уравнений в частных производных на примере простой конечно-разностной аппроксимации одномерного параболического уравнения. Данное исследование показало, что нашей библиотеке требуется очень маленький шаг на этапе стабилизации решения, что затрудняет ее использование в проекте, поскольку этап стабилизации решения весьма длительный в задачах фильтрации. Дальнейшие улучшения методов могут быть связаны с возможностью использования разных методов для разных компонент уравнения, чтобы явные методы использовались только для быстро меняющихся компонент. Данная работа потребует реализации покомпонентной оценки ошибки и модификации алгоритмов. Исследования возможности ускорения вычислений библиотеки за счет использования многоядерности современных компьютерных архитектур показали, что это имеет смысл делать на этапе решения систем линейных уравнений. Использование реализации этой функциональности из библиотеки Intel® MKL решило эту проблему. Проведено сравнительное тестирование библиотеки на 11 достаточно сложных системах, включая уравнения с частными производными, приведенных Э. Хайпером на веб-странице <http://www.unige.ch/~hairer/testset/testset.html>.

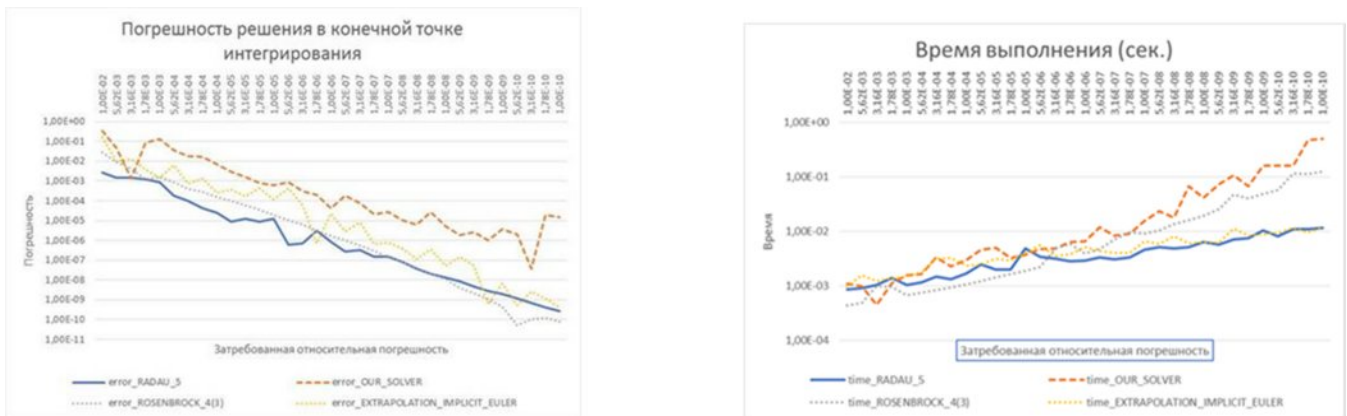


Рис. 7 – Осциллятор Ван дер Поля

**Результаты работ по договору № YBN2020095137
на выполнение НИР для Huawei Technologies Co. Ltd**

Проект № YBN2020095137 "LAPACK 3-diagonal solver".

Руководитель – д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

Работа по проекту фактически началась в ноябре 2020 г. До конца года была организована дистанционная работа по проекту в виде еженедельных совещаний с использованием технологии Zoom. Были распределены обязанности между членами команды, состоящей из 5 человек, включая руководителя проекта, начата работа над анализом необходимой алгоритмической базы, включающей набор функций из общедоступной библиотеки Netlib LAPACK. Было закуплено необходимое для реализации проекта оборудование.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Ivanov M. I., Kremer I. A., Laevsky Yu. M. Oil reservoir simulation based on the conservation laws in integral form // AIP Conf. Proc. 2312, 050008 (2020). DOI: 10.1063/5.0035698.
2. Popov A. S. Cubature formulas on the sphere that are invariant under the transformations of the dihedral group of rotations D_4 // Sib. Electron. Math. Rep. 2020. V. 17. P. 964–970. DOI: 10.33048/semi.2020.17.071.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Laevsky Yu. M., Nosova T. A. A multidimensional computational model of filtration gas combustion // J. Appl. and Indust. Math. 2020. V. 14, iss. 1. P. 148–161. DOI: 10.1134/S1990478920010147.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Иванов М. И., Кремер И. А., Лаевский Ю. М. Моделирование процесса фильтрации двухфазной жидкости на основе законов сохранения в интегральной форме // Актуальные проблемы прикладной математики и механики : тез. докладов 10-й Всерос. конф. с международным участием, посвящ. памяти акад. А. Ф. Сидорова и 100-летию УрФУ, пос. Абрау-Дюрсо, 1–6 сент. 2020 г. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2020. С. 35.
2. Гололобов С. В., Лаевский Ю. М. Комплекс программ по решению систем ОДУ // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 10.
3. Иванов М. И., Кремер И. А. Варианты решения вырожденной 3D задачи линейной упругости методом конечных элементов // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 12.
4. Иванов М. И., Кремер И. А., Лаевский Ю. М. Моделирование процесса фильтрации двухфазной жидкости на основе законов сохранения в интегральной форме // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 12.
5. Лаевский Ю. М., Носова Т. А. Вычислительные модели фильтрационного горения газа Международная конференция // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф.,

посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 173.

Участие в конференциях и совещаниях

1. 10-я Всероссийская конференция "Актуальные проблемы прикладной математики и механики" с международным участием, посвященная памяти акад. А. Ф. Сидорова и 100-летию УрФУ, пос. Абрау-Дюрсо, 1–6 сентября 2020 г. – 1 пленарный доклад (Иванов М. И., Кремер И. А., Лаевский Ю. М.).

2. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 9–23 октября 2020 г. – 4 доклада, из них 1 пленарный (Иванов М. И., Кремер И. А., Лаевский Ю. М., Гололобов С. В., Носова Т. А.).

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 3

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 7

Докладов на конференциях – 5, в том числе пленарных – 2

Кадровый состав

1. Лаевский Ю. М.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
2. Кремер И. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
3. Попов А. С.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
4. Голубева Л. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
5. Иванов М. И.	м.н.с.	
6. Носова Т. А.	м.н.с.	к.ф.-м.н.
7. Гололобов С. В.	ведущ. инж.	к.ф.-м.н.
8. Литвиненко С. А.	ведущ. инж.	к.ф.-м.н.
9. Сандер И. А.	ведущ. прогр.	
Носова Т. А. – молодой научный сотрудник.		

Педагогическая деятельность

Лаевский Ю. М.	– проф. НГУ, зав. кафедрой вычислительной математики
Голубева Л. А.	– доц. НГУ
Гололобов С. В.	– доц. НГУ
Кремер И. А.	– ст. преп. НГУ
Литвиненко С. А.	– ассистент НГУ

Руководство аспирантами

Первунин А. С. – 4-й курс аспирантуры ММФ НГУ, руководитель Лаевский Ю. М.

ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ И ГИДРОСФЕРЕ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Платов Г. А.

Важнейшие достижения

Оценка влияния неопределенности климатических данных о ледниковых циклах на анализ эволюции многолетнемерзлых грунтов

К.ф.-м.н. Малахова В. В.

Для анализа эволюции многолетнемерзлых пород (ММП) и зоны стабильности гидратов метана арктического шельфа и оценки их современного состояния необходимо построение палеогеографических сценариев развития климатических условий в регионе. Между имеющимися реконструкциями температуры для ледниковых циклов плейстоцена имеются значительные количественные различия. Получены оценки чувствительности результатов численного моделирования термического состояния многолетнемерзлых грунтов к неопределенности палеоклиматических реконструкций температуры воздуха и уровня океана с использованием модели теплофизических процессов в грунте с учетом фазовых переходов. Неопределенность, связанная с выбором данных климатических палеореконокструкций в терминах современной глубины нижней границы многолетнемерзлых грунтов на шельфе может достигать нескольких десятков метров (рис. 1). Несмотря на заметные различия между используемыми наборами данных, коэффициент неопределенности отклика мощности многолетнемерзлого слоя и зоны стабильности метангидратов составил менее 0.3 за исключением изолированных интервалов времени и/или наиболее глубоких областей шельфа.

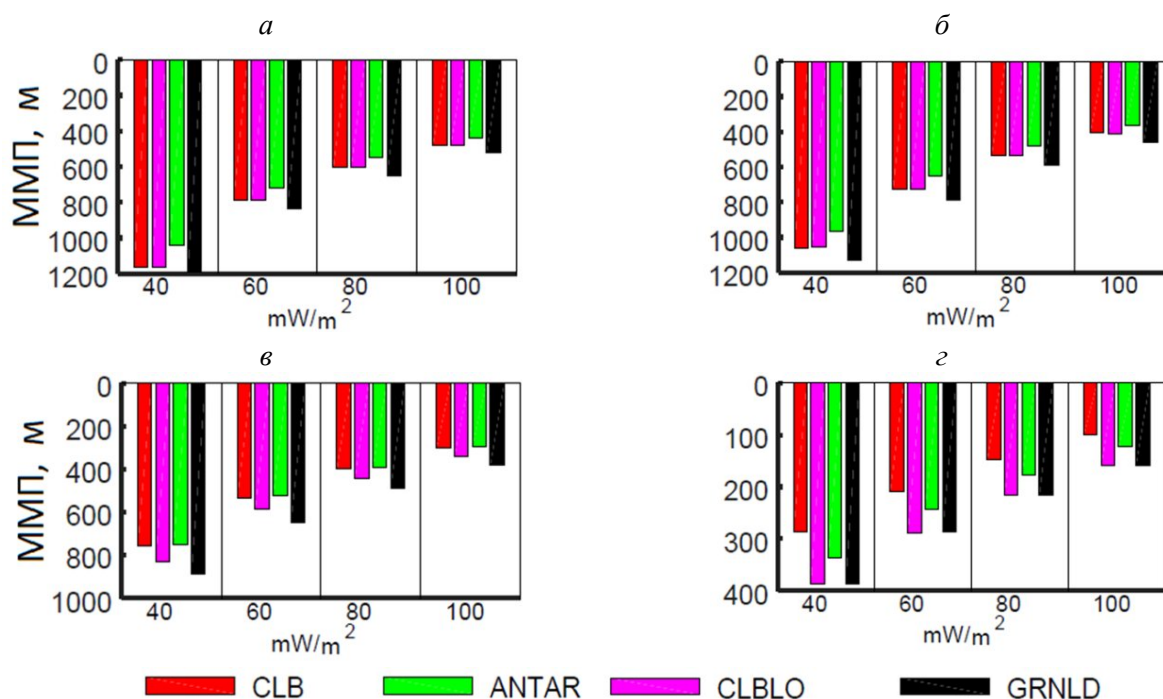


Рис. 1 – Оценки современной мощности мерзлоты шельфа, полученные при используемых палеогеографических сценариях для различных значений интенсивности геотермального теплового потока 40–100 мВт/м²; глубина воды:

a – 0 м; *б* – 10 м; *в* – 50 м; *з* – 100 м

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Malakhova V. V., Eliseev A. V. Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments // *Global and Planetary Change*. 2020, 192: 103249. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103249> (WoS, Q1 (IF 4.1)).
2. Malakhova V. V., Eliseev A. V. Analysis of the subsea permafrost dynamics at the Arctic shelf accounting for climate change uncertainty during glacial cycles // *Proc. SPIE*. 2020. V. 11560. P. 115606D. DOI:10.1117/12.2575081.

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. 26-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 29 июня – 3 июля 2020 г.
2. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, 19–23 октября 2020 г., Новосибирск.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершенным в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Развитие методов математического моделирования для задач физики атмосферы, гидросферы и окружающей среды с учетом природных и техногенных воздействий".

Номер государственной регистрации НИР 0315–2019–0004.

Руководители: д.ф.-м.н. Пененко В. В., д.ф.-м.н. Платов Г. А.

Раздел 2.

Руководитель – д.ф.-м.н. Платов Г. А.

Этап 2020 г.

Достигнутые в 2020 г. результаты:

1. Проведена оценка влияния неопределенности климатических данных для ледниковых циклов на анализ эволюции многолетнемерзлых грунтов (см. Важнейшие достижения 2020 г.)
2. Исследовано влияние повышения температуры нижней субтропической стратосферы на усиление полярного вихря. Для этого был проведен численный эксперимент с помощью новой модели системы Земли PlaSim-ICMMG-1.0, которая достаточно хорошо воспроизводит основные характеристики климатической системы.

Устойчивость стратосферного полярного вихря в зимне-весенний период является одним из ключевых факторов, определяющих продолжительность и масштабы разрушения стратосферного озона в полярной области. Арктический полярный вихрь имеет максимум скорости зимой, в то время как антарктический, как правило, усиливается в начале весны. В результате над Антарктикой ежегодно с августа по ноябрь наблюдается масштабное разрушение озона, а над Арктикой небольшие аномалии наблюдаются лишь эпизодически в период с января по март. Реанализ ERA-Interim показывает высокую согласованность между внутригодовыми изменениями температуры нижней субтропической стратосферы и скорости зонального ветра в субполярной и полярной нижней стратосфере в Южном полушарии.

Результаты численного моделирования демонстрируют усиление зонального ветра в субполярной области при повышении температуры субтропической стратосферы (рис. 2). Показано,

что зимне-весеннее усиление антарктического полярного вихря происходит благодаря увеличению стратосферного меридионального температурного градиента в результате сезонного повышения температуры нижней субтропической стратосферы в этот период.

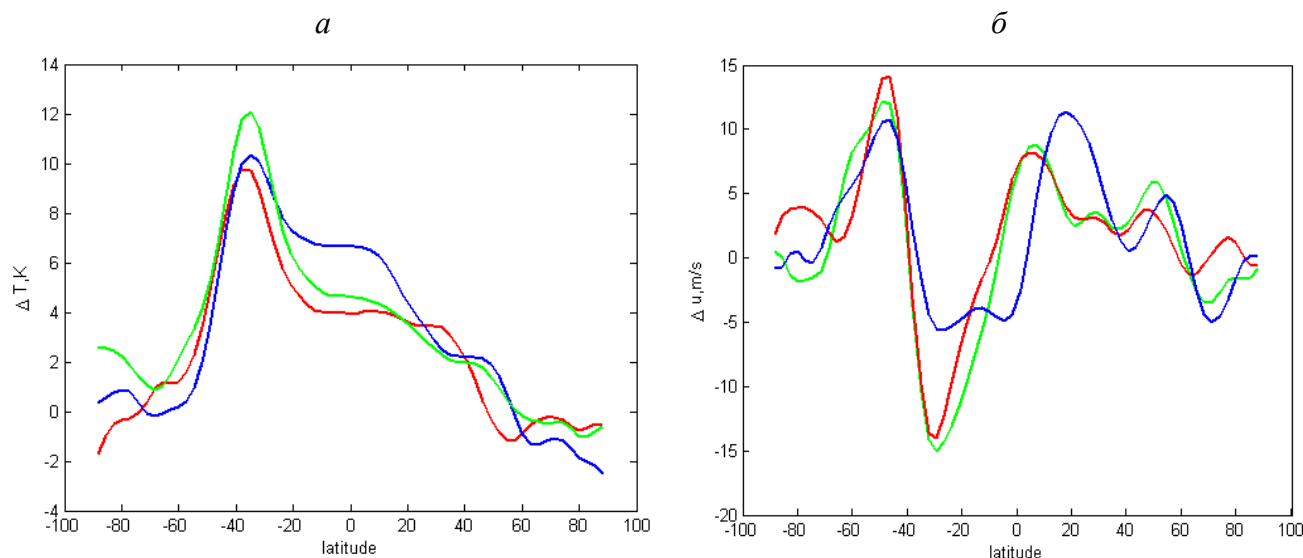


Рис. 2 – Среднемесячные аномалии температуры (а) и зональной скорости ветра (б) на уровне давления 70 hPa в июле (красная линия), сентябре (зеленая) и ноябре (синяя)

3. Проводилось исследование пространственно-временных особенностей волновой активности тропосферы и нижних слоев стратосферы в осенне-зимний период и анализ их отклика на региональные возмущения (влияние снежного покрова), формирующиеся в осенний сезон у поверхности, как индикатора устойчивости атмосферы к региональным возмущениям, а также анализ их связи в этот период с состоянием полярного вихря (совместно с Ю. В. Мартыновой (ИМКЭС СО РАН)).

В рамках этого исследования были также композиты MAX и MIN, отличающиеся интенсивностью формирования снежного покрова (СП) в Западной Сибири (ЗС, 50–70°с. ш. и 60–90° в. д.). Из композита MAX были выбраны для дальнейшей работы только те годы, в которые неделя с максимальной интенсивностью прироста СП пришлась исключительно на октябрь (ОСТMAX: 2003, 2009 и 2011). Из композита MIN оставлены для рассмотрения годы, в которые неделя с максимальным приростом на октябрь не пришлась (ОСТMIN: 1979, 1981 и 1999). Это позволяет избежать в рамках каждого композита существенных взаимных сдвигов по времени различных динамических процессов в атмосфере. Площадь СП оценивалась с помощью спутниковых данных о протяженности видимого снежного покрова, получаемых NOAA. Вычисление остальных характеристик осуществлялось с помощью данных реанализа ERA-Interim. Для анализа распространения квазистационарных планетарных волн был рассчитан поток Элиассе-на – Пальма (ЭП), отражающий распространение планетарных волн и в определенном смысле являющийся суперпозицией горизонтальных вихревых составляющих потока импульса, потока тепла и вертикального термического градиента. Для оценки трехмерного распространения планетарных волн в атмосфере для каждого композита был рассчитан поток Пламба. В рассмотрение были включены месяцы с сентября по февраль. Несмотря на то что в сентябре в выбранные для композитов годы формирование СП еще не происходит, анализ волновой активности для сентября позволяет сделать вывод о волновом состоянии атмосферы, предше-

ствующем аномалиям формирования СП. Также был проведен анализ влияния аномалий формирования СП на интенсивность шторм-треков (ШТ) Северного полушария (как характеристики вихревой активности атмосферы). Здесь и далее под ШТ понимаются области высокой бароклинности атмосферы. В средних широтах Северного полушария выделяются два ШТ: Атлантический и Тихоокеанский. Характеристика интенсивности ШТ была рассчитана на основе меридиональной составляющей скорости ветра. Предварительно к скорости ветра был применен 24-часовой фильтр, позволяющий выделить вихри синоптического масштаба. В рамках работы для каждого месяца осенне-зимнего сезона проанализированы различия между композитами в широтном и высотном расположении каждого ШТ. Оценена связь между аномалиями формирования СП в ЗС с состоянием Полярного вихря. Используя предложенный метод идентификации и объединения в кластеры событий обрушения волн Россби в Северном полушарии (см. далее), проведено сравнение количества и расположения обрушений антициклонического (АС) и циклонического (С) типов, полученного для каждого месяца в среднем для каждого композита.

4. Проводилось исследование сезонной изменчивости полярного вихря, изучение влияния изменений стратосферной и тропосферной компонент полярного вихря на его устойчивость. (совместно с Гочаковым А. В. (СибНИГМИ Росгидромета)).

Произведена модификация алгоритма идентификации первичных опрокидываний (ПО) контура потенциального вихря. Использовались данные реанализа ERA-Interim с горизонтальным разрешением $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ за 12 UTC. В качестве исходных данных использованы поля потенциальной завихренности (PV) на изобарической поверхности 350 К. Алгоритм дополнен критериями фильтрации событий первичных опрокидываний, в том числе в соответствии с параметрами, используемыми в работе. На выходе алгоритма определяются площадь контура языка, тип опрокидывания (антициклонический (АС) или циклонический (С)), а также общая площадь циклонической части каждого уровня PVU (площадь полярного вихря). Исследовалась изменчивость контура Полярного вихря. Для уровней 2 и 6 PVU определялись координаты среднего за месяц контура потенциального вихря. Координаты контура интерполировались с равномерным шагом в 1° по долготе. В качестве характеристик для каждой долготы вычислялась толщина слоя между контурами вихря 2 и 6 PVU, а также центры этого слоя. Таким образом, подготовлен набор первичных данных для анализа в формате netCDF. Набор содержит следующие характеристики: средняя координата между 2 и 6 PVU уровнями для каждой долготы, а также разницу широт (толщину слоя). Характеристики вычислялись для каждого месяца из доступных годов данных реанализа Era-Interim.

5. Проведено усовершенствование крупномасштабной численной модели океана. Рассмотрена физическая постановка задачи с учетом меняющейся уровенной поверхности океана. Осуществлена реализация двух способов учета уровенной поверхности: линейного и нелинейного. Изменение уровенной поверхности в новом варианте модели осуществляется на основе ее непосредственной динамики, следующей из изменчивости поля скорости, а также внешних источников, влияющих на объем морских вод: баланса осадков и испарения на поверхности океана, оценки скорости и объема поступающих пресных речных вод, процессов образования таяния льда. Численная реализация модели основана на аппроксимации исходной дифференциальной модели на трехмерной численной сетке по вертикали, что значительно отличает новый

вариант модели от предыдущей версии. Использование трехмерной численной сетки с возможностью адаптировать вертикальное пространственное распределение на нескольких горизонтах к произошедшим на поверхности изменениям уровня моря наиболее важно при работе численной модели в полярных регионах, где толщина льда может превышать глубину первого расчетного уровня океана. Разработан новый блок модели расчета поля скорости с реализацией автоматического (на основе использования одного параметра) переключения численной модели от использования параметризации "твердой крышки" к постановке с меняющейся уровенной поверхностью. Проведены предварительные численные эксперименты, показавшие, что модель удовлетворительно описывает динамику вод океана. Уточняются вопросы выполнения законов сохранения в новой модели.

6. Разработан метод идентификации мезомасштабных вихрей на основе данных численного моделирования вихреразрешающей модели SibPOM. Для распознавания вихревых образований использовались уединенные минимумы и максимумы в поле возвышения уровенной поверхности, которые рассматривались как циклонические и антициклонические вихри соответственно. Для каждой записи двумерного поля высоты уровенной поверхности строилось поле с равномерным однокилометровым разрешением с использованием билинейной интерполяции. Затем, после осреднения полученного поля по квадратам фиксированного размера, идентифицировались уединенные минимумы и максимумы, которые идентифицировались как вихри масштаба, соответствующего размерам квадрата осреднения. Запись результатов с суточной дискретностью по времени позволяет оценивать не только мгновенное положение и размер выявленных вихревых образований, но и динамику их перемещений и изменений размеров. На рис. 3 представлен пример работы метода идентификации с указанием размеров и траекторий движения наиболее интенсивных вихрей, полученных на основе численного моделирования района Карского моря.

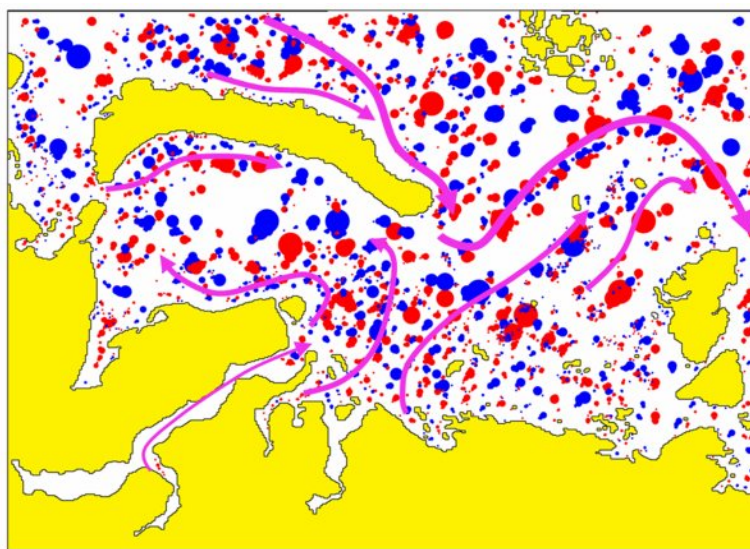


Рис. 3 – Численное моделирование вихревой активности в Карском моря в августе 2007 г.; красные окружности соответствуют циклоническим вихрям, синие – антициклоническим; диаметры окружностей соответствуют их размерам по географическому масштабу карты; стрелки указывают преимущественные направления и траектории движения вихрей

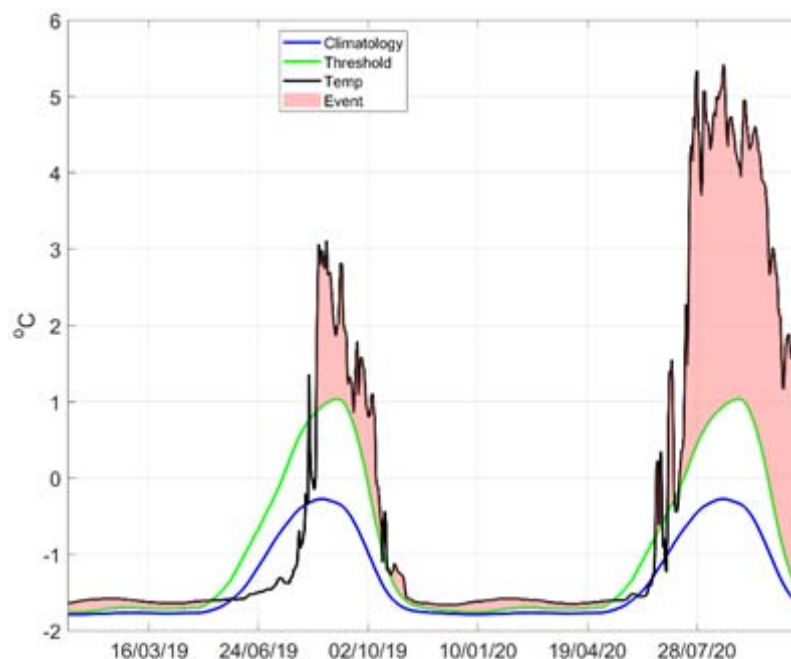


Рис. 4 – Морские волны тепла, выделенные на основе анализа данных наблюдений в море Лаптевых (по данным NOAA National Centers for Environmental Information (<https://www.ncdc.noaa.gov/oisst/data-access>))

7. Разработан метод идентификации морских волн тепла с использованием данных наблюдений или результатов численного моделирования. Метод основан на выделении положительных аномалий температуры акватории над климатическим среднемесячным распределением и пороговым значением. Климатическое среднемесячное распределение вычисляется на основе выбранного базового периода (в настоящем исследовании выбранного с 1979 по 2005 г.). Пороговое значение представляется в виде ежемесячного распределения температуры океана, определяемое как 90-й процентиль на основе базового периода (рис. 4).

8. Разработана новая версия климатической модели речного стока для моделирования многолетней динамики речных вод. В отличие от формирования речного стока на основе двухпараметрической линейной резервуарной модели в новой версии модели для расчета трансформации стока в речной сети используется линейная модель формирования водного баланса в русловой сети. С целью повышения точности расчетов гидрологического режима бассейна р. Лены проведена схематизация бассейна на основе гидрологически корректной цифровой модели рельефа.

Планируемые задачи исследования: на основе новой версии линейной климатической модели речного стока получить предварительные оценки естественного и зарегулированного годового и сезонного стока р. Лены за период с 1985 по 2005 г. с использованием глобальной базы данных реанализа MERRA.

8.1. На основе линейной климатической модели речного стока исследовалось антропогенное воздействие на среднее и нижнее течение р. Вилюй и нижнее течение р. Лены. В качестве антропогенного воздействия в задаче рассматривалось регулирование стока водохранилищем каскада Вилюйских ГЭС–I, II на сток ниже по течению до устья р. Вилюй и далее до Кюсюра, замыкающего створа р. Лены.

Выполнено моделирование естественного стока без воздействия водохранилища для всего бассейна р. Лены и зарегулированного стока на основе суточных данных о расходе воды на гидропосту Чернышевском (в створе ГЭС-I, II), представленные в архиве R-ArcticNET. Получе-

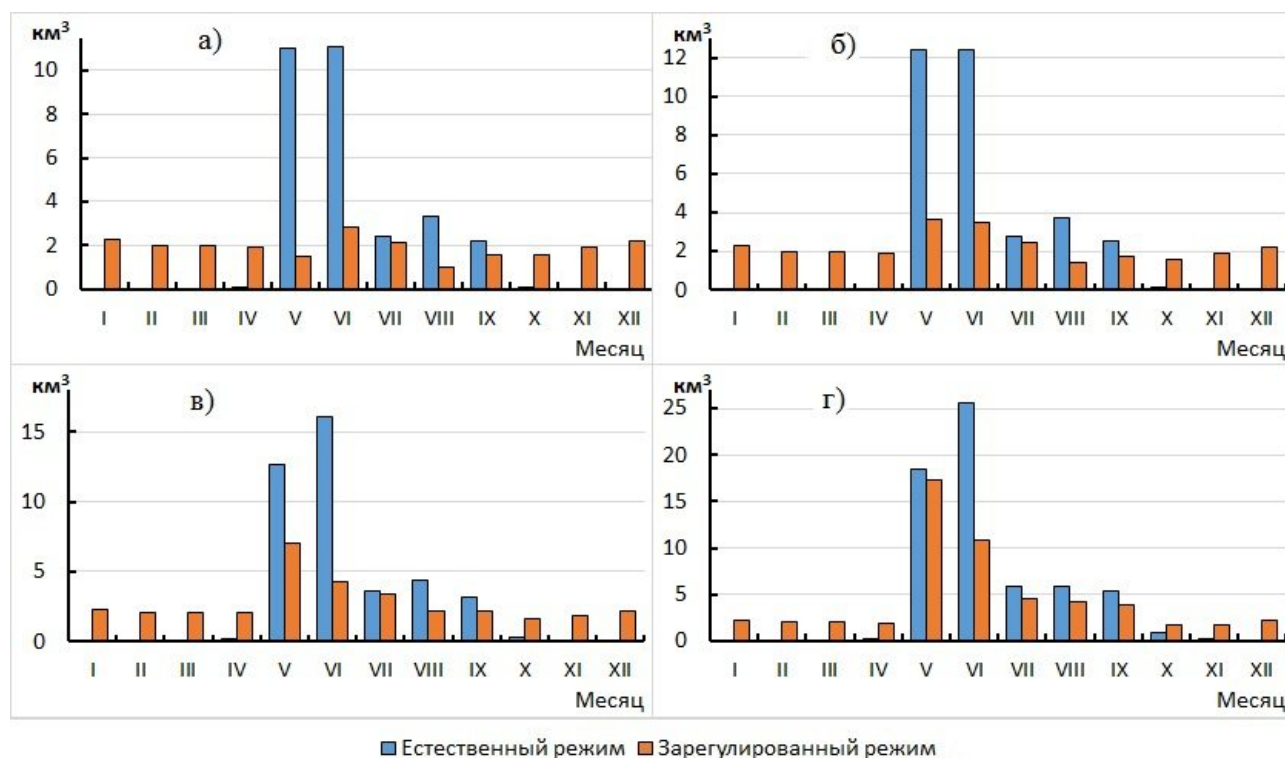


Рис. 5 – Сравнение среднеклиматического месячного расхода за период 1985–2005 гг. на гидропостах р. Вилуй:
а – Чернышевский; *б* – Сюльдюкар; *в* – Сунтар; *г* – Хатырык-Хомо

ны оценки влияния водохранилища на гидропостах Чернышевский, Сюльдюкар, Сунтар, Хатырык-Хомо, расположенных от створа вниз по течению р. Вилуй, а также на замыкающем створе Кюсюр бассейна р. Лены.

На рис. 5 приведен сезонный цикл среднеклиматического месячного стока за период с 1985 по 2005 гг. по четырем станциям для естественного и зарегулированного режимов.

Согласно результатам моделирования сезонное регулирование стока Вилуйским водохранилищем имеет место вплоть до устья р. Вилуй.

На рис. 6*а* приведены модельные сезонные циклы среднеклиматического месячного стока для естественного и зарегулированного режимов на замыкающем створе Кюсюр. Модельные результаты демонстрируют более высокие значения стока для естественного режима в период весеннего половодья. Это позволяет сделать предположение о влиянии Вилуйского водохранилища на сезонный режим стока в нижней части бассейна р. Лены.

8.2. На основе новой версии модели климатического речного стока проведены численные эксперименты по моделированию гидрологического годового цикла и межгодовой динамики речного стока бассейна р. Лены на основе данных реанализа MERRA за период 1985–2005 гг. На рис. 6*б* представлена динамика модельного и наблюдаемого годового стока в замыкающем створе Кюсюр. Пунктиром на рисунке обозначены линейные тренды, показывающие увеличение годового объема стока для данного периода времени.

Результаты моделирования гидрографа стока по новой версии линейной климатической модели оказались близкими с результатами по гидрологической модели VIC (Variable Infiltration Capacity, США) и модели SWAP (Soil Water –Atmosphere – Plants) Института водных проблем РАН.

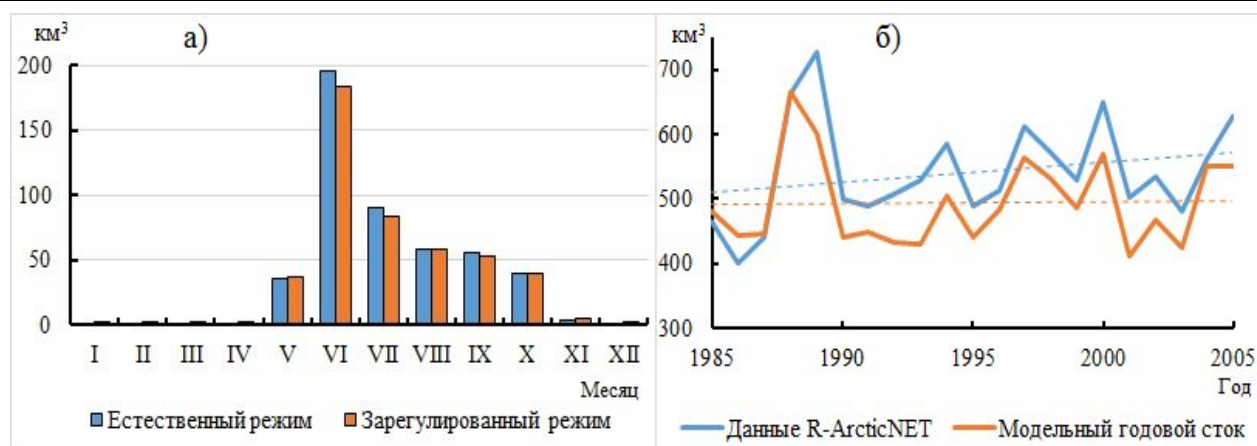


Рис. 6 – Сравнение среднеклиматического месячного стока для естественного и зарегулированного режимов за период 1985–2005 гг. на ГП Кюсюр (а); сравнение межгодового стока по данным R-ArcticNET с результатами моделирования (б)

9. Разработаны методы последовательного анализа и планирования систем мониторинга для решения задач оценивания загрязнения городских территорий и окрестностей промышленных площадок. С использованием методов последовательного анализа и планирования эксперимента, данных наземного и спутникового мониторингов снежного покрова в 2019 г. выполнено численное исследование процессов загрязнения территорий в окрестностях Чернореченского цементного завода (г. Искитим Новосибирской обл.). На основе моделей реконструкции полей моно- и полидисперсной примеси восстановлены поля выпадений примесей (рис. 7, 8).

Результаты моделирования показывают, что моно- и полидисперсные модели реконструкции достаточно адекватно описывают как распространение растворенного кальция, калия, натрия, так и выпадение цементной пыли. При построении использовались две опорные точки измерений (цветные окружности). Остальные измерения (темные окружности) служат для контроля точности численного восстановления полей концентраций (рис. 8). Статистический анализ спутниковой информации и данных наземного мониторинга показал наличие линейных функциональных связей между стандартизованным индексом различий снежного покрова (NDSI) и водородным показателем pH в пробах снеготалой воды ($R = -0.88$), растворенным кальцием и калием коэффициент корреляции R составил -0.86 и -0.84 соответственно.

10. С помощью гидродинамической модели WRF-CHEM выполнено исследование особенностей метеорологических условий и рассеяния высоких выбросов трех крупных ТЭЦ Красноярска (на примере мелкодисперсной пыли). Полученные по результатам моделирования оценки верифицированы с использованием данных наземных измерений. Метеорологические условия, формирующиеся над Красноярском в периоды с неблагоприятным рассеиванием, обуславливают повышение концентраций загрязняющих веществ на большей части жилых районов города. При этом выбросы ТЭЦ наиболее интенсивно загрязняют воздух в жилых районах на правом берегу и в микрорайонах, расположенных на повышенных формах рельефа на левом берегу р. Енисей (рис. 9). В штилевых условиях в приземном слое атмосферы в период неблагоприятных метеорологических условий, выявленный с помощью модели WRF-CHEM, разворот ветра над городом обуславливает увеличение концентраций мелкодисперсных частиц в воздухе жилых районов почти в 200 раз.

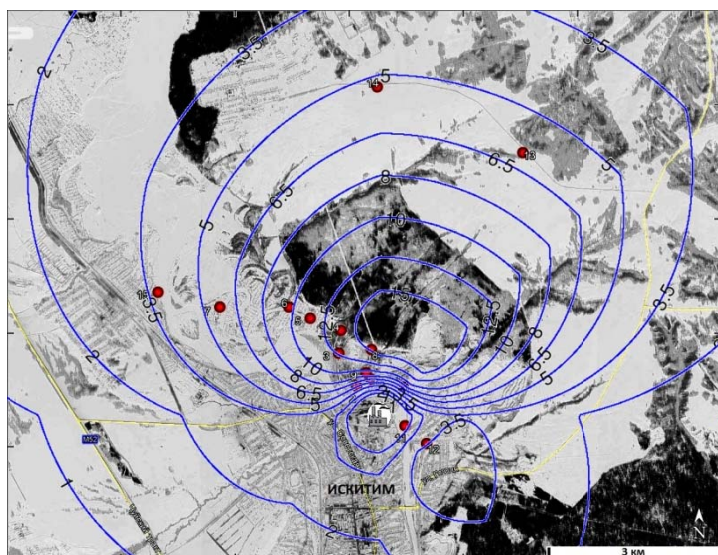


Рис. 7 – Схема отбора проб снега 4 марта 2019 г. Численно восстановленное поле концентрации водорастворенного кальция (мг/л) в зоне влияния аэрозольных выбросов Чернореченского цементного завода

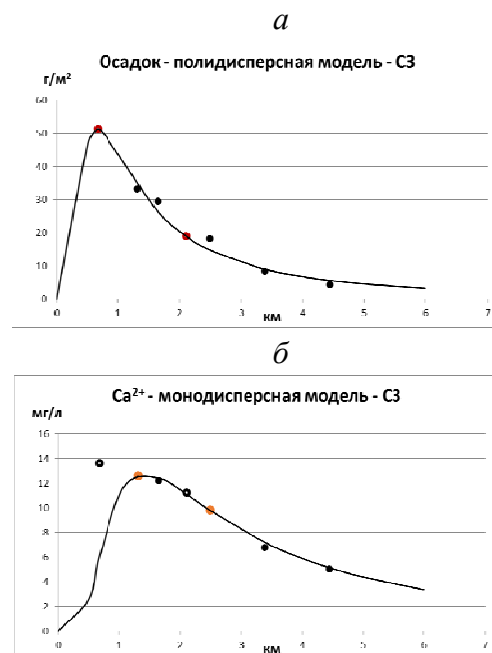


Рис. 8 – Измеренные и восстановленные выпадения в северо-западном направлении: а – взвешенных веществ (г/м^2); б – кальция (мг/л)

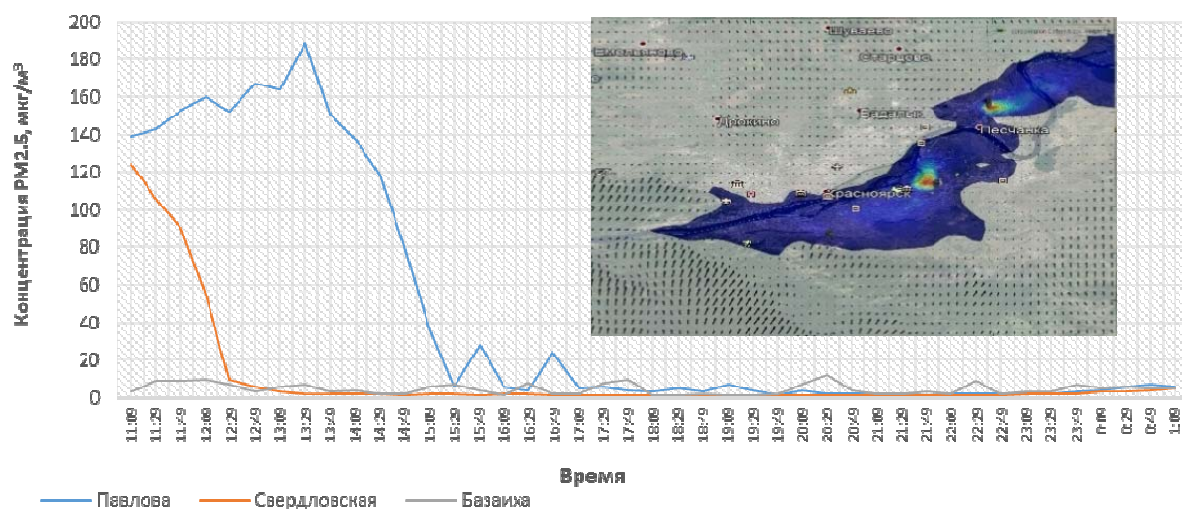


Рис. 9 – Изменение приземных концентрации (мкг/м^3) мелкодисперсной пыли в пунктах измерений на правом берегу р. Енисей при изменении ориентации факелов выбросов от ТЭЦ; в правом углу – рассчитанные ориентации факелов выбросов ТЭЦ над территорией Красноярска

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 20–05–00536 "Исследование роли арктических шельфовых морей в формировании ледовых и гидрологических полей Северного Ледовитого океана в условиях меняющегося климата Земли".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Голубева Е. Н.

На основе трехмерной численной модели океана и морского льда SibCIOM (Siberian Coupled Ice-Ocean Model), разработанной в ИВМиМГ СО РАН, и данных атмосферного реанализа получены среднемесячные поля пространственного распределения характеристик водных масс и морского льда Северного Ледовитого океана. Проведено сравнение результатов численного моделирования на численных сетках различного пространственного разрешения.

Проведено исследование распространения трассеров речных вод на шельфе арктических морей и за его пределами. Построены траектории трассеров, поступающих с речными водами сибирских рек и меняющих свое положение в ходе расчета численного эксперимента. Анализ информации, сохраняемой каждым трассером, показал, что минимальное время нахождения трассеров в шельфовой зоне сибирских морей равняется одному году, среднее время нахождения трассеров в Карском море составляет 3.2 года, на шельфе моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря – 6.8 лет. Циркуляция Карского моря способствует более интенсивному выносу трассеров за пределы акватории моря в отличие от того, как это происходит на шельфе морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, где обширный шельф и изменчивость циркуляции поверхностного слоя моря способствуют более длительному нахождению трассеров на акватории морей. Результаты моделирования показывают сокращение среднего срока нахождения трассеров на акватории сибирских морей в настоящее время примерно в два раза по сравнению с периодом до 2000 г. Причиной сокращения сроков нахождения трассеров на шельфе в настоящее время является увеличение продолжительности периода открытой воды и ветрового воздействия непосредственно на океаническую поверхность. В условиях усиления меридиональной направленности ветра в регионе это способствует повышению скорости поверхностных течений, направленных на вынос трассеров за пределы шельфовых морей. Дальнейшее распространение трассеров и время их нахождения в глубоководной части зависят от режима циркуляции вод Арктического бассейна. При антициклонической моде поверхностной циркуляции Арктического бассейна трассеры, вышедшие на материковый склон, включаются в интенсивный поток, выносящий арктические воды к Гренландии. При циклонической моде поверхностной циркуляции вод трассеры, вышедшие за пределы шельфа, распространяются в направлении хребта Ломоносова и впоследствии, даже при смене режима циркуляции, могут еще длительное время находиться в Арктическом бассейне, включаясь в циркуляцию Канадского бассейна.

Проведено исследование чувствительности воспроизведения численной моделью изменения состояния арктического халоклина. В численных экспериментах показано изменение нижней границы халоклина под действием динамического состояния атмосферы и увеличенного стока арктических рек. Проанализированы последствия повышенного стока рек на характеристики вод глубоководных районов. Показано, что повышение расхода сибирских рек приводит к повышению теплосодержания вод восточной части Евразийского бассейна.

Проект РФФИ № 20–05–00241 "Модельная оценка выделения метана из донных отложений Арктики в атмосферу в прошлом и будущем".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Малахова В. В.

Выполнен анализ эмиссии метана из океана в атмосферу с использованием модельного комплекса, описывающего пространственно-временную изменчивость процессов, происходящих в атмосфере, ледовом покрове, океане, донных отложениях океана, зоне стабильности под-

донных газогидратов и субаквальных мерзлых пород. Исследовано влияние параметризации процесса газообмена на количественную оценку эмиссии метана в атмосферу. Оценки эмиссий метана в атмосферу выполнены на основе различных параметризаций процесса газообмена в системе "вода – атмосфера" и "вода – лед – атмосфера". Показано, что квадратичная функция для определения скорости газообмена может быть использована для преобладающего диапазона скоростей ветра в рассматриваемом регионе. Однако при повышенной скорости ветра влияние используемой параметризации газообмена на рассчитанные потоки метана может быть значительным.

Оценки потоков метана в атмосферу в зимний период получены с учетом влияния изменений ледового покрова Арктики. Максимальный годовой поток CH_4 по результатам численного моделирования характерен для 2007, 2012 и 2015 гг. По результатам расчетов в эти годы значительно сократилась площадь льда, что способствовало повышенной эмиссии метана в атмосферу за счет увеличения вклада зимних месяцев. Получены оценки вклада летних и зимних месяцев в суммарную эмиссию метана для всего расчетного периода (1948–2019 гг.). Целью выполнения этих задач является верификация модели переноса метана в океане с учетом химических преобразований этого газа в океане и взаимодействия с морским льдом.

Разрушение метангидратов и деградация подводной мерзлоты мелководного арктического шельфа является одной из возможных причин повышенных потоков метана в атмосферу. Процессы засоления гидратонасыщенных донных отложений способствуют ускорению деградации гидратов. Используя соотношения для определения зоны стабильности гидрата метана (ЗСМГ) с учетом солености, получены оценки влияния диффузии соли на состояние этой зоны. Учет солености при расчете термобарических условий устойчивости гидрата метана приводит к сокращению ЗСМГ, но из-за большой глубины ее залегания под морским дном это влияние составляет не более нескольких процентов. Дополнительное смещение вниз верхней границы зоны стабильности составило 5–15 м для внешнего шельфа и 1–3 м для внутреннего.

Получены модельные оценки объемов метана в газогидратах донных отложений Северного Ледовитого океана при наличии субаквальной мерзлоты. Данная оценка выполнена с использованием численной модели термодинамических процессов в донных отложениях при интерактивном вычислении термодинамического состояния донных отложений и учете их гидратонасыщенности.

Проект РФФИ № 19-47-540008 "Численное и геоинформационное моделирование в задачах мониторинга загрязнения окружающей среды Новосибирской области".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Рапута В. Ф.

Методами постановок обратных задач переноса газовых и аэрозольных примесей в атмосфере разработана модель оценивания текущей эмиссии источника по измеренным концентрациям примеси в дымовом шлейфе и характеристикам пограничного слоя атмосферы, предложены модели оценивания полей концентраций примесей на территориях площадных источников.

В рамках реализуемого подхода проведена численная реконструкция и картографирование полей длительного загрязнения в окрестностях крупных промышленных предприятий Новосибирской обл. На основе наземного и спутникового мониторингов снежного покрова проведено оценивание загрязнения территорий Линёво-Искитимской промышленной зоны. Выполнены

экспериментальные исследования загрязнения снежного покрова в окрестностях Новосибирской ТЭЦ-5 и на их основе проведено численное восстановление полей концентраций и суммарных выпадений пыли-зола, тяжелых металлов, ионных компонентов. На данных биомониторинга ртути в опаде листьев деревьев выполнен численный анализ процессов ее выноса с промплощадки Новосибирского завода химконцентратов в 2019 году. Для периода распространения сильного дымового смога от лесных пожаров в 2019 г. в Восточной Сибири выполнен статистический анализ данных сетевых измерений концентраций субмикронных аэрозолей PM 2.5 и PM 10 в Новосибирске и сопоставление с измерениями в Томске и Челябинске.

Прочие гранты

Крупный научный проект "Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории" (Соглашение с Минобрнауки России № 075–15–2020–787 от 12.10.2020).

Блок 1 "Формирование концептуальных основ инструментальной, инфраструктурной и прикладных цифровых платформ экологического мониторинга и прогнозирования".

Раздел "Численный анализ данных мониторинга загрязнения атмосферы".

Основные исполнители от ИВМиМГ СО РАН: д.ф.-м.н. Рапута В. Ф., к.ф.-м.н. Леженин А. А.

Методами постановок обратных задач переноса газовых примесей в атмосфере разработаны малопараметрические модели реконструкции полей загрязнения территорий точечными источниками. Для рассматриваемых моделей предложены численные алгоритмы оптимизации размещения и оценки информативности используемых систем наземного мониторинга.

В рамках предложенного подхода проведен численный анализ данных биомониторинга ртути в окрестностях промплощадки "Усольехимпром" и на территории г. Усолье-Сибирское. Разработана модель реконструкции полей длительного загрязнения от основных очагов атмосферных поступлений ртути, проведена ее апробация. В точках отбора проб выполнена оценка вкладов загрязнения от шламохранилища завода и промплощадки цеха ртутного электролиза.

С использованием данных мониторинга загрязнения снежного покрова в окрестностях Иркутского алюминиевого завода разработана модель реконструкции полей выпадений легких примесей. Апробация модели проведена на данных измерений концентраций фторидов в снеговом покрове на преобладающих направлениях их выносов с промплощадки завода.

Разработан метод оценивания дополнительного подъема примесей от высотных источников на основе зимних спутниковых снимков и данных метеорологических и аэрологических наблюдений. Апробация предложенных моделей и методов выполнена применительно к процессам выноса дымовых шлейфов от высотных труб Гусиноозёрской ГРЭС.

На основе малопараметрической модели реконструкции полей загрязнений, создаваемых легкими примесями, разработана геоинформационная система анализа данных мониторинга. Ее демонстрация выполнена на данных мониторинга загрязнения снежного покрова атмосферными выбросами Иркутского алюминиевого завода. Для регистрации в Роспатенте по результатам биомониторинга подготовлена база данных измерений содержания ртути и других химических элементов в листьях тополя на территории г. Усолье-Сибирское.

Проекты РНФ

Проект РНФ № 19–17–00154 "Исследование взаимодействия компонент климатической системы "атмосфера – океан – морской лед" арктического региона в условиях изменений глобального климата".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Платов Г. А.

В рамках проекта предполагается исследовать причины сокращения площади и объема морского льда Арктики.

С решением этой задачи связано понимание роли изменений адвективных и конвективных потоков тепла в атмосфере и океане, потоков пресной воды, а также внутренних обратных связей, обусловленных чувствительностью арктической системы атмосфера – океан – лед к фазовым изменениям льда и снежного покрова. Процессы, рассмотрение которых необходимо для решения данной задачи, можно условно разделить на динамические, связанные с изменениями потоков воздуха в атмосфере и океанскими течениями, а также термодинамические, связанные с изменением температуры воздуха, радиационными и турбулентными потоками энергии, усвоением тепла в океане и обратной связью лед – снежный покров – альбедо.

Второй год посвящен исследованию этих связей:

1. Определены характеристики крупномасштабных процессов, связанных с обрушением планетарных волн Россби, способствующих формированию опасных погодных явлений и влияющих на сокращение морского льда в Арктике.

2. Изучены физические и динамические механизмы, которые связывают сокращение арктического морского льда с изменениями потоков энергии в Арктике, структурой атмосферной циркуляции и возникновением экстремальных погодных явлений.

3. Изучена изменчивость гидрологических и ледовых полей Северного Ледовитого океана. Создана база данных для дальнейшего анализа пространственно-временной сезонной и межгодовой изменчивости полей температуры, солености, толщины и сплоченности ледового покрова.

4. Исследована чувствительность термохалинных океанических и ледовых характеристик морей Арктического бассейна к поступлению аномально теплых атлантических вод через Баренцево море и пролив Фрама и тихоокеанских вод через Берингов пролив, т. е. к так называемым "морским волнам тепла".

5. На основе серии численных экспериментов для изучения и оценки мезомасштабных вихрей изучена статистика мезомасштабных вихрей в окраинных морях Арктики и ее связь с процессами образования и таяния морского льда.

Проект РНФ № 20–11–20112 "Разработка системы моделирования для анализа современного состояния и оценки тенденций будущих изменений природной среды Сибирских шельфовых морей".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Голубева Е. Н.

Ход выполнения работ по проекту в 2020 г.:

1. На основе анализа научной литературы, данных наблюдений, имеющихся в открытом доступе и представленных в виде архивов, а также численного моделирования с использованием крупномасштабной численной трехмерной модели океана и морского льда и данных реанализа атмосферы проведено исследование изменчивости термического состояния вод морей Сибир-

ского шельфа с середины прошлого столетия по настоящее время. Целью исследования являлось создание концептуальной картины возможных причин повышения температуры придонного слоя шельфовых морей. Для Карского моря, моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря определены периоды наиболее заметных изменений в повышении теплосодержания вод и причины, их вызывающие. Выделены различия, обусловленные географическим положением морей и особенностями состояния атмосферы в летний период.

2. Создана региональная трехмерная численная модель Северного Ледовитого океана с пространственным разрешением 12 км в глубоководной области и около 5 км в шельфовой зоне океана. Использование комбинированной системы вертикальной координаты позволяет учесть топографию шельфовой области с включением наиболее мелководных частей. Проведены предварительные численные эксперименты, показавшие, что учет топографических особенностей при увеличении сеточного разрешения модели способствует интенсификации обмена вод между морями через проливы и модифицирует поле течений в придонном слое, формируя дополнительные циркуляционные системы. В отдельных придонных ложбинах в течение зимнего периода могут сохраняться положительные аномалии температуры, возникшие в результате интенсивного перемешивания аномально нагретых в летний период поверхностных вод и вод придонного слоя. Учет в модели самой мелководной части шельфа способствует более быстрому осенне-зимнему охлаждению вод в этой области и формированию ледового покрова вдоль побережья.

3. Разработан палеогеографический сценарий изучения эволюции и современного состояния субаквальной мерзлоты Восточно-Сибирского шельфа с использованием расчетов изменений климата в плейстоцене (400 тыс. лет) по модели Земной системы Climber-2. Палеотемпературный сценарий дополнен учетом реконструированных температур придонной воды в голоценовые потепления и похолодания с учетом глубин моря. С учетом разработанного сценария построена модель эволюции криолитозоны Восточно-Сибирского шельфа. В модели учитывается засоление донных отложений в период океанических трансгрессий. При задании геологического разреза и свойств пород использованы данные наиболее глубокой скважины о. Новая Сибирь. Теплофизические характеристики были заданы исходя из литологического состава и возраста пород по данным, полученным на сопредельных территориях с привязкой к известным физическим характеристикам пород из рассмотренных скважин.

4. Проведен анализ согласованности различных данных палеореконструкций и калибровка модели субаквальной мерзлоты на основании сравнения с фактическими полевыми данными для региона. Получены оценки чувствительности результатов численного моделирования термического состояния субаквальных многолетнемерзлых грунтов к неопределенности палеоклиматических реконструкций температуры воздуха и уровня океана. Модель верифицирована при моделировании с использованием фактических данных двух скважин глубиной 80 и 200 м на о. Новая Сибирь. Тестовое моделирование показало совпадение расчетных данных с натурными. Выполненные расчеты дали возможность заключить, что составленные палеотемпературный сценарий и геологическая модель являются реалистичными и могут использоваться при математическом моделировании эволюции и современного состояния криолитозоны шельфа.

5. На основе анализа и обобщения результатов, опубликованных в российских и зарубежных открытых источниках, построены двумерные модели залежей газогидратов, обладающие следующими свойствами, типичными для шельфа северных морей Российской Федерации:

- преимущественное залегание в придонных отложениях в непосредственной близости от дна на глубинах начиная от 200 м;

- характерно перекрывание залежей газогидратов придонным слоем, содержащим мелкозернистые отложения, так называемым Bottom Simulating Reflector (BSR), который порождает интенсивную "отраженную волну";

- седименты, содержащие газогидраты, имеют весьма специфическое поведение добротности, которое будет использоваться нами впоследствии как один из основных прогностических признаков их наличия при использовании данных высокоразрешающей сейсморазведки.

6. Проведена серия численных экспериментов по изучению проявления залежей газогидратов в сейсмических волновых полях. Установлена причина связанности возмущений добротности и скоростей распространения волн при проведении сейсмических наблюдений и обработке их результатов. Получены оценки уровня погрешности в данных и точности аппроксимации интегральных операторов, возникающих при решении обратной задачи, гарантирующие надежное разделение возмущений добротности и скоростей распространения сейсмических волн.

7. Предложена и апробирована модификация штрафной функции в методе обращения полного волнового поля, гарантирующая восстановление макроскоростной составляющей при отсутствии сверхнизких частот (меньше 5 Гц) в спектре записанного сигнала.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Alekseeva M. N., Raputa V. F., Yaroslavl'tseva T. V., Yashchenko I. G. Estimation of air pollution due to gas flaring from remote observations of flare thermal radiation // *Atmosph. and Oceanic Optics*. 2020. V. 33, No. 3. P. 289–294. DOI: 10.1134/S1024856020030021.

2. Arzhanov M., Malakhova V., Mokhov I. Modeling thermal regime and evolution of the methane hydrate stability zone of the Yamal peninsula permafrost // *Permafrost and Periglacial Proc.* 2020. V. 31(4). P. 487–496. DOI: 10.1002/ppp.2074.

3. Gavrilov A., Malakhova V., Pizhankova E., Popova A. Permafrost and gas hydrate stability zone of the glacial part of the East-Siberian shelf // *Geosci.* 2020. V. 10(12). P. 484. DOI:10.3390/geosciences10120484.

4. Lezhenin A. A., Raputa V. F., Yaroslavl'tseva T. V. Models of smoke plumes from high-altitude sources // *Proc. SPIE 11560, 26th Intern. Symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric phys.*, 115606Z (12 November 2020). DOI: 10.1117/12.2575566.

5. Malakhova V. V., Eliseev A. V. Uncertainty in temperature and sea level datasets for the Pleistocene glacial cycles: Implications for thermal state of the subsea sediments // *Global and Planetary Change*. 2020, 192: 103249. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2020.103249.

6. Malakhova V. V., Eliseev A. V. The effect of salt diffusion in the sediments on the submarine permafrost state and the methane hydrates stability zone of the Arctic shelf // *Led i Sneg*. 2020. V. 60(4). P. 533–546. DOI:10.31857/S2076673420040058.

7. Malakhova V. V., Eliseev A. V. Analysis of the subsea permafrost dynamics at the Arctic shelf accounting for climate change uncertainty during glacial cycles // *Proc. SPIE*. 2020. V. 11560. P. 115606D. DOI: 10.1117/12.2575081.

8. Platov G., Iakshina D., Krupchatnikov V. Characteristics of atmospheric circulation associated with variability of sea ice in the Arctic // *Geosci.* 2020, 10(9), 359. DOI: 10.3390/geosciences10090359.

9. Raputa V. F., Lezhenin A. A. Estimation of the Altitude of Smoke Plumes from Satellite Images // *Atmosph. and Ocean. Optics*. 2020. V. 33, No. 5. P. 539–544. DOI: 10.1134/S1024856020050140.

10. Raputa V. F., Kokovkin V. V., Shuvaeva O. V. The study of aerosol deposition in the environ of TPP-5 in Novosibirsk // *Proc. SPIE 11560, 26th Intern. Symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric phys.*, 115604R (12 November 2020). DOI: 10.1117/12.2575606.

11. Zuev V. V., Savelieva E., Borovko I. V., Krupchatnikov V. N. Antarctic polar vortex weakening due to a temperature decrease in the lower subtropical stratosphere // *Proc. of SPIE. The international society for optical engineering-* 2020. 26th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics: Atmospheric phys. V. 11560. P. 115607U. DOI: 10.1117/12.2574652.

12. Zuev V. V., Borovko I. V., Krupchatnikov V. N., Savelieva E. S Influence of the temperature of the lower subtropical stratosphere on Antarctic polar vortex dynamics // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020 V. 33, No. 6. P. 648–651. DOI: 10.1134/S1024856020060160.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Golubeva E., Kraineva M., Platov G., Simulation of near-bottom water warming in the Laptev Sea // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 611 (2020) 012010. DOI: 10.1088/1755–1315/611/1/012010.

2. Krupchatnikov V. N., Borovko I V. Rossby wave breakings and events of blocking associated with some atmospheric circulation regimes in the Northern Hemisphere based on the climate system model (PlaSim-ICMMG-1.0) // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 611 (2020) 012015 DOI: 10.1088/1755–1315/611/1/012015.

3. Malakhova V. V. The response of the Arctic Ocean gas hydrate associated with subsea permafrost to natural and anthropogenic climate changes // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 606. P. 012035. DOI: 10.1088/1755–1315/606/1/012035.

4. Platov G., Golubeva E. Characteristics of mesoscale eddies of Arctic marginal seas: results of numerical modeling // *2020 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 611 (2020), 012009. DOI: 10.1088/1755–1315/611/1/012009.

5. Platov G., Kraineva M. and Golubeva E. Main modes of the Arctic Ocean circulation and a relationship between their trends and the Atlantic water heat content / *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 611 (2020), 012011. DOI: 10.1088/1755–1315/611/1/012011.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Borovko I. V., Krupchatnikov V. N. On the polar vortex streamer dynamics // *Bull. NCC. Num. Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies*. 2019. № 17. P. 1–8.

2. Амикишиева Р. А., Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В. Технологии анализа процессов атмосферного загрязнения на базе наземных и спутниковых наблюдений // *Интерэкспо "Гео-Си-*

биль" : Материалы 16-го Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. Т. 4. № 1. С. 36–41. DOI: 10.33764/2618–981X-2020–4–1–36–41.

3. Амикишиева Р. А., Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В. Информационная система анализа процессов распространения атмосферных примесей // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 72–73. DOI: 10.24411/9999–017A-2020–10127.

4. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Пижанкова Е. И. Сценарий геологического развития севера восточно-сибирского шельфа в последние 200 тыс. лет // Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне : Материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. 60-летию образования Ин-та мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН. 2020. С. 83–86.

5. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Пижанкова Е. И., Попова А. А. Оценка роли оледенения среднего неоплейстоцена в формировании криолитозоны севера восточно-сибирского шельфа // Морские исследования и образование (MARESEDU-2020) : труды 9-й Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 26–29 окт. 2020 г. С. 168–171.

6. Голубева Е. Н., Платов Г. А., Крайнева М. В. Исследование особенностей формирования гидрологических и ледовых условий в море Лаптевых в современном климате // Моря России: исследования береговой и шельфовой зон : тез. докл. Всерос. науч. конф. (28-я береговая конференция), Севастополь, 21–25 сент. 2020 г. С. 67–68. [Электрон. ресурс]. https://drive.google.com/file/d/1hSH3afiQDGHvz0DtILrLrZKjwZc_UQG/view?usp=sharing.

7. Голубева Е. Н., Якшина Д. Ф., Платов Г. А., Исследование последствий формирования морских волн тепла для Северного Ледовитого океана и его шельфовых морей // Моря России: исследования береговой и шельфовой зон : тез. докл. Всерос. науч. конф. (28-я береговая конференция). Севастополь, 21–25 сентября 2020 г. С. 68–69. https://drive.google.com/file/d/147DjRJ_LnPJVHt4v7nhJcOzGxbj-j9TI/view?usp=sharing.

8. Голубева Е. Н., Платов Г. А. Анализ траекторий распространения вод арктических рек в Северном Ледовитом океане на основе численного моделирования // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны : Расширенные тез. докл. 2-й Всерос. конф. с междунар. участием, Москва, 25–27 нояб. 2020 г. С. 53–56.

9. Зуев В. В., Савельева Е. С., Боровко И. В., Крупчатников В. Н. Ослабление антарктического полярного вихря при понижении температуры нижней субтропической стратосферы // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : тез. докл. 24-го Междунар. симп., Москва, 6–10 июля 2020 г. С. 14–17.

10. Коковкин В. В., Рапута В. Ф. Мониторинг макрокомпонентного состава снежного покрова в окрестностях ТЭЦ-5 г. Новосибирска // Интерэкспо "Гео-Сибирь" : Материалы 16-го Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. Т. 4. № 1. С. 36–41. DOI: 10.33764/2618–981X-2020–4–1–98–104.

11. Коковкин В. В., Рапута В. Ф. Анализ загрязнения снежного покрова в окрестностях антропогенных источников // Современные проблемы гигиены, токсикологии и медицины труда : Сб. трудов науч.-практ. конф. с междунар. участием, Омск, 27–28 февр. 2020 г. Омск: Изд-во ОмГА, 2020. С. 120–124.

12. Крупчатников В. Н., Боровко И. В., Голубева Е. Н., Платов Г. А. Анализ развития ранней стадии относительно устойчивых крупномасштабных погодных систем и связанных с ними фаз Арктических колебаний при потеплении климата // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Томск, 2020. С. 103–105. <https://drive.google.com/file/d/1KIVhdcqHwGeRdP9oQlq8eJqnRHHJ6E9LM/view?usp=sharin>.

13. Крылова А. И., Лаптева Н. А. Моделирование речного стока в бассейне реки Лены на основе гидрологически-корректной цифровой модели рельефа // Пробл. информ. 2020. № 4. С. 71–88. DOI:10.24411/2073–0667–2020–10016.

14. Крылова А. И., Лаптева Н. А. Исследование влияния регулирования стока водохранилищем каскада Вилюйских ГЭС – I, II на водный режим р. Вилюй // Интерэкспо "Гео-Сибирь" : Материалы 16-го Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. Т. 4. № 1. С. 66–73. DOI: 10.33764/2618–981X-2020–4–1–66–73.

15. Леженин А. А., Рапута В. Ф., Амикишиева Р. А. Модель оценивания параметров дымового шлейфа // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 88. DOI: 10.24411/9999–017A-2020–10150.

16. Малахова В. В. Влияние изменений климата на скорость деградации субаквальной мерзлоты // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны : Расширенные тез. докл. 2-й Всерос. конф. с междунар. участием, Москва, 25–27 нояб. 2020 г. С. 326–329.

17. Малахова В. В. Модельная оценка эмиссии метана в атмосферу на шельфе арктических морей // Моря России: исследования береговой и шельфовой зон : тез. докл. Всерос. науч. конф. (28-я береговая конференция), Севастополь, 21–25 сент. 2020 г. С. 131–132.

18. Малахова В. В. Влияние диффузии соли на стабильность метангидратов Арктического шельфа // Интерэкспо "Гео-Сибирь" : Материалы 16-го Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. Т. 4. № 1. С. 91–97.

19. Медвяцкая А. М., Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В. Загрязнение атмосферы г. Новосибирска субмикронными аэрозолями в период лесных пожаров 2019 года // Интерэкспо "Гео-Сибирь" : Материалы 16-го Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. Т. 4. № 1. С. 36–41. DOI: 10.33764/2618–981X-2020–4–1–98–104.

20. Михайлюта С. В., Леженин А. А., Коробов О. А. Влияние выбросов ТЭЦ на загрязнение атмосферного воздуха в г. Красноярске // Интерэкспо "Гео-Сибирь" : Материалы 16-го Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. Т. 4. № 1. С. 105–112. DOI: 10.33764/2618–981X-2020–4–1–105–112.

21. Платов Г. А., Крайнева М. В., Голубева Е. Н. Основные моды циркуляции Северного Ледовитого океана и связь их тенденций с теплосодержанием Атлантических вод // В сб.: Избр. труды Междунар. конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Томск, 2020. С. 108–112. <https://drive.google.com/file/d/1A8–31KnLvIYAAq8JeTeOdE1xrSVNPKDz/view?usp=sharing>.

22. Платов Г. А., Голубева Е. Н. Энергетика мезомасштабных вихрей окраинных морей Северного Ледовитого океана: результаты численного моделирования // В сб.: Избр. труды Меж-

дународной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды, Томск, 6–11 июля 2020 г. С. 85–90. https://drive.google.com/file/d/1JJMO-lwqKhziDgWyHI_kMfwO5OkkOrmx/view?usp=sharing.

23. Прилипко Н. С., Турбинский В. В., Рапута В. Ф., Бортникова С. Б. Оценка канцерогенной опасности чёрного углерода (сажи) и сопутствующих полиаренов промышленных выбросов в атмосферный воздух населённых мест // *Russ. J. Rehabilitation Med.* 2020. № 2. С. 84–102.

24. Тарханова М. А., Голубева Е. Н. Численное моделирование формирования арктического халоклина // *Интерэкспо "Гео-Сибирь"* : Материалы 16-го Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. Т. 4. № 1. С. 83–90.

25. Рапута В. Ф., Леженин А. А. Анализ процессов длительного загрязнения атмосферы г. Искитима // *Интерэкспо "Гео-Сибирь"* : Материалы 16-го Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 18 июня – 8 июля 2020 г. Т. 4. № 1. С. 137–141. DOI: 10.33764/2618–981X-2020–4–1–137–141.

26. Рапута В. Ф., Юсупов Д. В., Турсуналиева Е. М., Ярославцева Т. В., Ляпина Е. Е., Коковкин В. В. Биомониторинг и геоинформационный анализ ртутного загрязнения территории г. Новосибирска // *Современные проблемы гигиены, токсикологии и медицины труда* : Сб. трудов науч.-практ. конф. с междунар участием, Омск, 27–28 февр. 2020 г. Омск: Изд-во ОмГА, 2020. С. 219–223.

27. Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В., Леженин А. А., Амикишиева Р. А. Интерполяция данных сетевых наблюдений концентрации примеси по территории города // *Марчуковские научные чтения 2020: Тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 96. DOI: 10.24411/9999–017A-2020–10161.

28. Савельева Е. С., В. В. Зуев, И. В. Боровко, В. Н. Крупчатников. Влияние нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря // *Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы* : тез. докл. 23-й Всерос. школы-конф. молодых ученых, Борок, 5–9 октября 2020 г.

29. Щербатов А. Ф., Новикова И. И., Ерофеев Ю. В., Рапута В. Ф. Влияние загрязнений атмосферного воздуха цементной пылью на здоровье детей как гигиеническая проблема // *Современные проблемы гигиены, токсикологии и медицины труда* : Сб. трудов науч.-практ. конф. с междунар участием, Омск, 27–28 февр. 2020 г. Омск: Изд-во ОмГА, 2020. С. 321–327.

30. Ярославцева Т. В., Новикова И. И., Рапута В. Ф., Ерофеев Ю. В. Наземный и спутниковый мониторинг загрязнения снежного покрова в окрестностях ТЭЦ-5 г. Омска // *Современные проблемы гигиены, токсикологии и медицины труда* : Сб. трудов науч.-практ. конф. с междунар участием, Омск, 27–28 февр. 2020 г. Омск: Изд-во ОмГА, 2020. С. 327–331.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2020, Томск, 6–11 июля 2020 г., – 5 докладов, из них 3 приглашенных (Платов Г. А. Голубева Е. Н., Крупчатников В. Н., Крайнева М. В.).

2. Всероссийская научная конференция "Моря России: исследования береговой и шельфовой зон" (28-я Береговая конференция), 21–25 сентября 2020 г., Севастополь – 3 доклада (Голубева Е. Н., Платов Г. А., Крайнева М. В., Якшина Д. Ф., Малахова В. В.).
3. 2-я Всероссийская научная конференция "Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны", Москва, 26–27 ноября 2020 г. – 2 доклада (Голубева Е. Н., Платов Г. А., Малахова В. В.).
4. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, 19–23 октября 2020 г., Новосибирск – 9 докладов (Леженин А. А., Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В., Амикишиева Р. А., Малахова В. В., Крылова А. И., Тарханова М. А., Голубева Е. Н.).
5. Международная научная конференция "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 16-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 22–24 апреля 2020 г. – 9 докладов (Крылова А. И., Тарханова М. А., Голубева Е. Н., Малахова В. В., Леженин А. А., Рапута В. Ф., Амикишиева Р. А., Ярославцева Т. В.).
6. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием "Современные проблемы гигиены, токсикологии и медицины труда", посвященная 90-летию образования Новосибирского НИИ гигиены, Новосибирск, 27–28 февраля 2020 г. – 1 пленарный доклад (Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В.).
7. 26-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 29 июня – 3 июля 2020 г. – 4 доклада (Леженин А. А., Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В., Малахова В. В., Боровко И. В., Крупчатников В. Н.).
8. 5-й Ежегодный международный семинар "Сибирской сети" по изучению изменений окружающей среды (SecNet) "Сибирь в эпоху глобальных вызовов: Природа человека и человеческая природа", Барнаул, 8–10 октября, 2020 г. – 3 доклада (Леженин А. А., Рапута В. Ф., Амикишиева Р. А.).
9. 27-я Конференция "Аэрозоли Сибири", Томск, 24–27 ноября 2020 г. – 11 докладов, из них 1 пленарный (Леженин А. А., Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В., Амикишиева Р. А., Малахова В. В., Крайнева М. В., Крылова А. И., Боровко И. В.).
10. Всероссийская конференция "Ляпуновские чтения – 2020", Иркутск, 7–11 декабря 2020 г. – 1 доклад (Рапута В. Ф.).
11. 23-я Всероссийская школа-конференция молодых учёных "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы" (САТЭП-2020), Борок, 5–9 октября 2020 г. – 1 доклад (Крупчатников В. Н., Боровко И. В.).
12. 9-я Международная научно-практическая конференция "Морские исследования и образование" MARESEDU-2020, Москва, 23–25 октября 2020 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).
13. Всероссийская конференция с международным участием "Турбулентность, динамика атмосферы и климата", посвященная памяти акад. А. М. Обухова, Москва, ноябрь 2020 г. – 2 доклада (Крупчатников В. Н., Малахова В. В.).
14. 17-й гляциологический симпозиум "Роль криосферы в прошлом, настоящем и будущем Земли", Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2020 г. – доклад (Малахова В. В.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Платов Г. А.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;

– член оргкомитета Международной научной конференции "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 16-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 22–24 апреля 2020 г.

2. Крупчатников В. Н.

– член программного комитета Международной конференции "ENVIROMIS-2020", Томск, 6–11 июля 2020 г.;

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

3. Леженин А. А.

– член оргкомитета Международной научной конференции "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 16-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 22–24 апреля 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 12

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 17

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 48

Докладов на конференциях – 52, в том числе 5 пленарных

Членов организационных или программных комитетов конференций – 5

Кадровый состав

1. Платов Г. А.	зав. лабораторией	д.ф.-м.н.
2. Амикишиева Р. А.	инженер	
3. Боровко И. В.	н.с.	к.ф.-м.н.
4. Голубева Е. Н.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
5. Крайнева М. В.	м.н.с.	
6. Крупчатников В. Н.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
7. Крылова А. И.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
8. Леженин А. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
9. Малахова В. В.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
10. Рапута В. Ф.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
11. Тарханова М. А.	инженер	
12. Яковенко Г. Т.	программист	
13. Якшина Д. Ф.	м.н.с.	

14. Ярославцева Т. В. инженер

Амикишиева Р. А., Крайнева М. В., Тарханова М. А. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

Боровко И. В. – доц. СГУПС

Голубева Е. Н. – доц. НГУ

Крупчатников В. Н. – проф. НГУ

Леженин А. А. – доц. РАНХиГС

Платов Г. А. – доц. НГУ

Рапута В. Ф. – ст. преп. кафедры аналитической химии НГУ

Руководство студентами

Лоскутников Д. С. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Крупчатников В. Н.

Макаренко М. Е. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Крупчатников В. Н.

Романовская Н. А. – 1-й курс магистратуры ФЭН НГТУ, руководитель Рапута В. Ф.

Тарханова М. А. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Голубева Е. Н.

Усова А. В. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Голубева Е. Н.

Юрова Ю. Д. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Платов Г. А.

Руководство аспирантами

Градов В. С. – 1-й год, НГУ, руководитель Платов Г. А.

Тарханова М. А. – 1-й год, ИВМиМГ СО РАН, руководитель Голубева Е. Н.

Коробов О. А. – 4-й год НГУ, руководитель Платов Г. А.

Защита дипломов

Амикишиева Р. А. – магистр ФИТ НГУ, руководитель Рапута В. Ф.

Лоскутников Д. С. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Крупчатников В. Н.

Тарханова М. А. – магистр ММФ НГУ, руководитель Голубева Е. Н.

Усова А. В. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Голубева Е. Н.

Юрова Ю. Д. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Платов Г. А.

Награды

Тарханова М. А.:

– победитель в номинации "Лучший устный доклад (видеопрезентация)" секции "Физика океана" 6-й Всероссийской научной конференции молодых ученых "Комплексные исследования мирового океана";

– обладатель II премии Лаврентьевского конкурса студенческих и аспирантских работ по математике и механике 2020 г.;

– победитель программы спонсорской поддержки компании Huawei.

ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДНОЙ СРЕДЕ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Пененко В. В.

Важнейшие достижения

Алгоритм идентификации коэффициентов в нестационарных моделях продукции-деструкции на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений

К.ф.-м.н. Пененко А. В.

Модели продукции-деструкции применяются в широком спектре приложений, в том числе при моделировании нелинейных биологических и химических процессов. В прикладных задачах такие модели могут содержать неизвестные параметры, требующие уточнения по имеющимся данным измерений. Предлагаемый алгоритм является обобщением алгоритма на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений, разработанного для идентификации источников в моделях адвекции-диффузии-реакции и примененного для идентификации источников загрязнения атмосферы. При этом обратная задача представляется в виде семейства квазилинейных операторных уравнений, которые можно затем решать и анализировать любыми подходящими средствами, например методами сингулярного разложения. Вследствие ансамблевого характера алгоритма его выполнение можно естественно распараллелить.

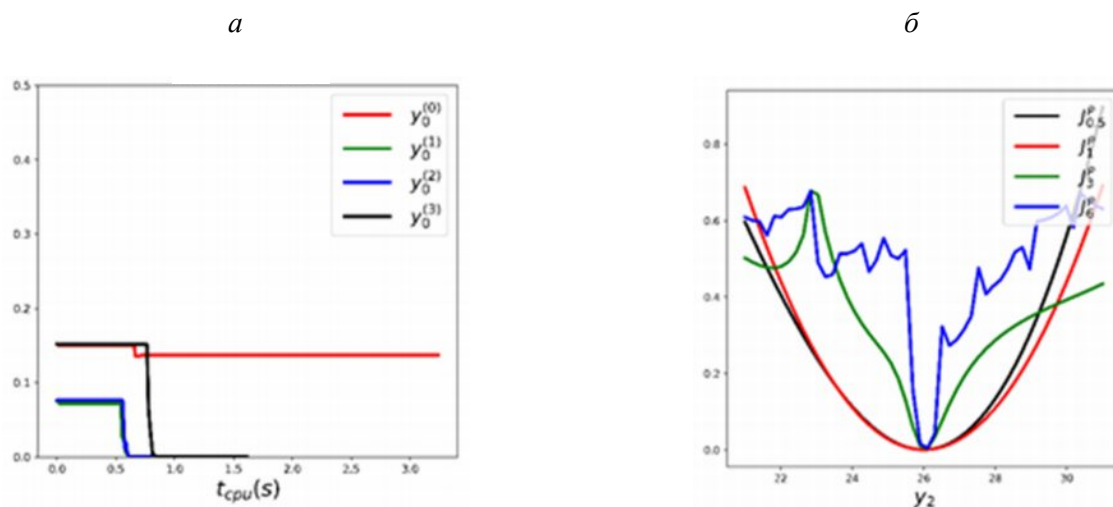


Рис. 1– Идентификация коэффициентов модели Лоренц'63
по точечным измерениям элементов функции состояния:

a – убывание относительной ошибки итераций в зависимости от начального приближения для некоторого набора данных измерений; b – вид функционала невязки для одного из искомых параметров в зависимости от величины ансамбля решений сопряженных уравнений (количества учитываемой информации)

На рис. 1 показано применение алгоритма к модельной задаче идентификации коэффициентов модели Лоренц'63 по точечным измерениям элементов функции состояния. Кроме того, оператор чувствительности позволяет разложить функционал невязки обратной задачи для анализа его локальных минимумов (рис. 1, b).

Результаты опубликованы в работах:

1. Penenko A. V., Mukatova Z. S., Salimova A. B. Numerical study of the coefficient identification algorithm based on ensembles of adjoint problem solutions for a production-destruction model // Intern. J. of Nonlin. Sci. and Num. Simul. [Electron. resource]. 2020. doi: 10.1515/ijnsns-2019-0088.
2. Penenko A. Convergence analysis of the adjoint ensemble method in inverse source problems for advection-diffusion-reaction models with image-type measurements // Inverse Probl. & Imaging. 2020. No. 14. P. 757–782. doi: 10.3934/ipi.2020035.

**Отчет по этапам работ, завершенным в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Развитие методов математического моделирования для задач физики атмосферы, гидросферы и окружающей среды с учетом природных и техногенных воздействий".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2019-0004.

Руководители: д.ф.-м.н. Пененко В. В., д.ф.-м.н. Платов Г. А.

1. Построен новый алгоритм идентификации источников с использованием свойств неустойчивости, присущих обратной задаче.

Разработана модификация алгоритма решения обратных задач на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений, в которой естественная некорректность обратной задачи используется для выхода итерационного алгоритма из локальных минимумов функционала невязки.

С помощью соотношений чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений обратная задача сводится к некорректному нелинейному операторному уравнению. Для его решения применяется алгоритм типа Ньютона – Канторовича с регуляризацией операции обращения матрицы оператора чувствительности на основе усеченного сингулярного разложения. Снижение регуляризующего эффекта (путем увеличения количества рассматриваемых сингулярных чисел и сингулярных векторов при построении приближенного обратного для матрицы оператора чувствительности) происходит по мере стабилизации итераций при фиксированном значении параметра регуляризации. При этом убывание функционала невязки контролируется только на шагах, где происходит снижение регуляризующего эффекта. В результате невязка между этими шагами может возрастать, тем самым итерации имеют возможность выйти из локальных минимумов функционала невязки. Далее, если на некотором шаге алгоритма функционал невязки убывает, соответствующее приближение запоминается. При уменьшении эффекта регуляризации алгоритм продолжает решение из точки, в которой было найдено минимальное значение функционала невязки.

Такая модификация алгоритма позволила в задаче идентификации источников для модели адвекции-диффузии-реакции с данными измерений типа изображений функции состояния получить более точное решение, нежели решение алгоритма с монотонным убыванием функционала невязки.

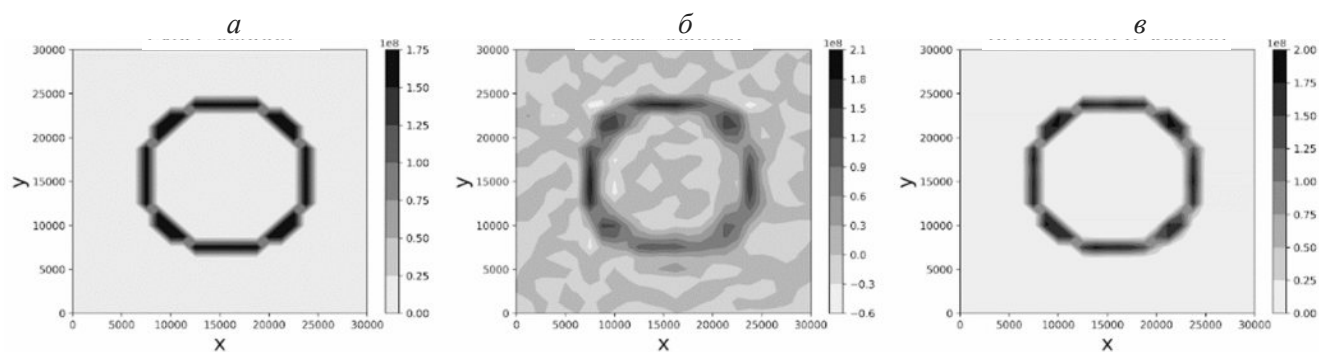


Рис. 2 – Сравнение с "точным" решением результата решения обратной задачи идентификации источников для модели адвекции-диффузии-реакции с данными измерений типа изображений функции состояния: *а* – "точный источник"; *б* – проекция точного решения на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности; *в* результат работы алгоритма

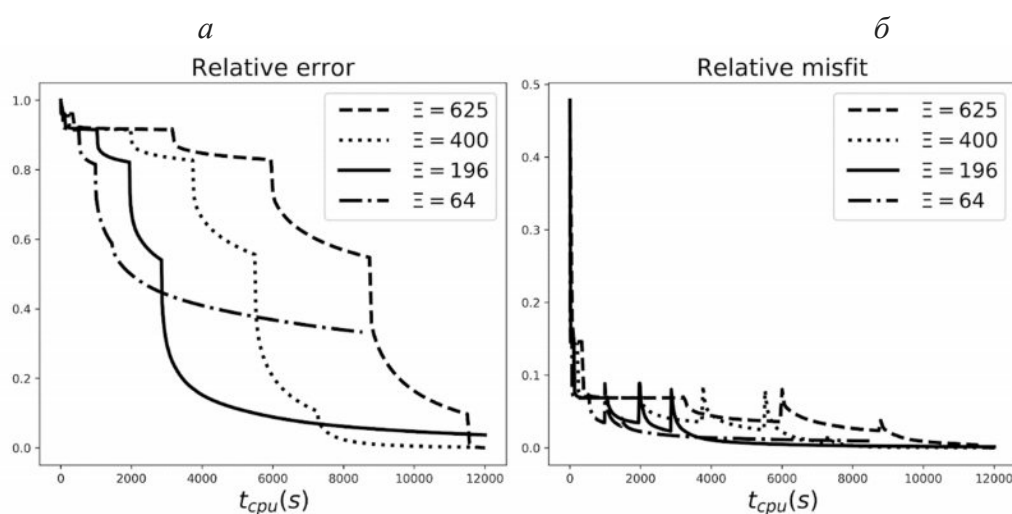


Рис. 3 – Параметры сходимости алгоритма решения обратной задачи идентификации источников для модели адвекции-диффузии-реакции с данными измерений типа изображений функции состояния для различных количеств решений сопряженных уравнений (при условии немонотонности убывания невязки): *а* – относительная ошибка; *б* – относительная невязка

2. Фильтр частиц в задачах усвоения данных

На основе фильтра частиц реализованы алгоритмы усвоения данных для моделей химии атмосферы.

Фильтры частиц относятся к динамико-стохастическим алгоритмам. Достоинством алгоритмов этого класса является то, что реализация алгоритма требует вычисления только оператора прямой задачи.

В ходе работы алгоритма в каждом окне усвоения реализуется ансамбль решений с возмущенными значениями функции неопределенности задачи. На основе данных измерений различные элементы ансамбля взвешиваются для аппроксимации функции плотности распределения вероятности решения задачи усвоения данных. Из этого распределения на следующем шаге генерируется ансамбль частиц. В тестовом примере была использована модель озон-азотного цикла в атмосфере с малым числом взаимодействующих компонентов.

3. Численное исследование трансформации вихревых потоков в устойчиво стратифицированном пограничном слое при постоянной скорости охлаждения

На основе трехпараметрического RANS-подхода с явными алгебраическими моделями для напряжений Рейнольдса и вектора потока скаляра (температуры, концентрации), полученными в приближении слабравновесной турбулентности, численно исследовалась трансформация вертикальных вихревых потоков в устойчиво стратифицированном пограничном слое при неустановившейся скорости охлаждения поверхности. Вычисленные вертикальные распределения скорости и температуры, напряжения Рейнольдса, кинетической энергии турбулентности, турбулентного числа Прандтля, высоты пограничного слоя и других характеристик, сопоставляются с результатами, полученными на основе LES-приближения моделирования турбулентности. Чисто устойчивый АПС инициируется наложением геострофического ветра постоянной скорости при охлаждении поверхности также с постоянной скоростью. Вертикальный профиль ветра после 10 часов с начала процесса показан на рис. 4. Сравнение проведено с результатами, полученными LES-методом с высоким разрешением (вертикальный шаг 3,25 м). Эти данные показаны на рисунке зачерненными квадратами, а другие LES-данные отмечены отрезками горизонтальных линий с указанием стандартного отклонения от среднего значения.

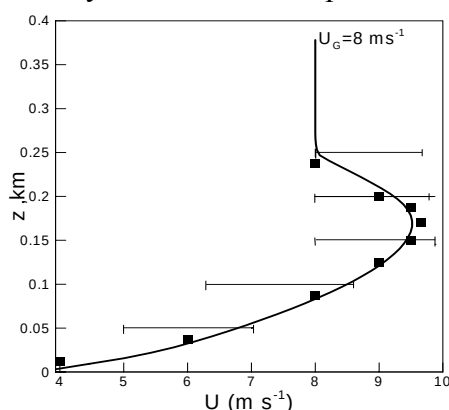


Рис. 4 – Профили скорости ветра в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое: сплошная линия – результат вычисления по трехпараметрической модели турбулентности после 10 часов интегрирования; черные квадраты – результат LES-моделирования; горизонтальные линии – другие результаты LES-моделирования с указанием для средних значений стандартного отклонения

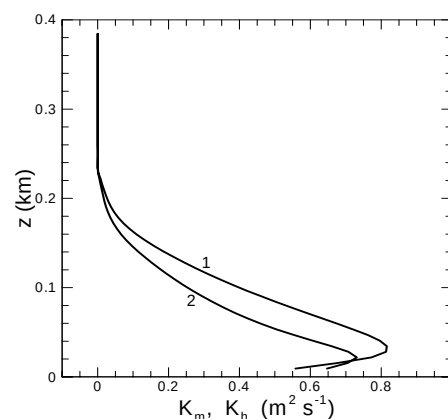


Рис. 5 – Вычисленные в ходе выполнения проекта профили коэффициентов турбулентного переноса импульса K_m и тепла K_h для сформировавшегося струйного профиля скорости (рис. 4). Поскольку данных измерений профилей коэффициентов K_m и K_h не имеется, на рис. 5 представлены только результаты вычислений

На рис. 4 отчетливо видно формирование струи на высоте примерно 175 м. На рис. 5 показаны вертикальные профили коэффициентов турбулентного обмена импульса K_m и тепла K_h для сформировавшегося струйного профиля скорости (рис. 4). Поскольку данных измерений профилей коэффициентов K_m и K_h не имеется, на рис. 5 представлены только результаты вычислений.

Для демонстрации состоятельности результатов, полученных с граничными условиями, используемыми в модели, на рис. 6 показана средняя скорость ветра и средняя потенциальная температура в логарифмическом масштабе. Видно, что и предлагаемая модель, и LES модель следуют тому же самому логарифмическому закону вблизи поверхности (до ≈ 5 м). Это также

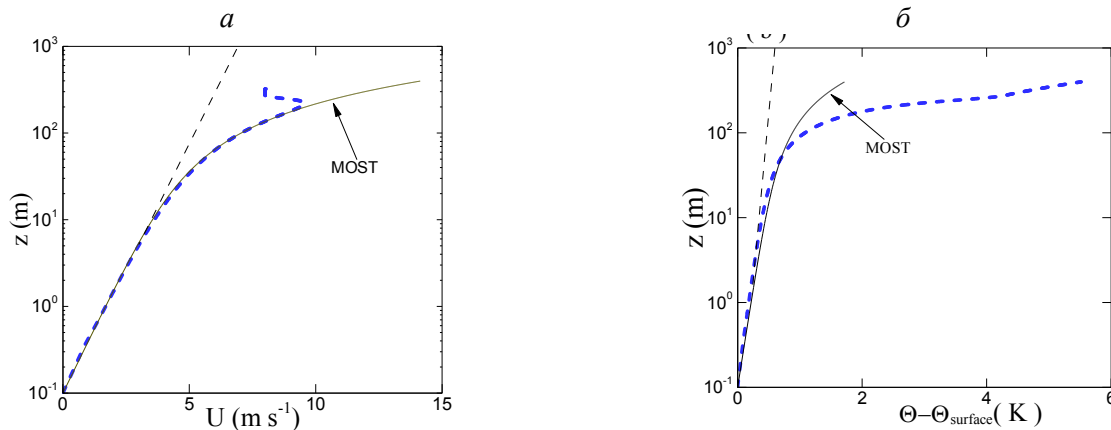


Рис. 6 – Профили средней скорости ветра (а) и средней потенциальной температуры (б) в случае GABLS1 для трехпараметрической модели турбулентности (синяя пунктирная линия); серые сплошные линии следуют из подобия Монина – Обухова с $u_* = 0.29 \text{ м с}^{-1}$; $\theta_* = 0.012 / u_* \text{ К}$;

$L = 149 \text{ м}$; $z_0 = 0.1 \text{ м}$; $\kappa = 0.4$ (значения взяты из работы Сухарт и др. 2006) и $\text{Pr}_T = 0.9$;

серые пунктирные линии – только логарифмическая часть этих функций

показывает, что граничные условия логарифмического слоя в уравнениях трехпараметрической модели турбулентности работают в рассматриваемом случае, пока шаг сетки вблизи стенки менее 5 м. Выше в пограничном слое из-за эффектов плавучести необходима коррекция в логарифмическом профиле, основанная на теории подобия Монина – Обухова. Эта коррекция является линейной функцией безразмерного параметра z/L , где $L = u_*^2 T_0 / (kg \theta_*)$ – масштаб Обухова, зависящий только от поверхностных потоков. Профили хорошо согласуются с теоретической кривой как для скорости ветра, так и для температуры.

Анализ результатов проведенного исследования показывает, что для моделирования структуры турбулентности устойчиво-стратифицированного пограничного слоя наряду с LES-методом можно использовать RANS-метод.

4. Эффекты стратификации и параметры атмосферных гравитационных течений над крутыми поверхностными препятствиями

Моделирование атмосферных гравитационных потоков над крутыми поверхностными препятствиями изучалось с помощью мезомасштабной метеорологической модели с аппроксимациями на конечных элементах. Модель основана на сжимаемых уравнениях Навье – Стокса. Цель исследований – изучение возможностей этой модели. Поэтому модель была подвергнута различным испытаниям. Скорость фронта, рассчитанная в нейтральной атмосфере, сравнивалась с эмпирической формулой, хорошо известной в теории атмосферных течений. В других тестах воспроизводилось обтекание крутых препятствий, таких как долина или холм. Скорость ветра до и после препятствий различной формы была рассчитана и сравнивалась с имеющимися измерениями и результатами моделирования, выполненного другими авторами. По результатам моделирования оценено влияние стратификации на различные параметры распространения фронта. Кроме того, изучалось влияние на скорость фронта введения слоя инверсии стратификации в устойчиво стратифицированную атмосферу. Инверсия изменяет характер распространения фронта путем уменьшения его скорости до и после препятствия, а также скорости распространения фронта над плоской поверхностью. Различие в поведении поверхностного давле-

ния, наблюдаемое при распространении фронта в устойчивых и нейтральных версиях атмосферной стратификации, было получено в расчетах и сравнивалось с данными наблюдений.

5. Развитие базовой мезомасштабной модели

Для разрабатываемой в лаборатории базовой мезомасштабной модели гидротермодинамики атмосферы продолжена адаптация модели фазовых переходов влажности из работы. На данном этапе ведется отладка параллельного (OpenMP) варианта программного кода реализации модели фазовых переходов влаги.

Разработаны дополнительные блоки программного кода реализации модели динамики атмосферы, позволяющие использовать прогнозные расчеты модели COSMO в качестве начальных распределений метеополей и для задания граничных условий на верхней границе расчетной области. Необходимость привлечения моделей более крупного масштаба для выбранной области расчета диктуется физическими соображениями и необходимостью воспроизведения сценариев прямого и обратного моделирования, настроенных на конкретные даты. Расчетные метеорологические поля прогностической модели COSMO в формате NetCDF были предоставлены ФГБУН "СибНИГМИ".

Выполнены сценарии моделирования для зимних условий (расчет на 24 ч) в предположении, что фоновые крупномасштабные атмосферные поля не меняются. В этом случае на верхней границе расчетной области были зафиксированы горизонтальные потоки ветра. В итоге сценарии моделирования представляли собой подстройку фоновых крупномасштабных полей к орографическим условиям территории и суточной изменчивости температуры поверхности.

Аналогичная модификация модели выполнена и для проведения сценариев моделирования атмосферной динамики для Новосибирского региона с настройкой по модели WRF.

Сетки для выбранных доменов были согласованы таким образом, что горизонтальные узлы совпадали с горизонтальными узлами соответствующих сеток модели ИВМиМГ. При этом поля прогностических расчетов по моделям COSMO и WRF потребовали дополнительной интерполяции по вертикали на прямоугольную сетку модели ИВМиМГ, поскольку модели COSMO и WRF используют сигма-координату по вертикали.

Все расчеты по мезомасштабной модели выполнялись с использованием параллельных алгоритмов реализации численных моделей, расчеты выполнены на вычислительных кластерах ССКЦ ИВМиМГ СО РАН.

6. Роль гидродинамики в формировании современной структуры водорослевых сообществ оз. Байкал

В последние года мировое сообщество обеспокоено стремительными экологическими изменениями в прибрежной зоне оз. Байкал. С недавних пор зеленая нитчатая водоросль *Spirogyra* начала появляться в больших количествах и вытеснять исконные байкальские виды водорослей. Появление дурно пахнущих глыб на берегах, которые являются отмирающими остатками спирогиры, не только отрицательно влияет на восприятие этого чудесного объекта природы, но и имеет более тяжкие последствия, отражающиеся на качестве байкальской воды. Существует несколько гипотез возникновения такой ситуации. Согласно одной из них появление спирогиры связано с изменением климата. Однако большинство ученых связывают эти события еще и с ухудшением экологической обстановки вокруг Байкала, в том числе и с развитием туризма. Су-

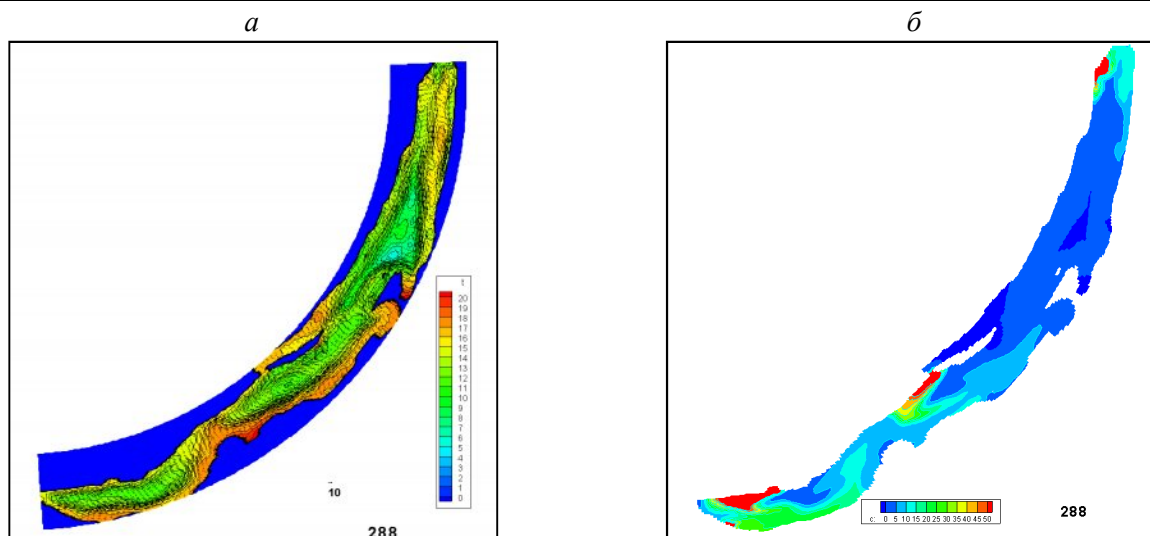


Рис. 7 – Фрагмент сценария, относящийся к концу "климатического" августа: *а* – поле течений (см/сек) и температуры (град С); *б* – концентрации примеси (усл.ед.)

существует гипотеза о том, что спирогира распространилась из первоначальных мест ее массового развития по прибрежным областям практически по всему озеру посредством системы течений.

Одна из версий негидростатической 3D модели гидротермодинамики и распространения примесей, разработанная в лаборатории, была использована для проверки справедливости гипотезы, выдвинутой лимнологами. Из-за значительной доли неопределенности, связанной с неполнотой наших знаний о всей совокупности процессов, отвечающих за функционирование природных систем, использован сценарный подход, позволяющий выделить отдельные стороны процессов, чтобы понять их значимость. В данном случае оценивалась роль системы течений. Причем для придания общности выводам рассматривались не конкретные события, а ситуация в целом. Для этого с помощью метода Монте-Карло были построены "климатические" сценарии атмосферных воздействий, согласно которым выполнены расчеты по гипотетическому сценарию распространения примеси на фоне крупномасштабных течений от четырех участков ее первоначальной локализации. Построены поля возможного распространения примесей из этих локализаций. Исследована чисто гидродинамическая задача о распространении примеси с определенными свойствами. В качестве мест первоначальной локализации примеси выбраны четыре участка озера, подверженные существенному антропогенному воздействию. В Южном Байкале это Лиственичный залив и участок у г. Байкальска. В центральном Байкале это пролив Ольхонские ворота, через который поступает вода из Малого моря, являющегося одним из главных туристических мест озера. В Северном Байкале это район г. Северобайкальска. По условиям сценария примесь из постоянно действующих источников, расположенных на участках боковой границы озера в местах первоначальной локализации, распространяется с течениями в июле и августе. Клетки спирогиры рассматриваются как пассивная примесь, не влияющая на гидродинамические процессы.

Анализ системы течений, полученной в расчетах, свидетельствует о ее сильной изменчивости в зависимости от атмосферных воздействий, заданных в качестве граничных условий на поверхности озера. Следуя течениям, примесь распространяется на большие расстояния (рис. 7). Причем распространение происходит не только вдоль побережья против часовой стрелки, как это полагают в соответствии с известной схемой общей циркуляции озера, но и отклоняется к

центральным участкам и даже к противоположным берегам. Таким образом, система течений вполне может быть причиной быстрого распространения водоросли в озере.

Крупный научный проект "Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории".

Соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2020-787 от 12.10.2020

Блок 1 "Формирование концептуальных основ инструментальной, инфраструктурной и прикладных цифровых платформ экологического мониторинга и прогнозирования".

Направление исследований: Разработка и реализация алгоритмов оценки информативности гетерогенных систем мониторинга на основе операторов чувствительности обратной задачи идентификации источников.

Решение основной задачи организовано в виде решения следующих подзадач по разработке и реализации алгоритмов:

а) генерации сценариев обратного моделирования для оценки информативности систем мониторинга (подготовка численного эксперимента по решению обратной задачи идентификации источников с различными типами данных и учетом имеющейся априорной информации);

б) идентификации источников на основе объединения различных типов данных измерений (точечные, типа изображений, интегрального типа);

в) оценки информативности данных измерений на основе анализа сингулярной структуры оператора чувствительности.

Подготовлены наборы расчетных прогнозных метеорологических полей над Байкальской территорией для зимних и летних условий. Эти наборы представляют собой трехмерные массивы данных о состоянии основных метеорологических переменных (давление, температура, поля скорости ветра, компоненты влажности), записанные с дискретностью 3 час. Такие наборы данных подходят для выполнения предварительных оценок распространения загрязняющих примесей от различных источников на Байкальской природной территории. Также эти данные являются базовыми для задания начальных и граничных условий при выполнении расчетов распределения метеорологических полей для более детального описания процессов над термически и орографически сложной территорией. На основе метеорологических полей, а также информации о расположении основных источников загрязнений и систем мониторинга, построены реалистичные сценарии обратного моделирования.

Совместное использование моделей процессов и данных наблюдений позволяет решать ряд природоохранных задач, в том числе идентифицировать источники загрязнений и восстанавливать поля загрязнений в ненаблюдаемых областях. Развиваемый подход на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений дает возможность унифицировано работать с гетерогенными данными измерений с помощью моделей переноса и трансформации примесей в атмосфере. На основе методов исследования сингулярной структуры оператора чувствительности обратной задачи разработаны методы экспресс-анализа и уточненного анализа информативности систем мониторинга. Проведена серия численных экспериментов по оценке эффективности комбинации различных действующих и перспективных систем мониторинга в регионе.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 20-01-00560 "Алгоритмы последовательного продолжения с оценкой неопределенностей в задачах обратного моделирования для природоохранной тематики".

Руководитель – д.ф.-м.н. Пененко В. В.

В проекте разрабатывается методология решения задач природоохранного прогнозирования и проектирования, которые формулируются как математические задачи продолжения. Основная идея нашего подхода заключается в восстановлении функции состояния модели по неполной информации с помощью специальных алгоритмов, идентифицирующих дополнительно введенные в модель функции неопределенности.

Связующим звеном между моделями процессов, записанных с учетом функций неопределенности, и данными наблюдений является вариационный принцип. Расширенный функционал вариационного принципа со слабыми ограничениями включает: модели процессов, записанных в виде интегрального тождества с использованием сопряженных функций; целевые функционалы, отвечающие за конкретные цели исследования в решаемой задаче, функционалы качества системы наблюдений, функционалы для оценки неопределенностей системы моделирования. Функции чувствительности являются основой для решения обратных задач, оценки параметров моделей и источников воздействий.

В отчетном периоде рассмотрены алгоритмы продолжения на основе методов идентификации неопределенности в источниках модели адвекции-диффузии-реакции и сравнили, как соотносятся решения задач продолжения и задачи идентификации источников. На данном этапе можно сформулировать следующий предварительный вывод по результатам расчетов: по имеющимся в реалистичных сценариях данным измерений, идентификация функции неопределенности модели (источников) получилась с некоторой ошибкой, поскольку данных оказалось недостаточно для этих целей. Однако при этом решение задачи продолжения, т. е. нахождение функции состояния, получается, по оценкам, более успешным. Это является дополнительным подтверждением перспективности постановки и решения задач продолжения природоохранной тематики.

Проект РФФИ 19-47-540011 р_а "Сценарный подход для оценки качества воздуха в Новосибирске методами прямого и обратного моделирования".

Руководитель – д.ф.-м.н. Пененко А. В.

В проекте разрабатывается методика оценки качества воздуха в городах с использованием различных данных мониторинга на примере Новосибирска. Чтобы оценить качество атмосферы с помощью модели распространения и трансформации примесей, необходимо иметь представление об источниках этих примесей. Как правило, информация о них является неполной. Поэтому в проекте на реалистичных сценариях тестируются алгоритмы идентификации источников на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений. Разрабатываемая методика позволяет единообразно работать как с точечными данными, так и с данными типа изображений. На данном этапе алгоритмы тестировались в сценариях с данными измерений в виде снимков полей концентраций отдельных химических веществ. Результаты сравнивались с результатами идентификации источников по временным рядам концентраций на постах мониторинга. Если рассматривать задачу идентификации источников как вспомога-

ную для оценки полей загрязнения, то относительная ошибка восстановления полей загрязнений в проведенных численных экспериментах оказалась меньше, чем относительная ошибка идентификации источников.

Поскольку алгоритмы решения обратных задач зачастую требуют решения множества прямых задач, необходима модель процессов переноса и трансформации примесей в атмосфере, которая, с одной стороны, адаптирована к городским условиям, а с другой, позволяет гибко настраивать сложность и время вычислений. В рамках развития такой модели проведена адаптация для нужд проекта мезомасштабной модели, создаваемой в ИВМиМГ СО РАН, и выполнено предварительное сравнение ее результатов с результатами WRF-Chem.

Проект РФФИ 19-07-01135 "Разработка алгоритмов на основе ансамблей сопряженных функций для нахождения коэффициентов в моделях продукции-деструкции по данным точечных измерений".

Руководитель – к.ф.-м.н. Пененко А. В.

В рамках разрабатываемого подхода с помощью ансамблей решений сопряженных уравнений и операторов чувствительности для обратной задачи строится семейство квазилинейных операторных уравнений различных размерностей. Полученные операторные уравнения решаются алгоритмами типа Ньютона – Канторовича. В отчетном периоде численно изучалась сходимость алгоритма решения коэффициентной обратной задачи для модели продукции-деструкции по данным точечных измерений значений функции состояния. В частности, рассматривалось влияние на сходимость различных уровней шума в данных, количество искомых коэффициентов и имеющихся данных измерений. Квазилинейная структура получаемых операторных уравнений позволяет изучать свойства обратной задачи на основе анализа оператора чувствительности. В отчетном периоде изучался способ оценить возможность восстановления тех или иных коэффициентов модели на основе анализа соответствующих им элементов диагонали проектора на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности. Такой подход показал свою эффективность в численных экспериментах.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных WoS

1. Penenko A. Convergence analysis of the adjoint ensemble method in inverse source problems for advection-diffusion-reaction models with image-type measurements // *Inverse Problems & Imaging*. 2020. Vol. 14. P. 757–782. DOI: 10.3934/ipi.2020035.
2. Penenko V. V., Penenko A. V. Construction of forecasts in environmental protection as a solution to the continuation problem // *Proc. SPIE. The Intern. Soc. for Opt. Engin.* 2020, 11560, 115605N. DOI: 10.1117/12.2575646.
3. Rynova E. A., Penenko V. V., Gochakov A. V., Faleychik L. M. Modeling the propagation of impurities from point sources in the winter atmosphere of the Baikal region // *Proc. SPIE. The Intern. Soc. for Opt. Engin.* 2020, 11560, 1156071. DOI: 10.1117/12.2575569.
4. Tsvetova E. A. Transporting Spirogyra algae in waters of Lake Baikal: results of mathematical modeling // *Proc. SPIE. The Intern. Soc. for Opt. Engin.* 2020, 11560, 115607H. DOI: 10.1117/12.2575644.

5. Pestunov D., Domysheva V., Shamrin A., Tsvetova E., Panchenko M. Distribution of the Barguzin River waters in the Barguzin Bay estimated by the content of dissolved methane // Proc. SPIE. The Intern. Soc. for Opt. Engin. 2020, 11560, 1156050. DOI: 10.1117/12.2575629.
6. Kurbatskaya L. I. Research of a neutral and stable boundary layer of the atmosphere using an explicit algebraic model of Reynolds stresses // Proc. SPIE. The Intern. Soc. for Opt. Engin. 2020, 11560, 115606K. DOI: 10.1117/12.2575483.
7. Yudin M. S. Calculation of stratification effects and parameters of atmospheric currents over steep surface obstacles // Proc. SPIE. The Intern. Soc. for Opt. Engin. 2020, 11560, 1156070. DOI: 10.1117/12.2575567.
8. Penenko A. V., Gochakov A., Antokhin P. Numerical study of emission sources identification algorithm with joint use of in situ and remote sensing measurement data // Proc. SPIE. The Intern. Soc. for Opt. Engin. 2020, 11560, 1156071. DOI: 10.1117/12.2575649.
9. Penenko A. V., Salimova A. B. Source Identification for the Smoluchowski equation using an ensemble of adjoint equation solutions // Num. Analysis and Appl. 2020. Vol. 13. P. 152–164. DOI: 10.1134/s1995423920020068.

Издания, включенные в библиографическую базу Scopus

1. Penenko A., Gochakov A., Penenko V. Algorithms based on sensitivity operators for analyzing and solving inverse modeling problems of transport and transformation of atmospheric pollutants // IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 2020, 611(1), 012032. DOI: 10.1088/1755-1315/611/1/012032.
2. Penenko A., Zubairova U., Bobrovskikh A., Doroshkov A. Adjoint ensemble methods for the inverse modeling of biological processes // Cognitive Sci., Genom. and Bioinform. (CSGB), IEEE, 2020. DOI: 10.1109/csgb51356.2020.9214652.
3. Gochakov A.V., Penenko A. V., Antokhin P. N., Kolker A. B. Urban canopy surface description by using geospatial data for air quality modeling and estimation tasks [Описание урбанизированной поверхности с использованием геопространственных данных для задач моделирования и оценки качества воздуха] CEUR Workshop Proc. 2020, 2534. All-russian conf. "Spatial data processing for monitoring of natural and anthropogenic processes", (SDM 2019), Berdsk, Aug. 26–30, 2019. P. 344–348.
4. Penenko A. V., Mukatova Z. S., Salimova A. B. Numerical study of the coefficient identification algorithm based on ensembles of adjoint problem solutions for a production-destruction model // Intern. J. Nonlin. Sci. and Num. Simulation. 2020. DOI: 10.1515/ijnsns-2019-0088.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Пененко А. В., Салимова А. Идентификация источника в уравнении Смолуховского с использованием ансамбля решений сопряженного уравнения // СибЖВМ. 2020. Т. 23. № 2. С. 183–199.
2. Пьянова Э. А., Пененко В. В. Моделирование зимней циркуляции атмосферы над территорией Байкальского региона // Фотограмметрия и дистанционное зондирование для цифровой экономики : сб. материалов Международной конференции в рамках 16-й Международной выставки и научного конгресса "ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2020", Новосибирск, 22–24 апр. 2020 г. Т. 4, № 1. С. 129–136. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-4-1-128-136.

3. Курбацкая Л. И. Вихревые коэффициенты переноса импульса и тепла в пограничном слое атмосферы: численное исследование // Фотограмметрия и дистанционное зондирование для цифровой экономики : сб. материалов Международной конференции в рамках 16-й Международной выставки и научного конгресса "ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2020", Новосибирск, 22–24 апр. 2020 г. Т. 4. № 1. С. 74–82. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-4-1-74-82.
4. Пененко А. В., Гочаков А. В., Пененко В. В. Алгоритмы на основе операторов чувствительности для анализа и решения задач обратного моделирования переноса и трансформации примесей в атмосфере // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды, Томск, 6–11 июля 2020 г. С. 239–242.
5. Penenko A., Zubairova U., Doroshkov A., Bobrovskikh A. Adjoint ensemble methods for inverse modeling of biological processes // Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology : Abst. 11th Intern. multiconf., Novosibirsk, July 6–10, 2020. P. 184.
6. Пененко В. В., Пененко А. В. Обратное моделирование для прогнозирования и контроля качества окружающей среды // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды, Томск, 6–11 июля 2020 г. С. 243–245.
7. Пененко В. В. Вариационные методы и обратные задачи последовательного продолжения с усвоением данных наблюдений // Актуальные проблемы прикладной математики и механики : тез. докл. 10-й Всерос. конф. с международным участием, посвященной памяти акад. А. Ф. Сидорова и 100-летию УрФУ, Екатеринбург, 1–6 сент. 2020. С. 56–57.
8. Пьянова Э. А., Пененко В. В., Гочаков А. В., Фалейчик Л. М. Моделирование процессов загрязнения воздушного бассейна акватории Байкала на основе сценарного подхода // Актуальные проблемы прикладной математики и механики : тез. докл. 10-й Всерос. конф. с международным участием, посвященной памяти акад. А. Ф. Сидорова и 100-летию УрФУ, Екатеринбург, 1–6 сент. 2020. С. 62–63.
9. Tsvetova E. A. Scenario modeling of hydrodynamics and impurity propagation in Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. 2020. № 4. P. 950–951. DOI:10.31951/2658-3518-2020-A-4-950.
10. Пьянова Э. А., Пененко В. В., Фалейчик Л. М. Численные сценарные исследования процессов распространения загрязняющих примесей в Южном Прибайкалье // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 96. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10353.
11. Пьянова Э. А. Сценарное моделирование динамики атмосферы над территорией Новосибирска // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 95. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10352.
12. Курбацкая Л. И. Вихревое перемешивание импульса и тепла в устойчиво стратифицированных пограничных слоях: численное исследование // Марчуковские научные чтения 2020 :

тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 86. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10146.

13. Пененко А. В. Алгоритмы обратного моделирования на основе ансамблей решений сопряженных уравнений // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 92. DOI:10.24411/9999-017A-2020-10351.

14. Пененко В. В. Обратные задачи продолжения на основе математических моделей и данных наблюдений исследуемых процессов // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 92–93. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10157.

15. Пененко В. В., Пененко А. В. Современные подходы в обратном моделировании на основе вариационных методов и теории чувствительности для решения задач природоохранной тематики // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 93. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10382.

16. Пененко А. В., Гочаков А. В. Анализ параллельного ускорения алгоритма идентификации источников на основе ансамблей решений сопряженных уравнений // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 111. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10354.

17. Цветова Е. А. Оценка загрязнения Малого моря (Байкал) с помощью численного моделирования // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 100 DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10169.

18. Юдин М. С. Бифуркационный каскад в модели распределения атмосферных полей с высотой в лесном массиве // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 103. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10173.

19. Kurbatskaya L. I. Eddy mixing, gravity waves and the intermittent turbulence in atmospheric flows under stronger stratification // Abst. of the Intern. conf. on the methods of aerophys. research, Novosibirsk, November 1–7, 2020. Pt. 2. Novosibirsk: Parallel, 2020. P. 92–93.

20. Penenko V. V., Penenko A. V., Pyanova E. A., Tsvetova E. A. Direct and inverse problems for evaluating ecological situations under anthropogenic and climatic influence // Abst. of the Intern. conf. on the methods of aerophys. research, Novosibirsk, November 1–7, 2020. Pt. 2. Novosibirsk: Parallel, 2020. P. 139–140.

Свидетельства о регистрации в Роспатенте

Свидетельство № 2020660310. Программа для ЭВМ "Программа для идентификации источников в нестационарных моделях адвекции-диффузии-реакции на основе операторов чувствительности по данным измерений типа изображений функции состояния модели" : св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ / Пененко А. В. Дата публикации 01.09.2020.

Свидетельства о регистрации в ФАП СО РАН

Свидетельство о регистрации программы в ФАП СО РАН № PR20003. Программа для идентификации источников в нестационарных моделях адвекции-диффузии-реакции на основе операторов чувствительности по данным измерений типа изображений функции состояния модели / Пененко А. В. Дата регистрации: 2020.12.28.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Фотограмметрия и дистанционное зондирование для цифровой экономики" в рамках 16-й Международной выставки и научного конгресса "ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2020", Новосибирск – 3 доклада (Пененко А. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Пененко В. В.).

2. 26-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 6–10 июля 2020 г. – 7 докладов, из них 1 приглашенный (Пененко В. В., Курбацкая Л. И., Пененко А. В., Гочаков А. В., Антохин П. Н., Цветова Е. А.; Пьянова Э. А., Фалейчик Л. М., Пестунов Д. А., Домышева В. М., Шамрин А. М., Панченко М. В., Юдин М. С.).

3. Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды, Томск, 6–11 июля 2020 г. – 2 приглашенных доклада (Пененко В. В., Пененко А. В.; Гочаков А. В.).

4. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. – 10 докладов, из них 1 пленарный (Пененко В. В., Пененко А. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Фалейчик Л. М., Цветова Е. А.; Юдин М. С.).

5. 12-я Международная молодежная научная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г. – 2 доклада (Пененко В. В., Пененко А. В.).

6. 2-я Международная конференция по методам аэрофизических исследований, Новосибирск, 1–7 ноября 2020 г., – 3 доклада (Пененко В. В., Цветова Е. А., Пьянова Э. А., Курбацкая Л. И.).

7. 27-я Конференция "Аэрозоли Сибири", Томск, 24–27 ноября 2020 г. – 6 докладов (Пененко В. В., Цветова Е. А., Пененко А. В., Гочаков А. В., Антохин П. Н., Пьянова Э. А., Курбацкая Л. И., Юдин М. С.).

8. 11th International multiconference "Bioinformatics of genome regulation and structure/systems biology" ("BGRS/SB-2020"), Новосибирск, July 6–10, 2020 – 1 доклад (Пененко А. В.).

9. Society for Mathematical Biology Annual Meeting 2020, August 20, 2020 – 1 доклад (Penenko A. V.).

10. 7-я Международная Верещагинская байкальская конференция, Иркутск, 7–13 сентября 2020 г. – 1 доклад (Цветова Е. А.).

11. 10-я Всероссийская конференция с международным участием, посвященная памяти акад. А. Ф. Сидорова и 100-летию УрФУ, Екатеринбург, 1–6 сентября 2020 г. – 1 доклад (Пьянова Э. А., Пененко В. В., Гочаков А. В., Фалейчик Л. М.).

Участие в программных и организационных комитетах

1. Пененко В. В.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;

– член программного комитета Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2020", Томск, 7–11 сентября 2020 г.;

– член программного комитета 26-го Международного симпозиума "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 6–10 июля 2020 г.;

– член программного комитета 27-й Конференции "Аэрозоли Сибири", Томск, 24–27 ноября 2020 г.;

– член программного комитета 12-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г.

2. Пененко А. В.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;

– член программного комитета 12-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г.

3. Пьянова Э. А. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

4. Юдин М. С.:

– член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;

– член организационного комитета Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2020", Томск, 7–11 сентября 2020 г.

Международные научные связи

В рамках некоммерческого партнерства лаборатория участвует в междисциплинарном проекте "Pan Eurasium Experiment" (ПЕЕХ, "Пан-Евразийский эксперимент") институтов Европы, России, Китая.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 9

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 13

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 42

Свидетельства о регистрации в Роспатенте – 1

Свидетельства о регистрации в ФАП СО РАН – 1

Докладов на конференциях 34, из них 4 пленарных и приглашенных

Членов организационных или программных комитетов конференций – 10

Кадровый состав

- | | | |
|--------------------|-------------------|-----------|
| 1. Пененко В. В. | зав. лаб. | д.ф.-м.н. |
| 2. Цветова Е. А. | в.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 3. Юдин М. С. | с.н.с. | |
| 4. Курбацкая Л. И. | с.н.с. | |
| 5. Пененко А. В. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 6. Пьянова Э. А. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 7. Коноплева В. С. | инж. (0,2 ст.) | |
| 8. Голенко П. С. | техник (0,2 ст.) | |
| 7. Иванова Г. И. | техник (0,25 ст.) | |

Педагогическая деятельность

Пененко В. В. – профессор НГУ

Пененко А. В. – ст. преподаватель НГУ

Защита дипломов

1. Мукатова Ж. С. – магистр НГУ, руководитель Пененко А. В.
2. Коноплева В. С. – бакалавр НГУ, руководитель Пененко А. В.
3. Латышенко У. – бакалавр НГУ, руководитель Пененко А. В.

Руководство студентами

Голенко П. – 1-й курс магистратуры НГУ, руководитель Пененко А. В.

ЛАБОРАТОРИЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА И МАШИННОЙ ГРАФИКИ

Зав. лабораторией д.т.н. Дебелов В. А.

Важнейшие достижения**Разработан метод модификации программ расчета физически корректных изображений 3D сцен для учета явления интерференции**

Д.т.н. Дебелов В. А., к.ф.-м.н. Васильева Л. Ф.

Разработан метод модификации программ расчета физически корректных изображений 3D сцен для учета явления интерференции.

По сравнению с существующими реализациями для расчета изображений с интерференцией разработаны новые спецификации оптических материалов и соответствующая информационная нагрузка трассирующего луча, которые учитывают когерентность лучей света, фазу колебаний световой волны, поляризацию. Предлагаемый метод модификации программ расчета изображений проверен для сцен с оптически изотропными и анизотропными объектами (рис. 1).

Одна из основных тенденций исследований и разработок в области фотореалистической визуализации (рендеринга 3D сцен) – обеспечение все большей степени физической корректности используемых математических моделей взаимодействия света с объектами сцены. Это выражается в более подробной спецификации материала объекта сцены, т. е. его оптических характеристик, включая источники освещения, и соответствующем усложнении информационной нагрузки трассирующего луча для учета особенностей математической модели. Разработанные алгоритмы рендеринга построены в основном на применении как прямой трассировки, в том числе стохастической, так и обратной рекурсивной трассировки лучей. Расчет взаимодействия лучей с объектами сцены не зависит от вида трассировки. Главное, что для падающего на объект луча выполняется расчет выходящих из него лучей. Основной вопрос в том, какие это лучи и как их обрабатывает расчетная программа – рендер.

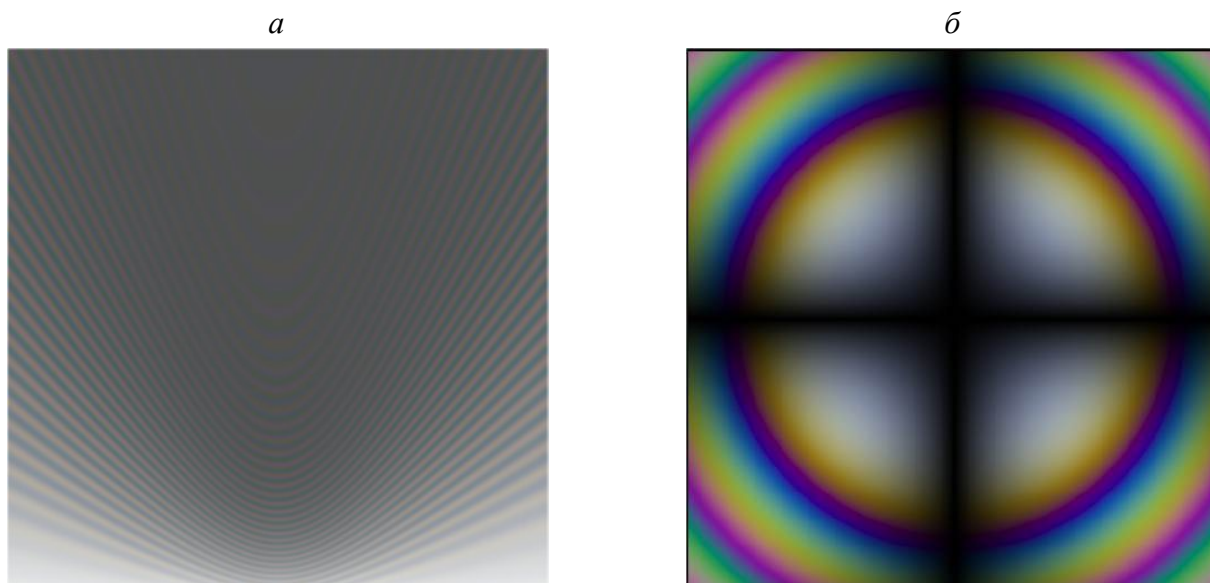


Рис. 1 – Интерференция в сцене с изотропным прозрачным объектом (а); изображение сцены с оптически одноосным кристаллом кальцита (интерференционная коноскопическая фигура) (б) (прямая трассировка)

В настоящее время рендеринг осуществляется с использованием: RGB-лучей, информационная нагрузка которых состоит из интенсивностей красного, зеленого и синего цветов; монохромных лучей света заданной длины волны, характеризующихся переносимой интенсивностью, что позволяет рассчитывать изображения в спектральном режиме и учитывать оптическую дисперсию, например картину разложения белого света в спектр призмой. Результирующее изображение рассчитывается на основе набора монохромных.

Начало разработок, ориентированных на расчет физически корректных изображений, наглядно демонстрирующих эффект интерференции, обычно связаны с работой М. Диас (1991 г.). Интерференция в тонких пленках рассчитывалась на основе аналитического решения, математической модели и формул, приведенных в литературе по физике. При заданных параметрах осуществляется расчет требуемой картинке для сцены, состоящей, например, из мыльных пузырей, на основе применения соответствующих формул. К сожалению, в приведенных изображениях оптическая дисперсия не учитывалась, так как для всех длин волн использовался один и тот же индекс рефракции. Данный подход вообще не имеет отношения к фотореалистической компьютерной графике.

Другой подход рассматривает параметризованную геометрическую и оптическую модель этого объекта, в которой учтены интерференционные эффекты и на основании которой выполняется расчет некоторого аналога функции отражения от объекта в зависимости от угла падающего луча с нормалью. Все взаимодействия с такими объектами осуществляются через применение данной функции отражения. При проведении численных экспериментов авторы назначали одинаковый индекс рефракции материалу интерферирующего слоя, т. е. игнорировали оптическую дисперсию.

Кроме этих двух противоположных подходов существуют и другие, которые частично используют детали упомянутых подходов вплоть до предварительного расчета специфических текстур. Основная цель многих таких подходов – подкрашивание рассчитываемой картины *радужными цветами*, а не соответствие физической корректности алгоритма.

Таким образом, по результатам этих работ модификацию традиционного рендера (как правило, RGB-рендера) упрощенно можно представить следующим образом: а) на интерферирующий слой или объект падает луч в обычной форме, например в виде тройки RGB; б) переносимая лучом энергия преобразуется к спектральной форме; в) внутри объекта выполняется расчет интерференции – рассчитывается выходной луч в спектральной форме; г) выполняется обратное преобразование представления выходного луча из спектрального в RGB; д) RGB-луч продолжает движение в сцене. На втором этапе (б) применяются аналитические решения для тонких пленок или используются специальные функции отражения. Конечно, в ряде случаев будут рассчитаны вполне корректные изображения. Но интерференция рассчитана слишком рано. Наиболее корректно выполнять расчет в точке регистрирующего устройства (экрана, глаза), поскольку в сцене могут распространяться несколько когерентных лучей. Таким образом, лучи в сцене должны переносить между объектами не только цвет.

Суть предлагаемого метода состоит в следующем. При расчете изображений фактически осуществляется трассировка лучей от источника. Введем *луч линейно поляризованного света с атрибутами*

$$R = \{P_0, \textit{dir}, X, Y, \textit{Atr}\},$$

где $\{P_0, \mathbf{dir}\}$ – математический луч; $\{X, Y, \mathbf{dir}\}$ – связанная с ним правосторонняя система координат; P_0 – начало луча; $\mathbf{dir}$ – направление; Atr – набор значений атрибутов. К этой системе координат привязана матрица когерентности данного луча, т. е. определены его поляризация и интенсивность. Луч, встречая поверхность сцены, порождает новые лучи (отраженный и преломленный). В данной реализации система координат выбрана так, чтобы колебания электрического вектора происходили по оси x . Рассмотрим набор атрибутов, который мы считаем достаточным для расчета изображений с учетом интерференции:

l – длина волны света; напомним, что для спектрального рендеринга используются только монохромные лучи;

$Light_{id}$ – идентификатор породившего луч точечного источника света или дифференциальной площадки площадного источника. Считается, что программа назначает уникальные числовые или текстовые идентификаторы. Пусть значение ноль указывает на то, что на дальнейшем пути данный луч не будет когерентным ни с каким другим лучом. Два луча когерентны, если их идентификаторы источника ненулевые и совпадают;

SC_{max} – предельная длина когерентности;

M_{hg} – матрица когерентности 2×2 ; интенсивность $I(l)$ считается через след матрицы;

Op – оптический путь, пройденный от источника, по которому рассчитывается текущая фаза электромагнитной волны;

S_d – скачок фазы, накопленный при отражениях.

Порожденные лучи (отраженный и преломленный) наследуют часть атрибутов либо они пересчитываются во время контакта порождающего луча с поверхностью сцены.

Для учета интерференции рендер можно модифицировать следующим образом:

- разделить все лучи, пришедшие в точку экрана, по группам взаимной когерентности.
- в рамках отдельной группы для каждого луча определить окончательную фазу и вектор электрического поля.
- получить результирующий вектор для каждой группы.
- сложить квадраты длин результирующих векторов групп лучей.

Таким образом, все вычислительные особенности алгоритма учета интерференции в 3D сцене с оптически изотропными и анизотропными объектами определены.

Результаты исследований опубликованы в работе

Debelov V. A., Vasilieva L. F. Visualization of interference pictures of 3D scenes including optically isotropic transparent objects // Sci. Visualization. 2020. Vol. 12, No. 3. P. 119–136. DOI: 10.26583/sv.12.3.11 (Scopus Q3).

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.
2. Международная конференция "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2019" (АПВПМ-2019), Новосибирск, 1–5 июля 2019 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР 0315-2019-0001 "Математическое моделирование, численные методы и высокопроизводительные информационно-вычислительные технологии для решения задач переноса лучистой энергии и тепломассопереноса в сложнопостроенных многофазных средах".

Номер государственной регистрации НИР АААА-А18-118012690166-1.

Руководитель – д.т.н. Дебелов В. А.

Раздел 1. "Моделирование влияния сил Лоренца на динамику расплава при импульсной тепловой нагрузке".

Руководитель – член-корр. РАН, д.ф.-м.н. Лазарева Г. Г.

Этап 2020 г. "Разработка параллельной версии программы для проведения крупномасштабных вычислительных экспериментов с использованием высокопроизводительных вычислительных систем для детальной проработки теоретической модели генерации и вылета капель тугоплавких металлов при кипении сверхкритического слоя в расплаве".

Разработана параллельная версия программы для проведения крупномасштабных вычислительных экспериментов с использованием высокопроизводительных вычислительных систем для детальной проработки теоретической модели генерации и вылета капель тугоплавких металлов при кипении сверхкритического слоя в расплаве. Модель включает задачу Стефана для расчета распределения температуры в пластинке с выделением зоны расплава, систему уравнений Максвелла для определения токов в образце и систему уравнений газовой динамики для расчета распределения параметров паров металла. Распространение газа над образцом описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{v}) = 0, \\ \frac{\partial(\rho \bar{v})}{(\rho \bar{v})} + \operatorname{div}(\bar{v}(\rho \bar{v}) + P) = 0, \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \operatorname{div}(\bar{v}((\rho E) + P)) = 0, \\ (\rho T) = \frac{2}{3} \frac{M}{R} ((\rho E) - \rho \bar{v}^2 / 2), \\ \bar{v} = \frac{(\rho \bar{v})}{\rho}, \quad T = \frac{(\rho T)}{\rho}, \quad P = \frac{R}{M} (\rho T). \end{cases}$$

Система уравнений описывает законы сохранения для следующих параметров течения: ρ – плотность газа; $\bar{v} = (v_r, v_z)$, – вектор скорости газа; P – давление; $T(r, z, t)$ – температура; E – полная удельная энергия. В уравнение входят газовая постоянная R и молярная масса M .

Граничные условия для плотности и скорости на нагреваемой поверхности γ

$$\rho|_{\gamma} = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{M} \right)^{-1} \frac{1}{T^*|_{\gamma}} \exp \left(a1 - \frac{a2}{T^*|_{\gamma}} \right), \quad v_r|_{\gamma} = 0, \quad v_z|_{\gamma} = \sqrt{\frac{5}{3}} \frac{R}{M} \sqrt{T^*|_{\gamma}}$$

соответствуют испарению со скоростью звука и зависимости плотности насыщенных паров от температуры. Температура поверхности определяется из решения задачи Стефана. На оси заданы условия симметрии. На остальных границах задаются условия свободного истечения газа в технический вакуум.

Часто применяемая гипотеза об испарении со скоростью звука при решении гидродинамики приводит к наблюдаемым в решении ударным волнам. Эти волны имеют небольшую плотность и мало влияют на дальнейшую эволюцию газа. Поперечная скорость наблюдается в основном на границе факела в силу осевой симметрии. Продольная скорость достигает максимальных значений в центре, поскольку именно там происходит основное испарение. Результаты расчетов показывают, что на границе факела поперечная скорость имеет тот же порядок, что и продольная, но продольная скорость в области активного испарения почти на порядок больше максимальной радиальной скорости.

Мгновенный нагрев до 6–8 тыс. К и экспоненциальный рост плотности газа при испарении на поверхности приводит к необходимости расчетов с очень малым временным шагом, для полного расчета требуется 2 млн шагов по времени. Для получения результатов разработана и реализована на кластере НКС-1Р (ЦКП ССКЦ СО РАН) параллельная версия программы, основанная на технологиях OpenMP. На рис. 2 приведены зависимости времени счета, ускорения и эффективности от числа процессоров. Ускорение равно времени счета на p ядрах по сравнению со счетом на одном ядре. Ускорение и эффективность вычисляются по формулам:

$$S_p = \frac{T_1}{T_p}, \quad E_p = \frac{T_1}{pT_p} = \frac{S_p}{p}.$$

Здесь T_n – время счета на n ядрах; p – количество ядер. Время счета нелинейно убывает с ростом числа процессоров. Если на одном ядре расчет занимает 5045 с, то на 64 ядрах 192 с. Соответственно ускорение растет. Например, на 64 ядрах счет ускоряется в 26 раз по сравнению с одним ядром. Эффективность на двух ядрах равна 0.925, на 4 ядрах – 0.92, на 8 – 0.89. То есть до 8 ядер эффективность очень высокая. Затем эффективность начинает падать в соответствии с графиком. На 64 ядрах эффективность равна 0.41. Это связано с тем, что с увеличением числа ядер растут задержки на синхронизацию. Расчет потребовал наличия большого объема оперативной памяти, так как требуется разместить 20 двумерных массивов размером 10000×8000 64-битных ячеек памяти. Расчеты показали, что кластер НКС-1Р достаточно эффективен для решения задач такого типа.

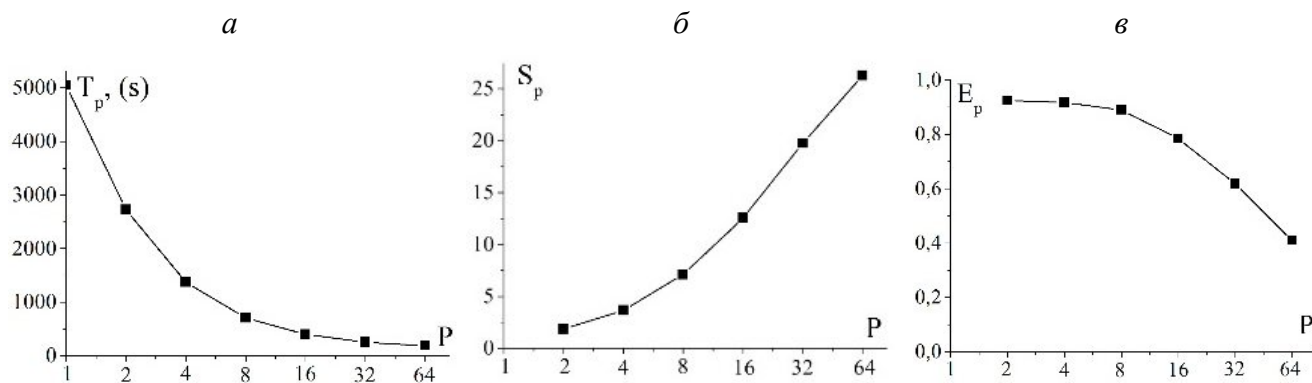


Рис. 2 – Зависимость от числа ядер времени счета (а), ускорения (б) и эффективности (в)

Исследованы и разработаны параллельные алгоритмы и технологии решения трехмерных краевых задач в областях со сложной геометрией на квазиструктурированных параллелепипедальных сетках методом декомпозиции расчетной области на подобласти, сопрягаемые без наложения. Разработаны параллельные сеточные структуры данных, ориентированные на работу со структурированными массивами данных. В предлагаемом варианте расчетная область разбивается структурированной макросеткой на подобласти, в каждой из которых строится своя структурированная подсетка (рис. 3). Подход основан на прямой (непосредственной) аппроксимации уравнения Пуанкаре – Стеклова на границе сопряжения подобластей (интерфейсе) системой линейных алгебраических уравнений. Он допускает несогласованные подсетки, не требует построения матрицы сеточных уравнений во всей области, а лишь в подобластях. Проведена предварительная апробация расчетов на модельных задачах. Намечены дальнейшие планы совершенствования алгоритмов.

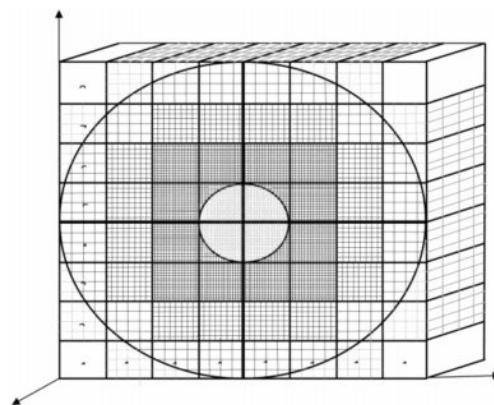


Рис. 3 – Разбиение области структурированной макросеткой

Разрабатывается и реализуется параллельный алгоритм для математической модели распределения тока электронного пучка при импульсном нагреве металлической мишени. Модель основана на решении двухфазной задачи Стефана с учетом процесса испарения и уравнения для потенциала тока с удельной проводимостью, зависящей от температуры образца. Для получения динамики распределения тока необходимо получать решение стационарного уравнения (несколько тысяч итераций на установление) на каждом временном шаге, чем и обусловлена необходимость распараллеливания.

Для решения задач используются вычислительные ресурсы Сибирского суперкомпьютерного центра коллективного пользования (ССКЦ КП) СО РАН: кластер НКС-30Т на платформе Intel Xeon (подкластер на шести ядерных процессорах X5670) и кластер НКС-1П с жидкостным охлаждением на базе 72-ядерных процессоров Intel Xeon Phi 7290. Используются технологии параллельного программирования OpenMP, MPI.

Раздел 2 "Разработка экономичного метода решения задачи Коши для уравнения Лапласа".

Руководитель – д.ф.-м.н. Сорокин С. Б.

Этап 2020 г.

Предложен и обоснован экономичный прямой численный метод решения задачи Коши для эллиптических уравнений с переменными коэффициентами, допускающими разделение переменных. Метод позволяет получить решение дискретной задачи за число арифметических операций порядка N , где N – число точек сетки.

Известные прямые алгоритмы решения задачи Коши разработаны только для уравнения Лапласа. Все они основаны на существовании аналитического решения задачи продолжения в стандартной области.

Новизна результата состоит в том, что разработанный экономичный алгоритм применим к эллиптическим уравнениям с переменными коэффициентами, для которых не представляется возможным получить аналитическое решение задачи продолжения.

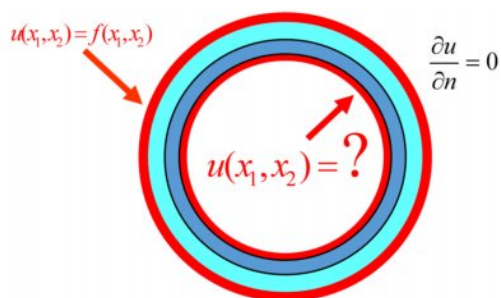


Рис. 4 – Геометрия примерной задачи

Практическое применение (теплопроводность).

Алгоритм может применяться при создании приборов, способных в реальном масштабе времени определять температуру на недоступных для измерения частях конструкций. Рассмотрим пример практической задачи, для которой может применяться алгоритм. Есть термоизолированная труба, выполненная из разных материалов (рис. 4). Имеется возможность измерить температуру на внешнем радиусе, необходимо узнать

температуру на внутренней границе трубы.

Раздел 3 "Разработка параллельных алгоритмов физически корректного расчета фотореалистических изображений для многоядерных ГПУ методом стохастической трассировки лучей для сцен, состоящих из кристаллических агрегатов прозрачных оптически анизотропных сред".

Руководитель – д.т.н. Дебелов В. А.

Этап 2020 г. "Разработан метод модификации программ расчета физически корректных изображений 3D сцен для учета явления интерференции".

В разделе "Важнейший результат" данного отчета отмечено, что для расчета интерференционных картин необходима модификация самого рендера. А включение в сцену тех или иных объектов возможно при наличии алгоритмов, обеспечивающих расчет взаимодействия луча с исследуемым объектом. Для параллельного алгоритма расчета взаимодействия лучей и оптически анизотропных кристаллов в качестве целевой платформы реализации алгоритма была взята система Nvidia OptiX для GPU типа Nvidia GeForce. Особенность системы OptiX в том, что она изначально спроектирована для реализации алгоритмов, строящих решение на основе использования трассировки лучей в 1D, 2D или 3D геометрии.

В разделе "Важнейший результат" предложено расширение, достаточное для организации отслеживания лучей во всей сцене: от источников до объектов, между объектами, от объектов на экран. Отметим одну особенность всех рассмотренных нами работ: в них не затрагиваются вопросы расчета значения цвета или интенсивности в пикселе экрана. В ряде работ даже не учитывается оптическая дисперсия, чтобы не решать проблему вычисления значений в пикселе, когда для разных волн лучи на экран попадают в разные пиксели. Наши исследования данной проблемы сформулированы в виде предложения учесть такие исследования в будущем.

Предлагается исследовать следующие проблемы:

- Разделить все лучи, пришедшие в точку экрана, на группы взаимной когерентности;
- Пиксель лазерного принтера равен 1/300 дюйма или около 0,085 мм; длина волны – 0,00038 – 0,00078, т. е. в одном пикселе 108 волн, т. е. фаза может поменяться 200 раз.

- Какие методы следует использовать для произвольной сцены, возможно, Монте-Карло? Как изучать пары когерентных лучей (или иные наборы)?
- Выбрать подход к усреднению по пикселю интенсивностей всех попавших в него лучей? И так далее.
- Нужно ли учитывать, что угловое разрешение человеческого глаза $1-2'$ (около $0,02-0,03^\circ$), что соответствует $30-60$ см на 1 км расстояния?
- Возможно, следует выбирать размер пикселя на основе анализа величины изменений.
- Следует ли предложить пересчет фазы для некоторой точки в пикселе для всех попавших в него лучей с учетом волновой природы света?

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 18-31-00303 мол-а "Математическое моделирование теплоотвода при импульсной тепловой нагрузке на основе кинетических схем и методов типа Годунова"

Руководитель – Максимова А. Г.

Построена модель теплоотвода при импульсных тепловых нагрузках вблизи поверхности материала с учетом неоднородностей. Воспроизведены измеренные распределения температуры по поверхности для предсказания характерных зависимостей ослабления теплоотвода в зависимости от геометрии неоднородностей. Задача рассмотрена в цилиндрической системе координат и в планарной постановке. Результаты вычислений коррелируют с полученными в ИЯФ СО РАН экспериментальными данными и существующими аналитическими оценками

Выполнена численная реализация двухмерной модели упругих деформаций для описания трещины, распространяющейся по поверхности, возникающей при импульсной тепловой нагрузке. Созданы два комплекса программ, позволяющих производить расчет смещений в однородном материале около трещин в двумерной постановке. Трещина задается на границе области через граничные условия. На одной части поверхности заданы смещения, а на другой – внешние усилия. Для расчета модели были созданы две дискретные модели, проведены численные расчеты.

Разработана новая линеаризованная редакция метода Годунова первого порядка точности, отличительной особенностью которой является выполнение свойства неубывания энтропии на разрывных решениях уравнений газовой динамики, что было численно проверено на модельных тестовых задачах о распаде разрыва.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Debelov V. A., Vasilieva L. F. Visualization of interference pictures of 3D scenes including optically isotropic transparent objects // Sci. Visualization. 2020. V. 12, No. 3. P. 119–136. DOI: 10.26583/sv.12.3.11.
2. Debelov V., Shelepaev R. Comparison of two approaches to calculate orthoscopic interference pictures // CEUR Workshop Proc. 2020. V. 2744. short44-1–short44-8. DOI: 10.51130/graphicon-2020-2-4-44.

3. Arakcheev A. S., Lazareva G. G., Maksimova A. G., Popov V. A., Ivashin N. E. Calculation of the expansion dynamics of evaporated tungsten under the action of a laser pulse // J. of Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1640, No. 012007. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012007.
4. Snytnikov A. V., Glinskiy B. M., Zagorulko G. B., Zagorulko Y. A. Ontological approach to formalization of knowledge in computational plasma physics // J. of Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1640, No. 012013. P. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012013.
5. Romanenko A. A., Snytnikov A. V., Boronina M. A. Cross-platform implementation of Particle-In-Cell method for simulation of high-temperature and fusion plasma by means of hybrid supercomputers equipped with GPU or Intel Xeon Phi accelerators // J. of Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1640, No. 012016. P. 1–5. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012016.

Издания, включенные в библиографическую базу РИНЦ

1. Maksimova A. G., Lazareva G. G. Numerical solution of the lame equation with a crack defined on the boundary // Abst. of the Intern. online conf. "Frontier in mathematics and computer". 2020. P. 66.
2. Максимова А. Г., Сорокин С. Б. Сопряженно операторный дискретный аналог третьей граничной задачи статики упругого тела // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 192. DOI:10.24411/9999-017A-2020-10028.
3. Дебелов В. А. Алгоритм вычисления значения интенсивности в пикселях фотореалистических интерференционных картин // Марчуковские научные чтения 2020: Тезисы Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 142. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10244.
4. Lazareva G. G., Ivashin N. E., Maksimova A. G., Popov V. A., Lobanov A. V., Arakcheev A. S. Calculation of uniform gas flow from the surface of a heated tungsten plate // Bull. NCC: Comput. Sci. 2020. No. 44.
5. Snytnikov A. V. Ontology design for solving computational plasma physics problems on supercomputers // Bull. NCC: Comput. Sci. 2020. No. 44.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, 19–23 октября 2020 г., Новосибирск – 2 доклада (Дебелов В. А., Максимова А. Г., Сорокин С. Б.).
2. International online conference organized by National University of Uzbekistan and Holon Institute of Technology "Frontier in mathematics and computer science", October 12–15, 2020 – 1 доклад (Максимова А. Г., Лазарева Г. Г.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Коновалов А. Н.:
– заместитель председателя оргкомитета 9-й Международной конференции по математическому моделированию, посвященной 75-летию со дня рождения профессора В. Н. Врагова, Якутск, 27 июля – 1 августа 2020,

– член организационного комитета 13-й Международной конференции "Сеточные методы для краевых задач и приложения – 2020", Казань, 20–28 октября 2020 г.,

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;

2. Дебелов В. А. – член программного комитета Юбилейной 30-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению "ГрафиКон-2020", Санкт-Петербург, 22–25 сентября 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 5

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 5

Докладов на конференциях – 3

Членов организационных или программных комитетов конференций – 4

Кадровый состав

1. Дебелов В. А.	зав. лаб.	д.т.н.
2. Бежаев А. Ю.	ведущ. программист	к.ф.-м.н.
3. Васильева Л. Ф.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
4. Долгов Н. Ю.	техник	
5. Коновалов А. Н.	советник РАН	академик РАН
6. Корнеев В. Д.	с.н.с.	к.т.н.
7. Лазарева Г. Г.	г.н.с.	член-корр. РАН
8. Максимова А. Г.	м.н.с.	
9. Марусина О. А.	техник 1-й катег.	
10. Роженко А. И.	с.н.с.	д.ф.-м.н.
11. Снытников А. В.	с.н.с.	д.т.н.
12. Сорокин С. Б.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
13. Хорсова Г. Е.	ведущ. программист	
Максимова А. Г. – молодой научный сотрудник.		

Педагогическая деятельность

Дебелов В. А.	– проф. НГУ
Коновалов А. Н.	– проф. НГУ
Лазарева Г. Г.	– проф. НГУ, НГТУ, РУДН
Максимова А. Г.	– преп. СУНЦ НГУ
Сорокин С. Б.	– проф. НГУ

Руководство студентами

Долгов Н. Ю.	– 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Дебелов В. А.
Ивашин Н. Е.	– 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Лазарева Г. Г.

Руководство аспирантами

Максимова А. Г.	– 3-й год, НГУ, руководитель Лазарева Г. Г.
Пехтерев М. С.	– 3-й год, НГУ, руководитель Лазарева Г. Г.

ЛАБОРАТОРИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ ГЕОФИЗИКИ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Имомназаров Х. Х.

Важнейшие достижения**Цифровой керн: моделирование акустической эмиссии в образцах керна**

Д.ф.-м.н. Решетова Г. В.

В настоящее время в нефтегазовой отрасли начинает активно применяться метод акустической эмиссии (АЭ) для изучения свойств кернового материала. Это связано, в первую очередь, с появлением современных установок для лабораторных исследований, снабженных многоканальными системами регистрации. К сожалению, на российском рынке пока нет доступного отечественного оборудования аналогичного типа. Данная работа была выполнена совместно с АО "Геологика" (Новосибирск), занимающейся созданием подобных установок. Цель исследования заключается в оценке параметров, которые должны быть заложены при создании отечественной измерительной системы сбора данных акустической эмиссии и разработке прототипа программного обеспечения для моделирования процесса АЭ на реальных образцах керна стандартного размера.

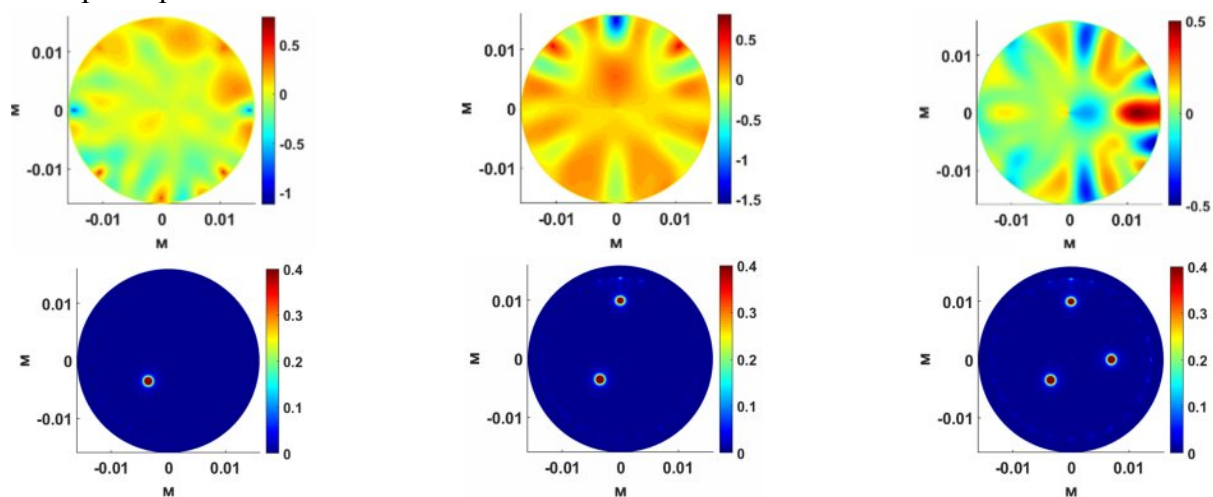


Рис. 1 – Результаты моделирования. Сравнение снимков волнового поля (вверху)

и предложенного метода суммарной энергии (внизу) для локализации трех источников АЭ

Был реализован метод зеркального обращения времени, который обеспечил разработку нового подхода к локализации и определению момента "включения" источников акустической эмиссии на основе вычисления "накопленной" упругой энергии. Важной особенностью предложенной методики является ее устойчивость по отношению к шумам и высокая разрешающая способность, обеспечивающая возможность определения оптимальной геометрии приемников при проектировании.

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Решетова Г. В., Анчуглов А. В. Цифровой керн: моделирование акустической эмиссии в целях локализации ее источников методом обращения волнового поля в обратном времени // Геология и геофизика, 2020. DOI:10.15372/GiG2020148 (WoS). 2-е место в 25-м Международном конкурсе научных работ "РосНаука" по направлению "Научные статьи по наукам о Земле и космологии".

2. Решетова Г. В. Оценка разрешающей способности метода обращения времени при восстановлении событий акустической эмиссии в образцах керна // Материалы 16-й Междунар. науч. конф. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 20–24 апр. 2020 г. Т. 2. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология". Стр. 579–589. DOI: 10.18303/B978-5-4262-0102-6-2020-063.

3. Reshetova G., Anchugov A., Pozdnyakov V. Reconstruction of the acoustic emission events in a core sample by time reversal mirror // Europ. Assoc. of Geoscientists & Engineers. Conf. proc. Saint Petersburg, Nov. 16–19, 2020. Vol. 2020. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202053097>.

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. 16-я Международная научная конференция Интерэкспо ГЕО-Сибирь "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология", Новосибирск, 20–24 апреля 2020 г.

2. 9-я Международная геолого-геофизическая конференция "Геонауки: трансформируем знания в ресурсы", Санкт-Петербург, 16–19 ноября 2020 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР 0315-2019-0005 "Методы создания, исследования и идентификации математических моделей с помощью суперкомпьютеров".

Номер государственной регистрации НИР 012010002449.

Руководитель – д.ф.-м.н., член-корр. РАН Кабанихин С. И.

Исследованы математические модели и предложены новые численные методы решения обратных задач восстановления изображений земных недр по сейсмическим данным, что является первостепенной задачей вычислительной сейсморазведки, так как сейсмическое изображение геологического объекта является основным результатом обработки данных полевых наблюдений. Разработаны новые спектрально-разностные методы высоких порядков точности для решения одностороннего волнового уравнения. Методы представляют собой комбинацию интегрального преобразования Лагерра по времени и конечно-разностной аппроксимации по пространству. Для обеспечения устойчивости разностных аппроксимаций разработаны стабилизирующие процедуры на основе сплайн-фильтрации и экстраполяции Ричардсона. Дополнительно исследована стабилизация методов Адамса, что позволило проводить расчеты по методу типа предиктор-корректор и снизить вычислительные затраты.

Для возможности выполнения быстрого преобразования Лагерра разработаны новые процедуры численного интегрирования быстро осциллирующих функций, также предложен быстрый алгоритм преобразования Лагерра. Корректность и точность 2d/3d алгоритмов миграции верифицированы специалистами из "Сибирского научно-исследовательского института геофизики, геологии и минерального сырья" и "Всероссийского научно-исследовательского геологического нефтяного института, Новосибирский филиал". Показано, что предлагаемые методы корректны и позволяют получать глубинные изображения высокого разрешения для сложных моделей сред. Выполнена обработка сейсмограмм для районов Западной и Восточной Сибири спектрально-разностными алгоритмами волновой миграции (рис. 2).

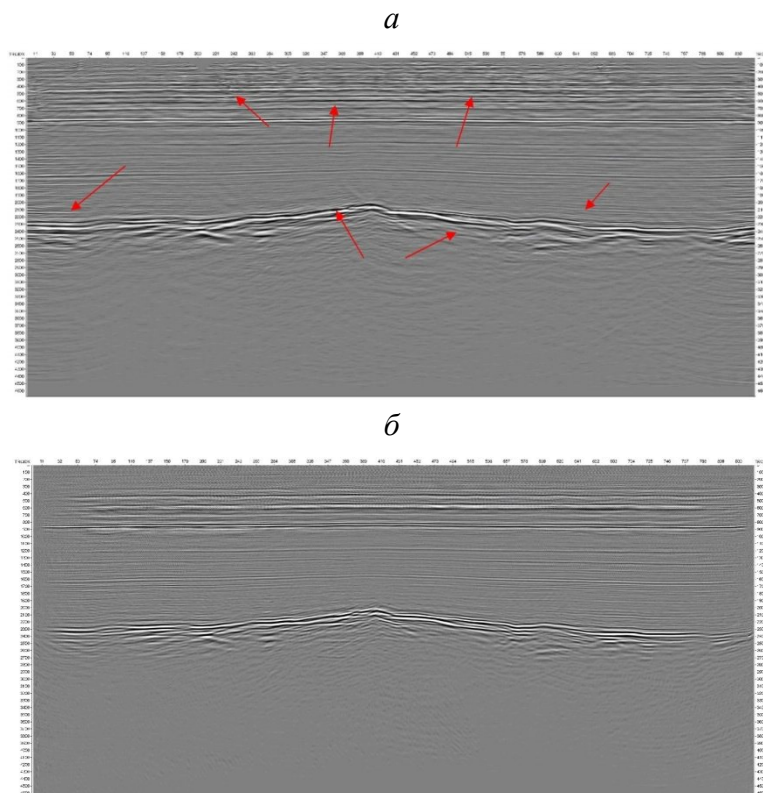


Рис. 2 – Глубинная миграция: а – "классический" методом, стрелками отмечены артефакты; б – на основе нового алгоритма (меньшее число шумов в верхней части разреза и более четкие границы разломов)

2. Создана полномасштабная теория несиловых ЭМП, в которой получены следующие результаты. О пределах применимости уравнений Максвелла. Определение тороидальных и полоидальных электромагнитных полей. Несиловые и силовые свойства тороидальных и полоидальных электромагнитных полей. Об источниках несиловых электромагнитных полей на Земле и в космосе. Граничные условия для тороидальных несиловых и полоидальных силовых электромагнитных полей. Обобщенные уравнения электродинамики для тороидальных и полоидальных электромагнитных полей. Физическое моделирование тороидальных и полоидальных электромагнитных полей. Обобщение фундаментальной теоремы единственности разложения векторного поля Гельмгольца на тороидальные и полоидальные электромагнитные поля. Калибровочные условия Кулона и Лоренца для векторного потенциала, представленного скалярной функцией. Обобщение теорем Гаусса и Шмидта на тороидальные и полоидальные магнитные поля. Природные источники несилового магнитного и электрического поля на Земле. Проявление несилового электрического поля в краткосрочных предвестниках землетрясений. Несиловое магнитное поле в эксперименте Ааронова – Бома. О взаимной генерации несиловых и силовых магнитных полей в токамаках и ее подавлении. Несиловые переменные электромагнитные поля токов смещения в конденсаторах. Несиловые переменные магнитные поля и скин-эффект. Сверхглубинное зондирование Земли несиловым магнитным полем. Алгоритм выделения переменных несиловых электромагнитных полей из наблюдаемых данных на шаре. Алгоритм восстановления переменных тороидальных электрических токов на сфере, возбуждающих несиловые электромагнитные поля. Алгоритм расчета электродинамических параметров источника несилового магнитного поля в ядре Земли.

Доказаны 16 теорем математической геофизики: 1) О восстановлении векторного поля специального вида с помощью нормальной компоненты этого поля на регулярной поверхности (аналог теоремы Гельмгольца); 2) О пределах применимости уравнений Максвелла; 3) Теорема существования несилового ЭМП 1; 4) Теорема существования несилового ЭМП 2; 5) О силовых и несиловых ЭМП; 6) Об уравнениях геофизической электродинамики; 7) Об источниках несиловых ЭМП; 8) О разделении силовых и несиловых ЭМП в наблюдаемых данных МГГ; 9) О разделении силовых и несиловых ЭМП от источников, расположенных внутри и вне шара; 10) О воспроизведении силовых и несиловых ЭМП с помощью одной скалярной функции; 11) О взаимной генерации силовых и несиловых ЭМП; 12) О компенсации индукционного слагаемого потенциальным в полоидальном электрическом поле; 13) О калибровках Кулона и Лоренца в силовых и несиловых ЭМП; 14) О наличии несилового ЭМП в ЭМП Земли; 15) О наличии несилового ЭМП в данных МГГ 1933 г., 1957/58 гг. и всемирной магнитной съемке 1964/65 гг.; 16) О единственности разделения вихревого магнитного поля на тороидальную и полоидальную части.

3. Средствами геонформационной системы GIS-ENDDb исследована возможность модификации понятия "крипекс", повышения его информативности и применимости в работе с общедоступными каталогами. Исследуется вводимый вместо канонического крипекса ($Cr = M_S - k \cdot m_b - l$) нормированный параметр $Cr_N = 4(M_S - m_b)/(M_S + m_b)$, имеющий менее выраженную систематическую зависимость от величины магнитуды и значительно меньшую дисперсию. Пример исследования проводится для очаговой зоны Великого восточного японского землетрясения (Тохоку) в 2010–2012 гг. с собственными определениями m_b и M_S агентства ISC. На основе комплексного анализа распределения окрашенных по величине крипекса очагов землетрясений устанавливаются закономерности изменения этого параметра в пространстве, выявляя его связь с тектонической обстановкой, и времени, выявляя закономерности процессов сейсмогенеза до и после рассматриваемого сильного события. Пример землетрясения Тохоку (11 марта 2011 г., $M_S = 8.7$) подтверждает информативность нормированного крипекса, показав, что процесс релаксации очага происходит парциально, периодическими цепочками очагов, демонстрирующими по величине крипекса чередование процессов квазипластического течения и хрупкого разрушения.

4. Получена система уравнений типа Бюргерса из системы уравнений двухскоростной гидродинамики в случае, когда диссипация энергии происходит за счет коэффициента межкомпонентного трения. Исследованы вопросы корректности задачи Коши для одномерной системы на основе метода слабой аппроксимации. Получена формула решения задачи Коши для одномерной системы уравнений типа Бюргерса. Показано, что при исчезновении кинетического коэффициента трения, отвечающего за диссипацию энергии, полученные формулы переходят к известному решению задачи Коши для одномерного уравнения Бюргерса.

5. Разработан алгоритм аппроксимации таблично заданной функции на основе оператора, который описывает работу цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), хорошо известного в теории обработки цифровых сигналов. Задача вычисления сглаженной функции и ее производных разбивается на два этапа. На первом этапе решается задача сглаживания и вычисления значений полученной функции и ее производных в узлах исходной сетки. После этого вычисление скорости и ее производных в произвольной точке производится путем трикубической интерполяции.

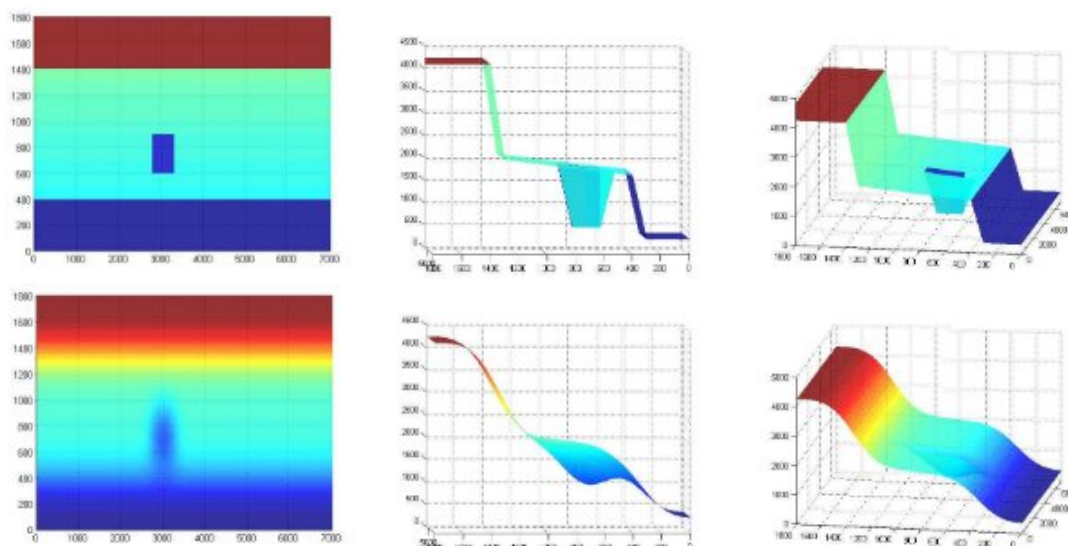


Рис. 3 – Пример применения алгоритма сглаживания: сверху – скорость до применения алгоритма; снизу – скорость после применения алгоритма

Пример применения алгоритма показан на рис. 3. Сглаженная функция, полученная с использованием данного алгоритма, использовалась для решения прямой кинематической задачи сейсмоки.

6. Рассмотрена разностная схема 2-го порядка аппроксимации для одномерных уравнений Максвелла с использованием преобразования Лагерра. В эту разностную схему вводятся дополнительные параметры, полученные путем минимизации погрешности разностной аппроксимации уравнения Гельмгольца. Значения этих оптимальных параметров не зависят от шага и числа узлов разностной схемы. Показано, что применение разложения Лагерра позволяет получить более высокую точность аппроксимации уравнений в сравнении с подобными разностными схемами при использовании разложения Фурье. Разностная схема 2-го порядка с параметрами сравнивалась с разностной схемой 4-го порядка в двух случаях. При решении задачи распространения электромагнитного импульса в неоднородной среде использование оптимальной разностной схемы дает точность решения, сравнимую с точностью решения с помощью разностной схемы 4-го порядка. При решении обратной задачи разностная схема 2-го порядка позволяет получить более высокую точность решения, чем разностная схема 4-го порядка. В рассмотренных задачах применение разностной схемы 2-го порядка с дополнительными параметрами сокращало время счета задачи на 20–25 % в сравнении с разностной схемой 4-го порядка.

7. Для численного моделирования процессов распространения сейсмических волн для трехмерно-неоднородных реалистичных моделей карбонатных резервуаров с разномасштабными неоднородностями в виде коридоров трещиноватости (кавернозно-трещиноватые резервуары) было создано научно-исследовательское параллельное программное обеспечение на основе сеток с локальным измельчением по пространству и по времени. Необходимость использования сеток с локальной адаптацией связана с огромными различиями в масштабах неоднородностей вмещающей среды (десятки и сотни метров) и микроструктуры пласта-коллектора (от долей сантиметра до первых метров). Прямолинейное применение конечно-разностных схем приводит к невозможности провести расчеты из-за огромных требований к памяти и вычислительным ресурсам. Применение мелких сеток лишь там, где это оправдано, а именно в местах скопления

мелкомасштабных неоднородностей вмещающей среды, существенно сокращает требования к вычислительным ресурсам и делает алгоритм эффективным. На основе разработанного метода было создано научно-исследовательское параллельное программное обеспечение для моделирования реалистичных моделей карбонатных резервуаров с коридорами трещиноватости. Программный продукт ориентирован на использование высокопроизводительных вычислительных систем с общей и распределенной памятью, использующий стандарты MPI2, OpenMP. Кроме того, для распараллеливания был применен новый стандарт языка Fortran – Coarray Fortran (SAF). Это современный подход к организации передачи данных, основанный на возможности всех процессов обращаться за необходимой информацией в динамические массивы, доступные для записи и считывания всем процессам одновременно. Такая возможность позволяет исключить дорогостоящие процедуры посылок/получения данных с помощью Send/Recv и повышает эффективность параллельной программы.

8. Вычислена и систематически исследована группа эквивалентности трехмерного уравнения эйконала (основной математической модели кинематической сейсмологии), уравнения акустики и других ДУ. Найдены ее дифференциальные инварианты (ДИ) и связи между ними, операторы инвариантного дифференцирования (ОИД) и их геометрический смысл. Получен методологический результат: показана эффективность применения геометрии (дифференциальной, римановой), векторного анализа и методики аналогий для решения сложных систем ДУ, определяющих ДИ и ОИД.

Ранее в двумерном случае изучены свойства группы Ли G , являющейся группой эквивалентности уравнения эйконала, волнового уравнения и других дифференциальных уравнений; получены различные приложения к математической физике и дифференциальной геометрии. Теперь исследован трехмерный аналог группы G – 10-параметрическая группа G_{10} , которая является подгруппой основной группы эквивалентности трехмерного уравнения эйконала для поля времен $u(x,y,z,t)$ в неоднородной изотропной среде с показателем преломления $n(x,y,z)=1/v(x,y,z)$, где v – скорость распространения волн (сигналов) в среде, а также трехмерного уравнения акустики и других ДУ. Уравнение эйконала является основной математической моделью кинематической сейсмологии и геометрической оптики. Вычислены дифференциальные инварианты группы G_{10} вплоть до третьего порядка и ее операторы инвариантного дифференцирования. Некоторые ДИ, геометрический смысл их и ОИД получены с помощью римановой и дифференциальной геометрии: это скалярная кривизна R риманова пространства с метрикой $dl^2=n^2(x,y,z)(dx^2+dy^2+dz^2)$ и его первый и второй дифференциальные параметры Бельтрами $\Delta_1 u$, $\Delta_2 u$. Эти величины и формулы есть трехмерные аналоги свойств группы G двумерного случая. Получено выражение величины R через другие ДИ группы G_{10} . Найти его, ДИ и ОИД группы G_{10} помогает также использование геометрических аналогий с результатами двумерного случая. Получен также методологический результат: показана эффективность применения геометрии (дифференциальной, римановой), векторного анализа и методики аналогий для решения сложных систем ДУ, определяющих ДИ и ОИД. Действительно, системы ДУ для вычисления ДИ и ОИД группы G_{10} , получаемые согласно общей теории группового анализа, являются довольно объемными и сложными. Например, система ДУ для определения ДИ 2-го порядка группы G_{10} , построенная согласно общей теории, содержит 10 уравнений с 30 независимыми переменными. Система ДУ для определения ОИД группы G_{10} , также построенная по общей теории, содержит 30 уравнений. Найти ОИД и ДИ группы G_{10} , в частности R , Δ_2 и другие ДИ второго и третьего

порядков группы G_{10} как решения соответствующих систем ДУ – непростая задача из-за их сложности. Мы находим эти решения, причем в явном виде, как трехмерные аналоги, в том числе геометрические, ДИ и ОИД группы G двумерного случая с использованием результатов двумерного случая. Проверка того, что они удовлетворяют соответствующей системе, является несложной технической (хотя и трудоемкой) задачей. При поиске ОИД важную роль играют также формулы дифференциальной геометрии для ортов Френе (нормали, бинормали) векторных линий векторного поля $\text{grad}u$.

9. Были разработаны и протестированы программы для прямого 3D моделирования в методе сопротивлений для задач вертикального электрического зондирования для случая автоматического генерирования моделей по результатам одномерной инверсии. При формировании модели была разработана технология введения геологического разлома с возможностью произвольного наклона. Реализованы быстрые алгоритмы расчета с использованием GPU и MPI технологии. Рассчитаны несколько моделей района Куйтун по автоматически построенным моделям с учетом разлома. Изучено влияние наклона разломной зоны на полученные кривые кажущегося сопротивления. Создана модель района Ештыкёль и проведены расчеты. По результатам этих работ готовится публикация совместно с геофизиками

10. Продолжены исследования на основе численного моделирования вулканических структур возможности применения виброисточников для установления изменений в живущих вулканах магматического типа. В этой связи рассмотрены две возможные модели строения вулкана Эльбрус, представленные в литературе. Проведены численные эксперименты, которые показали возможность фиксации изменений в сейсмотрассах в случае трансформирования границ магматической камеры. Проведенные численные эксперименты выполнены для моделей с резкими границами, что, вероятно, нехарактерно для магматических камер. В дальнейшем предполагается разработка алгоритмов и программ для рассмотрения более реалистичных моделей.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 18-51-41002 "Математическое моделирование термодинамически согласованной математической модели двухфазных сред в диссипативном приближении с перекрестными эффектами".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Урев М. В.

В рамках проекта за отчетный период рассмотрена переопределенная стационарная система дифференциальных уравнений двухскоростной гидродинамики с одним давлением. Для такой системы исследована краевая задача в ограниченной области с неоднородными дивергентными и краевыми условиями для двух скоростей. Получено необходимое условие разрешимости и доказано существование обобщенного решения. Доказательство использует метод ортогонального расширения, предложенный С. Г. Крейном, следуя которому в рассматриваемую нами переопределенную систему дополнительно вводится градиент скалярной функции с нулевым граничным условием. Получена обобщенная постановка этой задачи и ее дискретная аппроксимация методом конечных элементов. Решение двухскоростной системы сводится к последовательному решению двух краевых задач: задаче Стокса для одной из двух скоростей и давлению и переопределенной краевой задаче для векторного уравнения Пуассона с дивергентным ограничением. Для решения второй задачи предложен модифицированный вариант метода регуля-

ризации с использованием векторных конечных элементов Неделека на тетраэдрах. Построено фундаментальное решение для описания трехмерных стационарных течений вязких жидкостей двухскоростного континуума с одним давлением. Также рассмотрена краевая задача Дирихле для переопределенной стационарной системы двухжидкостной среды. Получены формулы для решения рассмотренных краевых задач через потенциалы двойного слоя. Показано существование классического решения задачи Дирихле для стационарной системы уравнений двухскоростной гидродинамики с одним давлением. Показано влияние кинетических и физических параметров на решение стационарной системы уравнений двухскоростной гидродинамики с одним давлением. Проведена групповая классификация одномерной системы уравнений двухскоростной гидродинамики для модели двухжидкостных сред при условии равенства давления в фазах в обратимом гидродинамическом приближении. Найдено ядро основных групп Ли преобразований одномерной системы уравнений двухскоростной гидродинамики с равновесием фаз по давлению, используя аппарат теории групп и алгебр Ли. Также выписаны все системы дифференциальных уравнений для инвариантных и частично инвариантных решений для всех неподобных подгрупп, алгебры которых входят в оптимальные системы подалгебр ядра основных алгебр Ли. В некоторых случаях найдены соответствующие решения.

Проект РФФИ № 19-01-00347а "Цифровой керн: методология построения разномасштабной модели горных пород путем проведения виртуальных физических экспериментов".

Руководитель – д.ф.-м.н. Решетова Г. В.

Во второй год выполнения проекта исследования проводились по трем запланированным направлениям исследований. Первое направление связано с изучением эффективных свойств трещиноватых флюидонасыщенных и минерализованных образцов по их цифровым изображениям с целью предсказательного моделирования геофизических полей в карбонатных резервуарах. В рамках этого направления было проведено численное исследование влияния шероховатости границ раздела слоев на эффективные упругие параметры осредненной модели. Установлены связи между шероховатостью границ, которая всегда находится вне разрешающей способности сейсмических методов, и неопределенностями в эффективной модели, что позволило существенно повысить достоверность интерпретации сейсмических данных. Был разработан алгоритм численного моделирования потенциального электрического поля в пористых материалах. Предложенный алгоритм ориентирован на проведение вычислений в существенно неоднородных моделях среды с частично насыщенными полиминеральными образцами горных пород. Параллельный программный модуль, реализованный на графических процессорах, был применен для оценки коэффициента проводимости (пласта) песчаника (Бентхайм), используя его КТ-изображения с различными разрешениями, а также для изучения процесса изменения (коэффициента) проводимости пласта карбонатных образцов при их насыщении углекислым газом CO_2 .

Второе направление связано с разработкой конечно-разностного алгоритма и созданием научно-исследовательской версии параллельного программного обеспечения для моделирования волновых процессов в насыщенных упругих пористых многофазных средах с целью моделирования зависимостей скоростей распространения и затухания сейсмических волн в насыщенных пористых образцах керна со сложной структурой порового пространства. Нами разработан метод диффузных границ для моделирования волновых полей в насыщенных упругих по-

ристых средах для случая неподвижной среды, не испытывающей предварительно напряженного состояния. Волновые процессы описываются гиперболической системой дифференциальных уравнений первого порядка, полученной на основе теории термодинамически согласованных систем законов сохранения механики сплошных сред. Определяющие уравнения записаны в терминах скорости смещения – напряжения, что позволило для их численной аппроксимации использовать эффективные конечно-разностные схемы на сдвинутых сетках высокого порядка точности. Предложенная система дает универсальный способ моделирования волновых полей в образцах породы, имеющих резкие границы раздела физических свойств с помощью единой системы определяющих уравнений и, как и модель Био, предсказывает три типа волн: быстрые и медленные волны сжатия и поперечные волны. Численные расчеты показали хорошее качественное согласие с классической теорией упругости и моделью Био.

Проект РФФИ № 18-41-543002 "Разработка математических методов и комплексов программ для построения изображений земных недр с использованием суперЭВМ".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Терехов А. В.

В проекте предложены новые спектрально-разностные алгоритмы высоких порядков точности для решения одностороннего волнового уравнения. В противоположность общепринятому подходу, вместо преобразования Фурье по времени использовано интегральное преобразование Лагерра, а для аппроксимации пространственных производных применяются конечно-разностные схемы высоких порядков точности. Интегральное преобразование Лагерра, исследованное при решении динамических задач для уравнения акустики и упругости, доказало свою эффективность. Использование преобразования Лагерра, как и преобразования Фурье по времени вместо конечных разностей, позволяет исключить из рассмотрения вопрос о согласованности (центрированности) последних. Также замена преобразования Фурье на преобразование Лагерра после аппроксимации производных по пространству приводит к хорошо обусловленным системам линейных алгебраических уравнений. Как следствие, уменьшение вычислительных затрат для решения систем линейных алгебраических уравнений позволяет предложить экономичный метод. При этом погрешность аппроксимации относительно шага сетки в направлении экстраполяции волнового поля будет иметь пятый порядок точности, тем самым существенно сократится численная дисперсия по сравнению с алгоритмами второго порядка точности. С точки зрения математического моделирования важным является то, что в рамках исследования удалось стабилизировать изначально неустойчивую модель одностороннего волнового уравнения для вещественной Паде-аппроксимации.

Дополнительно были разработаны новые алгоритмы для вычисления интегрального преобразования Лагерра на основе решения одномерно транспортного уравнения. Основная идея предлагаемого подхода состоит в том, что вычисление значений несобственных интегралов для быстро осциллирующих функции заменяется на решение методом разделения переменных начально-краевой задачи для транспортного уравнения. Такой подход позволил успешно преодолеть проблемы, связанные с численной реализацией преобразования Лагерра. Использование предлагаемой вычислительной модели было бы невозможным без разработки вспомогательных процедур, позволяющих исключить фиктивную периодичность, возникающую из-за периодических граничных условий вследствие использования преобразования Фурье. Одна

корректирующая процедура построена на основе решения транспортного уравнения, тогда как другая основана на апостериорном анализе энергии спектра Лагерра. Тестовые расчеты показали, что первый способ исключения периодичности более надежен, точнее и экономичнее, так как не требует увеличения интервала аппроксимации. Несмотря на то что предлагаемые алгоритмы не относятся к классу быстрых алгоритмов, число арифметических операций было значительно сокращено, так как нет необходимости проводить расчеты с малыми шагами сетки или реализовывать квадратурные формулы высоких порядков точности для расчета быстро осциллирующих несобственных интегралов. Дополнительно на основе решения транспортного уравнения рассмотрена идея, позволяющая сократить вычислительные затраты при выполнении преобразования Лагерра для длительных интервалов аппроксимации. Тестовые расчеты подтвердили, что все разработанные алгоритмы могут быть реализованы как с одинарной, так и с двойной вещественной точностью без потери численной устойчивости, тем самым обеспечивается эффективное использование ресурсов как CPU, так и GPU. Таким образом, в случае аппроксимации рядом Лагерра большого набора функций, например при решении задач сейсморазведки, предложенные алгоритмы позволяют значительно экономить время счета, что делает предлагаемый подход востребованным как с методической, так и с прикладной точек зрения.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Меграбов А. Г. Группа эквивалентности, дифференциальные инварианты и законы сохранения. Düsseldorf, D.: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG., 2020. 354 с. ISBN 978-620-2-51598-6.
2. Имомназаров Х. Х., Васильев Г. С., Мамасолиев Б. Ж. Математическое моделирование динамических процессов в двухжидкостной среде с одним давлением : Монография. Ташкент: Университет, 2020. 102 с. ISBN 978-9943-5603-8-3.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Мاستрюков А. Ф. Разностная схема для одномерных уравнений Максвелла // СибЖВМ. 2020. No. 1. С. 69–82. DOI: 10.15372/SJNM20200105.
2. Baishemirov Z., Tang J.-G., Imomnazarov K., Mamatqulov M. Solving the problem of two viscous incompressible fluid media in the case of constant phase saturations // Open Engin. 2020. No. 6(1). С. 742–745. DOI: 10.1515/eng-2016-0100.
3. Romenski E., Reshetova G., Peshkov I., Dumbser M. Modeling wavefields in saturated elastic porous media based on thermodynamically compatible system theory for two-phase solid-fluid mixtures // Comput. and Fluids. 2020. No. 206. 104587. DOI: 10.1016/j.compfluid.2020.104587.
4. Romenski E., Reshetova G., I. Peshkov. Thermodynamically compatible model for wavefields simulation in deformed porous medium saturated by a compressible viscous fluid // J. of Phys.: Conf. Series, Lavrentyev Readings on Mathematics, Mechanics and Physics, Vol. 1666(2020), 012044, Novosibirsk, Sept. 7–11, 2020. doi:10.1088/1742-6596/1666/1/012044.
5. Меграбов А. Г. О дифференциальных инвариантах группы эквивалентности уравнения и их геометрическом смысле // IOP Conf. Series: Lavrentyev Readings on Mathematics, Mechanics and Physics, Vol. 1666(2020), 012044, Novosibirsk, Sept. 7–11, 2020. DOI:10.1088/1742-6596/1666/1/012035.

6. Sharapov V. N., Tomilenko A. A., Kuznetsov G. V., Perepechko Y. V., Sorokin K. E., Mikhcheeva, A.V., Semenov Y. I. Mechanisms of partial melting of metasomatised mantle ultramafic rocks beneath the Avacha volcano (Kamchatka) and growth of minerals from gas phase in fractures // *Petrology*, 2020. Vol. 28. No. 6. P. 650–672. DOI: 10.31857/S0869590320050064.

7. Sapetina A. F., Glinskiy B. M., Martynov V. N. Numerical modeling results for vibroseismic monitoring of volcanic structures with different shape of the magma chamber // *J. of Phys.: Conf. Series*. Vol. 1715, Intern. conf. "Marchuk Scientific Readings 2020" (MSR-2020), dedicated to the 95th anniversary of the birthday of RAS Academician G. I. Marchuk, Novosibirsk, Oct. 19–23, 2020. 1715 (2021) 012057 IOP Publ. doi: 10.1088/1742-6596/1715/1/012057.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Imomnazarov B. Kh., Khaydarov I. Q., Imomnazarov Kh. Kh. On one thermodynamically consistent model of clay shale swelling // *Math. Notes of NEFU*. 2020. Vol. 27, iss. 2. P. 93–104. DOI: <https://doi.org/10.25587/SVFU.2020.43.24.006>.

2. Reshetova G. Virtual digital core by 3D CT images // *Soc. of Petroleum Engin. SPE Russian Petroleum Technology conf. 2019. RPTC 2019, 2020*. DOI: 10.2118/196870-ru.

3. Reshetova G., Anchugov A., Pozdnyakov V. Reconstruction of the acoustic emission events in a core sample by time reversal mirror // *European Association of Geoscientists & Engineers. Conf. proc. Saint Petersburg, Nov. 16–19, 2020. Vol. 2020. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202053097>*.

4. Mikhaylov I., Glinskikh V., Nikitenko M., Surodina I. Electromagnetic sounding with a toroidal source in vertical and deviated oil wells: Numerical simulation // *Conf. Proc. 82nd EAGE Annual Conf. & Exhib. Workshop Programme, Dec 2020. Vol. 2020. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.202011426*.

5. Галактионова А. А., Белоносов А. С. Алгоритм решения прямой кинематической задачи сейсмоки в трехмерных неоднородных изотропных средах // *Матем. заметки СВФУ*. 2020. Т. 27, № 1. С. 53–68. DOI: 10.25587/SVFU.2020.12.61.004.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Imomnazarov Sh., Mikhailov A. The Laguerre spectral method for solving dynamic problems in porous media // *Bull. NCC, Ser.: Math. Model. in Geophys.* 2020. V. 22. P. 1–10.

2. Хачкова Т. С., Лисица В. В., Колюхин Д. Р., Решетова Г. В. Численная оценка влияния шероховатых границ на упругие параметры слоистой среды // *Выч. мет. и программир.* 2020. Т. 21, № 3. С. 225–240. DOI: 10.26089/NumMet.v21r320.

3. Хачкова Т. С., Лисица В. В., Решетова Г. В., Чеверда В. А. Численная оценка удельного электрического сопротивления горных пород по их цифровым изображениям с использованием графических со-процессоров // *Выч. мет. и программир.* 2020. Т. 21, № 3. С. 306–318. DOI: 10.26089/NumMet.v21r326.

4. Решетова Г. В. Оценка разрешающей способности метода обращения времени при восстановлении событий акустической эмиссии в образцах керна // *Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология : материалы конференции в рамках 16-й Международной науч-*

ной конференции "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 20–24 апр. 2020 г. С. 579–589. DOI: 10.18303/B978-5-4262-0102-6-2020-063.

5. Хачкова Т. С., Лисица В. В., Колюхин Д. Р., Решетова Г. В., Базайкин Я. В. Геостатистическая многомасштабная оценка упругих параметров горной породы по ее цифровым изображениям // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск, РИЦ НГУ, 2020. С. 177. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-103010.

6. G. Reshetova, E. Romenski. Diffuse interface approach for the modeling of wavefields in saturated porous medium // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск, РИЦ НГУ, 2020. С. 64–65. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10114.

7. Решетова Г. В. Оценка разрешающей способности метода обращения времени при восстановлении событий акустической эмиссии в образцах керна // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология : материалы конференции в рамках 16-й Международной научной конференции "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 20–24 апр. 2020 г. С. 579–589. DOI: 10.18303/B978-5-4262-0102-6-2020-063.

8. Роменский Е. И., Решетова Г. В. Термодинамически согласованная модель течения сжимаемой жидкости в деформируемой пористой среде и ее применение к расчету волновых полей // Тез. 9-й Междунар. конф. "Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике", посвящ. 120-летию акад. М. А. Лаврентьева, Новосибирск, 7–11 сентября 2020 г. С. 17.

9. Максимов М. А., Суродина И. В. Трехмерное моделирование и инверсия данных разновысотной магнитной разведки с учетом рельефа // Геофиз. технol. 2019. № 2. С. 4–11. DOI: 10.18303/2619–1563–2019–2–4 (не вошла в отчет за 2019-й год).

10. Суродина И. В. Математическое моделирование показаний зонда с тороидальными катушками. Анизотропный случай среды // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск, РИЦ НГУ, 2020. С. 68.

11. Максимов М. А., Суродина И. В. Анализ чувствительности задачи разновысотной магниторазведки при использовании программно-алгоритмического обеспечения геомагнитной томографии // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология : материалы конференции в рамках 16-й Международной научной конференции "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 20–24 апр. 2020 г. С. 479–485.

12. Михайлов И. В., Глинских В. Н., Никитенко М. Н., Суродина И. В. Численное моделирование сигналов тороидального источника для задач промысловой геофизики // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология : материалы конференции в рамках 16-й Международной научной конференции "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 20–24 апр. 2020 г. С. 493–505.

13. Суродина И. В., Михайлов И. В., Глинских В. Н. Математическое моделирование сигналов тороидального источника в трехмерных изотропных моделях геологических сред // *Естеств. и техн. науки*. 2020. № 12(150). С. 131–134.
14. Аксенов В. В. Пятнадцать теорем математической геофизики. Формулировки, доказательства, ссылки на публикации // *Наука России: Цели и задачи : сб. статей по материалам 20-й Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 2*. 2020. С. 56–70. DOI: 10.18411/sr-10-04-2020-28.
15. Меграбов А. Г. О дифференциальных инвариантах группы эквивалентности уравнения и их геометрическом смысле // *Тез. 9-й Междунар. конф. "Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике"*, посвящ. 120-летию акад. М. А. Лаврентьева, Новосибирск, 7–11 сентября 2020 г. С. 55–56.
16. Mikheeva A. V., Kalinnikov I. I. Creepex-analysis by the GIS-ENDDB tools of processes in large earthquakes focal zones on the Tohoku example // *Bull. NCC. Ser.: Math. Model. in Geophys.* 2020. V. 22. P. 11–21.
17. Mikheeva A. V. A deep model of the multi-ring structures formation in the Earth relief // *Bull. NCC. Ser.: Math. Model. in Geophys.* 2020. V. 22. P. 33–39.
18. Михеева А. В. Глубинная модель образования многокольцевых структур в рельефе Земли // *Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск, РИЦ НГУ, 2020. С. 63. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10113.
19. Михеева А. В. Корреляционный анализ пространственных аномалий вычисленных и измеренных полей в системе GIS-ENDDB // *Рос. сейсмол. журн.* 2020. Т. 2. № 1. С. 103–112. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.1.10.
20. Сапетина А. Ф., Глинский Б. М., Мартынов В. Н. Результаты численного моделирования вибросейсмического просвечивания вулканических структур при подъеме магмы // *Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск, РИЦ НГУ, 2020. С. 65.
21. Подколотный Н. Л., Твердохлеб Н. Н., Подколотная О. А. Компьютерное моделирование влияния циркадных часов на воспалительную реакцию на бактериальную инфекцию // *Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск, РИЦ НГУ, 2020. С. 166. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10366.
22. Кобало Н. С., Куликов А. И., Титов И. И., Воробьев Д. Г. Компьютерная идентификация альтернативного сплайсинга мобильных интронов группы II // *Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск, РИЦ НГУ, 2020. С. 163.
23. Куликов А. И. Размещение двух многоугольников в многоугольнике при параллельном переносе // *Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука*, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск, РИЦ НГУ, 2020. С. 30.
24. Аксёнов В. В. О единственности разделения вихревых магнитных полей, создаваемых сферическими тороидальными токами, на тороидальную и полоидальную части // *Марчуков-*

ские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск, РИЦ НГУ, 2020. С. 56.

25. Аксёнов В. В. Электродинамика несиловых электромагнитных полей // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск, РИЦ НГУ, 2020. С. 56.

Прочие

1. Aksenov V. V. Non-force electromagnetic fields // Intern. J. of Phys. Research and Appl. 2020. No. 3. P. 20–45. DOI:10.29328/journal.ijpra.1001021.

2. Aksenov V. V. Non-force electromagnetic fields in nature and experiments on earth: Part 2 // Intern. J. of Phys. Research and Appl. 2020. No. 3. P. 75–114. DOI:1029328/journal.ijpra.1001026.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2020", Академгородок, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. – 10 докладов (Решетова Г. В., Аксёнов В. В., Куликов А. И., Подколотный Н. Л., Мартынов В. Н., Михеева А. В., Суродина И. В.).

2. 16-я Международная научная конференция "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология" в рамках 16-й Международной научной конференции "Интерэкспо ГЕО-Сибирь" Новосибирск, 20–24 апреля 2020 г. – 4 доклада (Решетова Г. В., Суродина И. В.).

3. 9-я Международная конференция "Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике", посвященная 120-летию акад. М. А. Лаврентьева, Новосибирск, 7–11 сентября 2020 г. – 2 доклада (Решетова Г. В., Меграбов А. Г.).

4. 20-я Международная научно-практическая конференция "Наука России: Цели и задачи", Екатеринбург, 10 апреля 2020 г. – 1 доклад (Аксёнов В. В.).

5. 9-я Международная геолого-геофизическая конференция "Геонауки: трансформируем знания в ресурсы", Санкт-Петербург, 16–19 ноября 2020 г. – 1 доклад (Решетова Г. В.).

6. EAGE Annual Conference & Exhibition Workshop, Dec. 2020 – 1 доклад (Суродина И. В.).

7. The 12th International multiconference "Bioinformatics of genome regulation and structure/systems biology" (BGRS/SB-2020), Novosibirsk, July 6–10, 2020 – 1 приглашенный доклад (Подколотный Н. Л.).

8. Международная научная конференция "Современные проблемы дифференциальных уравнений и смежных разделов математики", Фергана (Узбекистан), 12–13 марта 2020 г. – 1 доклад (Имомназаров Х. Х.).

9. Республиканская научная конференция с участием зарубежных ученых "Современные методы математической физики и их приложения", Ташкент (Узбекистан), 17–18 ноября 2020 г. – 4 доклада (Имомназаров Х. Х., Урев М. В., Васильев Г. С.).

10. 9-я Международная конференция по математическому моделированию, посвященная 75-летию со дня рождения проф. В. Н. Врагова, г. Якутск, 27 июля – 1 августа 2020 г. – 2 доклада (Урев М. В., Имомназаров Х. Х.).

11. The Uzbekistan – Malaysia international online conference, Tashkent (Uzbekistan), August 24–25, 2020 – 3 доклада (Урев М. В., Имомназаров Х. Х.).

12. Республиканская конференция "Актуальные проблемы математического моделирования, вычислительной математики и программной инженерии", Карши (Узбекистан), 23–24 октября 2020 г. – 1 доклад (Имомназаров Х. Х.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Суродина И. В. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2020", Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

2. Мартынов В. Н. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2020", Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

3. Подколотный Н. Л.:

– член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2020", Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.;

– член организационного комитета "The 12th International Multiconference "Bioinformatics of genome regulation and structure/systems biology" (BGRS/SB-2020), Novosibirsk, July 6–10, 2020.

4. Имомназаров Х. Х.:

– член программного комитета Международной конференции "Современные проблемы дифференциальных уравнений и смежных разделов математики", Фергана (Узбекистан), 12–13 марта 2020 г.;

– член программного комитета Республиканской конференции "Актуальные проблемы математического моделирования, вычислительной математики и программной инженерии", Карши (Узбекистан), 23–24 октября 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Монографий, глав в монографиях – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 7

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 12

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 40

Докладов на конференциях – 31, в том числе 4 пленарных

Членов организационных или программных комитетов конференций – 6

Кадровый состав

1. Имомназаров Х. Х. – зав. лаб., г.н.с. д.ф.-м.н.

2. Аксенов В. В. – г.н.с. д.ф.-м.н.

3. Белоносов А. С. – с.н.с. к.ф.-м.н.

4. Галактионова А. А. – м.н.с.

5. Кабанихина Е. С. – инж.

6. Куликов А. И. – ведущ. программист

7. Мартынов В. Н. – с.н.с.

8. Матрюков А. Ф. – с.н.с. к.ф.-м.н.

9. Меграбов А. Г. – в.н.с. д.ф.-м.н.

10. Михайлов А. А. – н.с. к.ф.-м.н.

11. Михеева А. В. – н.с. к.ф.-м.н.

12. Подколотный Н. Л. – с.н.с.

13. Решетова Г. В. – г.н.с. д.ф.-м.н.
 14. Суролина И. В. – с.н.с. к.ф.-м.н.
 15. Терехов А. В. – с.н.с. д.ф.-м.н.
 16. Урев М. В. – в.н.с. д.ф.-м.н.
 17. Шерстюгина Л. П. – техник 1-й катег.
- Галактионова А. А. – молодой научный сотрудник.

Педагогическая деятельность

1. Аксенов В. В. – проф. СибУПК
2. Белоносов А. С. – доц. ММФ НГУ
3. Меграбов А. Г. – проф. НГТУ
4. Михеева А. В. – доц. ВКИ НГУ
5. Подколотный Н. Л. – ст. преподаватель НГУ
6. Урев М. В. – доц. НГУ, профессор СибАГС
7. Терехов А. В. – доц. НГТУ

Руководство студентами

- Койнов В. В. – 1-й год магистратуры ММФ НГУ, руководитель Решетова Г. В.
Головчан А. Е. – магистрант, 5-й курс НГТУ, руководитель Терехов А. В.
Махмасоатов М. Г. – 2-й год магистратуры ММФ НГУ, руководитель Имомназаров Х. Х.

Руководство аспирантами

- Кобало Н. С. – 3-й год, ИВМиМГ, руководитель Имомназаров Х. Х.

Награды

1. Суролина И. В. – диплом лауреата 1-й степени в 26-м Международном конкурсе научно-исследовательских работ за работу "Трехмерное моделирование сигналов электромагнитного зонда с тороидальными катушками".
2. Решетова Г. В. – 2-е место в 25-м Международном конкурсе научных работ РосНаука по направлению "Научные статьи по наукам о Земле и космологии" за статью "Цифровой керн: моделирование акустической эмиссии в целях локализации ее источников методом обращения волнового поля в обратном времени".

ЛАБОРАТОРИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Шишленин М. А.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ "Алгоритмы определения акустических и упругих параметров сложных след по площадным системам наблюдений на основе прямой линейной обработки данных".

Номер государственной регистрации НИР № 18-31-00409.

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Новиков Н. С.

В ходе работы над проектом проведен сравнительный анализ методов восстановления скорости распространения акустических волн в среде на основе метода оптимального управления и метода Гельфанда – Левитана – Марченко.

Проект РФФИ № 18-31-20019 "Прямые и обратные задачи социальных процессов: теория, алгоритмы и комплексы программ"

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Криворотько О. И.

В проекте разработаны и проанализированы алгоритмы численного решения прямых и обратных задач для систем дифференциальных уравнений, описывающих

- 1) процессы распространения информации в социальных сетях,
- 2) эпидемии социально значимых заболеваний в регионах Российской Федерации,
- 3) движения ценных бумаг.

Коэффициенты уравнений, исследуемых в проекте, характеризуют особенности исследуемых процессов. Для составления оптимального плана мероприятий по распространению и контролю процессов 1) – 3) построены и исследованы алгоритмы решения обратных задач, состоящих в идентификации неизвестных параметров математических моделей по дополнительной информации о процессе в фиксированные моменты времени. Рассматриваемые обратные задачи некорректны (решение может быть неединственным и/или неустойчивым), поэтому была разработана численная регуляризация решения таких задач, основанная на методе регуляризации Тихонова, добавления априорной информации для уточнения множества решений, а также применения подхода мултистарта для итерационного поиска решения. Разработаны алгоритмы численного решения обратных задач на основе комбинации стохастических и градиентных методов с целью повышения точности решения, а также итерационные алгоритмы, основанные на поэтапном определении коэффициентов и уровня корреляции процессов, для решения совмещенных постановок обратных задач для коррелирующих социальных процессов. Проведен анализ идентифицируемости и чувствительности математических моделей социальных процессов и получены условия корректности исследуемых обратных задач, которые являются важнейшим априорным этапом исследования обратных задач для построения алгоритма регуляризации и, с другой стороны, обязательным апостериорным этапом анализа влияния уровня зашумленности данных на решение обратной задачи. В результате выполнения проекта построены адекватные математические модели социальных процессов с учетом влияния экономических и эпидемиологических факторов, экономичные алгоритмы численного статистического моделирования для реализации созданных моделей, соответствующий программный инструментарий для супер-

компьютеров. Разработан комплекс программ численного решения прямых и обратных задач для математических моделей социальных процессов, проведена их визуализация с использованием трехмерной программной системы и составлена карта прогнозов эпидемий социально значимых заболеваний, таких как туберкулез, ВИЧ, COVID-19, и распространения информации в социальных сетях Twitter, Reddit.

Результаты работ по научно-исследовательским программам, проектам Президиума РАН, ОМН РАН

Программа Президиума РАН, подпроект № 0315-2019-0005 "Методы создания, исследования и идентификации математических моделей с помощью суперкомпьютеров".

Руководитель – д.ф.-м.н., член-корр. РАН Кабанихин С. И.

Проведено исследование многомерных аналогов уравнений Гельфанда – Левитана – Крейна – Марченко. В частности, предложен новый аналог двумерного уравнения Гельфанда – Левитана – Крейна для решения задачи определения акустической жесткости среды в случае, когда данные получены с помощью площадной системы наблюдений.

Результаты работ по проектам РНФ

Грант РНФ 19-11-00154 "Создание принципиально новых математических моделей акустической томографии в медицине. Численные методы, высокопроизводительные вычисления и комплексы программ".

Руководитель – д.ф.-м.н. Шишленин М. А.

В ходе работы над проектом решена задача определения коэффициентов системы уравнений акустики, основанной на законах сохранения. Исследованы и улучшены различные аспекты эффективности подходов, основанных на минимизации функционала невязки. Реализованы численные алгоритмы одновременного определения плотности и скорости среды в случае двух пространственных переменных.

Грант РНФ 20-71-00128 "Создание новых алгоритмов идентификации параметров геофизических моделей на основе прямых методов обработки данных".

Руководитель – к.ф.-м.н. Новиков Н. С.

В ходе работы над проектом рассмотрена задача определения потенциала волнового уравнения в случае двух пространственных переменных и отсутствия сингулярной составляющей в источнике зондирующего импульса. Предложен алгоритм сведения данной задачи к системе линейных интегральных уравнений первого рода. Предложен численный алгоритм решения полученной системы. Также сформулирован прямой метод определения двух коэффициентов уравнения акустики в случае, когда скорость распространения волн изменяется только с глубиной.

Грант РНФ 18-71-10044 "Суперкомпьютерный анализ социальных, эпидемиологических и экономических процессов. Теория, алгоритмы и комплекс программ".

Руководитель: к.ф.-м.н. Криворотько О. И.

Разработка и анализ математических моделей распространения коронавирусной инфекции COVID-19 в регионах РФ

Исследованы и адаптированы для регионов Российской Федерации (Москва, Новосибирская обл.) математические модели распространения новой коронавирусной инфекции COVID-19, основанные на камерном (закон действующих масс) и агентном моделировании (случайные графы). Проведен анализ идентифицируемости математических моделей, в результате которого выявлено необходимое количество статистических данных для однозначного определения неизвестных параметров моделей (параметр контагиозности вируса, смертность, вероятность госпитализации, начальное количество бессимптомных больных и т. п.). Показана возможность прогнозирования распространения COVID-19 в Новосибирской обл. с 29 октября по 15 декабря 2020 г. по данным за 7,5 предыдущих месяцев, а именно: количество ежедневно выявленных случаев при отсутствии резких изменений (снятие или отмена ограничений, праздники, сезонные эпидемии ОРВИ) составит примерно 200 человек в день к середине декабря 2020 г., а динамика смертельных случаев в ноябре и декабре будет сохраняться (рис. 1).

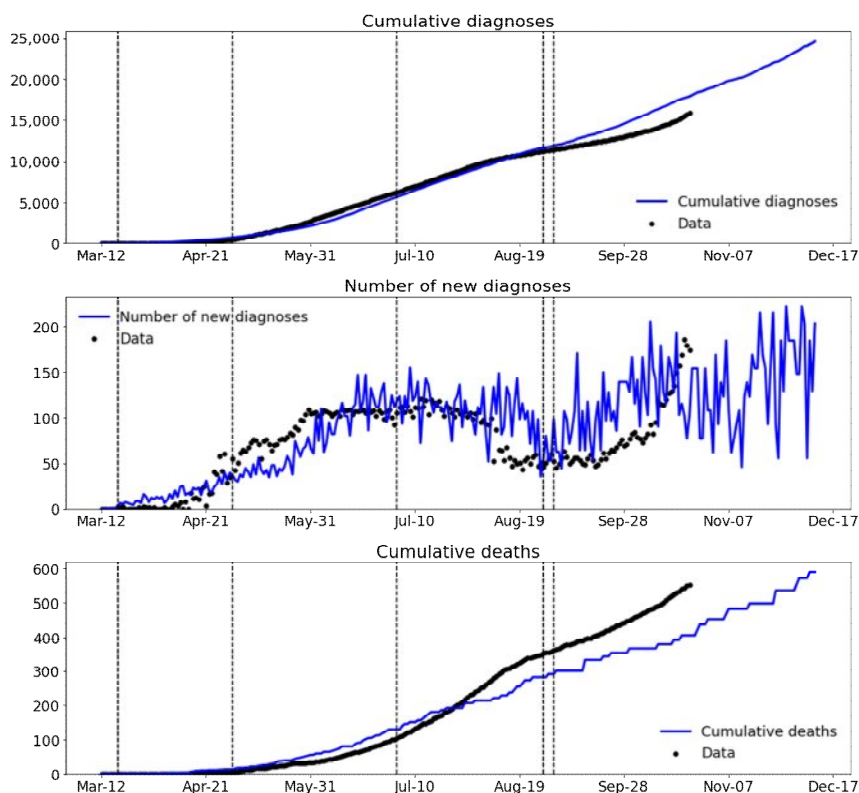


Рис. 1 – Результаты моделирования (синяя линия) с 10.03.2020 по 28.10.2020 и прогнозирования (до 15.12.2020) количества выявленных (сверху – кумулятивно, посередине – ежедневные) и смертельных случаев (снизу) с учетом мер, введенных в Новосибирской обл. (пунктирные линии); черные точки – статистические данные

Анализ социально-экономических характеристик методами машинного обучения для построения прогноза рецессий экономики США

Проведен количественный анализ социально-экономических характеристик, набор которых характерен в предкризисные периоды рыночной экономики. Методами машинного обучения построен индикатор прогноза наступления рецессии экономики США в течение следующих 6,

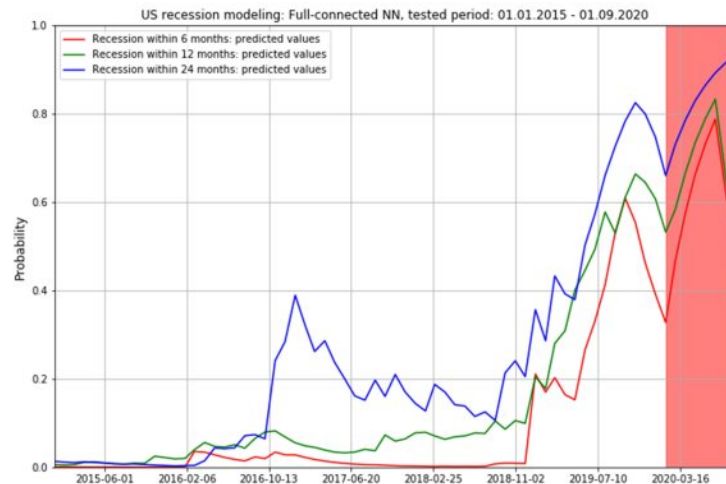


Рис. 2 – Вероятность начала рецессии в США в течение следующих 6 мес. (красная линия); 12 мес. (зеленая линия); 24 мес. (синяя линия); период текущей рецессии (начиная с 02.2020) обозначен красной полосой

12 и 24 месяцев. Показано, что наименьшая ошибка прогнозирования наступления будущих рецессий получена с помощью полносвязной нейронной сети. Также показано (рис. 2), что в сентябре 2019 г. за 5 месяцев до официальной даты начала рецессии экономики США в период пандемии COVID-19 (февраль 2020 г.) значения данных индикаторов одновременно стали больше 0.5, что давало возможность инвесторам заблаговременно снизить долю рискованных активов в своем портфеле, а соответствующим организациям выработать план управления возможной рецессией. Стоит отметить, что для прогнозирования рецессий периода 2010–2020 гг. полносвязная нейронная сеть обучалась на данных с 1955 по 2010 гг., а прогнозы были построены без знания информации о том, что в феврале 2020 г. наступит рецессия.

Анализ градиентных методов решения задачи об источнике для диффузионно-логистической модели, описывающей распространение информации в онлайн социальных сетях

Разработаны алгоритмы регуляризации решения обратной задачи для математической модели, описывающей распространение информации в социальных сетях. Исследуемая обратная задача для диффузионно-логистической модели сводилась к задаче минимизации квадратичного целевого функционала. Для решения задач выпуклой оптимизации были реализованы следующие методы:

- метод градиентного спуска (МГС) с параметром спуска 10^{-3} ;
- многоуровневый градиентный метод (МГМ), который является модификацией МГС, что позволяет значительно увеличить скорость сходимости;
- комбинированный метод, который состоит в последовательном применении стохастического метода глобальной оптимизации роя частиц (МРЧ) и метода первого порядка Нелдера – Мида (МНМ).

Получено явное выражение градиента целевого функционала для исследуемой обратной задачи, связанное с решением соответствующей сопряженной задачи.

Для градиентных методов рассмотрены два варианта выбора начального приближения: решение обратной задачи, полученное с помощью МРЧ, и нулевое начальное приближение. Ана-

лиз результатов применения комбинации методов показал, что МГМ дает решение с заданной точностью более чем в 100 раз быстрее МГС. При нулевом начальном приближении методы работают в несколько раз дольше, но достигают большей точности. А комбинированный метод дает даже более точный результат (до 10 %), чем МГМ. Однако для вычислений комбинированным методом требуется в 10 раз больше времени. Таким образом, результаты численных расчетов на модельных данных показали эффективность алгоритма МГМ для решения многопараметрических задач оптимизации.

Прочие гранты

Грант Президента РФ МК-814.2019.1

Руководитель – к.ф.-м.н. Криворотко О.И.

Создан комплекс программ на супер-ЭВМ для построения, уточнения и анализа математических моделей эпидемиологии и социальных сетей с дальнейшим прогнозированием на основе методов машинного обучения (полносвязные нейронные сети, метод опорных векторов и др.). Получены оценки условной устойчивости решения задач об источнике для диффузионно-логистической модели, отличающиеся между собой типом дополнительной информации.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Romanyukha A. A., Karkach A. S., Borisov S. E., Belilovsky E. M., Sannikova T. E., Krivorotko O. I. Small-scale stable clusters of elevated tuberculosis incidence in Moscow, 2000–2015. Discovery and spatiotemporal analysis // Intern. J. of Infect. Diseases. 2020. Vol. 91. P. 156–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2019.11.015>.
2. S. Kabanikhin, O. Krivorotko, A. Takuadina, D. Andornaya, S. Zhang. Geo-information system of tuberculosis spread based on inversion and prediction. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. 2020. Vol/ 29, iss. 1. P. 65–79. DOI: 10.1515/jiip-2020-0022.
3. Kabanikhin S. I., Krivorotko O. I., Bektemessov M. A., Bektemessov Zh. M., Zhang Sh. Differential evolution algorithm of solving an inverse problem for the spatial Solow mathematical model // J. Inverse and Ill-Posed Probl. 2020. Vol. 28, iss. 5. P. 761–774. (WoS Q2, Scopus Q3) DOI: 10.1515/jiip-2020-0108.
4. Krivorotko O., Kabanikhin S., Zhang Sh., Kashtanova V. Global and local optimization in identification of parabolic systems // J. Inverse and Ill-Posed Probl. 2020. Vol. 28, iss. 6. P. 899–913. DOI: 10.1515/jiip-2020-0083.
5. Lukyanenko D. V., Prigorniy I. V., Shishlenin M. A. Some features of solving an inverse backward problem for a generalized Burgers' equation // J. Inverse and Ill-Posed Probl. 2020. Vol. 28, iss. 5. P. 641–649. DOI: 10.1515/jiip-2020-0078.
6. Kabanikhin S. I., Klyuchinskiy D. V., Novikov N. S., Shishlenin M. A. Numerics of acoustical 2D tomography based on the conservation laws // J. Inverse and Ill-Posed Probl. 2020. Vol. 28, iss. 2. P. 287–297. DOI: 10.1515/jiip-2019-0061.
7. Kalmenov, T.S., Kabanikhin, S.I., Les, A. The Sommerfeld problem and inverse problem for the Helmholtz equation. Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. 2020. Vol. 29, iss. 1.

8. Li T., Kabanikhin S., Nakamura G., Wang F., Xu D. An inverse problem of triple-thickness parameters determination for thermal protective clothing with Stephan – Boltzmann interface conditions // *J. Inverse and Ill-Posed Probl.* 2020. Vol. 28, iss. 3. P. 411–424. DOI: 10.1515/jiip-2019-0060.

9. Krivorotko O. I., Andornaya D. V., Kabanikhin S. I. Sensitivity analysis and practical identifiability of some mathematical models in biology // *J. Appl. and Indust. Math.* 2020. V. 14, iss. 1. P. 115–130. DOI: 10.1134/S1990478920010123.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Klyuchinskiy D., Novikov N., Shishlenin M. A Modification of gradient descent method for solving coefficient inverse problem for acoustics equations // *Computation.* 2020. No. 8, iss. 3: 73. DOI: 10.3390/computation8030073.

2. Kabanikhin S. I., Kulikov I. M., Shishlenin M. A. An algorithm for recovering the characteristics of the initial state of supernova // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2020. No. 60, iss. 6. P. 1008–1016. DOI: 10.1134/S0965542520060135.

3. Kabanikhin S. I., Krivorotko O. I. Optimization methods for solving inverse immunology and epidemiology problems // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2020. V. 60, iss. 4. P. 580–589. DOI: 10.1134/S0965542520040107.

4. Kabanikhin S. I., Krivorotko O. I. Mathematical modeling of the Wuhan COVID-2019 epidemic and inverse problems // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2020. V. 60, iss. 11. P. 1889–11899. DOI: 10.31857/S004446692011006X.

5. Kabanikhin S. I. Inverse problems of natural science // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2020. Vol. 60, iss. 6. P. 911–914. DOI: 10.1134/S0965542520060044.

6. Krivorotko O. I., Kabanikhin S. I., Zyatkov N. Yu., Prikhodko A. Yu., Prokhoshin N. M., Shishlenin M. A. Mathematical modeling and forecasting of COVID-19 in Moscow and Novosibirsk region // *Num. Analysis and Appl.* 2020. V. 13, iss. 4. P. 332–348. DOI: 10.15372/SJNM20200404.

Участие в конференциях и совещаниях

1. "Dynamics in Siberia", Новосибирск, 24–29 февраля 2020 г. – 1 доклад (Криворотко О. И.).

2. Всероссийская научная конференция "Геофизика и геология первой четверти XXI века", посвященная 70-летию акад. М. И. Эпова, 19 марта 2020 г. – 1 пленарный доклад (Кабанихин С. И.).

3. BGRS/SB-2020: 12th International multiconference "Bioinformatics of genome regulation and structure/systems biology", July 6–10, 2020, Novosibirsk – 8 докладов, из них 1 пленарный, 7 приглашенных) (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Криворотко О. И., Новиков Н. С., Зятков Н. Ю., Приходько А. Ю.).

4. 12-я Международная школа молодых ученых "Системная биология и биоинформатика", Ялта – Севастополь, 14–20 сентября 2020 г. – 1 доклад (Криворотко О. И.).

5. Online series of conferences of applied math, Beijing (China), July 30, 2020 – 1 пленарный доклад (Кабанихин С. И.).

6. "Информация, оптимизация и управление", Сочи, 23–29 августа 2020 г. – 1 пленарный доклад (Кабанихин С. И.).

7. Всероссийская научно-практическая интернет-конференция с международным участием "Молекулярная диагностика и биобезопасность – 2020" – 1 доклад (Криворотько О. И.).
8. "Inverse Problems and AI", S.A.I.ence-2020 conference, November 14–15, 2020 – 1 пленарный доклад (Кабанихин С. И.).
9. 12-я Международная молодежная научная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Novosibirsk, 4–12 октября 2020 г. – 7 докладов, из них 3 пленарных) (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Криворотько О. И., Новиков Н. С., Зятьков Н. Ю., Приходько А. Ю.).
10. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020", посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. – 6 докладов из них 1 пленарный, 1 приглашенный (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Криворотько О. И., Новиков Н. С., Зятьков Н. Ю., Приходько А. Ю.).
11. Российско-Казахстанский математический симпозиум "Избранные вопросы фундаментальной и прикладной математики" 19 сентября 2020 г. – 1 пленарный доклад (Шишленин М. А.).
12. International conference "Quasilinear equations, inverse problems and their applications", November 30 – December 2, 2020 – 2 пленарных доклада (Кабанихин С. И., Шишленин М. А.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Кабанихин С. И.:
 - член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.,
 - член программного комитета Международной конференции "Quasilinear equations, inverse problems and their applications", 30 ноября – 2 декабря 2020 г.,
 - председатель программного комитета 12-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г.,
 - председатель организационного комитета 12-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г.
 - сопредседатель программного symposium "Mathematical Problems of Covid-19" в рамках BGRS/SB-2020: 12th International multiconference "Bioinformatics of genome regulation and structure/systems biology", Novosibirsk, July 6–10, 2020,
 - сопредседатель организационного комитета Symposium "Mathematical Problems of Covid-19" в рамках BGRS/SB-2020: 12th International Multiconference "Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology", Novosibirsk, July 6–10, 2020;
2. Шишленин М. А.:
 - член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука,

– заместитель председателя организационного комитета 12-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г.,

– заместитель председателя программного комитета 12-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г.,

– член программного комитета symposium "Mathematical Problems of Covid-19" в рамках BGRS/SB-2020: 12th International multiconference "Bioinformatics of genome regulation and structure/systems biology", Novosibirsk, July 6–10, 2020,

– член организационного комитета symposium "Mathematical Problems of Covid-19" в рамках BGRS/SB-2020: 12th International multiconference "Bioinformatics of genome regulation and structure/systems biology", Novosibirsk, July 6–10, 2020;

3. Криворотько О. И.:

– заместитель председателя организационного комитета 12-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г.,

– заместитель председателя программного комитета 12-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г.;

Новиков Н. С. – член организационного комитета 12-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г.;

Зятьков Н. Ю. – член организационного комитета 12-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г.;

4. Приходько А. Ю.:

– ученый секретарь BGRS/SB-2020: 12th International Multiconference "Bioinformatics of genome regulation and structure/systems biology", Novosibirsk, 6–10 July, 2020,

– член организационного комитета 12-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–12 октября 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 9

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 15

Докладов на конференциях – 31, в том числе пленарных – 12

Участников программных и организационных комитетов конференций – 17

Кадровый состав

1. Шишленин М. А.	зав. лаб.	д.ф.-м.н.
2. Зятьков Н. Ю.	м.н.с.	к.т.н.
3. Кабанихин С. И.	г.н.с.	д.ф.-м.н.

- | | | |
|----------------------|----------------|-----------|
| 4. Криворотько О. И. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 5. Новиков Н. С. | м.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 6. Приходько А. Ю. | техник | |
| 7. Юдина О. А. | ведущ. инженер | |
- Зятьков Н. Ю., Криворотько О. И., Новиков Н. С. – молодые научные сотрудники

Педагогическая деятельность

- | | |
|-------------------|---|
| Кабанихин С. И. | – заведующий кафедрой ММФ НГУ |
| Шишленин М. А. | – доцент ММФ НГУ |
| Новиков Н. С. | – ст. препод. НГУ, ст. препод. СУНЦ НГУ |
| Криворотько О. И. | – ст. препод. НГУ |

Руководство студентами

Ануфриенко Е. А. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководители: Кабанихин С. И., Криворотько О. И.

- | | |
|------------------|---|
| Лю Шуан | – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И. |
| Звонарева Т. А. | – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И. |
| Жаркова Е. И. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И. |
| Корченко Г. С. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И. |
| Неверов А. В. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И. |
| Нестерова А. В. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И. |
| Сосновская М. И. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И. |
| Приходько А. Ю. | – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А. |
| Безгачев М. В. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А. |
| Савченко Н. А. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А. |
| Козлов И. А. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А. |
| Харченко Д. С. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А. |
| Воробьев М. С. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А. |
| Сурнин П. С. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А. |
| Савчиц Н. М. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А. |
| Уфимцева А. М. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А. |
| Ахметов Д. М. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А. |

Руководство аспирантами

Андорная Д. В. – 3-й год, НГУ, руководители: Кабанихин С. И., Криворотько О. И.

Защита дипломов

- | | |
|------------------|---|
| Ануфриенко Е. А. | – магистр ММФ НГУ, руководители: Кабанихин С. И., Криворотько О. И. |
| Лю Шуан | – магистр ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И. |

Награды

Криворотько О. И. – премия мэрии города Новосибирска в сфере науки и инноваций, номинация "Лучший молодой исследователь в организациях науки". За разработку карты прогноза распространения социально значимых заболеваний в городе Новосибирске.

ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Гусяков В. К.

Важнейшие достижения

Распределение годовых максимумов высот цунами в Мировом океане по типам источников

Д.ф.-м.н. Гусяков В. К.

Все существующие службы предупреждения о цунами ориентированы исключительно на прогноз цунами сейсмического происхождения, составляющих порядка 75 % от всех случаев цунами, зарегистрированных в Мировом океане за исторический период наблюдений (более 4000 лет). Между тем анализ содержания глобального каталога наблюдений цунами за инструментальный период (последние 120 лет) показывает, что среди годовых максимумов высот волн около 36 % (т. е. более одной трети) составляют цунами несейсмического происхождения (вулканогенные, обвальные и метеорологические). В частности, обвальные цунами ответственны за 90 % максимальных (более 50 м) наблюдавшихся высот. В некоторых районах, таких как, например, восточное побережье США, Желтое море, Адриатическое море, западное побережье Австралии, метеорологические цунами наблюдаются намного чаще, чем сейсмогенные и являются основным источником ущерба. Анализ инструментального каталога показывает, что для обеспечения безопасности населения и снижения ущерба возможности служб оперативного прогноза цунами должны быть расширены путем создания средств и методов прогноза цунами несейсмического происхождения.

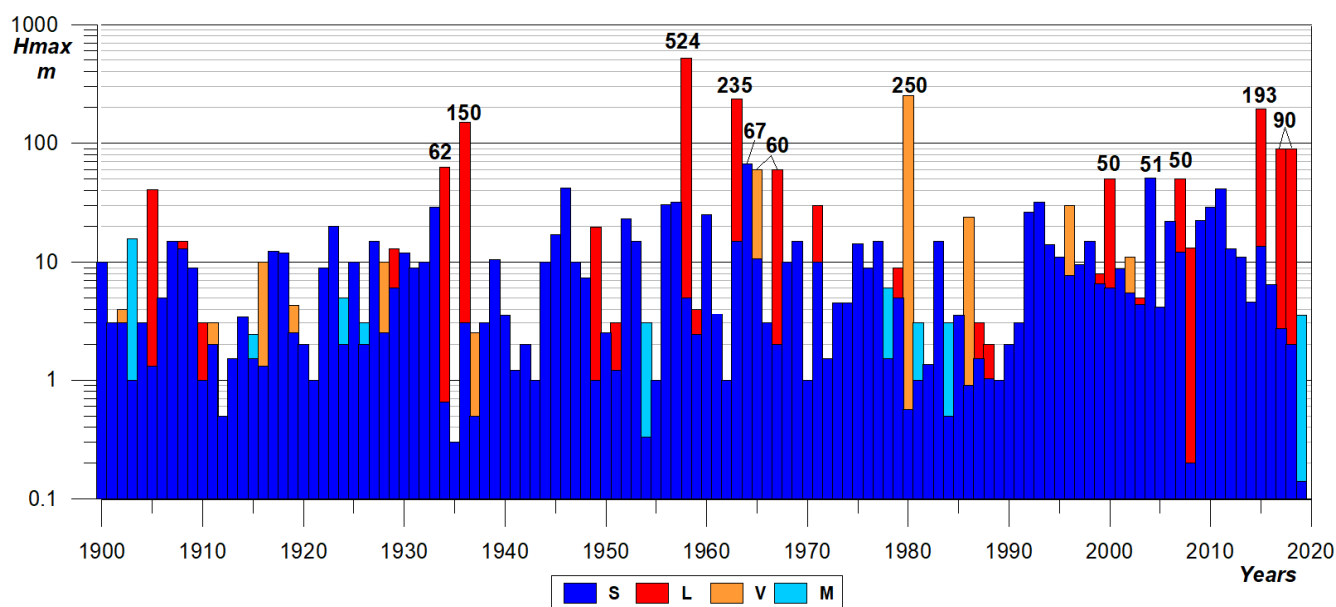


Рис. 1 – Распределение годовых максимумов высот цунами, наблюдавшихся в Мировом океане за инструментальный период (с 1900 по 2019 гг.); цветом показан тип источника цунами:

S – сейсмогенные, L – обвальные, V – вулканогенные, M – метеорологические;

для высот, превышающих 50 м, показаны точные значения (м)

Результаты исследований опубликованы в работе

Gusiakov V. K. Global occurrence of large tsunamis and tsunami-like waves within the last 120 years (1900–2019) // Pure Appl. Geophys. 2020. Vol. 177. P. 1261–1266. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02437-9>.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

В рамках выполнения базового задания по созданию новых методов расчета высот цунами у берега проведено исследование вопросов, связанных с энергией волн цунами. В частности, с помощью численного моделирования изучена направленность излучения волновой энергии эллипсовидным очагом. Получена зависимость распределения волновой энергии по секторам от соотношения длин осей источника. Результаты исследования направлены в виде статьи в журнал "Вестник НГУ. Серия: информационные технологии". В сотрудничестве с Институтом автоматизации и электрометрии СО РАН проведено сравнительное тестирование разностных схем МакКормака, реализованных с применением программируемых пользователем вентильных матриц (Field Programmable Gates Array (FPGA)) и схемы расчета цунами на основе расщепления, используемой в пакете MOST (Method of Splitting of Tsunami). Реализован численный расчет распространения волны цунами на последовательности сгущающихся сеток с применением аппаратного ускорителя на базе FPGA, что дает инструмент для быстрого и детального моделирования распространения цунами от очага до берега. Пример такого расчета приведен на рис. 2. Гидродинамические параметры передаются из области в подобласть через граничные условия. Расчетный шаг по пространству уменьшался от примерно 280 м в исходной расчетной области до 8 м в прибрежной области, включающей акваторию порта Онахама на восточном побережье Японии. Применение платы FPGA позволило сократить время расчета примерно в 200 раз по сравнению со стандартным персональным компьютером.

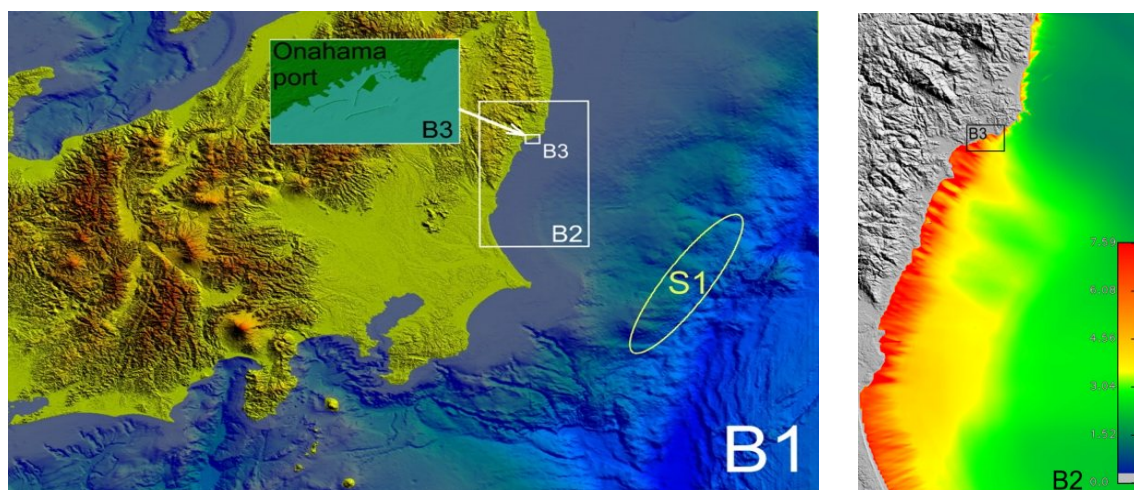


Рис. 2 – Расположение очага цунами и вложенных подобластей при моделировании цунами на последовательности сгущающихся сеток (B1). Распределение максимумов вычисленной высоты цунами вдоль побережья японских префектур Ибараки и Фукусима (B2)

В рамках выполнения базового задания разработан алгоритм вычисления распространения волны цунами на основе представления первоначальной формы волны цунами в виде компози-

ции из единичных модельных источников. Алгоритм реализован в виде программного модуля, встроенного в программный комплекс восстановления начальной формы волны цунами по измерениям колебаний уровня свободной поверхности, обусловленных пришедшей волной в серии удаленных приемников. Использование этого программного модуля позволяет оперативно решать задачу восстановления источника цунами не пересчитывая матрицу системы при изменении области очага цунами, что занимает основное время расчетов. Если область очага цунами известна, то искомая функция источника цунами представляется в виде конечного ряда Фурье по пространственным гармоникам. Задача восстановления источника цунами по удаленным записям колебаний водной поверхности относится к классу некорректных задач, для ее решения применяется метод τ -решения, основанный на усечении сингулярного разложения (SVD) компактного оператора. Регуляризация оператора в этом случае осуществляется путем сужения оператора на подпространство, являющееся линейной оболочкой его первых правых сингулярных векторов. Единственности численного решения не существует, поэтому результат инверсии сильно зависит от выбора основных параметров метода: количества правых сингулярных векторов, образующих базис в пространстве решения, количества пространственных гармоник, используемых в представлении неизвестной функции источника цунами и пространственного распределения глубоководных станций наблюдения. Разработана новая методология выбора оптимальных значений основных параметров инверсии, найден новый подход к дизайну системы наблюдения, состоящей из глубоководных регистраторов, основанный на анализе распространения энергии цунами.

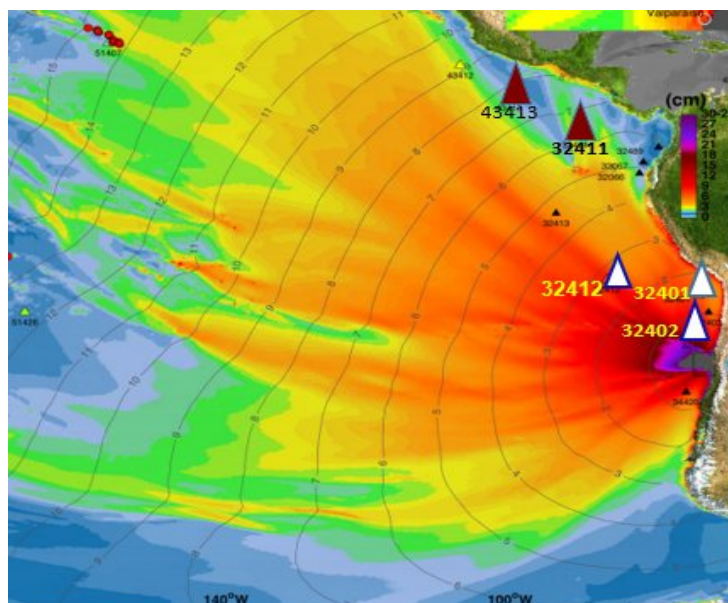


Рис. 3 – Распространения энергии с учетом топографии морского дна для Иллапель цунами 16.09.2015 в Чили. Треугольными маркерами обозначена система наблюдения, состоящая из глубоководных регистраторов цунами DART (Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis): 32401, 32402, 32412, 32411, 43413. Наиболее информативная часть системы наблюдения, обозначенная белыми треугольными маркерами, тесно связана с направлениями наиболее интенсивного распространения энергии цунами

В рамках направления по созданию новых алгоритмов и программ численного моделирования цунами в лаборатории начата работа над развитием методов расчета распространения цу-

нами на адаптивных сетках. Адаптивность в данном случае означает сгущение сеточных узлов вблизи берега. Требуемые алгоритмы найдены и адаптированы для соответствия поставленным требованиям. Пример построенной адаптивной сетки для плоского линейно-наклонного дна, со сгущением узлов по направлению к берегу (левая граница области) приведен на рис. 4. Размеры модельной области, для которой строилась сетка, по длине и ширине 600×600 км, возмущение – эллипс в центре области с главными осями по 100 и 50 км. Глубина меняется линейно от 0.01 км до 4 км.

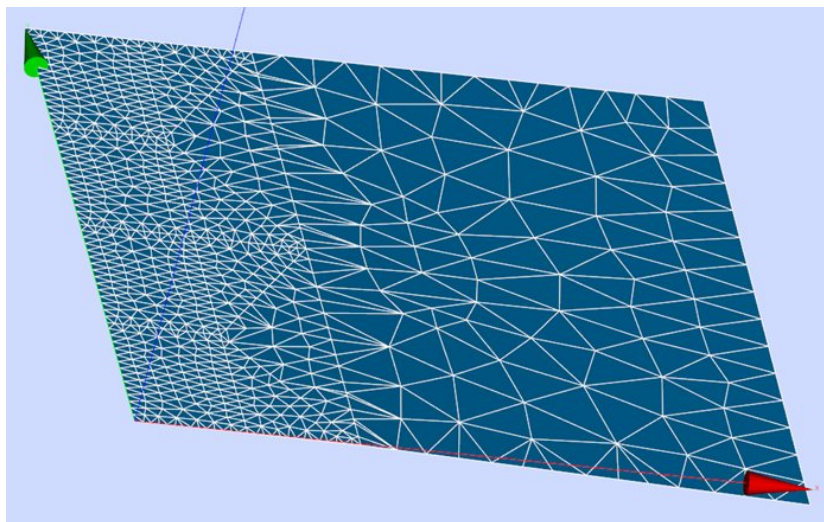


Рис. 4 – Пример построения адаптивной треугольной сетки для плоского линейно-наклонного дна с возмущением в форме эллипса в центральной части расчетной области

В рамках темы, связанной с исследованием процесса распространения волны цунами в океане с заданным рельефом дна, рассматривалось описывающее этот процесс двумерное уравнение эйконала. В результате построен алгоритм, позволяющий по известному решению уравнения (из некоторого множества) строить новое решение того же уравнения (с той же правой частью). Результатом работы стала работа, представленная в журнал СибЖВМ.

На основе анализа содержания поддерживаемой в лаборатории ММВЦ глобальной базы данных наблюдений цунами за инструментальный период наблюдений (1901–2020) получены оценки распределения цунамигенных событий по типам источников (сейсмогенные, вулкано-генные, обвальные, метеорологические). Показано, что имеются обширные районы побережья Мирового океана, где основную опасность представляют цунами несейсмического происхождения, в частности обвальные и метеорологические, прогноз которых не обеспечивается существующими службами предупреждения о цунами. В состав Глобальной базы данных по наблюдениям цунами введено более 150 неизвестных ранее случаев метеоцунами.

В состав аналитической подсистемы графической оболочки PDM/TSU (Parametric Data Manager/TSUnami), созданной в лаборатории ММВЦ для поддержки Глобальной базы данных по проблеме цунами, введено новое приложение для визуализации и анализа максимальных высот цунами от событий различного генезиса (сейсмогенных, оползневых, вулкано-генных и метеорологических). Приложение позволяет выбирать максимальные годовые высоты цунами различного генезиса для заданного региона и временного интервала (рис. 5). На основе таких выборок можно делать заключения о преобладающем типе цунамигенных источников в том или

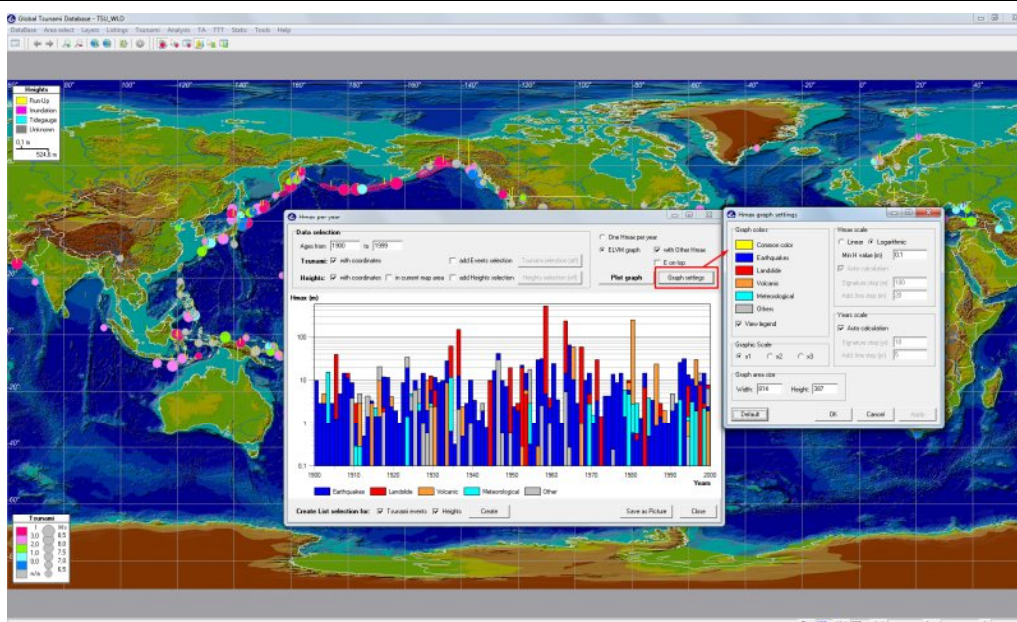


Рис. 5 – Пример работы с новым приложением, обеспечивающим быструю выборку максимальных высот цунами от очагов различного генезиса, встроенным в аналитическую подсистему графической оболочки PDM/TSU

ином регионе Мирового океана. Также в составе аналитического блока оболочки PDM/TSU создано приложение, позволяющее получать оценки долговременной цунамиопасности заданного участка побережья на основе вероятностного анализа наблюдаемых высот цунами. Пример работы этого приложения показан на рис. 6. Дальнейшее развитие аналитической подсистемы и подсистемы моделирования графической оболочки PDM/TSU постепенно превращает ее в информационно-экспертную систему для поддержки исследований по проблеме цунами, разработки методов оперативного прогноза цунами и получения оценок долгосрочной цунамиопасности побережья.

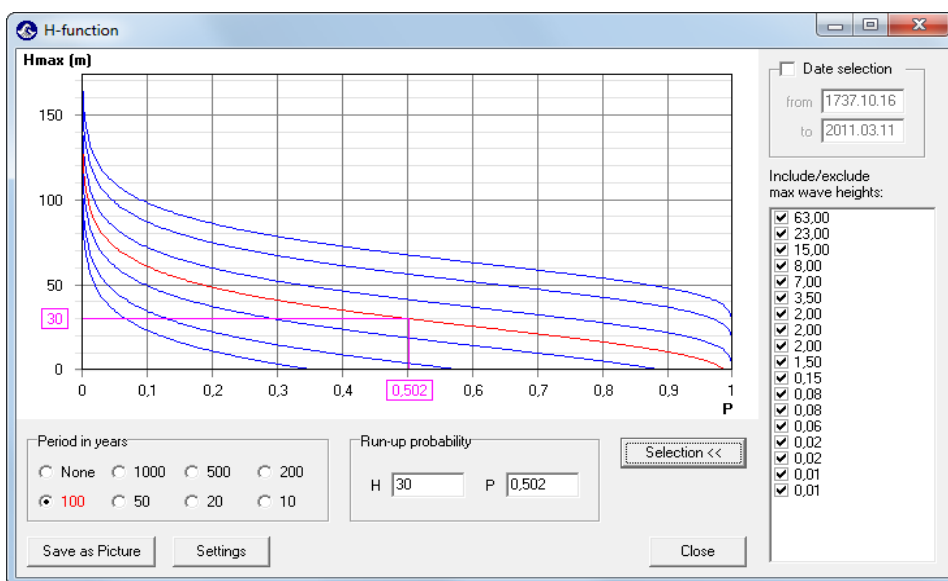


Рис. 6 – Пример вероятностного расчета цунамиопасности для района г. Северо-Курильска (о-в Парамушир) на основе анализа данных о наблюдаемых и измеренных заплесках цунами, показывающий вероятность 0.502 превышения высоты заплеска 30 м в течении 100 лет

В рамках поддержки Экспертной базы данных (БД) по импактным структурам Земли EDEIS (Expert Database on the Earth Impact Structures) (<https://tsun.sssc.ru/nh/impact.php>) продолжалась работа по ее дальнейшему пополнению и верификации. По состоянию на декабрь 2020 г. БД содержит данные о 1189 импактных структурах (23 – падение крупных метеоритов, метеоритные поля, 202 – достоверные, 202 – предполагаемые, 507 – возможные, 120 – сомнительные, 135 – опровергнутые), 4116 фотографий, 1010 текстовых описания, 1825 ссылок. За 2020 г. добавлено 14 новых структур, 81 фото, 40 текстов, 24 ссылки, уточнены параметры 20 структур. Объем базы данных 625 МБ.

В рамках разработки приложения PDM/IMP, предназначенного для поддержки базы данных по импактным структурам Земли EDEIS (среда разработки Visual studio, C#) создан блок визуализации на цифровой карте региона (контурной или рельефной) с выбором области на карте мышкой или вводом числовых значений (рис. 7). В зависимости от выбранной области данные о контурах подстраиваются до необходимой детализации. Реализована функция вывода всплывающих подсказок при наведении курсора на объект (импактную структуру). Блок вкладок Settings позволяет настроить вид картинки: выбирать размеры и цвета для событий, палитры или заливку одним цветом рельефа суши или океана (палитры можно создавать и подстраивать интерактивно), менять шрифты, параметры географической сетки, цвет и толщину линий.

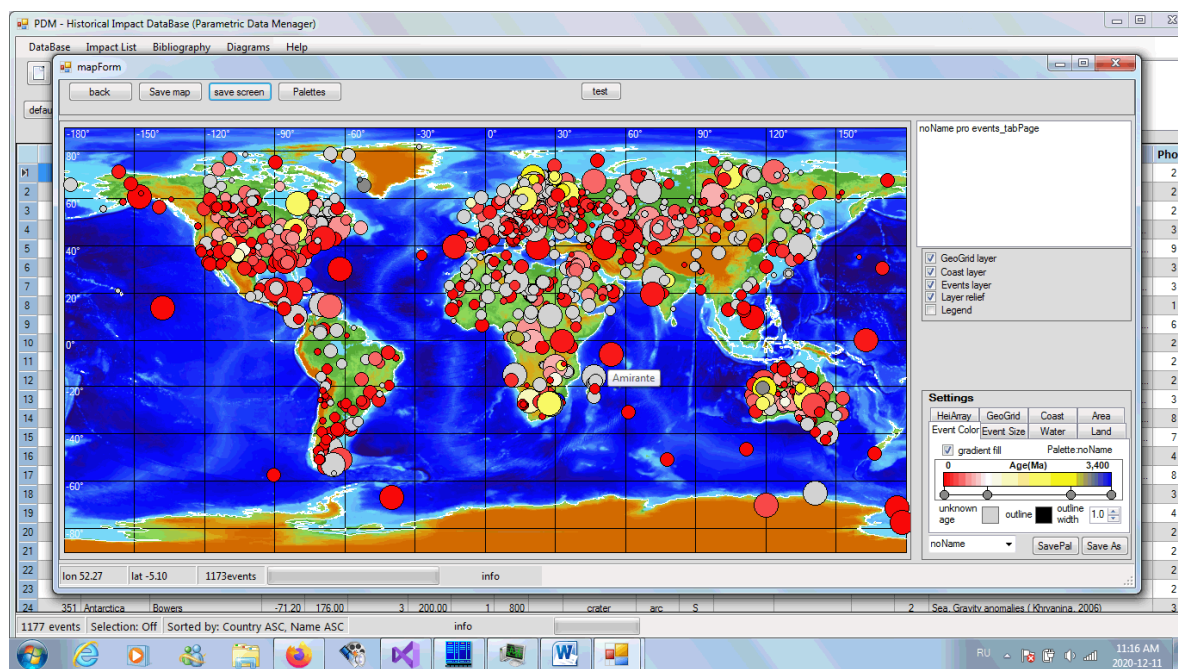


Рис. 7 – Пример визуализации содержания Экспертной базы импактных структур Земли – карта расположения импактных кратеров с указанием их возраста (градиацией по цвету) и диаметра (масштабированием по размеру символов)

Продолжалась работа по поддержке и дальнейшему развитию веб-версии Глобальной базы данных по проблеме цунами, поддерживаемой лабораторией в составе сайта "Веб-энциклопедия по природным катастрофам" (<http://tsun.sssc.ru/nh/>). Обновлен программный код и база событий, исправлены ошибки в представлении наблюдений высот цунами. Поддерживаемая лабораторией глобальная база наблюдений цунами охватывает исторический период более 4000 лет (с 2000 г. до н.э. по 2020 г.), содержит более 2450 цунамигенных событий и на между-

народном уровне является единственной альтернативой глобальной базе данных, поддерживаемой Национальным центром данных по геофизике в Боулдере (США).

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных WoS

1. Gusiakov V. K. Meteotsunamis on global scale: problems of event identification, parameterization and cataloguing // Natural Hazards. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04230-2>.
2. Gusiakov V. K. Global occurrence of large tsunamis and tsunami-like waves within the last 120 years (1900–2019) // Pure Appl. Geophys. 2020. Vol. 177. P. 1261–1266. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02437-9>.
3. Lavrentiev M., Marchuk An., Oblaukhov K., Romanenko A. Comparative testing of MOST and Mac-Cormack numerical schemes to calculate tsunami wave propagation // J. of Phys.: Conf. Ser. Vol. 1666. 2020. Lavrentyev Readings on Mathematics, Mechanics and Physics, Novosibirsk, Sept. 7–11, 2020. doi:10.1088/1742-6596/1666/1/012028.
4. Марчук Ан. Г., Москаленский Е. Д. Семейство решений двумерного уравнения эйконала // СибЖВМ. 2020. Т. 23, № 2. С. 155–164. DOI: 10.15372/SJNM20200204.
5. Hayashi K., Vazhenin A., Marchuk An. Distributed nested streamed models of tsunami waves // Intern. J. Comput. Scie. and Engin. 2020. V. 23, iss. 2. P. 124–135. DOI: 10.1504/IJCSE.2020.110531.
6. Lavrentiev M. M., Lysakov K. F., Marchuk An. G., Oblaukhov K. K., Shadrin M. Yu. FPGA based tsunami wave propagation calculator // J. Phys.: Conf. Ser. Proc. of the 9th Intern. conf. on engineering mathematics and physics, Istanbul (Turkey), July 1–4, 2020. doi:10.1088/issn.1742-6596.

Издания, включенные в реферативную базу данных РИНЦ

1. Marchuk An. G. The variation approach for travel-time calculations on regular grids // Bull. NCC, Ser.: Math. Modeling in Geophys. 2020. Vol. 22. P. 23–32.
2. Марчук Ан. Г. Волновая энергия цунами // Вестн. НГУ. Сер.: Информ. технол. 2020. Т. 18, № 4. С. 39–53. DOI:10.25205/1818-7900-2020-18-4-39-53.
3. Гусяков В. К., Сергеев В. А. К сертификации шкал измерений для опасных природных процессов // Науч. аспект. 2020, № 4. С. 3–11.

Доклады на конференциях

1. 2-я Всероссийская научная конференция "Волны цунами: моделирование, мониторинг, прогноз", Москва, 16–17 ноября 2020 г. – 1 приглашенный доклад (Гусяков В. К.).
2. 2-я Всероссийская научная конференция "Волны цунами: моделирование, мониторинг, прогноз", Москва, 16–17 ноября 2020 г. – 1 приглашенный доклад (Гусяков В. К.).
3. The 9th International conference on engineering mathematics and physics, Istanbul (Turkey), July 1–4, 2020 – 1 доклад (Марчук Ан. Г.).
4. The Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast, October 5–14, 2020 – 2 доклада (Марчук Ан. Г.).
5. "Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике", Новосибирск, 7–11 сентября 2020 г. – 1 доклад (Марчук Ан. Г.).

6. 12-я Международная молодежная научная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 4–11 октября 2020 г. – 1 приглашенный доклад (Марчук Ан. Г.).

7. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. – 3 доклада (Марчук Ан. Г., Воронина Т. А.).

8. Национальный суперкомпьютерный форум, Переславль-Залесский, 24–27 ноября 2020 г. – 1 доклад (Марчук Ан. Г.).

9. 2-я Всероссийская научная конференция "Волны цунами: моделирование, мониторинг, прогноз", Москва, 16–17 ноября 2020 г. – 1 доклад (Воронина Т. А.).

Итоговые данные по лаборатории

Публикации, индексируемые в базе данных Web of Science – 6

Публикации, индексируемые в базе данных РИНЦ – 9

Докладов на конференциях 12, в том числе 3 пленарных

Кадровый состав лаборатории

1.	Гусяков В. К.	зав. лаб.	д.ф.-м.н.
2.	Марчук Ан. Г.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
3.	Воронина Т. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
4.	Амелин И. И.	н.с.	к.ф.-м.н.
5.	Горшунов В.С.	м.н.с	
6.	Сергеев В. А.	м.н.с. 0.5 ст.	
7.	Москаленский Е. Д.	м.н.с. 0.5 ст.	
8.	Лысковская Е. В.	инженер 1-й кат.	
9.	Калашникова Т. В.	ведущ. инженер	
10.	Ляпидевская З. А.	ведущ. программист, 0.5 ст.	
11.	Зиновьев П. С.	инженер 1-й кат.	

Педагогическая деятельность

Руководство студентами

Патрушев В. А. – бакалавр НГУ, руководитель Марчук Ан. Г.

ЛАБОРАТОРИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАТИКИ

Зав. лабораторией д.т.н. Ковалевский В. В.

Важнейшие достижения**Новое аналитическое решение уравнения Клейна – Гордона в задачах анализа сейсмогравитационных процессов**

Д.ф.-м.н. Фатьянов А. Г., чл.-корр. РАН Собисевич А. Л.

Наблюдаемые экспериментально длиннопериодные (сейсмогравитационные или "упруго-гравитационные") волновые возмущения на этапах формирования очаговых структур и непосредственного развития крупных сейсмических событий до сих пор не получили исчерпывающего объяснения. Особый интерес представляют результаты, полученные региональными сетями сейсмологических наблюдений, которые позволили выделить практически "мгновенные" упруго-гравитационные возмущения, предвещающие вступление Р-волн в точку наблюдения. Однако для классических упругих сред никакого сигнала, предшествующего прямым Р-волнам, быть не может. Получено новое аналитическое решение уравнения Клейна – Гордона, представляющее собой совокупность "мгновенного" сейсмогравитационного возмущения (рис. 1, $t = 0$) и упруго-гравитационного процесса, распространяющегося со скоростью сейсмических Р-волн. Обсерваторские наблюдения вариаций различных геофизических полей на этапах подготовки и развития крупных сейсмических событий дают основание полагать, что сейсмогравитационное возмущение зачастую предшествует Р-волнам. Таким образом, практическая значимость результата состоит в выявлении краткосрочного прогностического признака окончательного формирования очаговых структур сильнейших землетрясений. Результат получен совместно ИВМиМГ СО РАН и ИФЗ РАН.

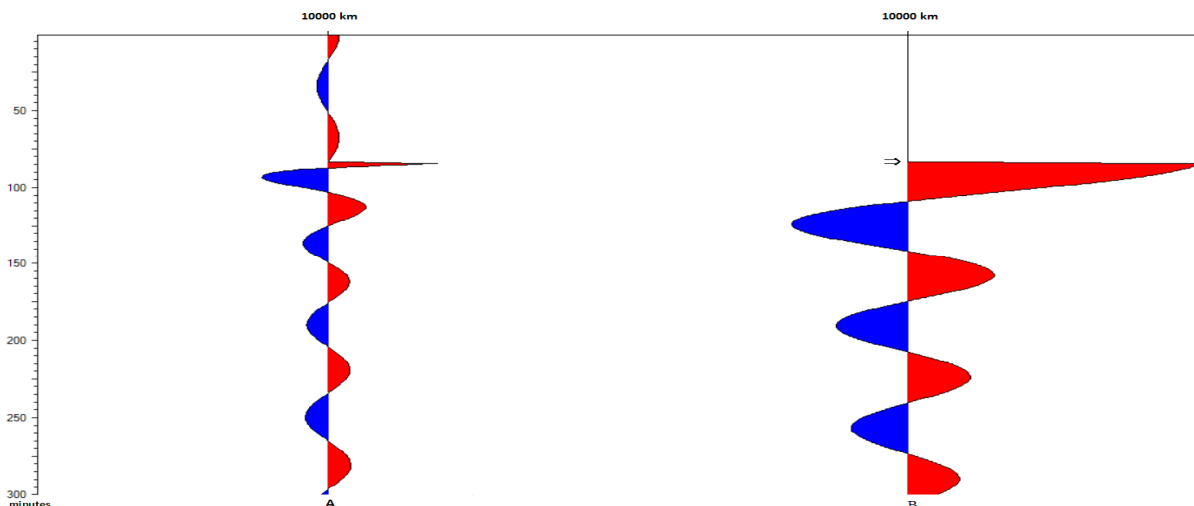


Рис. 1 – Полное сейсмогравитационное поле в резонансной зоне (слева) и волновое поле для среды без гравитации (справа) на расстоянии 10 000 км от эпицентра; стрелкой обозначен момент прихода Р-волны; по оси ординат – время (возрастает вниз)

Результаты исследований опубликованы в работе

Собисевич Л. Е., Собисевич А. Л., Фатьянов А. Г. Длиннопериодные сейсмогравитационные процессы в литосфере. М.: ИФЗ РАН, 2020. 228с. ISBN 978-5-91682-050-8.

Результаты исследований представлены на конференции

Собисевич Л. Е., Фатьянов А. Г. Аналитический анализ длиннопериодных сейсмогравитационных процессов. Новые вызовы в сейсмологии. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020". Пленарный доклад. 19-23 октября 2020 г., Новосибирск, Россия.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершенным в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Математическое моделирование, численные методы и высокопроизводительные информационно-вычислительные технологии для решения задач активной сейсмологии и дистанционного зондирования Земли".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2019-0003.

Руководители: д.т.н. Ковалевский В. В., д.т.н. Пяткин В. П.

Раздел 1. Актуализация базы данных вибросейсмических исследований Байкальской рифтовой зоны и прилегающих районов Монголии, Алтае-Саянского региона, Таманской грязевулканической провинции и Приэльбрусья. Совершенствование программного обеспечения, включая веб-ориентированное, для моделирования и обработки данных мониторинга и верификации моделей строения земной коры в сейсмоопасных зонах. Разработка многофакторной модели взаимодействия сопряженных полей. Разработка рекомендаций по предупреждению геоэкологических рисков техногенного и природного характера. Развитие методов интеграции знаний и обмена информацией по активной сейсмологии как внутри интернет-портала, так и в пространстве Сети.

Этап 2020 г.

Создан структурированный архив вибрационных сейсмограмм, зарегистрированных в ходе экспериментов с использованием виброисточников ЦВО-100 и СВ-10 в разломных зонах БРЗ, Северной Моголии, Таманской грязе-вулканической провинции и Приэльбрусья. Проведена предварительная обработка и валидация данных, созданы структурированные архивы корреляционных сейсмограмм. Данные, полученные в результате полевых и вычислительных экспериментов, включены в ИВС "Вибрационное просвечивание Земли". Выделены особенности спектрального состава вибрационного сигнала, амплитудного затухания с расстоянием и временем.

Выполнено численное моделирование волновых полей в задаче вибросейсмического мониторинга Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) с использованием реалистичной скоростной модели земной коры в регионе. С целью изучения влияния воздействия неоднородностей в геолого-геофизической модели (области с повышенными или пониженными значениями упругих параметров уравнений динамической теории упругости) проведена работа по модификации вычислительных программ для многоядерных систем. Реализована возможность задания геометрии такой области с выбором изменения значений параметров по сравнению с заданными в модели упругой среды. Проведена серия вычислительных экспериментов по моделированию полного сейсмического поля от точечного источника для двухмерных моделей БРЗ с учетом различного положения области изменения параметров с использованием разработанных параллельных алгоритмов и программ на кластере. По результатам проведенных экспериментов получен набор теоретических сейсмограмм выбранной расстановки профиля наблюдения, а также набор снимков волнового поля с характерной картиной упругих волн различной природы.

Проведена специальная обработка теоретических сейсмограмм (редуцирование, определение параметров поляризации (наклон главной оси эллипсоида и коэффициент эллиптичности) в условной плоскости) для извлечения полезной и отличительной информации о влиянии области изменения параметров на общую картину сейсмического поля. По результатам моделирования и обработки наибольшее влияние на волновое поле оказывает неоднородность, которая была расположена относительно близко к дневной поверхности. Ее влияние было отмечено на расстояниях более 60 км. Неоднородности, расположенные в моделях на большей глубине, оказали не столь значительное влияние.

Разработан алгоритм обработки сейсмических сигналов для исследования сейсмической анизотропии Байкальской рифтовой зоны по данным вибросейсмического мониторинга с использованием виброисточника ЦВО-100. Было обработано более 200 трехкомпонентных вибрационных сейсмограмм, зарегистрированных сейсмостанцией Тырган (TIG) за период с 2004 по 2019 год. На первом этапе с целью повышения качества сейсмотрасс удалялись импульсные помехи до корреляционной свертки и производилось синхронное суммирование близких по времени сеансов после свертки. Также для повышения точности измерений была увеличена частота дискретизации сейсмотрасс методом интерполяции. На втором этапе определялись поляризационные параметры сейсмических волн (направление главной оси и линейность эллипсоида) и времена вступления продольных и поперечных волн. Времена определялись по максимуму огибающей по Гильберту. Все необходимые для данного алгоритма процедуры введены в состав программного комплекса V12.

Получена новая асимптотика функций Бесселя, позволяющая получить устойчивое аналитическое решение для волновых полей в шаре планетарных размеров. Это дает возможность проводить исследования волновых полей с высокой детальностью. Новая асимптотика имеет наглядный физический смысл в терминах однородных и неоднородных волн в шаре. Кроме того, она подтверждает предположение Аки и Ричардса "о более приемлемом значении для пространственной частоты для шара". Аналитическое решение задачи для распространения волн в шаре получено с использованием потенциалов продольных и поперечных волн. В данной работе представление получено в виде, позволяющем непосредственно свести векторные уравнения движения (в спектральной области) к классическим уравнениям Бесселя, что существенно упрощает нахождение аналитического решения.

В рамках фундаментальной проблемы взаимодействия "вибрационное поле – среда" выполнен анализ данных вибрационного зондирования части разломных зон в Новосибирской области. Искомые данные рассматриваются в качестве модельных, позволяющих изучать обобщенные процессы вариаций динамики волновых форм при распространении в разломных зонах. По результатам анализа получены количественные характеристики волновых форм, отражающие динамику их поглощения, а также вариабельность спектрально-временных характеристик, обусловленных прохождением волн через неоднородную среду разломных зон. Сопоставление полученных результатов с результатами зондирования другого типа неоднородных трещиноватых сред, в частности зон грязевых вулканов, свидетельствует о едином фундаментальном механизме развития процессов вариаций волновых форм, что отражает общее фундаментальное свойство рассматриваемых сред. Учет вклада разломных зон в процессы распространения сей-

смических волн имеет как фундаментальное, так и прикладное значение, в частности при изучении сейсмофизических процессов в Байкальской рифтовой зоне.

В рамках изучения проблемы взаимодействия полей применительно к решению задачи акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах выполнено оценивание вклада алгоритмов цифровой обработки оптических данных в улучшение качества оценивания потенциальной чувствительности к взаимодействию обоих типов полей. Количественная оценка эффекта повышения чувствительности достигнута на уровне двух порядков по сравнению с традиционно используемыми визуальными методами. Результат получен на модельных данных акустооптического взаимодействия, полученных в лабораторных экспериментах совместно с сотрудниками Института лазерной физики. Показана возможность измерения отклонений лазерного луча в акустическом поле с точностью на уровне нанометров, чего не было ранее.

В связи с экологической проблемой воздействия инфранизкочастотных полей техногенных шумов на человека и сооружения развито фрактальное представление функций спектрально-временного анализа. С использованием такого представления реализован таксономический подход к распознаванию источников по шумам на основе применения аппарата замкнутых геометрических поверхностей для построения разделяющих функций сложной конфигурации. Разработана методика оценивания интегрального воздействия транспортных шумов, включая излучение вибраторов, на окружающую среду как результата взаимодействия различных природных факторов, включая метеопараметры, характеристики земного покрова, сезонного состояния верхней части разреза земли и атмосферы. Методика опирается на рекомендации Роспотребнадзора в части воздействия техногенных шумов.

Развиты методы интеграции знаний и обмена информацией в области активной сейсмологии. Базовые онтологии — онтология научной деятельности и онтология научного знания — расширены формализованными понятиями, связанными с описанием методов и средств геофизических исследований разломных зон и грязевых вулканов. С целью ускорения процесса разработки, а также для повышения эффективности запросов, онтологии разрабатывались с применением онтологических паттернов содержания (Content ontology Design Pattern (CDP)). Паттерны представляют собой небольшие целостные фрагменты онтологии, формализующие обобщенные ситуации предметной области. На основе онтологии проведена модернизация интеллектуального научного интернет-ресурса (ИНИР) (доступен по адресу <http://opg.sccc.ru/>), представляющего собой доступную через Интернет информационную систему, обеспечивающую систематизацию и интеграцию научных знаний и информационных ресурсов по активной сейсмологии. Средствами портала "Активная сейсмология" интегрированы информационные объекты (специализированные сайты, статьи, справочный материал и т. д.) предметной области без их физического слияния.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 18-47540006 р_а "Разработка геоинформационной технологии оценивания экологических рисков техногенных шумов для социальной инфраструктуры города".

Руководитель проекта — д.т.н. Хайретдинов М. С.

В связи с экологической проблемой воздействия инфранизкочастотных техногенных шумов на человека и сооружения предложена методика оценивания интегрального воздействия как ре-

зультата взаимодействия различных техногенных и природных факторов, определяющих особенности распространения низкочастотных акустических колебаний в атмосфере и вибраций в земле. Выделены наиболее угрожающие области низких частот, характерные для различных видов тяжелого транспорта. Предложен и развивается таксономический подход к распознаванию источников по шумам. Получены предварительные результаты, улучшение которых увязывается с оптимизацией выбора системы информативных признаков.

Проект РФФИ № 20-07-00861 а "Геоинформационная технология и теоретико-экспериментальные исследования закономерностей распространения и приема сейсмических колебаний наземных вибраторов на смешанных трассах "суша – море".

Руководитель проекта – д.т.н. Хайретдинов М. С.

На основе анализа данных вибрационного зондирования разломных зон в Новосибирской области и Байкальской рифтовой зоне получены количественные характеристики волновых форм, отражающие динамику их поглощения, а также вариабельность спектрально-пространственно-временных характеристик, обусловленных прохождением волн через гетерогенную среду разломов. Полученные результаты увязаны с фундаментальным свойством преобразования волн, характерным для подобных сред, в частности, зон грязевых вулканов. Учет вклада разломных зон в процессы распространения сейсмических волн имеет фундаментальное значение в связи с изучаемыми сейсмофизическими процессами распространения волн на смешанных трассах "суша – море". Создана многофакторная физико-математическая модель, описывающая процесс распространения сейсмических волн с учетом параметров источника и смежных сред.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Alekseev A. S., Tsibulchik G. M., Kovalevsky V. V., Belonosov A. S. Elements of active geophysical monitoring theory // Active Geophysical Monitoring (2nd ed.). Elsevier, Ch. 1.1. 2020. P. 3–18. DOI: 10.1016/B978-0-08-102684-7.00001-7. ISBN: 978-008102684-7 (Scopus).
2. Kovalevsky V. V., Glinsky B. M., Khairtdinov M. S., Fatyanov A. G., Karavaev D. A., Braginskaya L. P., Grigoryuk A. P., Tubanov T. A. Active vibromonitoring: Experimental systems and fieldwork results // Active Geophysical Monitoring (2nd ed.). Elsevier, Ch. 1.3. 2020. P. 43–65. DOI: 10.1016/B978-0-08-102684-7.00003-0. ISBN: 978-008102684-7 (Scopus).
3. Khairtdinov M. S., Kovalevsky V. V., Shimanskaya G. M., Sedukhina G. F., Yakimenko A. A. Active monitoring technology in studying the interaction of geophysical fields // Active Geophysical Monitoring. Elsevier (2nd ed.). Ch. 3.3. 2020. P. 207–222. DOI: 10.1016/B978-0-08-102684-7.00010-8. ISBN: 978-008102684-7 (Scopus).
4. Khairtdinov M. S., Shimanskaya G. M. The nonlinear processes in active monitoring // Active Geophysical Monitoring (2nd ed.). Elsevier. Ch. 3.4. 2020. P. 223–241. DOI: 10.1016/B978-0-08-102684-7.00011-X. ISBN: 978-008102684-7 (Scopus).
5. Алексеев А. С., Хайретдинов М. С. Научные и научно-технические проблемы обеспечения дальней передачи сейсмических сигналов на глубокопогруженные объекты // В кн.: Стратегическая стабильность России на море. К 40-летию Научного Совета РАН. М: 2020. С. 139–213. ISBN: 978-5-94588-273-7 (РИНЦ).

6. Собисевич А. Л., Собисевич Л. Е., Фатьянов А. Г. Длиннопериодные сейсмогравитационные процессы в литосфере: аналитический анализ обсерваторских наблюдений. М.: ИФЗ РАН, 2020. 262 с. ISBN 978-5-91682-050-8 (РИНЦ).

7. Якименко А. А. Методология нагрузочного тестирования на примере кредитной организации // Модельное исследование методов, алгоритмов и средств индуктивного анализа данных в приоритетных отраслях : монография. М.: Русайнс, 2020. С. 207–222. ISBN 978-5-4365-5376-4.

8. Якименко А. А. Разработка и реализация инструментов повышения качества нагрузочного тестирования // Модельное исследование методов, алгоритмов и средств индуктивного анализа данных в приоритетных отраслях : монография. М.: Русайнс, 2020. С. 223–250. ISBN 978-5-4365-5376-4.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Хайретдинов М. С., Поллер Б. В., Борисов Б. Д., Бритвин А. В. Акустооптическое взаимодействие в задачах лазерного экологического мониторинга // Автотметрия. 2020. Т. 56, № 6. С. 91–99. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10332.

2. Kulikov I., Chernykh I., Karavaev D., Genrikh E., Sapetina A., Protasov V., Serenko A., Nenashev V., Prigarin V., Ulyanichev I., Lomakin S. Simulating relativistic jet on the nks-1p supercomputer with Intel Broadwell computing nodes // Commun. in Comp. and Inform. Sci. 2020. 1263 CCIS. P. 224–236. DOI: 10.1007/978-3-030-55326-5_16.

3. Kulikov I., Chernykh I., Karavaev D., Sapetina A., Prigarin V., Protasov V., Ulyanichev I. The parallel & distributed code for numerical simulation of relativistic magnetohydrodynamics simulation. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. 1640(1), 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012001.

4. Kulikov I., Chernykh I., Karavaev D., Protasov V., Nenashev V., Prigarin V. The numerical simulation of radial age gradients in spiral galaxies // Commun. in Comp. and Inform. Sci. 6th Russian Supercomputing Days (RuSCDays 2020), Moscow, Sept. 21–22, 2020. Vol. 1331. P. 365–374. DOI: 10.1007/978-3-030-64616-5_32.

5. Braginskaya L. P., Grigoruk A. P., Kovalevsky V. V. Integration of knowledge and data in active seismology // CEUR Workshop Proc. 2019. 2569. P. 6–12 (не вошла в отчет 2019 г.).

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Хайретдинов М. С., Караваев Д. А., Якименко А. А., Морозов А. Е. Восстановление геофизических моделей упругих сред с применением нейронных сетей // Пробл. информ. 2020. № 3. С. 60–69. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10012.

2. Якименко А. А., Михайленко Д. А., Макфузова А. И. Программное обеспечение для обнаружения границ на примере изображений сейсмического волнового поля // Пробл. информ. 2020. № 2. С. 37–47. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10007.

3. Хайретдинов М. С., Шиманская Г. М., Седухина Г. Ф. анализ и предсказание техногенных геоэкологических рисков в экологоохранных задачах // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии ИНФО 2020 : Сб. трудов 17-й науч.-практ. конф, Сочи, 1–10 окт. 2020 г. С. 152–156.

4. Хайретдинов М. С., Поллер Б. В., Борисов Б. Д., Бритвин А. В. Информационные характеристики акустооптического взаимодействия в задачах лазерного экологического мониторинга // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рожде-

ния акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. С. 175. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10332.

5. Хайретдинов М. С., Шиманская Г. М. Численный анализ и пути снижения геоэкологических рисков техногенных шумов // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. С. 176. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10333.

6. Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В. Численные характеристики волновых полей в зонах тектонических разломов. // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. С. 68. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10355.

7. Л. П. Брагинская, А. П. Григорюк, В. В. Ковалевский. Онтологический подход к организации информационной поддержки исследований в активной сейсмологии. // Тезисы междунар. конф. посвященной 95-летию со дня рождения академика Г. И. Марчука, "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), 19-23 октября 2020, Новосибирск. С. 68. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10369

8. Григорюк А. П., Ковалевский В. В., Брагинская Л. П. Анализ данных вибросейсмического мониторинга Южного Прибайкалья // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. С. 59. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10368.

9. Собисевич Л. Е., Фатьянов А. Г. Аналитический анализ длиннопериодных сейсмогравитационных процессов: новые вызовы в сейсмологии // Марчуковские научные чтения 2020 : тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. С. 67. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10330.

10. Fatyanov A.G., Burmin V.Yu. The focusing effect of p-wave in the moon's and earth's low-velocity core. Analytical solution // Материалы 10-го Междунар. симп. по исследованиям Солнечной системы. 2019. С. 389–391 (не вошла в отчет 2019 г.).

Участие в конференциях и совещаниях

1. Междунар. науч. конф. "Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ) 2020", Пермь, 31 марта – 2 апреля 2020 г. – 1 доклад (Караваев Д. А.).

2. The 3rd Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics, Novosibirsk, October 12–16, 2020 – 1 доклад (Караваев Д. А.).

3. 6th Russian Supercomputing Days (RuSCDays), Moscow, September 21–22, 2020 – 1 доклад (Караваев Д. А.).

4. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. – 6 докладов (Хайретдинов М. С., Шиманская Г. М., Ковалевский В. В., Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Фатьянов А. Г.).

5. 17-я научно-практическая конференция "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии ИНФО 2020", Сочи, 1–10 октября 2020 г. – 1 доклад (Хайретдинов М. С., Шиманская Г. М., Седухина Г. Ф.).

6. Международная научно-техническая конференция "Проблемы информатики, электроники, радиотехники ПИЭР-2020", Новосибирск, 10–11 декабря 2020 г. – 3 доклада (Хайретдинов М. С., Копылова О. А., Добrorодный В. И., Шиманская Г. М., Якименко А. А.).

7. Международная научно-техническая конференция "Динамика систем, механизмов и машин" (Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines)", Омск, 10–12 ноября 2020 г. – 1 доклад (Хайретдинов М. С.).

8. Научно-техническая конференция по вопросам разведки и разработки месторождений нефти и газа на территории Восточной Сибири, Красноярск, 13–16 октября 2020 г. – 1 доклад (Фатьянов А. Г.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Ковалевский В. В.:

– член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.,

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.,

2. Иванова И. Н.:

– член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.,

Итоговые данные по лаборатории

Монографий, глав в монографиях – 8

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 9

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 13

Докладов на конференциях – 15

Членов организационных или программных комитетов конференций – 3

Кадровый состав

1.	Ковалевский В. В.	и.о. зав. лабораторией	д.т.н.
2.	Борисов В. В.	ведущ. инженер	
3.	Брагинская Л. П.	ведущ. программист	
4.	Григорюк А. П.	н.с.	
5.	Ефимов С. А.	н.с.	
6.	Знак В. И.	с.н.с.	к.т.н.
7.	Иванова И. Н.	ведущ. инженер	
8.	Кайсина Н. В.	ведущ. инженер	
9.	Караваев Д. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
10.	Макаров В. А.	ведущ. инженер-электроник	

- | | | |
|-----------------------|--------|-----------|
| 11. Седухина Г. Ф. | н.с. | |
| 12. Фатьянов А. Г. | г.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 13. Хайретдинов М. С. | г.н.с. | д.т.н. |
| 14. Шиманская Г. М. | н.с. | к.т.н. |
| 15. Якименко А. А. | н.с. | к.т.н. |
- Якименко А. А., Караваев Д. А. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

- Хайретдинов М. С. – профессор НГТУ
 Якименко А. А. – доцент НГТУ, зав. кафедрой ВТ.

Руководство студентами

- | | |
|-----------------------|--|
| 1. Голощапова Д. П. | – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С. |
| 2. Малышенко М. В. | – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С. |
| 3. Пестова Т. В. | – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С. |
| 4. Садковский В. С. | – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С. |
| 5. Выродов А. Ю. | – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 6. Котович Н. И. | – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 7. Нишляев Е. В. | – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 8. Хрыпченко А. В. | – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 9. Ветчинникова А. Е. | – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 10. Лампадов Н. И. | – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 11. Латыгин Д. С. | – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 12. Плюснин П. Н. | – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 13. Помпеев А. А. | – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 14. Семеско В. М. | – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 15. Фаренбрух О. С. | – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А. |

Руководство аспирантами

- | | |
|----------------------|--|
| 1. Доброродный В. И. | – 4-й год, аспирант ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С. |
| 2. Машников Д. Я. | – 3-й год, аспирант ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С. |
| 3. Пинигина Д. Л. | – 2-й год, аспирант НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С. |
| 4. Копылова О. А. | – 1-й год, аспирант ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С. |
| 5. Латынцева Т. В. | – 1-й год, аспирант ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С. |
| 6. Минахудин Р. Ф. | – 1-й год, аспирант НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С. |
| 7. Михайленко Д. А. | – 3-й год, аспирант НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 8. Булатов А. Д. | – 1-й год, аспирант НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 9. Стубарев И. М. | – 1-й год, аспирант НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 10. Харюткина С. А. | – 1-й год, аспирант НГТУ, руководитель Якименко А. А. |

Защита дипломов

- | | |
|-------------------|--|
| 1. Копылова О. А. | – магистр НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С. |
| 2. Бибилов Н. А. | – магистр НГТУ, руководитель Якименко А. А. |
| 3. Булатов А. Д. | – магистр НГТУ, руководитель Якименко А. А. |

4. Левчук С. А. – магистр НГТУ, руководитель Якименко А. А.
5. Макфузова А. И. – магистр НГТУ, руководитель Якименко А. А.
6. Паршин С. Е. – магистр НГТУ, руководитель Якименко А. А.
7. Ветчинникова А. Е. – бакалавр НГТУ, руководитель Якименко А. А.
8. Латыгин Д. С. – бакалавр НГТУ, руководитель Якименко А. А.
9. Сараев С. А. – бакалавр НГТУ, руководитель Якименко А. А.
10. Фаренбрух О. С. – бакалавр НГТУ, руководитель Якименко А. А.
11. Яковенко Е. В. – бакалавр НГТУ, руководитель Якименко А. А.

ЛАБОРАТОРИЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Зав. лабораторией д.т.н. Пяткин В. П.

Важнейшие достижения**Новый алгоритм обнаружения угловых структур на изображениях с использованием иерархии масок свертки**

Д.ф.-м.н. Казанцев И. Г.

Разработаны новые семейства масок свертки для выделения угловых структур на цифровых изображениях. В отличие от традиционных масок Кирша, Лапласа и др., разработанные семейства содержат маски произвольного размера, что позволяет выделять углы произвольной величины на зашумленных изображениях. Получены аналитические представления масок произвольных размеров для углов в 45° , 90° , 135° , показана возможность представления маски для выделения заданного угла как линейной комбинации масок для других углов. Конструкция семейства масок делает возможным использование результата применения маски меньшего размера при применении маски большего размера, что позволяет более эффективно реализовать обработку изображения с помощью последовательности масок. Результат может применяться для поиска точек интереса в машинном зрении, обработке данных аэрокосмосьемки и кристаллографии.

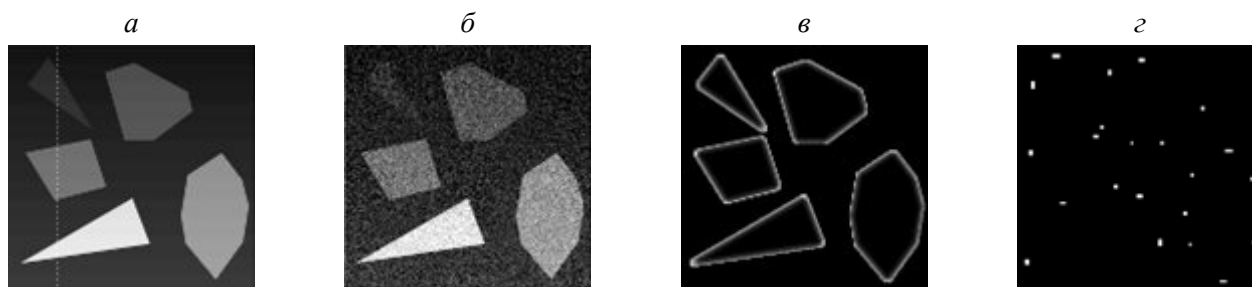


Рис. 1 – Выделение угловых структур различной яркости: *а* – тестовое 256-тоновое изображение; *б* – добавление к тестовому изображению равномерного случайного шума $\sigma = 25$; *в* – результат применения к зашумленному изображению маски для выделения угла 45° размером 7×7 пикселей; *г* – выделение пикселей, в которых значение оператора выделения угловой структуры превысило оптимальный порог

Результаты исследований опубликованы в работе

Казанцев И. Г., Мухаметжанова Б. О., Исаков К. Т., Миргаликызы Т. Выделение угловых структур на изображениях с помощью масштабируемых масок // СибЖИМ. 2020. Т. 23, № 1. С. 70–83.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершнным в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Математическое моделирование, численные методы и высокопроизводительные информационно-вычислительные технологии для решения задач активной сейсмологии и дистанционного зондирования Земли".

Номер государственной регистрации НИР 01201370226.

Руководители: д.т.н. Ковалевский В. В., д.т.н. Пяткин В. П.

Раздел 2. "Разработка распределенных высокопроизводительных технологий решения задач моделирования, обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием кластеров Сибирского суперкомпьютерного центра (ССКЦ). Разработка и реализация облачных Web-интерфейсов для доступа как к вновь создаваемым, так и к существующим программным технологиям. Дальнейшее развитие и совершенствование высокопроизводительных программных технологий обработки данных ДЗЗ различного спектрального и пространственного разрешения. Разработка методов и алгоритмов решения задач моделирования, обработки и интерпретации гиперспектральных данных ДЗЗ и томографических сканеров. Разработка статистических алгоритмов и критериев для анализа и моделирования как единичного изображения, так и последовательности изображений. Визуализация "естественной кластеризации" для анализа многомерной гистограммы на основе ее представления в виде четырехмерного рельефа. Разработка высокопроизводительных методов и алгоритмов кластеризации гиперспектральных данных ДЗЗ. Представление результатов проекта для экспертной проверки на лабораторном Web-сервере."

Руководитель – д.т.н. Пяткин В. П.

Этап 2020 г. "Разработка облачных технологий решения задач моделирования данных ДЗЗ. Разработка и реализация облачного Web-сервиса для решения задачи автоматической классификации данных ДЗЗ. Разработка и реализация алгоритмов обработки гиперспектральных данных, получаемых на некольцевых томографических сканерах специального назначения на основе методов обратной задачи Штурма – Лиувилля и использования фазовой информации. Разработка двух программ для задач скорейшего обнаружения в последовательности, элементами которой являются соответственно тройки и пятерки зашумленных изображений, моментов появления объектов-целей, движущихся прямолинейно к центру важного (охраняемого) объекта".

Выполнены следующие работы по реализации макета облачной технологии решения задач моделирования данных ДЗЗ:

1. Выделение расчетной части разработанного ранее программного комплекса быстрого моделирования спутниковых данных SatRaS в автономную программу.
2. Разработка интерфейса Web-сервиса быстрого моделирования спутниковых данных на основе стандарта JSON-RPC.
3. Реализация Web-сервиса быстрого моделирования спутниковых данных на основе языка Python и Web-фреймворка Django.

Разработанная система принимает HTTP-запросы с телом в виде JSON-объекта, содержащего параметры моделирования (идентификатор измерительной платформы, список каналов, условия наблюдения и проч.), запускает для расчетов модуль SatRaS и возвращает пользователю результат (измеренные интенсивности и/или яркостные температуры, якобианы) в виде JSON-объекта. Результат может быть использован как в качестве составной части тематических облачных Web-приложений моделирования спутниковых данных, так и в качестве независимого вычислительного микросервиса.

Разработан макет облачной SaaS-технологии контролируемой классификации данных ДЗЗ. Архитектурно технология состоит из двух частей:

1. Интерактивный модуль, предназначенный для построения (обучения) классификатора, – настольное Windows-приложение с графическим интерфейсом, позволяющее вводить и редак-

тировать на изображениях обучающие и контрольные поля, предназначенные для построения сигнатур классов (рис. 2). Реализовано девять классификаторов: один поэлементный (классифицируются отдельные пиксели изображения независимо друг от друга) и восемь объектных (по четыре для квадратных и крестообразных объектов в зависимости от выбранного типа связи между пикселями).

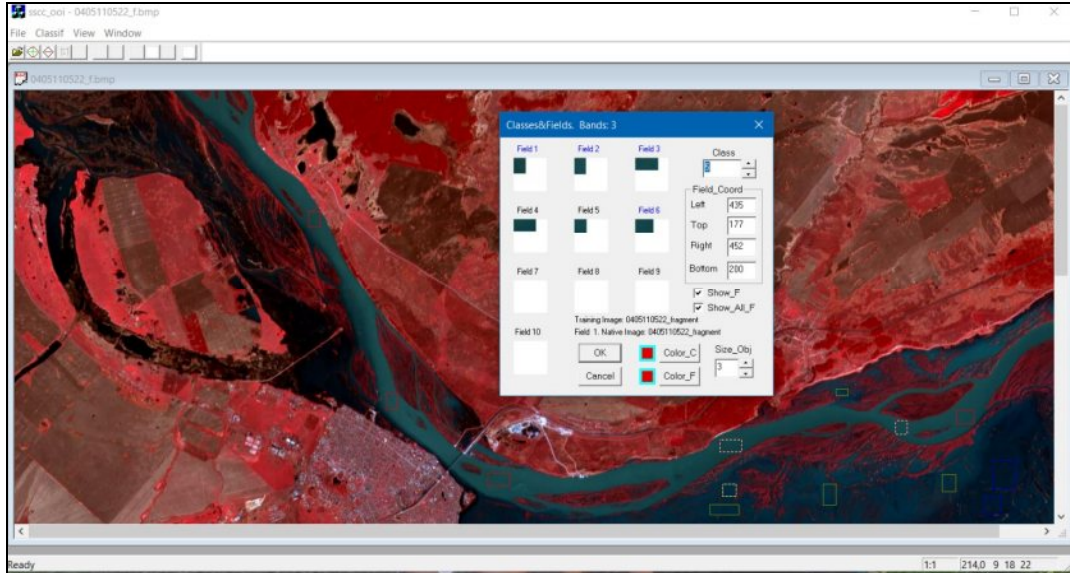


Рис. 2 – Скриншот сеанса работы с модулем построения классификатора технологии контролируемой классификации данных ДЗЗ

2. Собственно "облачная" часть, выполняющая классификацию по данным построенного классификатора. Технологической основой разработки стал свободно распространяемый Web-сервер Apache; для использования в качестве вычислительного ядра системы создан автономный вариант соответствующей программы. Результатом работы является одноканальное (байтовое) изображение, значениями пикселей которого являются номера классов. Это изображение окрашивается в predetermined colors. Пример работы алгоритма представлен на рис. 3.

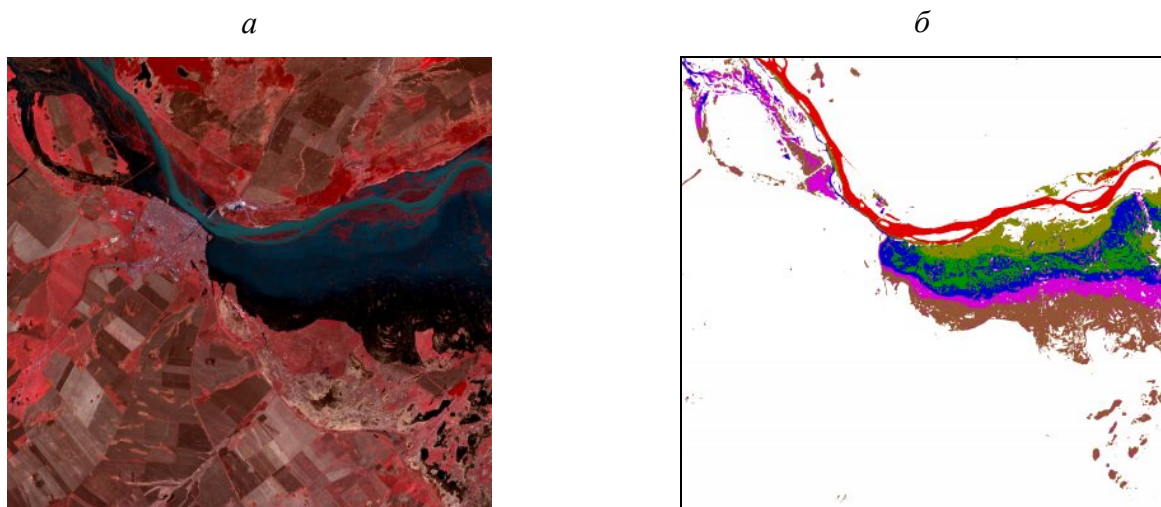


Рис. 3 – Пример работы алгоритма контролируемой классификации данных ДЗЗ:
а – фрагмент снимка со спутника SPOT-4, 4.05.2011: паводковая ситуация в районе Камня-на-Оби;
б – результат работы поэлементного классификатора: выделены 6 зон затопления

Разработанная система может быть использована при анализе данных различной природы, это могут быть данные систем ДЗЗ, установленных как на космических спутниках, так и на разнообразных авиационных аппаратах.

Скриншот сеанса работы с Web-интерфейсом технологии представлен на рис. 4.

Загрузка исходных и выгрузка насчитанных изображений в формате BMP осуществляется через папку ftp://ioi1.sscs.ru/L&C

В связи со временным ограничением на одновременную работу анонимных пользователей допущены пользователи user1 и user2, соответственно с паролями user1 и user2.

Введите имя Вашего исходного снимка

Input file	0405110522_f.bmp
Classifier data file	0405110522_f_6_th.cnf
Output file	0405110522_f_006_th.bmp
Классификатор	6

Запустить программу

Рис. 4 – Скриншот формы интерфейса конфигурирования алгоритма классификации

Разработан новый алгоритм реконструкции для специализированных прямоугольных томографических сканеров. Исследована геометрия сканеров, состоящих из двух и четырех пар линеек детекторов, используемых в позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) (рис. 5). Такие схемы просвечивания позволяют осуществить движение (сближение) пар линеек для плотного охвата объекта при сканировании органов малого таза, молочной железы или мелких животных. Это принципиально отличает такие специализированные прямоугольные сканеры от традиционных кольцевых, где диаметр области обследования жестко фиксирован (порядка одного метра).

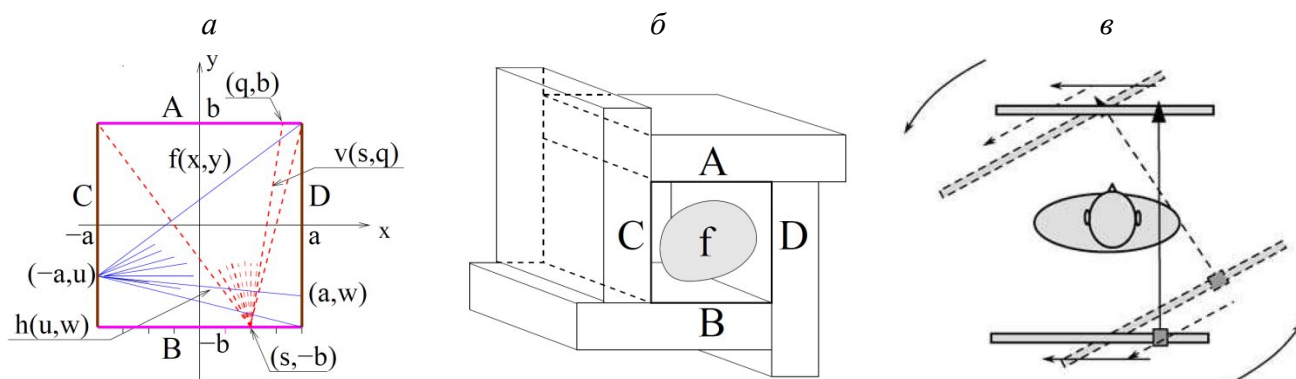


Рис. 5 – Томографическое сканирование с парами линейных детекторов: *a* – геометрия сбора для двумерного случая двух пар линеек детекторов {A, B} и {C, D}; *б* – принцип динамического охвата объекта подвижными панелями детекторов; *в* – пара панелей детекторов с вращением 90°

Получена система интегро-дифференциальных уравнений, описывающих прямую задачу для конкретных прямоугольных сканеров в терминах усеченного преобразования Гильберта (УПГ). Доказана возможность раздельного решения уравнений системы (факторизация системы), что приводит к набору задач меньшей размерности. Основанием реконструкции является

недавний результат А. Кацевича (2012 г.), позволяющий численно решить задачу Штурма – Лиувилля вычисления собственных функций усеченного преобразования Гильберта с учетом фазовой информации. Проведены численные эксперименты на модельных данных с использованием пакета MATLAB. Результаты численного моделирования для двух пар линек детекторов представлены на рис. 6. Практическое применение данной работы возможно в лабораториях, использующих томографы в научных исследованиях.

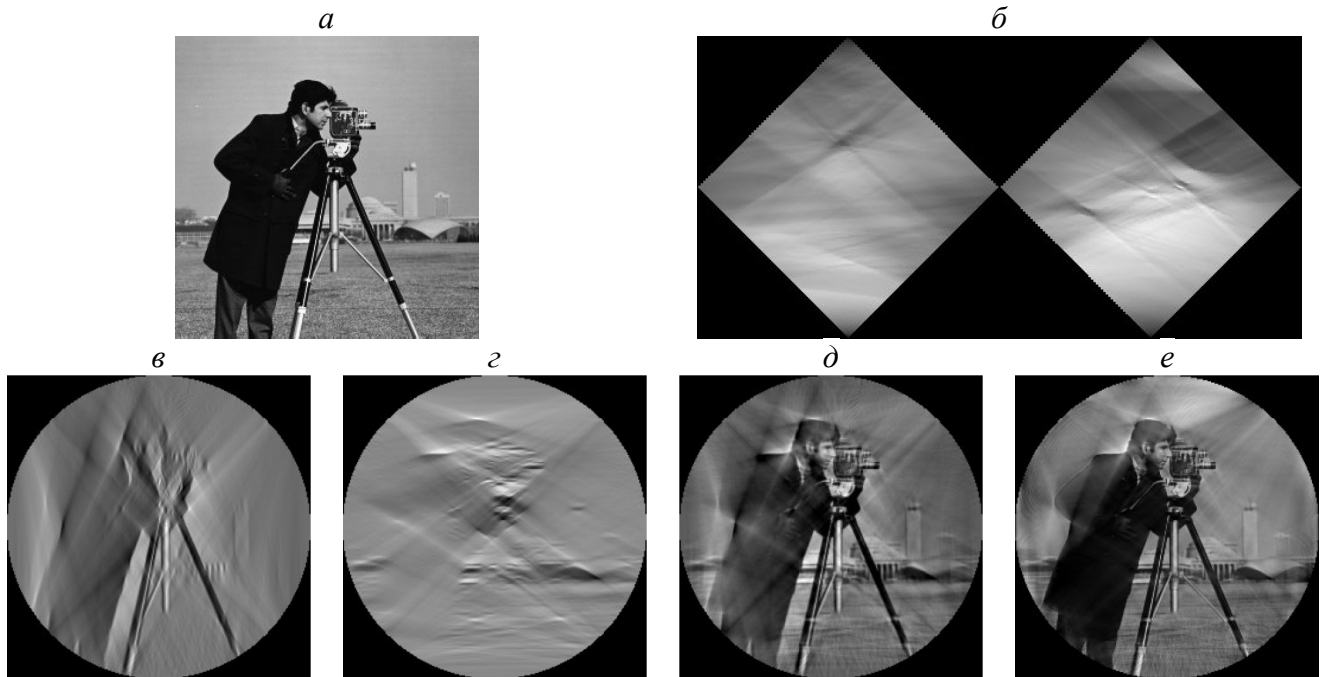


Рис. 6 – Результат работы алгоритма реконструкции для прямоугольных томографических сканеров:

a – исходное изображение размером 256×256 пикселей; *б* – синограмма для двух пар линеек детекторов, каждая по 256 детекторов, и 256 углов сканирования; *в* и *г* – раздельное решение системы интегро-дифференциальных уравнений прямой задачи для каждой из пар линеек; *д* – совместное решение системы для двух пар линеек; *е* – результат итеративной реконструкции по алгоритму Качмажа (для сравнения)

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Kazantsev I. G., Mukhametzhanova B. O., Iskakov K. T. et al. Detection of the corner structures in images by scalable masks // J. Appl. and Industrial Math. 2020. Vol. 14. P. 73–84. DOI: 10.1134/S1990478920010081.
2. Kazantsev I. G., Matej S., Lewitt R. M., Olsen U. L., Poulsen H. F., Yarovenko I. P., Prokhorov I. V. Modeling and simulation of Compton scatter image formation in positron emission tomography // J. Inverse and Ill-Posed Probl. 2020. Vol. 28, No. 6. [20200052]. DOI: 10.1515/jiip-2020-0052.
3. Rusin E. V. Framework-based approach to implementation of high-performance image processing library // CEUR Workshop Proc. 2019. Vol. 2534. P. 183–188.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Бучнев А. А., Гетлинг А. В. Визуализация процессов развития активных областей в фотосфере Солнца // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы 7-й Междунар. науч. конф., Красноярск, 29 сент. – 2 окт. 2020 г. С. 43–46.

2. Казанцев И. Г., Мухаметжанова Б. О., Исаков К. Т. Алгоритм выделения угловых структур на изображениях с помощью масштабируемого иерархического детектора // Марчуковские научные чтения : труды Международной конференции, Новосибирск, 1–5 июля 2019 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2019. С. 196–202. DOI: 10.24411/9999-016A-2019-10032 (не вошла в отчет 2019 г.).

3. Казанцев И. Г., Мухаметжанова Б. О., Исаков К. Т. Алгоритм выделения угловых структур на изображениях с помощью масштабируемого иерархического детектора // Марчуковские научные чтения – 2019 : тезисы Международной конференции, Новосибирск, 1–5 июля 2019 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2019. С. 89–90 (не вошла в отчет 2019 г.).

4. Казанцев И. Г., Мухаметжанова Б. О., Исаков К. Т., Миргаликызы Т. Выделение угловых структур на изображениях с помощью масштабируемых масок // СибЖИМ. 2020. Т. 23. № 1. С. 70–83. DOI: 10.33048/SIBJIM.2020.23.107.

5. Ким П. А. О географической сетке трехмерной гиперболы // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы 7-й Междунар. науч. конф., Красноярск, 29 сент. – 2 окт. 2020 г. С. 89–91.

Участие в конференциях и совещаниях

1. 7-я Международная научная конференция "Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли", 29 сентября – 2 октября 2020 г., Красноярск – 2 доклада (Бучнев А. А., Ким П. А.).

2. 20-я Юбилейная Международная конференция по науке и технологиям Россия – Корея – СНГ, 19–21 октября 2020 г., Новосибирск – 1 доклад (Ким П. А.).

3. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, 19–23 октября 2020 г., Новосибирск, Россия – 1 доклад (Казанцев И. Г.).

Участие в оргкомитетах конференций

Пяткин В. П. – член программного комитета 7-й Международной научной конференции "Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли", Красноярск, 29 сентября – 2 октября 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 3

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 8

Докладов на конференциях – 4

Членов организационных или программных комитетов конференций – 1

Кадровый состав

1. Пяткин В. П.	зав. лаб.	д.т.н.
2. Бучнев А. А.	с.н.с.	к.т.н.
3. Казанцев И. Г.	с.н.с.	д.ф.-м.н.
4. Ким П. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.

5. Русин Е. В. с.н.с. к.т.н.

6. Карогодина Т. И. ведущ. инженер.

Педагогическая деятельность

Пяткин В. П. – проф. СГУГиТ

Руководство аспирантами

Казанцев И. Г. – научный консультант аспиранта Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева (Астана, Казахстан) Мухаметжановой Б. О. (научный руководитель – Искаков К. Т.).

ЛАБОРАТОРИЯ СИСТЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ

Зав. лабораторией д.т.н. Родионов А. С.

Важнейшие достижения**Новые методы анализа и оптимизации беспроводных самоорганизующихся сетей**

К.ф.-м.н. Шахов В. В., к.т.н. Соколова О. Д., к.т.н. Рудомётов С. В., Ткачёв К. В.

Для решения ряда задач анализа и оптимизации беспроводных самоорганизующихся сетей предложены новые методы, основанные на теории телетрафика, исследовании операций, теории графов, имитационном моделировании. Разработанные математические и программные средства, в отличие от ранее предложенных подходов, позволяют оптимизировать функционал сетевых узлов и протоколов при наличии интерференции, нестационарной топологии сети и конфликтующих целевых функций. Также обоснованы серьезные недостатки нескольких существующих математических моделей, используемых для анализа данных сетей, предложены способы устранения указанных недостатков. Комплекс полученных методов позволяет повысить эффективность систем мониторинга промышленных и природных процессов, сетей VANET, технологий Интернета вещей. На рис. 1 показано несколько сценариев загрязнения городского воздуха, для которых проводится анализ эффективности системы мониторинга.

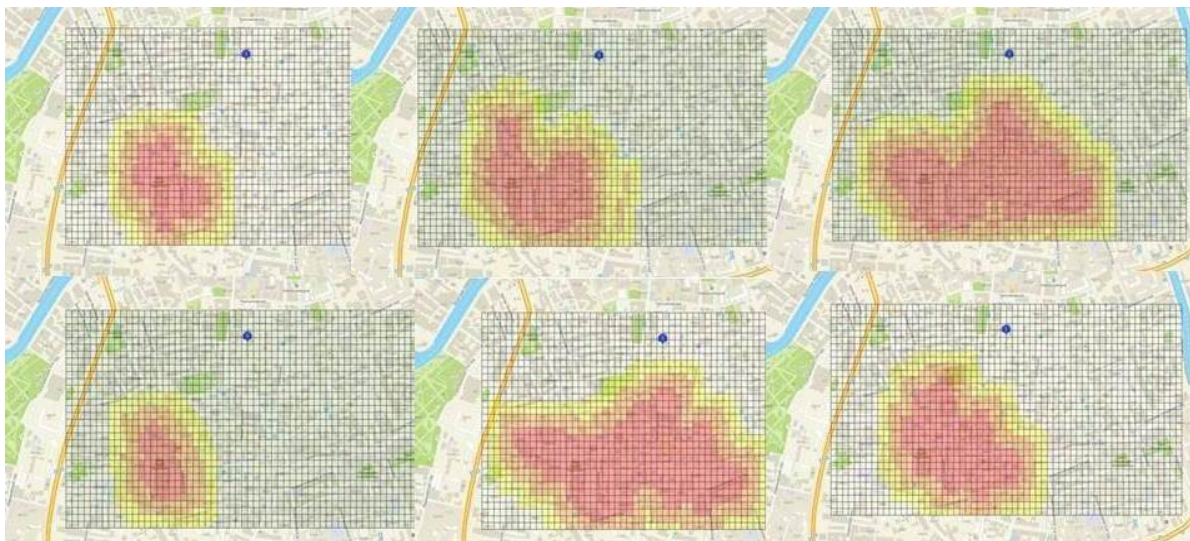


Рис. 1 – Анализ эффективности мобильных систем мониторинга городского воздуха

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Shakhov V., Sokolova O., Koo I. A criterion for IDS deployment on IoT edge nodes // Springer Lect. Notes in Comput. Sci. 2020. Vol. 12249. P. 546–556. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58799-4_40 (Q2 SJR).
2. Lin K., Chen H., Ai X., Shakhov V., Ni L., Yu J., Li Y. EUMD: Efficient slot utilization based missing tag detection with unknown tags // J. Network and Comput. Appl. 2020. Vol. 160, art. 102640 (Q1WoS).
3. Соколова О. Д., Шахов В. В. Вопросы обеспечения безопасности интернета транспортных средств. Обзор исследований // Информ. проц. 2020. Т. 20, № 3. С. 231–253 (RSCI/Q4 WoS)

4. Тарханова О. Ю., Шахов В. В. К вопросу оценки эффективности беспроводных сенсорных сетей // Пробл. информ. 2020. № 1 (46). С. 35–65. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10003 (BAK).
5. Шахов В. В., Соколова О. Д. Анализ сетей с нестационарной топологией. Обзор исследований // Пробл. информ. 2020. № 4 (49). С. 27–42. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10014 (BAK).
6. Rudometov S., Sokolova O., Materukhin A. Optimization of mobile sink movement in the gathering spatio-temporal data process from air pollution sensors // Intern. Rus. Autom. Conf. (RusAuto-Con 2020), Sochi, Sept. 6–12, 2020. P. 648–652. doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208148 (Scopus).

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Развитие теории и разработка математических моделей и методов системного анализа, оптимизации и мониторинга сложных систем".

Номер государственной регистрации 0315-2019-0006.

Руководитель – д.т.н. Родионов А. С.

Получены следующие основные результаты:

1. Разработана концепция интегрированной системы маршрутизации транспорта в городе, совмещенной с системой управления светофорами и управляемыми дорожными знаками и использующей прогнозную загрузку дорог. Предложена модель прогнозирования загрузки участков дорог, позволяющая выбирать маршрут транспортного средства с учетом соответствующего прогноза, что, в свою очередь, влияет на коррекцию прогноза загрузки. Этот же прогноз позволяет оптимизировать будущий режим работы светофоров, также влияющий посредством обратной связи на прогноз загрузки участков дорог и, соответственно, на маршрутизацию.

2. Получены новые кумулятивные оценки коэффициентов полинома связности случайного графа. Оценки строятся на основе смыслового значения коэффициентов полинома связности (ATR-полинома) в одном из его представлений. Совмещение нескольких шагов точного алгоритма расчета коэффициентов с последующей оценкой коэффициентов ATR-полиномов порожденных алгоритмом графов позволяет получать достаточно качественные их границы.

Раздел "Анализ и оптимизация сетей инженерных коммуникаций и других многоуровневых структур".

К.т.н. Токтошов Г. Ы., к.ф.-м.н. Мигов Д. А., к.т.н. Юргенсон А. Н.

Проведены исследования по анализу и оптимизации сетей инженерных коммуникаций, имеющих различные назначения. В частности, проведено исследование многокритериальной задачи оптимизации по минимизации суммарных строительных и эксплуатационных затрат при заданном уровне надежности проектируемой сети. Известно, что в базовой постановке задача по укладке вторичной сети в первичную сеть является NP-трудной и не имеющей решения в общем случае. В связи с этим разработан двухэтапный эвристический алгоритм, основанный на методе k -кратчайших путей и алгоритме муравьиной колонии, который гарантирует выполнение ограничения по надежности путей, при этом находит пути меньшей стоимости, что позво-

ляет находить приемлемое решение с учетом иерархичности проектируемой сети и многокритериальности поставленной задачи. Полученные результаты являются новыми.

В развитие данного метода выполнено исследование проблемы оптимизации инфраструктуры образовательной системы, в котором структура образовательной инфраструктуры описывается графом первичной сети, а структура образовательного процесса (процесс передача знаний) – вторичной сетью. Введено понятие "живучесть образовательной системы" как способность непрерывного функционирования при воздействии различных внешних дестабилизирующих факторов (пожары, аварии, эпидемиологическая обстановка и т. п.). Одна из разновидностей задачи – построение образовательной системы, живучесть которой определяется надежностью ее функционирования при условии доступности статистики или прогноза по внешним воздействующим факторам, влияющим на ее работоспособность. Для решения данной задачи возможно применение модифицированного метода k -кратчайших путей для построения образовательной системы с самой дешевой инфраструктурой и достаточным уровнем надежности.

Раздел "Разработка и исследование интеллектуальных методов моделирования и оптимизации на основе биоинспирированных алгоритмов для инфокоммуникационных и инженерных систем".

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

Получены следующие результаты:

1. Рассмотрено решение проблемы построения нелинейных моделей (математических выражений, функций, алгоритмов, программ) на основе заданных экспериментальных данных, множества переменных, базовых функций и операций. Разработан унифицированный метод метаэвристического программирования для синтеза нелинейных моделей, который использует представление хромосомы в виде вектора действительных чисел и позволяет применить различные биоинспирированные (природоподобные) алгоритмы оптимизации при поиске моделей. Получены оценки эффективности предложенного подхода с использованием десяти различных биоинспирированных алгоритмов (две модификации генетического алгоритма, алгоритм дифференциальной эволюции, алгоритм оптимизации роем частиц, алгоритм колонии пчел, алгоритм оптимизации на основе преподавания и обучения и две его модификации, эволюционная стратегия с адаптацией матрицы ковариаций, алгоритм поиска на основе теплопередачи) и проведено его сравнение со стандартным алгоритмом генетического программирования, алгоритмом грамматической эволюции и алгоритмом декартова генетического программирования. Проведенные эксперименты с использованием параллельных вычислений показали существенное преимущество предложенного подхода по сравнению с указанными алгоритмами как по времени поиска решения (более чем на порядок в большинстве случаев), так и по вероятности нахождения заданной функции (модели) (во многих случаях более чем в два раза). Описанный подход позволяет также использовать темплейты (шаблоны, скелетоны) алгоритмов для ускорения процесса эволюционного синтеза. Исследовано влияние степени специализации темплейта на характеристики алгоритма поиска при эволюционном синтезе нелинейных моделей, заданных обыкновенными дифференциальными уравнениями с недоопределенными функциями. Получены оценки трудоемкости данного алгоритма и показано значительное сокращение времени поиска при использовании темплейтов в процессе эволюционного синтеза.

2. Для инфокоммуникационных систем разработаны алгоритмы динамической парной маршрутизации с константной оценкой сложности для оптимальных двумерных циркулянтных сетей, даны их оценки по требуемым ресурсам для сетей на кристалле с двумерной топологией. Найден улучшенный алгоритм поиска кратчайших путей для оптимальных обобщенных графов Петерсена с аналитическим описанием. Разработаны и реализованы динамические алгоритмы маршрутизации, предназначенные для использования в сетях на кристалле с трехмерной циркулянтной топологией. Получена задаваемая параметрически серия семейств аналитически описываемых циркулянтных сетей степени шесть с общими коммуникативными свойствами. На ее основе синтезированы новые семейства циркулянтов с лучшими структурными характеристиками, чем известные в литературе, и получен общий аналитический алгоритм маршрутизации для всех графов серии. Проведено тестирование новых алгоритмов маршрутизации на различных семействах циркулянтных сетей, рассмотренных в качестве топологии сетей на кристалле, и выполнено их сравнение с известными алгоритмами по эффективности, скорости и занимаемым в памяти ресурсам в сетях на кристалле.

Раздел "Разработка модели роста сетевых объектов на основе предпочтительного присоединения".

К.Т.н. Бредихин С. В., Щербакова Н. Г., Ляпунов В. М.

Получены следующие результаты:

1. Изучается сеть цитирования статей (СЦС), в качестве узлов которой выступают научные статьи (НС), размещенные в общей библиографической базе данных (БД), а дугами являются упорядоченные пары НС, связанные бинарным отношением цитирования. СЦС представляет собой масштабно-инвариантную комплексную сеть, распределение входящих степеней узлов которой соответствует степенному закону. Рост таких сетей обладает важным свойством: добавление новых узлов и дуг не сопровождается удалением существующих элементов. Согласно модели Барабаши – Альберт (ВА) основу развития масштабно-инвариантной сети составляют рост и механизм предпочтительного присоединения (РА): добавленный узел присоединяется к узлу i с вероятностью $P(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$, где k_i – степень узла i . Для СЦС РА-механизм определяется

как скорость, с которой НС получают новые цитирования, пропорциональная числу уже имеющихся. СЦС моделируется с применением обобщенной ВА-модели, учитывающей, что скорость получения цитирований зависит также от начальной привлекательности узлов и их возрастов, поскольку наблюдается явная потеря интереса к "старым" НС.

2. Рассматривается сеть соавторства (N^{CA}), узлами которой являются авторы научных публикаций (НП), а в качестве ребер выступают связи между парами авторов, являющихся соавторами по крайней мере одной НП. Отношение соавторства предполагает существование механизма деления ответственности между авторами за результаты совместных исследований, представленные в НП. Сеть N^{CA} конструируется на основе множества НП P , размещенных в библиометрической БД и множестве V – авторов или соавторов публикаций из P . Для авторов $v_i, v_j \in V$ определено бинарное отношение соавторства R^{CA} : $i R^{CA} j$, если существует НП $p \in P$, такая что v_i, v_j являются соавторами НП p . Модель N^{CA} -сети представлена в виде неориентированного взвешенного графа $G^{UW} = (V, E, W)$, где $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множество вершин, представ-

ляющих множество авторов, $E \subset V^2$ множество ребер $e = (v_i, v_j) \in E$, если выполняется $v_i R^{CA} v_j$ и $W = (w_{ij})$ – матрица весов ребер, отражающих степень соавторства. Представлены варианты формального представления сети соавторства и рассмотрены возможные методы вычисления значений весов ребер.

Раздел "Модели современных сетей связи и передачи данных".

К.ф.-м.н. Швхов В. В., к.т.н. Соколова О. Д., к.т.н. Юргенсон А. Н., Ткачёв К. В.

Разработаны математические модели современных сетей, в которых присутствуют как стационарные, так и мобильные узлы. Рассмотрены топологии специального вида, которые являются типовыми для сетевой технологии *LoRaWAN*, сенсорных сетей, используемых в прецизионном сельском хозяйстве, а также приложений, релизованных с использованием концепции *Edge Computing*. Предложен и обоснован ряд показателей эффективности сетей, например, критерий надежности для сетей мониторинга, где применимо правило $n-k$, выглядящее следующим

образом: $K_{Rel} = R(p) \sum_{j=k}^n C_j^n q^j (1-q)^{n-j}$, где полином $R(p)$ задает вероятность связности базовой

станции через сеть транзитных узлов с устройствами мониторинга. Параметры q и p характеризуют доступность устройств мониторинга и качество каналов связи, для их определения используются модели на основе марковских цепей с непрерывным временем. Данный критерий использовался для сравнительного анализа методов повышения надежности сетей, а также для обоснования отсутствия оптимальной топологии в общем случае.

В ходе разработки моделей и методов обеспечения качества функционирования сложных систем, обладающих высокой динамикой, описываемых дискретным множеством состояний со случайными переходами между ними, выявлено, что подход на основе Марковских процессов принятия решений (MDP), где вероятности перехода между состояниями и функция вознаграждения не зависят от времени, требует серьезного упрощения решаемых прикладных задач, что приводит к низкой достоверности оценок эффективности систем. Кроме того, существование функции вознаграждения является серьезным допущением во многих практически важных случаях. Таким образом, принято решение отказаться от указанного инструментария в пользу раскрашенных временных сетей Петри. Для разработки моделей функционирования сложных систем использовался программный продукт *CPN Tools* и язык программирования CPN ML. Полученные модели применялись для анализа влияния технических характеристик сенсорных узлов на показатели качества обслуживания беспроводной сенсорной сети *ZigBee*.

В ходе разработки методов обеспечения эффективного функционирования RFID систем исследована проблема обнаружения отсутствующих меток за минимальное время с заданным качеством в условиях присутствия "мешающих" меток. Получена постановка задачи оптимизации параметров протокола обнаружения отсутствующих меток:

$$(h^*, x^*) = \arg \min_{n_{ID}} \frac{x}{n_{ID}} (\log_2(h+1) + 1)$$

$$(1-A)(1-x^{-1})^b \geq 1 - \sqrt[b]{1-\alpha}, \quad A = \prod_{j=1}^h a_j$$

где h – количество последовательных сеансов обнаружения отсутствующих меток; x – размер фрейма; n_{ID} – размер идентификатора метки; m – количество отсутствующих меток, $\alpha \in (0;1)$ – заданная надежность обнаружения, $b \in \mathbb{R}_+$, $a_j \in \mathbb{R}_{(0;1)}$ – предварительно вычисленные константы. С использованием подхода на основе целочисленного программирования получено решение задачи.

В ходе исследования проблемы оптимизации интеллектуальных систем разработан метод прогноза рейтинга объектов в рекомендательных системах. Механизм основан на деформируемых сверточных сетях (входящих в состав технологий глубокого обучения). Полезные признаки параллельно извлекаются из двух наборов данных, содержащих описания объектов и их рейтинги. Предложен механизм формирования кумулятивного множества признаков. С использованием критерия среднеквадратичной ошибки (*RMSE*) проведено экспериментальное сравнение предложенного метода с аналогами, показана его эффективность.

Для задачи оптимальной укладки вторичной сети в первичную рассматривались оценки приближенных алгоритмов. Если стоимость ребер мала по сравнению со стоимостью ветвей, то можно воспользоваться известными алгоритмами для решения задачи Штейнера на графах. В частности, в качестве приближенного решения можно взять минимальное остовное дерево. В таком случае стоимость такого остовного дерева не превосходит двух стоимостей оптимального дерева Штейнера. Для некоторых других случаев, так же были приведены оценки работы жадного алгоритма.

Предложена система моделей сетевого планирования экстренных пограничных операций. На предварительной стадии для своевременного получения информации использованы типовые модели с детерминированной структурой. Для оперативного управления применены стохастические сетевые модели.

Для точного решения задач календарного планирования проектов с непрерывными и допускающими перерывы операциями предложена более компактная формализация ресурсно-временных условий в моделях целочисленного линейного программирования. С применением известных пакетов решения оптимизационных задач проведены сравнительные расчеты, подтвердившие сокращение размерности задач и времени счета.

Раздел "Разработка математических моделей современных сетей передачи данных с узлами на движущихся объектах. Разработка оптимизационных алгоритмов для анализа функционирования сетей с узлами на движущихся объектах. Разработка гибридной модели городского транспортного потока".

К.т.н. Соколова О. Д., Ткачёв К. В., д.т.н. Родионов А. С.

Для решения задач, связанных с движением транспортных потоков и распространением информации среди участников движения разработана (совместно со студентами ВКИ НГУ) система имитационного моделирования *Mobile Monitoring*, позволяющая имитировать функционирование сети передачи данных с узлами, расположенными на движущихся объектах. Предполагается, что в узлах сети размещены датчики с возможностью определения своего местоположения и с приемо-передающими функциями. Основная цель системы заключается в моделировании сбора и передачи данных во время движения узлов (например, передача информации о

ситуации на дорогах, сбор данных о состоянии атмосферы и другие задачи мониторинга, которые можно осуществлять автоматически, без участия человека).

Создано приложение, которое позволяет имитировать ситуацию на дорогах с помощью настраиваемой симуляции дорожного движения – движение общественного транспорта по маршрутам, мониторинг с помощью закрепленных на некоторых транспортных средствах датчиков, передача собранной информации в центр обработки данных. Моделировались критические ситуации на карте, автоматическая передача данных о ситуации от узлов до базовой станции. Особенности разработанного приложения: построение транспортной сети на заданной пользователем карте, настройка маршрутов транспорта.

Раздел "Исследование тенденций развития свободного программного обеспечения (СПО). Анализ существующих репозиторий, форматов пакетов и средств демонстрации СПО пользователям".

Кратов С. В.

Проведены исследования и выполнено проектирование системы информационно-компьютерной поддержки проектной деятельности команд из научно-исследовательских организаций при работе с биоресурсными коллекциями. Задачи проектируемой системы – организация хранения, актуализации и доступа через Интернет к базе метаданных биоресурсных коллекций, ориентированных на проведение фундаментальных исследований в области генетики. Согласованы спецификации баз данных (коллекций), созданы соответствующие им типы информационных материалов, разработаны интерактивные формы для их заполнения, поиска по ним, организован ролевой контроль доступа пользователей к материалам коллекций.

На основе проекта на базе ФИЦ ИЦиГ СО РАН разработана информационная система, обеспечивающая поддержку на всех этапах организации жизнедеятельности биоресурсных коллекций, в том числе процедур:

- информационной регистрации биоресурсных коллекций и формирования БД их метаданных с последующей актуализацией данных,
- подачи организациями заявок на выполнение государственных заданий по поддержке и развитию коллекций,
- оценки научно-технологической состоятельности и значимости заявок и отчетов экспертными группами и согласования результатов экспертизы с профильными отделениями РАН,
- хранения в электронной форме архива документации по ключевым этапам работы (паспорта коллекций, отчеты о работе за прошедшие периоды; заявки на финансирование на предстоящий год, организации-держатели коллекций, физлица (руководители коллекций, эксперты и т. д.).

Проделанная работа позволила собрать в одном хранилище все метаданные о коллекциях для их анализа, оценки, экспертизы.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 18-07-00460 "Разработка математических методов и комплексов программ для анализа надежности сетей различного назначения".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Мигов Д. А.

В рамках проекта разработан ряд эффективных методов, в том числе параллельных, для расчета и оценивания показателей надежности сетей различного назначения, а также для структурной оптимизации сетей по критерию надежности. Методы основываются на декомпозиции, кумулятивном уточнении границ надежности, генетических алгоритмах, статистическом моделировании, ассоциативных алгоритмах. Были изучены как широко известные показатели надежности, так и новые показатели. Впервые исследован и реализован подход к решению задач анализа сетевой надежности с использованием ассоциативных алгоритмов.

Для задач проектирования и структурной оптимизации сетей предложены и экспериментально исследованы метод проектирования топологии инженерных сетей минимальной стоимости с обеспечением заданного уровня надежности и генетический алгоритм размещения стоков в беспроводной сенсорной сети для получения максимально надежной топологии с точки зрения рассматриваемых показателей надежности.

На основе полученных методов разработаны программные комплексы, позволяющие проводить достоверный анализ надежности сетей различного назначения за приемлемое время, часть из них адаптированы для исполнения на суперкомпьютерных системах большой производительности, в том числе и гибридных. Так, предложенный метод оценки вероятности связности сети на основе ассоциативных алгоритмов позволяет использовать графические ускорители суперкомпьютеров при близкой к линейной масштабируемости алгоритма, что открывает новые возможности для решения задач анализа надежности сетей.

Проект РФФИ № 19-01-00562 а "Математические модели и алгоритмы для оптимизации функционирования сетей передачи данных с подвижными узлами"

Руководитель проекта – к.т.н. Соколова О. Д.

Объект исследования – беспроводные сети с меняющейся топологией. Подготовлен аналитический обзор публикаций, посвященных исследованиям по данной тематике. Подробно проанализировано применение систем массового обслуживания для моделирования технологий Multi-access edge computing, рассмотрены различные теоретико-графовые методы решения задач оптимизации передачи данных, выполнен сравнительный анализ известных систем имитационного моделирования для нестационарных сетей.

Получены новые результаты при исследовании проблемы использования технологий когнитивного радио для обеспечения надежной передачи данных с учетом интерференции множественного доступа. Для повышения надежности передачи критически важной информации предложен подход на основе дифференцированного обслуживания. С применением теории телетрафика построена модель для вычисления вероятности потери сообщений при пропорциональном дифференцируемом контроле доступа. С ее использованием разработан алгоритм вычисления минимального количества каналов при ограничениях на требуемые вероятности доставки сообщений различных классов. Алгоритм работает за линейное время и основан на оригинальной аппроксимации функции потерь Эрланга, приведено обоснование использования указанной аппроксимации.

Получили дальнейшее развитие оригинальные методы теории телетрафика для анализа и оптимизации сетей с мобильными узлами, использующие кластеризацию множества передающих узлов (разбиение на подмножества) и ретрансляторы сообщений для повышения эффек-

тивности передачи информации. С применением аппарата марковских процессов предложен подход к вычислению вероятностей состояний системы в установившемся режиме. С использованием указанных значений вычисляется вероятность блокировки пакетов и математическое ожидание количества обслуживаемых пакетов в системе.

Проект РФФИ № 19-47-540007 p_a "Модели и алгоритмы для эффективного сбора и передачи пространственно-временных данных о состоянии атмосферы мегаполиса с помощью беспроводных сенсорных сетей (на примере Новосибирска)"

Руководитель – к.т.н. Соколова О. Д.

Рассматривались актуальные задачи оптимизации мониторинга атмосферы в мегаполисах с помощью большого количества датчиков (геосенсоров), размещенных на некоторой территории (как в стационарных, так и в подвижных узлах). Проведен сравнительный анализ традиционных методов сбора данных от геосенсоров (алгоритмы маршрутизации строят остовное дерево) и методов на основе кластеризации узлов сети с использованием мобильного стока, посещающего каждый кластер. При втором подходе агрегирование трафика происходит через головной узел кластера. В качестве критерия рассматривались общие энергозатраты сети. Показано, что второй подход энергоэффективнее.

Исследовалась задача, возникающая при мониторинге протяженных объектов. На плоскости задан барьер в форме отрезка прямой линии, а также мобильные сенсоры, которые произвольно расположены на плоскости (каждый сенсор может пройти путь ограниченной длины). Часть барьера, вдоль которой прошел сенсор, считается покрытой этим сенсором. Требуется покрыть весь барьер минимальным числом сенсоров. В рамках проекта удалось найти несколько частных случаев, когда задача полиномиально разрешима, а также необходимые и достаточные условия существования решения.

Для моделирования мониторинга территории с помощью стационарных или мобильных датчиков была адаптирована система имитационного моделирования MTSS (Manufacturing and Transportation Simulation System). Проведено моделирование различных вариантов сбора информации - разбиение множества стационарных узлов на кластеры (сбор информации только с головных узлов), управление мощностью передатчиков (сбор данных с учетом мощности и остатка заряда сенсора). Оптимизация передачи данных проводилась с учетом энергоэффективности сети. В качестве тестируемого примера рассматривалась задача моделирования мониторинга загрязнения воздуха на территории Советского района.

Проект РФФИ № 19-17-50144 Экспансия "Вопросы обеспечения безопасности Интернета транспортных средств. Обзор исследований".

Руководитель проекта – к.т.н. Соколова О. Д.

Развитие и распространение технологий Интернета транспортных средств несут не только огромную выгоду пользователям, но и серьезные риски, обусловленные угрозами информационной безопасности. Проблема обеспечения безопасности Интернета в интеллектуальных транспортных системах является очень актуальной, исследования проводятся во всем мире. В рамках работы по проекту выполнен обзор результатов, опубликованных по этой теме в отечественных и зарубежных журналах за последние два десятилетия. Рассмотрены угрозы нарушения конфиденциальности, целостности, доступности информации. Показано, что используе-

мые средства защиты применяются на каждом из трех уровней периметра безопасности: предотвращение атак, обнаружение атак и противодействие атакам. Основная цель опубликованного обзора – дать представление о типовых подходах, используемых при решении задачи обеспечения безопасности Интернета транспортных средств (кластеризация узлов, использование придорожного оборудования и др.).

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Rodionov A. some new ideas about obtaining and estimating reliability polynomial of a random graph //Proc. of the 14th Intern. conf. on ubiquitous information management and communication (IMCOM), Taichung (Taiwan), Jan. 3–5, 2020. DOI: 10.1109/IMCOM48794.2020.9001760.
2. Monakhova E. A., Romanov A. Yu., Lezhnev E. V. Shortest path search algorithm in optimal two-dimensional circulant networks: Implementation for networks-on-chip // IEEE Access. 2020. Vol 8. P. 215010–215019. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3040323.
3. Монахова Э. А. Поиск кратчайших путей в оптимальных двумерных циркулянтах // Прикл. дискр. матем. 2020. № 47. С. 87–100. DOI: 10.17223/20710410/47/7.
4. Романов А. Ю., Сидоренко М. В., Монахова Э. А. Маршрутизация в сетях на кристалле с топологией трехмерный циркулянт // Информ. технол. 2020. Т. 26, № 1. С. 22–29. DOI: 10.17587/it.26.22-29.
5. Монахов О. Г., Монахова Э. А. Разработка метода метаэвристического программирования для синтеза нелинейных моделей // СибЖВМ. 2020. Т. 23, № 4. С. 415–429. DOI: 10.15372/SJNM20200405.
6. Monakhov O. G., Monakhova E. A. Development of a metaheuristic programming method for synthesis of nonlinear models // Num. Analysis and Appl. 2020, No 13(4). P. 349–359. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995423920040059>.
7. Монахова Э. А. Параметрическое задание серии семейств аналитически описываемых циркулянтных сетей степени шесть // Прикл. дискр. матем. 2020. № 49. С. 108–119. DOI: 10.17223/20710410/49/8.
8. Lin K., Chen H., Ai X., Shakhov V., Ni L., Yu J., Li Y. EUMD: Efficient slot utilization based missing tag detection with unknown tags // J. Network and Comput. Appl. 2020. Vol. 160. Art. 102640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102640>.
9. Shakhov V., Sokolova O., Koo I. A criterion for IDS deployment on IoT edge nodes // Springer. Lect. Notes in Comput. Sci. 2020. Vol. 12249. P. 546–556. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58799-4_40.
10. Мигов Д. Декомпозиция сети по сечениям при расчете ее надежности // Прикл. дискр. матем. 2020. № 47. С. 62–86. DOI 10.17223/20710410/47/6.
11. Kratov S., Zybarev Yu. To the question of the digital platform "Bioinformatics" creating and its system-forming solutions // [Electron. resource]. J. Integr. Bioinform. Art. 20200029. 2020. Nov. 2. DOI 10.1515/jib-2020-0029.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Monakhova E. A., Monakhov O. G., Romanov A. Yu., Lezhnev E. V. Analytical routing algorithm for networks on chip with the three-dimensional circulant topology // Proc. of the Moscow work-

shop on electronic and networking technologies (MWENT-2020), IEEE, Moscow, March 11–13, 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/MWENT47943.2020.9067418.

2. Monakhov O. Evolutionary synthesis of nonlinear models based on metaheuristic programming and templates // J. Physics: Conf. Ser. Vol. 1715. Intern. conf. "Marchuk Scientific Readings 2020" (MSR-2020). 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012010.

3. Scherbakova N. G., Bredikhin S. V. Preferential attachment in the citation network of scientific articles // J. Physics: Conf. Ser. Vol. 1715. Intern. conf. "Marchuk Scientific Readings 2020" (MSR-2020). 012055. doi:10.1088/1742-6596/1715/1/012055.

4. Li Z., Chen H., Lin K., Shakhov V., Shi L. Double attention-based deformable convolutional network for recommendation // IEEE/CIC Intern. conf. on communications in China (ICCC), Chongqing (China), 2020. P. 1051–1056. DOI: 10.1109/ICCC49849.2020.9238819.

5. Lyakhov O. A. Integer linear models of network planning // J. Physics: Conf. Ser. Vol. 1715. Intern. conf. "Marchuk Scientific Readings 2020" (MSR-2020). 012053. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012053.

6. Rudometov S., Sokolova O., Materukhin A. Optimization of mobile sink movement in the gathering spatio-temporal data process from air pollution sensors // Intern. Rus. Autom. Conf. (RusAutoCon 2020). Sochi, Sept. 6–12, 2020. P. 648–652. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208148.

7. Zybarev Y., Kratov S. The project office for bioresource collections management // Proc. of the Intern. multi-conf. on engineering, computer and information sciences "SIBIRCON 2019", Novosibirsk, 21–22 окт. 2019 г. P. 657–660. 8958441. DOI: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958441.

8. Sokolova O., Kratov S. Platforms for joint development and hosting of software and the example of their implementation in the FAP SB RAS // Proc. of the 2020 Intern. conf. "Engineering Technologies and Computer Science" (EnT 2020), Moscow – Saint-Peterburg, June 24–27, 2020. P. 15–18. DOI 10.1109/EnT48576.2020.00010.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Монахов О. Г. Эволюционный синтез нелинейных моделей на основе метаэвристического программирования и темплейтов // Тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 154–155.

2. Токтошов Г. Ы., Юргенсон А. Н., Мигов Д. А. О сложности задач оптимизации сетей инженерных коммуникаций // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 9. С. 17–23. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-9-17-23.

3. Токтошов Г. Ы., Юргенсон А. Н., Мигов Д. А. Исследование эффективности метода k-кратчайших путей для оптимизации топологии иерархических сетей // Труды 16-й Междунар. Азиат. школы-семина. "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 25–29 авг. 2020 г. С. 38–42. DOI: 10.24411/9999-018A-2020-100007.

4. Toktoshov G. Y., Yurgenson A. N., Migov D. A. Analysis of the complexity of the multicriterial optimization problems of engineering networks // Тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 148. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10257.

5. Бредихин С. В., Ляпунов В. М., Щербакова Н. Г. Динамика роста сети цитирования научных статей // Пробл. информ. 2020. № 1. С. 5–20. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10001.

6. Бредихин С. В., Щербакова Н. Г. Коллективное соавторство научных публикаций // Труды 16-й Междунар. Азиат. школы-семина. "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 25–29 авг. 2020 г. С. 6–9. DOI: 10.24411/9999-018A-2020-100009.
7. Тарханова О. Ю., Шахов В. В. К вопросу оценки эффективности беспроводных сенсорных сетей // Пробл. информ. 2020. № 1 (46). С. 35–65.
8. Соколова О. Д., Шахов В. В. Вопросы обеспечения безопасности интернета транспортных средств. Обзор исследований // Информ. проц. 2020. Т. 20, № 3. С. 231–253.
9. Токтошов Г. Ы., Юргенсон А. Н., Мигов Д. А. Исследование эффективности применения метода k-кратчайших путей для оптимизации топологии иерархических сетей // Труды 16-й Междунар. Азиат. школы-семина. "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 25–29 авг. 2020 г. С. 38–42. DOI: 10.24411/9999-018A-2020-100007.
10. Мигов Д. А., Юргенсон А. Н. Нахождение путей для подключения базовых станций к центрам питания в шахте // Труды 16-й Междунар. Азиат. школы-семина. "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 25–29 авг. 2020 г. С. 22–26. DOI: 10.24411/9999-018A-2020-100004.
11. Ляхов О. А. Ресурсные условия в управлении проектами // Труды 16-й Междунар. Азиат. школы-семина. "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 25–29 авг. 2020 г. С. 16–21. DOI: 10.24411/9999-018A-2020-100003.
12. Ляхов О. А. Сетевое планирование пограничных операций // Обработка информации и математическое моделирование : материалы Российской научно-технической конференции, Новосибирск, 23–24 апр. 2020 г. С. 106–116. [Electron. resource]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44119963>.
13. Пагано М., Родионов А., Соколова О., Ткачёв К. Модель очереди узла обработки мобильной сети геомониторинга // Пробл. информ. 2020. № 3. С. 5–13. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-100092.
14. Кальней А. М., Родионов А. С. Анализ надежности многоуровневых сетей с ненадежными вершинами // Пробл. информ. 2020. № 2. С. 5–15. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-100005.
15. Нестеров С. Н., Мигов Д. А., Остапкевич М. Б. Параллельные методы анализа сетевой надежности с использованием вычислителей с распределенной памятью и ПЛИС // Труды Междунар. конф. "Молодежь. Инновации. Технологии" (МНТК-2020), Новосибирск, 28–30 апр. 2020 г. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. С. 17–18.
16. Соколова О. Д., Матерухин А. В. Аналитический обзор современных информационных технологий в области сбора, обработки и анализа данных, применяемых для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха // Пробл. информ. 2020. № 1. С. 21–34. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-100002.
17. Шахов В. В., Соколова О. Д. Анализ сетей с нестационарной топологией. Обзор исследований // Пробл. информ., 2020, № 4 (49). DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10014.
18. Рудометов С. В., Соколова О. Д., Матерухин А. В. Оптимизация движения мобильных стоков в процессе сбора пространственно-временных данных о состоянии воздушной среды в киберфизических системах мониторинга производства // Фундаментальные проблемы управления производственными процессами в условиях перехода к индустрии 4.0. : тез. докл. науч. се-

минара в рамках Международной научно-технической конференции "Автоматизация". 2020. С. 231–235.

19. Scherbakova N. G., Bredikhin S. V. Preferential attachment in the citation network of scientific articles // Тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 150. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10327.

Свидетельства о регистрации в ФАП СО РАН

1. Свидетельство о регистрации программы в ФАП СО РАН № PR20001. Укладка иерархических сетей / А. Н. Юргенсон.

2. Свидетельство о регистрации программы в ФАП СО РАН № PR20002. Система моделирования движения транспорта и передачи данных между движущимися узлами Mobile Monitoring / К. В. Ткачёв Кирилл Валерьевич, В. И. Мишуков, С. П. Корсаков.

Участие в конференциях и совещаниях

1. 16-я Школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 25–29 августа 2020 г. – 4 доклада, из них 1 пленарный (Родионов А. С., Мигов Д. А., Юргенсон А. Н., Токтошов Г. Ы., Ляхов О. А.).

2. 14th International conference on ubiquitous information management and communication (IMCOM), Taichung (Taiwan), Jan. 3–5, 2020 – 1 доклад (Родионов А. С.).

3. 5-я Международная научная конференция "Информатика и прикладная математика", Алматы (Казахстан), 29 сентября – 1 октября 2020 г. – 1 пленарный доклад (Родионов А. С.).

4. Международная конференция, посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. – 5 докладов, из них 1 пленарный (Родионов А. С., Монахов О. Г.; Рудометов С. В., Соколова О. Д., Ляхов О. А.).

5. Moscow Workshop on electronic and networking technologies (MWENT-2020), IEEE, Moscow, March 11–13, 2020 – 1 доклад (Монахов О. Г., Монахова Э. А.).

6. Научно-практическая конференция, посвященная к развитию и цифровизации региона "Дистанционное обучение – вызовы XXI века", Кыргызская Республика, 28 мая 2020 г. – 1 пленарный доклад (Токтошов Г. Ы.).

7. International conference on computational science and its applications (ICCSA), Cagliari (Italy), July 1–4, 2020 – 1 доклад (Шахов В. В.).

8. IEEE/CIC International conference on communications in China (ICCC), Chongqing (China), August 9–11, 2020 – 1 доклад (Шахов В. В.).

9. Российская научно-техническая конференция "Обработка информации и математическое моделирование", Новосибирск, 23–24 апреля 2020 г. – 1 доклад (Ляхов О. А.).

10. Международная конференция "Молодежь. Инновации. Технологии" (МНТК-2020), Новосибирск, 28–30 апреля 2020 г. – 1 доклад (Нестеров С. Н., Мигов Д. А., Остапкевич М. Б.).

11. International Russian automation conference (RusAutoCon), Сочи, September, 6–12, 2020 – 1 доклад (Рудометов С. В., Соколова О. Д., Матерухин А. В.).

12. 12th International Multiconference on bioinformatics of genome regulation and structure / systems biology" (BGRS/SB-2020), Novosibirsk, July 6–10, 2020 – 1 доклад (Зыбарев Ю. М., Кратов С. В.).

13. 12-я Всероссийская научная конференция "Научный сервис в сети Интернет", Новороссийск, 21–25 сентября 2020 г. – 1 доклад (Кратов С. В.).

14. International conference "Engineering Technologies and Informatics: Innovations and Applications" (EnT-2020), Moscow, October 10–14, 2020 – 1 доклад (Соколова О. Д., Кратов С. В.).

15. The 16th International scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines", Omsk, November 10–12, 2020 – 1 доклад (Подсадников А. В., Розов К. В., Кратов С. В.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Родионов А. С.:

– сопредседатель программного комитета 16-й Школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 25–29 августа 2020 г.,

– член программного комитета 14th International conference on ubiquitous information management and communication (IMCOM), Taichung (Taiwan), January 3–5, 2020,

– член программного комитета V Международной научной конференции "Информатика и прикладная математика", Алматы, Казахстан, 29 сентября – 1 октября 2020 г.,

– член программного комитета Международной конференции, посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.,

– член организационно-программного комитета 21-й Международной конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам "EDM 2020", Новосибирск, 29 июня – 3 июля 2020 г.;

2. Токтошов Г. Ы. – член организационного комитета 16-й Международной Азиатской школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 29 июля 2020 г.;

3. Шахов В. В. – член программного комитета The 14th International conference on ubiquitous information management and communication, Taichung (Taiwan), January 3–5, 2020 г.;

4. Соколова О. Д. – ученый секретарь программного комитета 16-й Международной Азиатской школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 26 июля–5 августа 2020 г.;

5. Ткачёв К. В.:

– член организационного комитета 16-й Школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 25–29 августа 2020 г.,

– член организационного комитета Международной конференции, посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 11

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 10

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 28

Свидетельств о регистрации в ФАП СО РАН – 2

Докладов на конференциях – 22, в том числе пленарных 4

Членов организационных или программных комитетов конференций – 10

Кадровый состав

- | | | |
|---------------------|----------------|-----------|
| 1. Родионов А. С. | зав. лаб. | д.т.н. |
| 2. Бакулина М. П. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 3. Бредихин С. В. | в.н.с. | к.т.н. |
| 4. Волжанкина К. А. | м.н.с. | |
| 5. Капустина Г. А. | ведущ. инженер | |
| 6. Кратов С. В. | н.с. | |
| 7. Ляпунов В. М. | ведущ. инженер | |
| 8. Ляхов О. А. | н.с. | к.э.н. |
| 9. Мигов Д. А. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 10. Моисеенко В. В. | н.с. | |
| 11. Монахов О. Г. | в.н.с. | к.т.н. |
| 12. Монахова Э. А. | с.н.с. | к.т.н. |
| 13. Рудометов С. В. | н.с. | к.т.н. |
| 14. Соколова О. Д. | с.н.с. | к.т.н. |
| 15. Ткачёв К. В. | м.н.с. | |
| 16. Токтошов Г. Ы. | н.с. | к.т.н. |
| 17. Трофимова Л. В. | ведущ. инженер | |
| 18. Шахов В. В. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 19. Щербакова Н. Г. | с.н.с. | |
| 20. Юргенсон А. Н. | н.с. | к.ф.-м.н. |

Ткачев К. В. – молодой научный сотрудник.

Педагогическая деятельность

- Бакулина М. П. – ст. преподаватель НГУ
 Родионов А. С. – профессор НГУ и СибГУТИ
 Токтошов Г. Ы. – доцент СибГУТИ
 Шахов В. В. – доцент НГТУ
 Мигов Д. А. – ст. преподаватель НГУ
 Ткачёв К. В. – ст. преподаватель ВКИ НГУ

Руководство студентами

- Ефремов Р. Т. – 1-й курс магистратуры НГУ, руководитель Родионов А. С.
 Хагай В. В. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Шахов В. В.
 Ластович А. А. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Шахов В. В.
 Чулков Д. Д. – 1 курс магистратуры НГТУ, руководитель Шахов В. В.
 Сергеев К. С. – 4-й курс НГУ, руководитель Мигов Д. А.
 Тарасов А. А. – 4-й курс НГУ, руководитель Мигов Д. А.

Руководство аспирантами

- Буров В. С. – 2-й год, ИВМиМГ, руководитель Родионов А. С.
Кальней А. М. – 2-й год, ИВМиМГ, руководитель Родионов А. С.
Куянцев В. П. – 1-й год, ИВМиМГ, руководитель Родионов А. С.

Защита дипломов

- Ефремов Р. Т. – бакалавр НГУ, руководитель Родионов А. С.
Багдуев А. А. – бакалавр НГУ, руководитель Родионов А. С.
Иванов А. А. – бакалавр НГУ, руководитель Родионов А. С.
Куянцев В. П. – магистр НГУ, руководитель Родионов А. С.

ЛАБОРАТОРИЯ СИНТЕЗА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Зав. лабораторией д.т.н. Малышкин В. Э.

Важнейшие достижения

Модернизированы и реализованы новые алгоритмы генерации распределенных программ численного моделирования на мультикомпьютерах для системы LuNA

Д.т.н. Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.

Система LuNA обеспечивает автоматическое конструирование распределенных программ численного моделирования на мультикомпьютерах. Конструирование программы осуществляется в два этапа: вывод алгоритма решения поставленной задачи в аксиоматической теории, частично описывающей предметную область, и генерация распределенной программы по выведенному алгоритму. Автоматическое конструирование программ в других предметных областях сводится к замене частичной аксиоматической теории, описывающей предметную область. В 2020 г. были модернизированы алгоритмы генерации программ, что позволило уменьшить в 3–5 раз время выполнения сгенерированных программ. Ускорение достигнуто за счет сокращения накладных расходов на работу исполнительных систем. Модернизированные алгоритмы сохраняют возможность автоматического обеспечения динамических свойств конструируемых программ, таких как динамическая балансировка нагрузки на вычислительные узлы мультикомпьютера. Достигнутое качество конструирования параллельных программ позволяет начать работы по реализации технологии активных знаний.

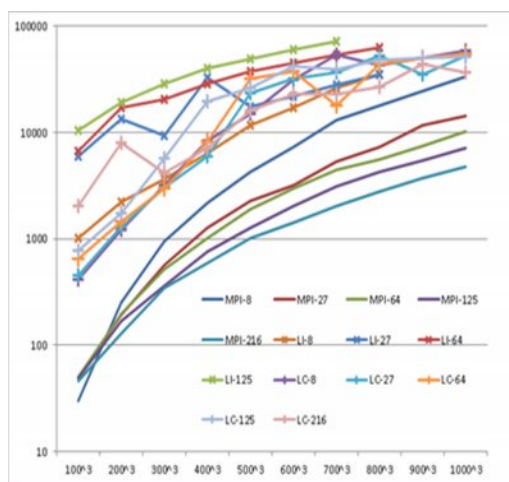


Рис. 1 – Сравнительные временные характеристики исполнения автоматически сгенерированных и написанных вручную программ, реализующих решение модельного уравнения теплопроводности в единичном кубе

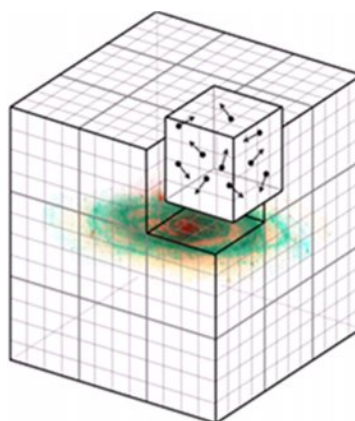


Рис. 2 – Схема описания задачи в виде частичной аксиоматической теории в терминах фрагментов данных и вычислений в системе LuNA

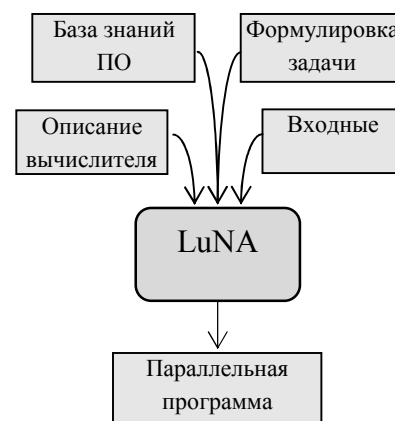


Рис. 3 – Схема конструирования параллельной программы системой LuNA

Результаты исследований представлены в работе

Malyshkin V., Akhmed-Zaki D., Perepelkin V. Parallel programs execution optimization using behavior control in LuNA system // J. of Supercomput. Special Issue on Parallel Computing Technologies 2020 (принято к печати, спецвыпуск, 2021).

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Технологии, алгоритмы и система автоматического конструирования параллельных программ численного моделирования на пета- и эксафлопсных суперЭВМ".

Номер государственной регистрации НИР 01201370230.

Руководитель – д.т.н. Малышкин В. Э.

Этап 2020 г.

1) Разработка методики использования системы автоматического конструирования параллельных программ численного моделирования LuNA и необходимой эксплуатационной документации. Оптимизация тех алгоритмов системы LuNA, низкое качество которых существенно сказывается на качестве автоматического конструирования параллельных программ численного моделирования LuNA, и/или разработка новых алгоритмов, обеспечивающих более высокое качество работы системы LuNA. Разработка и реализация Web интерфейса для удаленного доступа к системе LuNA.

2) Создание клеточно-автоматных моделей нелинейной пространственной динамики с использованием технологии параллельного программирования. Разработка целочисленных клеточно-автоматных моделей потоковых и волновых процессов и создание комплекса программ для их параллельной реализации на кластерных суперкомпьютерах.

1) Улучшены алгоритмы системы LuNA, осуществляющие трансляцию LuNA-программ в исполняемое представление, и алгоритмы исполнительной системы LuNA:

- статический алгоритм автоматической сборки "мусора" для LuNA-программ частного вида,
- динамический алгоритм балансировки вычислительной нагрузки на узлы мультикомпьютера на основе подхода "job stealing",
- алгоритмы профилирования LuNA-программ и алгоритм анализа профиля.

Разработана документация по эксплуатации системы LuNA, а также механизмы повышения информативности сообщений об ошибках компиляции и исполнения LuNA-программ.

Одной из задач развития проекта LuNA является создание удобных средств для применения языка LuNA пользователями. В 2020 г. обеспечена возможность разработки и применения LuNA-программ через веб-интерфейс. Эта работа выполнена в рамках развития проекта HPC Community Cloud (HPC2C).

Проект HPC2C – создание системы высокоуровневого управления организацией вычислений, которая обеспечивает унифицированные программный и пользовательский интерфейсы для управления организацией вычислений на удаленных высокопроизводительных вычислительных системах (BBC). Сервисы HPC2C позволяют программно (через RESTful интерфейс) или средствами веб-приложения

- перемещать файлы между персональным компьютером пользователя, файловыми хранилищами HPC2C и BBC, к которым у пользователя есть персональный доступ (учетная запись),
- осуществлять постановку и отслеживание выполнения вычислительных задач на BBC,
- разрабатывать с помощью визуального языка сложные сценарии, состоящие из указанных операций,

– разрабатывать (в том числе пользуясь встроенными инструментами генерации кода) пользовательские интерфейсы для создания высокоуровневых сред управления вычислительными экспериментами.

Возможности интегрированной среды разработки (IDE), встроенной в веб-приложение HPC2C, были расширены для поддержки разработки LuNA-программ. Автоматизирована отправка разработанных программ на удаленные вычислительные системы для компиляции/сборки и постановки вычислительных задач на основе этих программ. Обеспечена возможность использовать программы на языке LuNA в качестве операций, которые могут быть включены в сложные сценарии вычислений, выполняемые под управлением HPC2C.

2) Разработана клеточно-автоматная модель потока в трубе с локальным сужением, имеющая целочисленный алфавит состояний клеток и синхронный режим работы. Создан комплекс параллельных программ для реализации потоковых процессов на основе целочисленных клеточно-автоматных моделей и проведены компьютерные эксперименты с клеточным массивом размером 5000×500 клеток. Просвет сужения варьировался от 100 до 300 клеток. Концентрация частиц соответствует приблизительно 50 на клетку. Поля скорости и давления исследуемого потока приведены на рис. 4. Длина и направление векторов соответствуют модулю и направлению скорости потока в точке. Яркость фона пропорциональна давлению.

Показана возможность применения исследуемой модели в условиях движения потока в прямой трубе при постоянной температуре в докритическом режиме; в этих условиях критическое число Рейнольдса составляет несколько тысяч. Результаты моделирования совпадают с известными данными, это позволяет заключить, что клеточно-автоматная модель адекватно моделирует ламинарный поток в трубе (рис. 4).

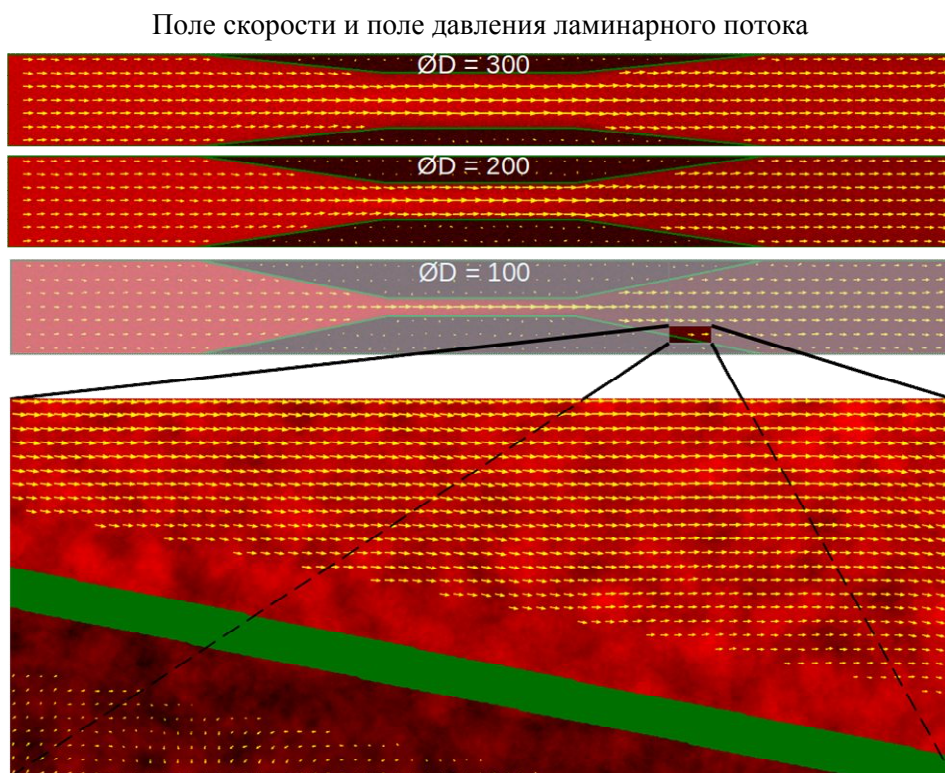


Рис. 4 – Диаметр трубы 300, 200 и 100 клеток с увеличенным фрагментом

Исследовано поведение клеточно-автоматной модели диффузии с целочисленным алфавитом состояний клетки в одно-, дву- и трехмерном пространствах. Одна и та же двумерная задача промоделирована с помощью одно- и двумерной и трехмерной моделей. Приведено сравнение результатов.

Начальная концентрация в выбранной для анализа одномерной и двумерной задачах распределена в виде дельта-функции соответствующей размерности, которые имеют аналитическое решение. В начальный момент времени значение концентрации равно нулю всюду, кроме начала координат, где она полагается бесконечной, а интеграл концентрации равен единице. Размер клеточного массива, выбранный для проведения компьютерных экспериментов, составил 1000 клеток в каждом измерении. Распределение концентрации вдоль каждого направления совпадает с функцией Грина, являющейся решением уравнения диффузии соответствующей размерности для дельта-функции. На рис. 5 показано распределение концентрации, полученное с использованием двумерной и трехмерной моделей для одномерной и двумерной задач.

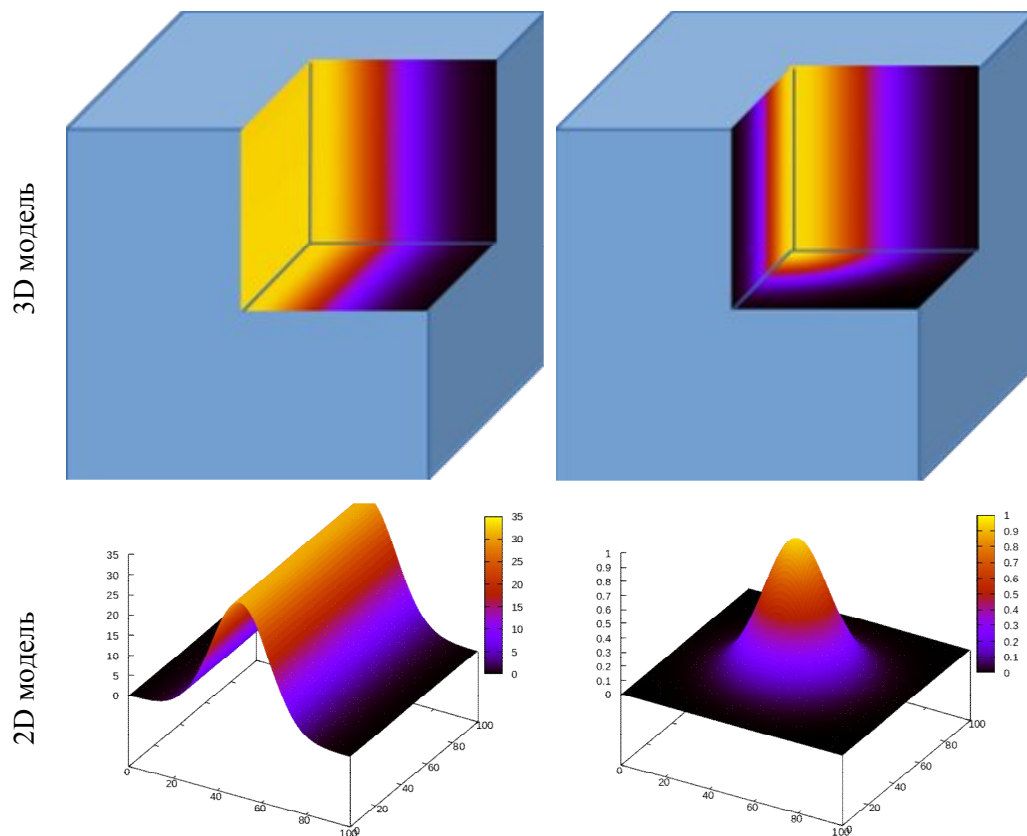


Рис. 5 – Распределение концентрации, полученное с использованием дву- и трехмерной моделей для одно- и двумерной задач

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Pomelov S., Skopin I. A performance prediction method showcase: Ant colony optimization scaling for a particular computer system // Test Engin. and Manag. Mattingly Publishing (US). ISSN 0193-4120. V. 83. May – June 2020. P. 27330–27350.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Перепёлкин В. А. Система LuNA автоматического конструирования параллельных программ численного моделирования на мультикомпьютерах // Пробл. информ. 2020. № 1. С. 66–74. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10004.
2. Скопин И. Н. Локальное и глобальное время при моделировании развивающихся систем // Пробл. информ. 2020. № 4. С. 5–26. DOI: 10.24411/2073-0667-2020-10013.
3. Kireev S. E., Sabelfeld K. K. Stochastic simulation of GaN island formation in molecular beam epitaxy // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 окт. 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 42. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10075.
4. Malyshkin V. E., Perepelkin V. A., Belyaev N. A. The overview of LuNA system for automatic construction of parallel programs of numerical simulation // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 106. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10177.
5. Медведев Ю. Г. Имитационное моделирование прохождения ламинарного потока через локальное сужение в трубе // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 107. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10178.
6. Скопин И. Н. Особенности разработки программных систем с длительным жизненным циклом использования // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 107. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10179.
7. Снытникова Т. В., Непомнящая А. Ш. Параллельная реализация на GPU инкрементального алгоритма Рамалингама для динамической обработки потоковых графов с одним источником // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 111–112. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10186.
8. Городничев М. А., Марченко М. А., Перепёлкин В. А. Применение платформы HPC Community Cloud для автоматической генерации интерактивного суперкомпьютерного приложения на примере статистического моделирования газовых разрядов // Марчуковские научные чтения 2020 : тезисы Междунар. конф., посв. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. / Ин-т вычислит. математики и матем. геофизики СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. С. 104–105. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10175.
9. Скопин И. Н. Понятие времени при моделировании развивающихся систем // Материалы Национального суперкомпьютерного форума (НСКФ-2020). [Electron. resuorce]. URL: http://2020.nscf.ru/TesisAll/03_Systemnoe_i_promezhytochnoe_PO/058_SkopinIN.pdf.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященная 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. – 6 докладов (Городничев М. А., Перепёлкин В. А., Киреев С. Е., Малышкин В. Э., Снытникова Т. В., Непомнящая А. Ш., Скопин И. Н., Медведев Ю. Г., Беляев Н. А.).

2. 13-я Международная конференция "Новые информационные технологии в исследовании сложных структур" (ISAM 2020), Томск, 7–9 сентября 2020 г. – 2 доклада (Медведев Ю. Г., Киреев С. Е.).

3. Национальный Суперкомпьютерный форум (НСКФ-2020), Переславль-Залесский, 24–27 ноября 2020 г. – 1 доклад (И. Н. Скопин).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Малышкин В. Э.:

– член организационного комитета 34-й Зимней школы по параллельному программированию, 27–31 января 2020 г., Новосибирск;

– член организационного комитета 35-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, 6–17 июля 2020 г., Новосибирск;

– член программного комитета 35-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, 6–17 июля 2020 г., Новосибирск.

2. Маркова В. П.:

– член организационного комитета 34-й Зимней школы по параллельному программированию, 27–31 января 2020 г., Новосибирск;

– член программного комитета 35-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, 6–17 июля 2020 г., Новосибирск;

– член организационного комитета 35-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, 6–17 июля 2020 г., Новосибирск.

3. Киреев С. Е.:

– член организационного комитета 34-й Зимней школы по параллельному программированию, 27–31 января 2020 г., Новосибирск;

– член организационного комитета 35-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, 6–17 июля 2020 г., Новосибирск.

4. Перепёлкин В. А.:

– член организационного комитета 34-й Зимней школы по параллельному программированию, 27–31 января 2020 г., Новосибирск;

– член организационного комитета 35-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, 6–17 июля 2020 г., Новосибирск.

5. Городничев М. А.:

– член организационного комитета 34-й Зимней школы по параллельному программированию, 27–31 января 2020 г., Новосибирск;

– член организационного комитета 35-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, 6–17 июля 2020 г., Новосибирск.

6. Щукин Г. А.:

– член организационного комитета 34-й Зимней школы по параллельному программированию, 27–31 января 2020 г., Новосибирск;

– член организационного комитета 35-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, 6–17 июля 2020 г., Новосибирск.

7. Калгин К. В. – член организационного комитета 35-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, 6–17 июля 2020 г., Новосибирск.

8. Арыков С. Б. – член организационного комитета 35-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, 6–17 июля 2020 г., Новосибирск.

4. Медведев Ю. Г.:

– член программного комитета 13-й Международной конференции "Новые информационные технологии в исследовании сложных структур" (ICAM 2020), Томск, 7–9 сентября 2020 г.

– член организационного комитета 13-й Международной конференции "Новые информационные технологии в исследовании сложных структур" (ICAM 2020), Томск, 7–9 сентября 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 1

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 10

Докладов на конференциях – 9

Членов организационных или программных комитетов конференций – 18

Кадровый состав

1. Малышкин В. Э.	зав. лабораторией	д.т.н.
2. Арыков С. Б.	м.н.с.	к.ф.-м.н.
3. Ачасова С. М.	с.н.с.	к.т.н.
4. Власенко А. Ю.	м.н.с.	к.т.н.
5. Городничев М. А.	н.с.	
6. Калгин К. В.	м.н.с.	к.ф.-м.н.
7. Киреев С. Е.	н.с.	
8. Маркова В. П.	с.н.с.	к.т.н.
9. Медведев Ю. Г.	с.н.с.	к.т.н.
10. Непомнящая А. Ш.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
11. Перепелкин В. А.	н.с.	
12. Савукова В. А.	техник 1-й кат.	
13. Скопин И. Н.	с.н.с.	к.т.н.
14. Снытникова Т. В.	м.н.с.	
15. Щукин Г. А.	н.с.	

Проведение школ по параллельному программированию

1. 34-я Зимняя школа по параллельному программированию, 27–31 января 2020 г., Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, НГУ, НГТУ.

2. 35-я Летняя международная молодежная школа-конференция по параллельному программированию, 6–17 июля 2020 г., Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, НГУ, НГТУ.

Международные научные связи

1. Лаборатория синтеза параллельных программ ИВМиМГ СО РАН совместно с лабораторией компьютерных наук НИИ Математики и механики Казахского национального университета им. аль-Фараби (Казахстан, Алма-Ата) участвует в выполнении двух проектов, поддержанных МОН РК:

– «Создание высокопроизводительных интеллектуальных технологий анализа и принятия решения для системы "логистика-агломерация" в рамках формирования цифровой экономики РК» (BR05236340);

– "Разработка системы управления активными знаниями для автоматизации конструирования высокопроизводительных параллельных программ обработки неструктурированных данных и численного моделирования в задачах фильтрации" (AP05134651).

Координаторы работ по темам: с казахской стороны – д.т.н., проф. Д. Ж. Ахмед-Заки, с российской стороны – д.т.н., проф. В. Э. Малышкин. Даты начала и окончания работ по темам: 2018–2020 г.

2. В. Э. Малышкин – член редколлегии международных журналов The Journal of Parallel and Distributed Computing, The International Journal of Big Data Intelligence, The Journal of Supercomputing, The International Journal of Computational Science and Engineering.

Педагогическая деятельность

Малышкин В. Э. – проф., зав. каф. НГУ и НГТУ

Маркова В. П. – доц. НГУ и НГТУ

Арыков С. Б. – доц. НГТУ

Власенко А. Ю. – доц. НГУ

Киреев С. Е. – ст. преподаватель НГУ

Медведев Ю. Г. – доц. ВКИ НГУ

Городничев М. А. – ст. преподаватель НГУ, ассистент НГТУ

Калгин К. В. – ст. преподаватель НГУ

Перепелкин В. А. – ст. преподаватель НГУ

Щукин Г. А. – ассистент НГТУ

Руководство аспирантами

1. Беляев Н. А. – ИВМ и МГ, руководитель Малышкин В. Э.

2. Нурислам Муратбекулы Касымбек – Казахский национальный университет им. аль-Фараби, руководители Лебедев Д. В. (Каз.НУ им. аль-Фараби), В. Э. Малышкин.

3. Иост А. В. – НГТУ, руководитель Малышкин В. Э.

4. Кондратов А. С. – НГУ, руководитель Малышкин В. Э.

Защита дипломов

1. Чмиль А. В. – бакалавр НГУ, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.
2. Кудинов А. Ю. – бакалавр НГУ, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.
3. Шмидт М. С. – бакалавр НГУ, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.
4. Полушин К. А. – бакалавр НГУ, руководитель Малышкин В. Э.
5. Иванишкин Д. С. – бакалавр НГУ, руководитель Маркова В. П.
6. Холявко П. О. – бакалавр НГУ, руководитель Малышкин В. Э.
7. Дедов Е. И. – бакалавр НГУ, руководитель Маркова В. П.
8. Ершов С. И. – бакалавр НГУ, руководитель Маркова В. П., Медведев Ю. Г.
9. Юрганов Д. С. – бакалавр НГУ, руководитель Маркова В. П., Калгин К. В.
10. Никитин А. К. – бакалавр НГТУ, руководитель Малышкин В. Э.
11. Нестёркина А. А. – магистрант НГТУ, руководитель Малышкин В. Э.
12. Мошкина А. Д. – магистрант НГТУ, руководитель Малышкин В. Э.
13. Кислицын И. О. – магистрант НГТУ, руководитель Маркова В. П.

Руководство студентами

1. Баранов И. Н. – НГУ, ФИТ, 3-й курс, руководители Малышкин В. Э., Киреев С. Е.
2. Кондратьева В. С. – НГУ, ФИТ, 3-й курс, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.
3. Налепова Е. Д. – НГУ, ФИТ, 3-й курс, руководители Малышкин В. Э., Городничев М. А.
4. Шевяков И. Г. – НГУ, ФИТ, 3-й курс, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.
5. Бурнышев Е. К. – НГУ, ФИТ, 3-й курс, руководители Маркова В. П., Киреев С. Е.
6. Чемагин А. С. – НГУ, ФИТ, 3-й курс, руководители Малышкин В. Э., Киреев С. Е.
7. Парфёнов Д. Р. – НГУ, ФИТ, 4-й курс, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.
8. Плешков А. В. – НГУ, ФИТ, 4-й курс, руководители Маркова В. П., Перепёлкин В. А.
9. Александров Е. А. – НГУ, ФИТ, 4-й курс, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.
10. Лямин А. С. – НГУ, ФИТ, 4-й курс, руководители Маркова В. П., Перепёлкин В. А.
11. Масыч М. А. – НГУ, ФИТ, 4-й курс, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.
12. Голиков М. О. – НГУ, ФИТ, 4-й курс, руководители Маркова В. П., Киреев С. Е.
13. Зыкин М. И. – НГУ, ФИТ, 4-й курс, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.
14. Борзов А. С. – НГУ, ФИТ, 4-й курс, руководители Маркова В. П., Городничев М. А.
15. Кудинов А. Ю. – НГУ, ФИТ, 1-й курс магистратуры, руководители Маркова В. П., Городничев М. А.
16. Холявко П. О. – НГУ, ФИТ, 1-й курс магистратуры, руководители Маркова В. П., Городничев М. А.
17. Чмиль А. В. – НГУ, ФИТ, 1-й курс магистратуры, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.
18. Меркурьев З. В. – НГУ, ФИТ, 1-й курс магистратуры, руководители Маркова В. П., Городничев М. А.
19. Полушин К. А. – НГУ, ФИТ, 1-й курс магистратуры, руководители Маркова В. П., Городничев М. А.
20. Артюхов А. А. – НГУ, ФИТ, 2-й курс магистратуры, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.
21. Ижицкий Р. Л. – НГУ, ФИТ, 2-й курс магистратуры, руководители Малышкин В. Э., Перепёлкин В. А.

ЛАБОРАТОРИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Зав. лабораторией к.ф.-м.н. Черных И. Г.

Важнейшие достижения**Новая вычислительная модель белых карликов и взрыва сверхновых типа Ia**

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

Построена вычислительная модель эволюции белых карликов и взрыва сверхновых типа Ia. Для детального описания горения углерода в белом карлике использована технология вложенных сеток, когда гидродинамика взрыва моделируется на регулярной сетке, а подсеточные процессы горения углерода в качестве отдельной гидродинамической задачи – на вложенных сетках. Вычислительные эксперименты показали, что энергия взрыва значительно варьируется в зависимости от ядерного горения углерода, это приводит к различию в кривых блеска (рис. 1), что в свою очередь говорит о ненадежности использования сверхновых типа Ia в виде "стандартных свечей" для измерения расстояний во Вселенной.

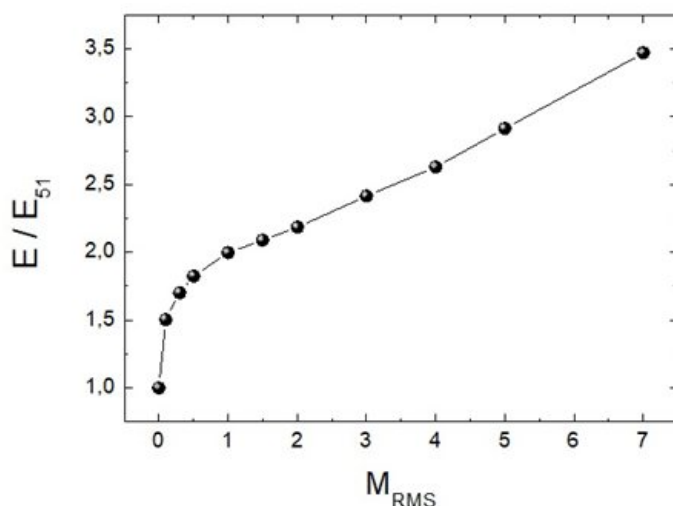


Рис. 1 – Отношение энергии взрыва сверхновой типа Ia при турбулентном горении к энергии статического горения в зависимости от отношения скорости возмущения к скорости звука

Результаты исследований опубликованы в работе

Kulikov I. M., Chernykh I. G., Sapetina A. F., Lomakin S. V., Tutukov A. V. A new Rusanov-type solver with a local linear solution reconstruction for numerical modeling of white dwarf mergers by means massive parallel supercomputers // Lobachevskii J. of Mathematics. 2020. Vol. 41, iss. 8. P. 1485–1491.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершнным в 2020 г.
в соответствии с планом НИР института .**

Проект НИР "Разработка суперкомпьютерных технологий и методов моделирования масштабируемости алгоритмов для высокопроизводительных вычислительных систем".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2019-0009.

Руководитель – д.ф.-м.н. Глинский Б. М.

Этап 2020 г.

Исследована эволюция гигантского газового облака типа облака Смита в виде движения плотного газового облака через разреженную среду. Физико-математическая модель основана

на решении уравнений многокомпонентной односкоростной гравитационной гидродинамики, функции охлаждения при низкой температуре, функции охлаждения при высокой температуре, нагревания космическими лучами, фотоэлектрического нагревания, химической кинетики до иона гидрида гелия. В ходе вычислительных экспериментов установлено, что активное образование иона гидрида гелия происходит в разреженной области кокона облака Смита за фронтом ударной волны.

Для созданной ранее суперкомпьютерной модели трехмерной динамики газопылевого гравитирующего околозвездного диска, основанной на комбинации метода SPH (метод сглаженных частиц) для решения газодинамических уравнений и метода частиц-в-ячейках для моделирования пылевой компоненты, был разработан прототип программного комплекса, использующий пакет OpenFPM в качестве структур данных для организации параллельного взаимодействия отдельных блоков параллельного алгоритма для метода частиц. Реализованный параллельный алгоритм предназначен для использования на суперкомпьютерах с распределенной памятью и основан на трехмерной декомпозиции области, при этом за реализацию вспомогательных операций, таких как эффективная передача частиц между ячейками или их сортировка по каждой ячейке сетки, отвечают структуры данных пакета OpenFPM. Проверка работоспособности реализации модели проводится на решении распада разрыва для двухфазной среды (частицы и газ) в трехмерной прямоугольной области с периодическими граничными условиями, где ударная волна распространяется вдоль оси X .

Проведено исследование динамики плазмы в режиме непрерывной инъекции ионного пучка в осесимметричную открытую ловушку, предназначенную для создания компактного термоядерного реактора. В вычислительных экспериментах установлено, что для большого диапазона задаваемых физических характеристик пучка, фоновой плазмы и конфигурации магнитного поля движение непрерывно инжектируемого ионного пучка сопровождается образованием магнитной каверны – области пониженного давления магнитного поля.

Давление магнитного поля внутри каверны может составлять 1 % от давления начального поля на оси системы, что позволяет существенно увеличить пробочное отношение и время удержания плазмы. На границе магнитной каверны формируется скачок магнитного поля, пространственный размер которого определяется величиной ларморовского радиуса инжектируемых ионов. Наблюдаемый процесс характеризуется вытеснением фоновой плазмы из области магнитной каверны и образованием слоя повышенной плотности плазмы на ее границе. Пространственный размер формируемой магнитной каверны определяется током инжектируемого ионного пучка.

Разработаны модификации двумерных моделей. В частности, разработана процедура инъекции пучка из любой точки области в произвольном направлении. Модельные частицы фона разделены на подвижные и неподвижные. Для повышения устойчивости алгоритма введена процедура сглаживания.

Разработана трехмерная численная модель диамагнитного режима открытой магнитной ловушки. Расчетная область имеет форму параллелепипеда, в центр ее вводится ионный пучок. Кинетическое уравнение Власова используется для ионной компоненты фоновой плазмы и ионов инжектируемого пучка, электронная компонента плазмы описывается приближением магнитной гидродинамики. Необходимость создания такой гибридной модели обусловлена

необходимостью учета эффектов, связанных как с гидродинамическими, так и кинетическими неустойчивостями плазменных течений в неосесимметричных магнитных полях. Полученные при численном моделировании результаты образования каверны магнитного поля и развития желобковой структуры на ее границе соответствуют теоретическим и лабораторным данным о возможности формирования диамагнитного режима удержания плазмы в открытой магнитной ловушке.

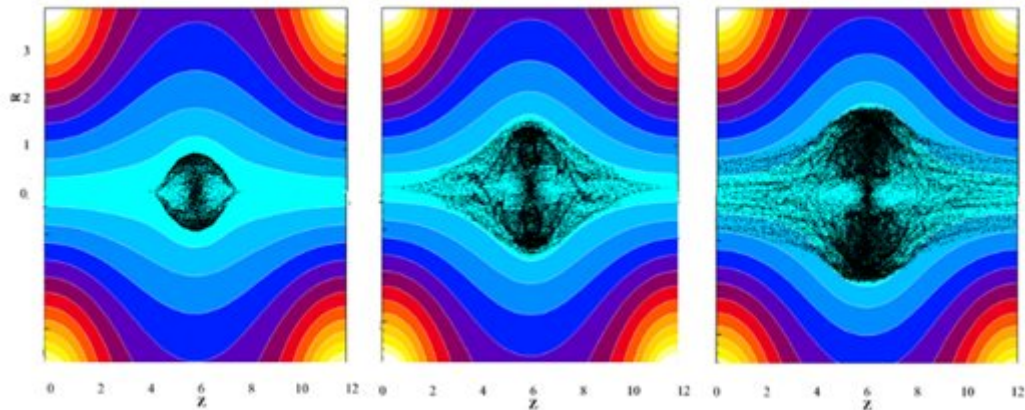


Рис. 2 – Временная эволюция конфигурации магнитного поля открытой ловушки и положение протонов инжектируемого пучка

Реализованы и исследованы три метода расчета плотности и средних скоростей ионов в двумерном случае с применением автоматической векторизации циклов компилятором. Два из них оказались неприменимы за счет низкой эффективности вследствие существенного различия в числе частиц в ячейках. Алгоритм позволил добиться ускорения в три раза. Проведение балансировки загрузки процессорных ядер несколько раз в единицу времени (тысячи временных шагов) позволило сократить время расчетов в два раза на начальных этапах эволюции системы.

Разработан параллельный алгоритм декомпозиции для метода частиц-в-ячейках для различных форм-факторов модельных частиц. Форм-факторы могут иметь различные размеры, поэтому декомпозиция была выполнена с переменной областью перекрытия. Это позволяет использовать в параллельной программе форм-факторы разных порядков точности. С учетом этого также были модифицированы схемы интерполяции поля и расчета плотности тока и добавлена возможность обхода произвольного числа узлов сетки. Также в параллельный алгоритм добавлены элементы балансировки вычислительной нагрузки с учетом процессов полевой ионизации. Проведены численные эксперименты по оценке производительности кода с учетом полевой ионизации и без. Благодаря использованию форм-факторов различного порядка (нейтральные атомы и ионы рассчитываются с пониженным порядком, поскольку не вносят существенный вклад в плотность тока), учет в модели полевой ионизации с необходимостью дополнительной интерполяции поля на каждую частицу потребовал не более 10 % дополнительных ресурсов.

Построены две приближенные геолого-геофизические модели вулкана Эльбрус с эллиптической и конусовидной верхними магматическими камерами, включенными в слоистую среду. Предложена схема мониторинга верхней магматической камеры вулкана с системой регистрации, расположенной в штольне Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН, что позволяет минимизировать индустриальные помехи при мониторинге. В штольне можно поста-

вить линейку сейсмических датчиков протяженностью более 4 км для приема вибросейсмических сигналов от источника, размещенного на противоположной стороне вулкана в районе долины Битик-Тюбю на расстоянии от системы наблюдения около 30 км, что позволит просветить глубинное строение среды вулкана до 15 км, включая верхнюю магматическую камеру.

Для исследования влияния формы верхней магматической камеры на характер волнового поля и информативность сигнала, доходящего до системы наблюдения в штольне БНО, проведено 2D моделирование процесса распространения сейсмических волн внутри вулканической структуры на основе конечно-разностного решения уравнений теории упругости. Рассчитаны мгновенные снимки волнового поля в различные моменты времени и теоретические сеймотрассы для модели с эллиптической камерой (А) и для модели с конусовидной камерой (В) для предложенной системы наблюдения. Размер расчетной сетки 7200×4800 узлов по пространству и 56000 шагов по времени. Один расчет на графическом ускорителе NVIDIA K40 в среднем занимает около 25 мин.

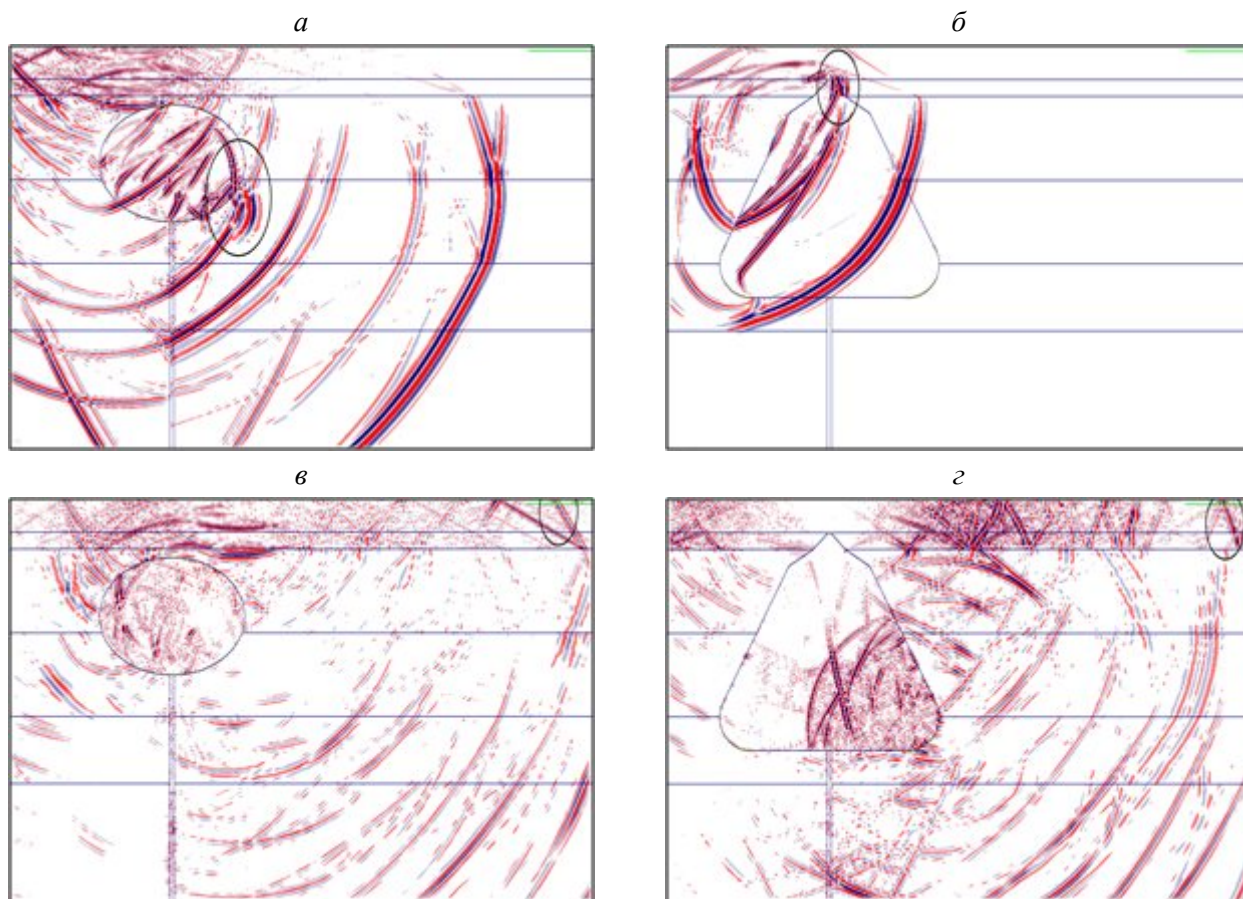


Рис. 3 – Разница между мгновенными снимками компоненты u волнового поля для слоистой среды с магматическими включениями и без них в различные моменты времени:

a – эллипсовидная камера, $T = 5.5$ s; b – конусовидная камера, $T = 3$ s;

v – эллипсовидная камера, $T = 12$ s; z – конусовидная камера, $T = 11$ s

На снимках поля (рис. 3) линиями отмечены границы слоев и включений, зеленая линия в правом верхнем углу отмечает положение профиля сейсмоприемников в БНО. На рис. 3а,б отмечена зона выхода волны из магматической камеры, а на рис. 3в,г отмечен приход этих же волн в район системы наблюдения. Из снимков видно, что волновое поле имеет сложную картину с существенным влиянием формы камеры на форму проходящих через нее волн. При этом

в случае рис. 3г волны, отражающиеся от дна камеры и выходящие за ее пределы, выходят на поверхность не доходя до линейки приемников. На сеймотрассах можно также выделить приход этих волн в соответствующие моменты времени. При этом отметим, что в случае эллипсоидной камеры (рис. 3а,в) на сеймотрассах наблюдается приход волны, отразившейся от дна эллипса, а в случае конусовидной камеры на приемники приходит большое количество волн, отразившихся от верхних точек дифракции камеры и распространяющихся внутри слоев. Таким образом, сопоставляя снимки волнового поля и сеймотрассы можно проанализировать кинематические характеристики волнового поля, обусловленного магматическими включениями. Чем более точной на данном этапе будет модель слоистой структуры, тем качественнее можно будет оценить влияние включений. Расчеты показывают существенную разницу в наблюдаемой картине волнового поля при различных формах верхней магматической камеры, а также возможную применимость предложенной схемы мониторинга с использованием штольни БНО в обоих случаях. Из полученных результатов следует, что численное моделирование может дать значительную информацию для организации проведения натурных экспериментов и интерпретации результатов экспериментальных наблюдений, полученных в ходе вибросейсмического мониторинга.

Также в 2020 г. было решено расширить область применения методов моделирования волновых полей на участки сред, представляющие интерес с точки зрения добычи углеводородов. В качестве тестовой области были использованы реальные данные одного из участков Западной Сибири (рис. 4). (Постановка задачи и данные предоставлены В. А. Чевердой.) Характерными особенностями таких сред являются многослойность, высокая контрастность параметров слоев в приповерхностной зоне, а также наличие криволинейной топографии поверхности. Для лучшего согласования форм дискретной и физической моделей был видоизменен созданный ранее алгоритм построения криволинейной сетки, а также разработан и оптимизирован параллельный алгоритм численного моделирования волновых полей с применением такой сетки. Для численного решения задачи использовалась явная конечно-разностная схема. Проведены серии расчетов, получены трассы, показывающие эффективность использования криволинейных сеток при решении подобных задач (рис. 5).

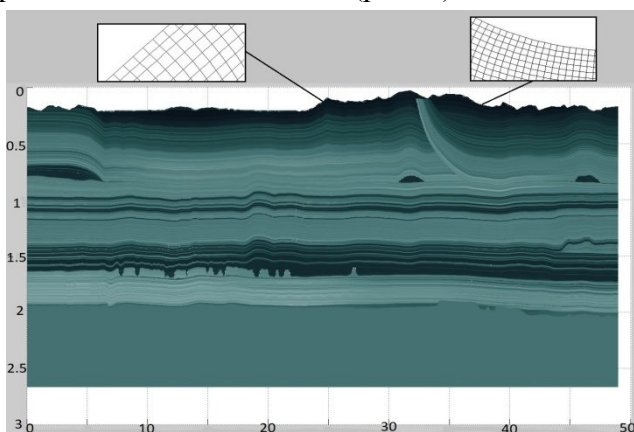


Рис. 4 – Строение одного из участков Западной Сибири и криволинейная сетка для него

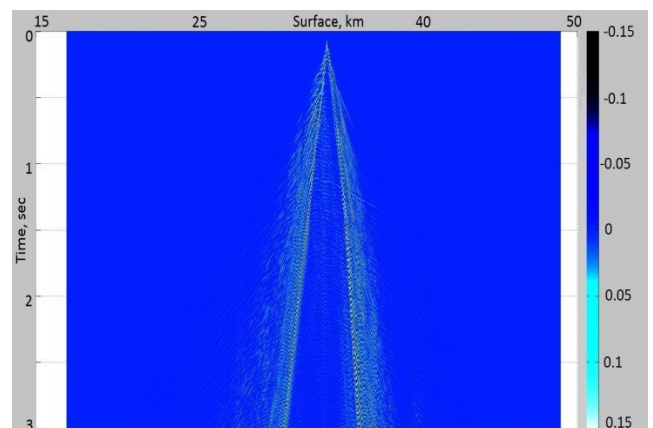


Рис. 5 – Трассы для волнового поля, полученные при численном моделировании

Продолжено развитие программного обеспечения для имитационного моделирования исполнения параллельных алгоритмов на вычислительной инфраструктуре современных супер-

компьютеров. Были уточнены алгоритмы имитации выполнения блоков вычислений на различных архитектурах процессоров, обменов данными через различные сетевые аппаратные средства и работы с параллельной системой хранения данных. В алгоритмах выполнения параллельных программ проведена дополнительная оптимизация для более детальной имитации процесса запуска и окончания алгоритма и достоверного учета операций с данными. Реализованы механизмы логирования работы подсистем имитационной модели для контроля и дальнейшей визуализации процесса моделирования.

Все изменения внесены в специализированную библиотеку поведений программных агентов, которые имитируют процесс исполнения ветвей параллельной программы, с учетом современных иностранных и отечественных разработок. Так как не представилось возможности получить исходные данные для исследования масштабируемости алгоритмов на всех имеющихся сейчас в распоряжении иностранных и отечественных архитектурных решениях, проверка адекватности и корректировка имитационной модели исполнения параллельных программ с обновленным набором поведений проводилась на уже имеющихся данных. Стоит отметить, что внесенные уточнения позволили получить более точные значения масштабируемости, однако на общую тенденцию ускорения/замедления алгоритма повлияли не существенно.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 18-01-00166 "Разработка векторизованных параллельных вычислительных методов высокого порядка точности для моделирования динамической эволюции галактик на суперЭВМ, оснащенных ускорителями Intel Xeon Phi".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Куликов И. М.

Разработана вычислительная гидродинамическая модель взаимодействующих галактик. Для описания межзвездной среды галактик используется модель гравитационной многокомпонентной односкоростной гидродинамики. Для описания звездной компоненты и темной материи используется модель на основе первых моментов бесстолкновительного уравнения Больцмана с полным тензором дисперсии скоростей. В модель добавлены подсеточные процессы фазовых переходов между газом и звездами: процесс звездообразования и эффект от процесса взрыва сверхновых Ia звезд солнечной массы, ветра звезд средней массы и взрыва сверхновых на основе коллапса ядра для массивных звезд. Построена неравновесная химокINETическая модель основных форм водорода и гелия до образования иона гидрида гелия. Включены функции охлаждения и нагрева при различных температурных режимах. Для разрешения вычислительной модели разработан новый эффективный векторный численный метод на основе комбинации метода Годунова и метода Хартена – Лакса – Ван Леера высокого порядка точности. С помощью вычислительных экспериментов смоделированы сценарии образования иона гидрида гелия и формальдегида в сталкивающихся галактиках, образование двухрукавного диска из молодых звезд, прохождения карликовых галактик через разреженную межгалактическую среду. Исследован градиент возраста звезд в галактическом диске. В результате выполнения проекта получен программный код мирового уровня для моделирования столкновения и эволюции галактик на суперЭВМ, оснащенных ускорителями Intel Xeon Phi.

Проект РФФИ № 19-51-14002 "Моделирование образования звезд на массивно параллельных суперкомпьютерах".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Куликов И. М.

За первый год выполнения проекта российской стороной разработан новый численный метод решения уравнений гравитационной гидродинамики на полигональных сетках. Предложенный метод ориентирован на моделирование эволюции таких астрофизических объектов, как протозвезды и протозвездные диски, характеризующиеся сферической формой. В основе дискретизации расчетной области лежит использование геодезических треугольных сеток на поверхности сферы с сериализацией полученной треугольной сетки с поверхности сферы до центра области. Также в дискретизацию включено разбиение полученных призм до тетраэдральной сетки. Такой подход позволяет моделировать сферические объекты без особенностей, которые имеют место при использовании сферических или цилиндрических координат. Разработан новый численный метод решения уравнений газовой динамики высокого порядка точности. На основе метода Галеркина построена конечно-элементная схема для решения уравнения Пуассона для вычисления гравитационного потенциала. Проведена подробная верификация численных методов на классических тестах о распаде разрыва, на задачах о развитии неустойчивости типа Кельвина – Гельмгольца и Релея – Тейлора, на задаче Седова. Численный метод решения уравнения Пуассона протестирован на задачах, допускающих аналитическое решение. Используемый способ построения расчетной сетки позволил включить радиальное движение ячеек при сохранении структуры сетки. Выполнен анализ образования и эволюции протозвезд и протозвездных дисков в политропном приближении, сформулированы характерные модельные задачи для верификации численного метода решения уравнений гравитационной гидродинамики на полигональных сетках.

Проект РФФИ № 19-07-00085 а "Интеллектуальная поддержка решения задач на пета- и эксафлопсных суперЭВМ".

Руководитель проекта – д.т.н. Глинский Б. М.

Разработана база знаний, включающая онтологические описания задач гидродинамики космической плазмы, вычислительной физики плазмы, геофизики, а также численных методов их решения и архитектур суперкомпьютеров, которые могут быть использованы для расчетов. На основе онтологии реализован информационно-аналитический интернет-ресурс для поддержки решения вычислительно сложных задач на суперкомпьютерах, предоставляющий содержательный доступ к систематизированной в соответствии с онтологией информации о данной области знаний. Для наполнения контента ресурса фактической информацией разработаны паттерны онтологического проектирования, описывающие основные классы онтологии. Наполнение выполнялось для трех областей математической физики: астрофизики, геофизики и физики плазмы. Для организации логического вывода фактов, не представленных явно в контенте ресурса, разработаны и включены в базу знаний экспертные правила.

Проект РФФИ № 19-07-00446 а "Разработка алгоритмов и программного обеспечения для суперкомпьютерного моделирования терагерцового излучения в плазме".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Берендеев Е. А.

Продолжена работа над модификацией PIC модели для моделирования терагерцового излучения в плазме. Модель дополнена новыми физическими процессами (полевая ионизация) и новыми диагностиками. Создана единая база для моделирования как в 3D3V, так и в 2D3V геометрии. С помощью созданной 2D3V аксиально симметричной PIC модели проведен поиск оптимальных условий для постановки лабораторного эксперимента по генерации узкополосного терагерцового излучения за счет лобового столкновения двух плазменных кильватерных волн, возбуждаемых парой фемтосекундных лазерных импульсов в сверхзвуковой струе гелия. В этом случае излучение электромагнитных волн на второй гармонике плазменной частоты обусловлено нелинейным взаимодействием встречных плазменных волн с различными профилями поперечного потенциала в фокусе лазерных пучков. В численную модель включены процессы полевой ионизации атомов гелия и исследовано, насколько сильно на эффективность оптико-терагерцового преобразования энергии в этой схеме влияют неоднородный профиль электронной плотности, возникающий из-за неполной ионизации атомов на периферии, а также временная задержка между приходами лазерных импульсов в точку фокусировки. С помощью проведенных расчетов показано, что оптимальная задержка между импульсами должна составлять

2–2.5 пс, причем широкий пучок должен приходить в фокус раньше узкого.

Проект РФФИ № 18-31-00314 мол_а "Численное моделирование конфигурации магнитного поля в осесимметричных открытых ловушках с диамагнитным удержанием плазмы".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Генрих Е. А.

Для повышения точности и экономии времени расчетов в созданный для гибридной модели плазмы численный алгоритм был внесен ряд изменений. Схема вычисления температуры изменена с итерационной на явную, добавлено разделение полного магнитного поля на поле ловушки и изменение магнитного поля, добавлен трекинг частиц и поглощающие граничные условия. Проведено тестирование разработанного кода и выполнена серия расчетов для различных параметров ловушки и инжектируемого пучка. Проведенные расчеты показали, что в результате инжекции в ловушку пучка достаточной мощности формируется магнитная каверна, внутри которой находится плазма высокого давления. Проведено исследование процесса формирования магнитной каверны в зависимости от мощности инжекции и величины магнитного поля ловушки. При высокой мощности инжекции частиц поле ловушки не способно удержать плазму, а при низкой мощности инжекции каверна не формируется. Чем слабее магнитное поле ловушки, тем быстрее растет магнитная каверна и тем хуже удерживается плазма.

Проект РФФИ № 18-29-21025 "Суперкомпьютерное моделирование плазменных течений в режимах диамагнитного удержания открытых ловушек".

Руководитель проекта – д.ф.м.н. Вшивков В. А.

Для численного моделирования течения плазмы в открытой магнитной ловушке совершенствовались алгоритмы решения уравнений движения заряженных частиц, которые позволили создать более экономичную реализацию PIC-метода. Проведен анализ устойчивости гибридной модели. Для корректного описания потерь вещества и энергии из диамагнитной ловушки и структуры границы диамагнитного "пузыря" в численный код добавлен учет ион-ионных столкновений с помощью метода Монте-Карло и добавлена возможность расчета с несколькими

ми сортами ионов, что необходимо для моделирования многокомпонентной (в частности, дейтерий-тритиевой) плазмы. Разработана трехмерная численная модель диамагнитного режима открытой магнитной ловушки. Расчетная область имеет форму параллелепипеда, в центр его вводится ионный пучок. Кинетическое уравнение Власова используется для ионной компоненты фоновой плазмы и ионов инжектируемого пучка, электронная компонента плазмы описывается приближением магнитной гидродинамики. Необходимость создания такой гибридной модели обусловлена необходимостью учета эффектов, связанных как с гидродинамическими, так и кинетическими неустойчивостями плазменных течений в неосесимметричных магнитных полях. Полученные при численном моделировании результаты образования каверны магнитного поля и развития желобковой структуры на ее границе соответствуют теоретическим и лабораторным данным о возможности формирования диамагнитного режима удержания плазмы в открытой магнитной ловушке. В результате вычислительных экспериментов по исследованию динамики плазмы в режиме непрерывной инжекции ионного пучка в осесимметричную открытую ловушку показано, что для большого диапазона задаваемых физических характеристик пучка, фоновой плазмы и конфигурации магнитного поля движение непрерывно инжектируемого ионного пучка сопровождается образованием магнитной каверны - области пониженного давления магнитного поля. Пространственный размер скачка определяется значением ларморовского радиуса инжектируемых ионов. Наблюдаемый процесс характеризуется вытеснением фоновой плазмы из области магнитной каверны и образования слоя повышенной плотности плазмы на ее границе. Пространственный размер магнитной каверны определяется током инжектируемого ионного пучка.

Результаты работ по проектам РНФ

Проект РНФ № 18-11-00044 "Разработка, реализация и исследование эффективных параллельных вычислительных методов для решения уравнений гидродинамики с использованием технологии вложенных сеток на массивно-параллельных суперЭВМ".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Куликов И. М.

В рамках работы по проекту в 2020 году разработаны математические модели замагниченных внегалактических струй, для описания которых используются уравнения специальной релятивистской магнитной гидродинамики. Уравнения дополнены химическими и ядерными реакциями, описывающими ионизацию водорода. Для описания взрыва сверхновых типа Ia разработана математическая модель на основе использования переопределенной системы уравнений гравитационной гидродинамики со звездным уравнением состояния. Для детального моделирования эволюции белых карликов, горения материала и взрыва сверхновых используется двухуровневая модель: на первом уровне моделируется гидродинамика процесса, а на втором уровне для описания подсеточных процессов применяется турбулентное горение материала белых карликов, энергетический вклад которого используется в основном гидродинамическом моделировании. Разработаны, реализованы и подробно верифицированы численные методы решения уравнений специальной магнитной релятивистской гидродинамики на основе схем Рунге, Рунге-Кутты и новой оригинальной модификации, которая позволила избежать коллективных взаимодействий между процессами при параллельной реализации. Проведено подробное тестирование разработанного ранее метода решения уравнений специальной релятивистской гидро-

динамики на специальном наборе тестов. Разработана параллельная реализация вложенных сеток в виде C++ класса для архитектур с общей и распределенной памятью. Разработка такого класса позволила сконструировать фреймворк для численного решения гиперболических уравнений на вложенных сетках. Исследована эволюция замагниченного внегалактического джета при прохождении через плотную среду галактики. С помощью вычислительного эксперимента объяснен механизм образования полярных долей, аналогичных наблюдаемым в микроквазаре GRS 1758-258. С использованием многоуровневых вычислений экспериментально доказан сценарий взрыва сверхновых типа Ia дочандрасекаровской массы. В основе сценария лежат различные сценарии турбулентного горения материала в ходе слияния белых карликов и их поджиг.

Проект РНФ № 19-71-00054 "Суперкомпьютерное моделирование генерации терагерцового излучения при фокусировке мульти-гигаваттных электронных пучков в плазме".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Берендеев Е. А.

В рамках проекта создан высокопроизводительный 2D3V PIC код, позволяющий непрерывно инжектировать электронные пучки в расчетную область и измерять основные характеристики генерируемого ЭМ излучения. Разработан двухуровневый параллельный алгоритм с системой связи на каждом уровне, что позволяет добиться высокой масштабируемости. На первом уровне выполняется декомпозиция области, при которой каждая подобласть независимым образом обменивается данными только с соседними подобластями. При этом на втором уровне декомпозиции каждая подобласть также делится между процессорами, которые имеют возможность обмениваться с соседними элементами. В каждом из таких обменов участвуют только соседи, поэтому такие обмены выполняются параллельно. Схема алгоритма представлена на рис. 6.

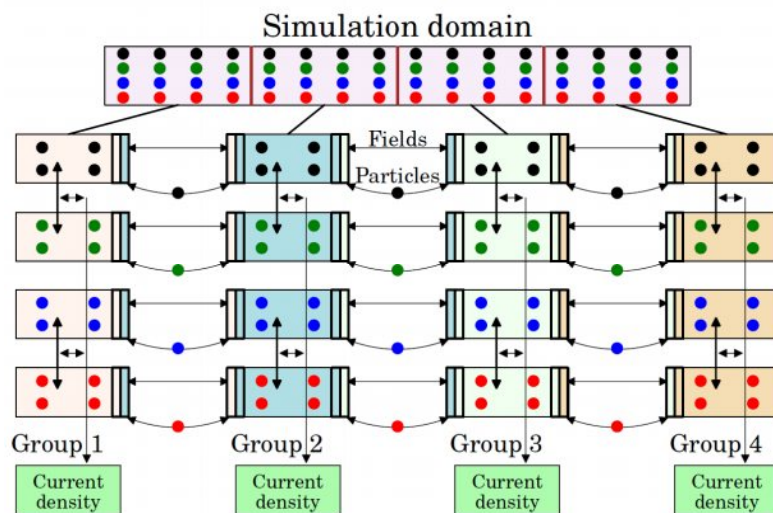


Рис. 6 – Схема обменов частицами и полями при двухуровневой декомпозиции

Проведено тестирование масштабируемости разработанного алгоритма. Показано, что на 16 узлах 2×16-ядерных Intel Xeon E5-2697A v4 эффективность распараллеливания составляет более 92 %. Также исследована слабая масштабируемость. Показано, что время коммуникаций между группами меняется не более чем на 5 % для 16 узлов, а внутри групп время обменов увеличивается как $\log_2(N)$, где N – количество узлов внутри группы.

С помощью разработанного кода рассчитана эффективность генерации электромагнитного излучения для электронных пучков различной толщины, инжектируемых в плазму.

Проект РНФ № 19-71-20026 "Численное моделирование открытых плазменных ловушек для решения задач управляемого термоядерного синтеза с использованием перспективных высокопроизводительных вычислительных систем".

Руководитель проекта – к.ф.м.н. Черных И. Г.

Разработан алгоритм решения задач физики разреженной плазмы в диамагнитной ловушке в трехмерной постановке на основе гибридной модели. В диамагнитном режиме в 3D возможно развитие желобковой и tilt-неустойчивостей. Источником энергии для неустойчивостей является диамагнетизм плазмы, приводящий к выталкиванию ее в область с более слабым магнитным полем. Развитие желобковой неустойчивости приводит к формированию желобков, вытянутых вдоль силовых линий магнитного поля.

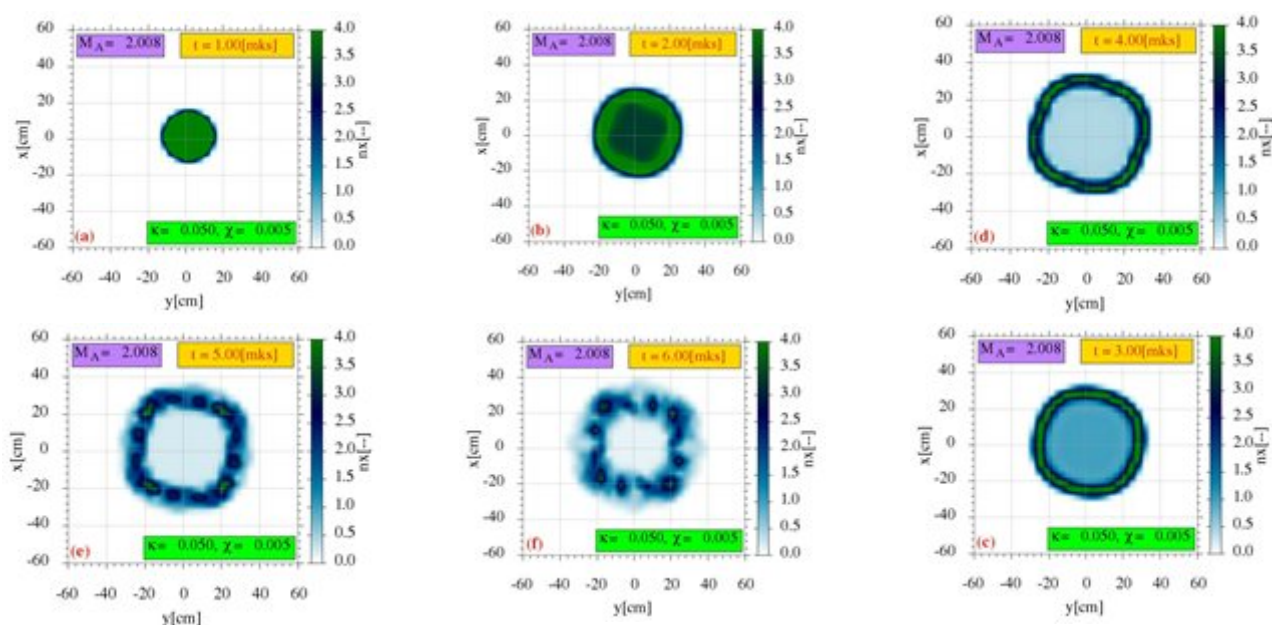


Рис. 7 – Развитие желобковой неустойчивости в трехмерной модели. Плотность пучка в последовательные моменты времени в плоскости XY

Проведены численные эксперименты созданных двумерных алгоритмов на различных архитектурах суперЭВМ (процессоры Xeon Phi 7290, Xeon E5-2697, Xeon Platinum 8268 кластера НКС-1П ССКЦ СО РАН). Показано, что процессоры с архитектурой Knights Landing обеспечивают высокую эффективность векторизации по сравнению с остальными, однако малая тактовая частота не позволяет проводить расчеты быстрее, чем на процессорах архитектуры CascadeLake с их менее эффективной векторизацией и высокой тактовой частотой. Показано, что при использовании автоматической векторизации прирост производительности разрабатываемого кода в некоторых случаях может составить 10 %. Дальнейшая работа по выравниванию данных даст более значимый прирост производительности.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Куликов И. М. Суперкомпьютерное моделирование гидродинамических объектов в задачах астрофизики. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2020. 170 с. ISBN 978-5-7692-1686-2.
2. Liseykina T., Bauer D., Popruzhenko S., Macchi A. Collective effect of radiation friction in laser-driven hole boring of dense plasma targets // Proc. Müller M. (Editor); Binder K. (Editor); Trautmann A. (Editor). NIC Symposium 2020. NIC Ser. 50. Vol. 424. P. 405–414. ISBN 978-3-95806-443-0.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Hanusch A., Liseykina T., Malkov M. Electron energization in quasi-parallel shocks: Test-particle electrons in a proton-driven turbulence // Astron. & Astrophys. 2020. Vol. 642. A47. DOI: 10.1051/0004-6361/202038915.
2. Kabanikhin S. I., Kulikov I. M., Shishlenin M. A. An algorithm for recovering the characteristics of the initial state of supernova // Comput. Math. and Math. Phys. 2020. Vol. 60. P. 1008–1016. DOI: 10.1134/S0965542520060135.
3. Kulikov I., Chernykh I., Karavaev D., Protasov V., Nenashev V., Prigarin V. The numerical simulation of radial age gradients in spiral galaxies // Commun. in Comput. and Inform. Sci. 2020. Vol. 1331. P. 365–374. DOI: 10.1007/978-3-030-64616-5_32.
4. Efimova A. A., Dudnikova G. I., Vshivkov K. V. 3D numerical model of diamagnetic plasma confinement in a gasdynamic trap // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2312, 060001. DOI: 10.1063/5.0035484.
5. Vshivkova L., Vshivkov V., Dudnikova G. Analysis of the hybrid numerical model to study physical processes in the plasma // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2312, 060003. DOI: 10.1063/5.0035700.
6. Timofeev I. V., Berendeev E. A., Annenkov V. V., Volchok E. P. Simulations of electromagnetic emission from colliding laser wakefields // Plasma Phys. and Control. Fusion 62(4). 2020. DOI: 10.1088/1361-6587/ab74e6.
7. Timofeev I. V., Berendeev E. A., Annenkov V. V., Volchok E. P., Trunov V. I. Optimal synchronization of laser pulses in THz generation scheme with colliding plasma wakes // Phys. of Plasmas 28, 013103. 2021. DOI: 10.1063/5.0029848.
8. Kulikov I. A new code for the numerical simulation of relativistic flows on supercomputers by means of a low-dissipation scheme // Comput. Phys. Commun. 2020. Vol. 257. Art. 107532. DOI: 10.1016/j.cpc.2020.107532.
9. Kulikov I. M., Chernykh I. G., Sapetina A. F., Lomakin S. V., Tutukov A. V. A new Rusanov-type solver with a local linear solution reconstruction for numerical modeling of white dwarf mergers by means massive parallel supercomputers // Lobachevskii J. of Mathematics. 2020. Vol. 41, iss. 8. P. 1485–1491. DOI: 10.1134/S1995080220080090.
10. Kulikov I. M. On a modification of the Rusanov solver for the equations of special relativistic magnetic hydrodynamics // J. of Appl. and Indust. Math. 2020. Vol. 14, iss. 3. P. 524–531. DOI: 10.1134/S1990478920030114.
11. Kulikov I. M. A low-dissipation numerical scheme based on a piecewise parabolic method on a local stencil for mathematical modeling of relativistic hydrodynamic flows // Num. Analysis and Appl. 2020. Vol. 13, iss. 2. P. 117–126. DOI: 10.1134/S1995423920020032.

12. Kulikov I., Chernykh I., Karavaev D., Genrikh E., Sapetina A., Protasov V., Serenko A., Nenashev V., Prigarin V., Ulyanichev I., Lomakin S. Simulating relativistic jet on the NKS-1P supercomputer with Intel Broadwell computing nodes // Commun. in Comput. and Inform. Sci. 2020. Vol. 1263. P. 224–236. DOI: 10.1007/978-3-030-55326-5_16.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Chernykh I., Vshivkov V., Dudnikova G., Liseykina T., Genrikh E., Efimova A., Kulikov I., Chernoshtanov I., Boronina M. High-performance simulation of high-beta plasmas using PIC method // Selected Papers of the 6th Russ. Supercom. Days (RuSCDays) 2020, Moscow, Sept. 21–22, 2020 / Voevodin V., Sobolev S. (eds). Vol 1331. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-64616-5_18.

2. Boronina M. A., Chernykh I. G., Genrikh E. A., Vshivkov V. A. Performance improvement of particle-in-cell method for numerical modelling of open magnetic system // J. Phys.: Conf. Ser. 1640, 012014, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012014.

3. Romanenko A. A., Snytnikov A. V., Boronina M. A. Cross-platform implementation of Particle-In-Cell method for simulation of high-temperature and fusion plasma by means of hybrid supercomputers equipped with GPU or Intel Xeon Phi accelerators // J. Phys.: Conf. Ser. 1640, 012016, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012016.

4. Boronina M. A., Dudnikova G. I., Efimova A. A., Genrikh E. A., Vshivkov V. A., Chernoshtanov I. S. Numerical study of diamagnetic regime in open magnetic trap // J. Phys.: Conf. Ser. 1640, 012021, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012021.

5. Kulikov I., Chernykh I., Karavaev D., Protasov V., Prigarin V., Ulyanichev I., Vorobyov E., Tutukov A. The collision of giant molecular cloud with galaxy: Hydrodynamics, star formation, chemistry // Continuum Mechan., Appl. Math. and Sci. Comput.: Godunov's Legacy. 2020. P. 261–267. DOI: 10.1007/978-3-030-38870-6_34.

6. Gornova A., Kulikov I., Chernykh I. The supercomputing simulation of instability and shock waves in gas giant // J. of Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1640. Art. 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012005.

7. Kulikov I., Vorobyov E., Chernykh I., Elbakyan V. Hydrodynamic modeling of self-gravitating astrophysical objects on tetrahedral meshes // J. of Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1640. Art. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012003.

8. Kulikov I., Chernykh I., Karavaev D., Sapetina A., Prigarin V., Protasov V., Ulyanichev I. The parallel & distributed code for numerical simulation of relativistic magnetohydrodynamics simulation // J. of Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1640. Art. Num. 012001. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012001.

9. Dudnikova G., Vshivkov V., Boronina M., Genrikh E. Numerical simulation of ion beam evolution in magnetized plasma // THE 7th Intern. congress on energy fluxes and radiation effects (EFRE), Tomsk, Sept. 14–16, 2020. P. 439–441. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9242083.

10. Sapetina A., Glinskiy B., Zagorulko G. Content of ontology for solving compute-intensive problems of the cosmic plasma hydrodynamics // J. of Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1640. 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012019.

11. Snytnikov A. V., Glinskiy B. M., Zagorulko G. B., Zagorulko Y. A. Ontological approach to formalization of knowledge in computational plasma physics // The 3rd Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics, Novosibirsk, Oct. 12–16, 2020. Rus. J. of Phys.: Conf. Ser. Vol. 1640 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1640/1/012013.

12. Sapetina A. F., Glinskiy B. M., Martynov V. N. Numerical modeling results for vibroseismic monitoring of volcanic structures with different shape of the magma chamber // J. of Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1715. Art. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012057.

13. Liseykina T., Popruzhenko S. Bright single-cycle terahertz source based on gas cells irradiated by two-color laser pulses // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1412. Art. 042005. DOI: 10.1088/1742-6596/1412/4/042005.

14. Glinskiy B. M., Zagorulko Yu. A., Zagorulko G. B., Kulikov I. M., Sapetina A. F., Titov P. A., Zhernyak G. F. Building ontologies for solving compute-intensive problems // MSR2020. J. of Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1715. Art. Num. 012071. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012057.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Титов П. А. Применение криволинейных сеток для моделирования 2D волновых полей в неоднородных областях со сложной топографией // Вестн. НГУ Информационные технологии. 2020. Т. 18, № 3. С. 81–95. DOI: 10.25205/1818-7900-2020-18-3-81-95.

2. Титов П. А. Моделирование 3D волновых полей в неоднородной области со сложной топографией при помощи схемы Лебедева // Вестн. НГУ Информационные технологии. 2020. Т. 18, № 3. С. 66–85. DOI: 10.25205/1818-7900-2020-18-4-66-85.

3. Боронина М. А., Вшивков В. А., Черных И. Г. Модификация параллельного алгоритма расчета динамики плазмы в открытых магнитных ловушках (MMiST) // Mathematical modeling and supercomputer technologies : proc. of the 20th Intern. conf., Nizhni Novgorod, Nov. 23–25, 2020. / Ed. by prof. V. P. Gergel. Nizhni Novgorod: UNN Press, 2020. P. 67–71.

4. Боронина М. А., Вшивков В. А., Генрих Е. А., Дудникова Г. И. Параллельный алгоритм для моделирования процессов в цилиндрических открытых ловушках // Марчуковские научные чтения 2020: тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 109. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10182.

5. Глинский Б. М., Загорулько Ю. А., Загорулько Г. Б., Куликов И. М., Сапетина А. Ф., Титов П. А. Построение онтологий для решения вычислительно сложных задач // Марчуковские научные чтения 2020: тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 110. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10184.

6. Glinskiy B. M., Zhernyak G. F., Titov P. A. System of intelligent support for solving geophysical problems //: Proc. of the 6th Russian Supercomputing Days-2020, Moscow, Sept. 21–22, 2020. P. 11–18. DOI: 10.29003/m1406.RussianSCDays-2020.

7. Ефимова А. А., Дудникова Г. И., Вшивков К. В. 3D численная модель диамагнитного удержания плазмы в газодинамической ловушке // Актуальные проблемы прикладной математики и механики : тез. докл. 10-й Всерос. конф. с международным участием, посвящ. памяти акад. А. Ф. Сидорова и 100-летию УРФУ, Екатеринбург, 1–6 сент. 2020 г. С. 33–34.

8. Вшивкова Л. В., Вшивков В. А., Дудникова Г. И. Анализ гибридной численной модели для изучения физических процессов в открытой плазменной ловушке // Актуальные проблемы прикладной математики и механики: тез. докл. 10-й Всерос. конф. с международным участием, посвящ. памяти акад. А. Ф. Сидорова и 100-летию УРФУ, Екатеринбург, 1–6 сент. 2020 г. С. 17–18.

9. Загорулько Ю. А., Загорулько Г. Б., Шестаков В. К., Сапетина А. Ф. Информационно-аналитическая поддержка решения вычислительно сложных задач на суперкомпьютерах // Информ. и матем. технол. в науке и управл. 2020. № 3(19). С. 86–95. DOI: 10.38028/ESI.2020.19.3.009.

10. Сапетина А. Ф., Глинский Б. М., Мартынов В. Н. Результаты численного моделирования вибросейсмического просвечивания вулканических структур при подъеме магмы // Марчуковские научные чтения 2020: тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 65. DOI: 10.24411/9999-017A-2020-10115.

11. Берендеев Е. А. Тимофеев И. В. Суперкомпьютерное моделирование полевой ионизации при взаимодействии лазерного импульса с плазмой // Марчуковские научные чтения 2020: тез. Междунар. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2020. С. 178.

Участие в конференциях и совещаниях

1. First Stars VI, – Консепсьон (Чили), 1–6 марта 2020 г. – 2 доклада (Куликов И. М., Черных И. Г.).

2. The 3rd Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes. Honor of Academician G. I. Marchuk 95th Birthday, 12–16 октября 2020 г. – 11 докладов, из них 5 пленарных) (Куликов И. М., Черных И. Г., Сапетина А. Ф., Боронина М. А., Вшивков В. А., Дудникова Г. И., Ефимова А. А., Генрих Е. А., Судаков А. М., Вшивков К. В., Вшивкова Л. В., Глинский Б. М., Лисейкина Т. В.).

3. Международная конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвящ. 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука – 5 докладов, из них 1 пленарный (Боронина М. А., Вшивков В. А., Генрих Е. А., Глинский Б. М., Дудникова Г. И., Ломакин С. В., Черных И. Г., Куликов И. М., Сапетина А. Ф., Титов П. А.).

4. The 7th International congress on energy fluxes and radiation effects, Tomsk, Sept. 14–26, Russia – 1 доклад (Боронина М. А., Вшивков В. А., Генрих Е. А., Дудникова Г. И.).

5. Международная конференция "Суперкомпьютерные дни в России", Москва, 21–22 сентября 2020 г. – 3 доклада (Черных И. Г., Вшивков В. А., Дудникова Г. И., Лисейкина Т. В., Генрих Е. А., Ефимова А. А., Куликов И. М., Боронина М. А., Глинский Б. М., Титов П. А.).

6. Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии, Нижний Новгород, 23–27 ноября 2020 г. – 1 доклад (М. А. Боронина, В. А. Вшивков, И. Г. Черных).

7. Виртуальная конференция "20 лет развития вычислительных ресурсов МСЦ РАН: результаты и перспективы", Москва, 10 декабря 2020 г. – 1 доклад (Черных И. Г., Вшивков В. А., Боронина М. А.).

8. 10-я Всероссийская конференция "Актуальные проблемы прикладной математики и механики" с международным участием, посвящ. памяти акад. А. Ф. Сидорова и 100-летию УРФУ, Абрау-Дюрсо, 1–6 сентября 2020 г. – 2 доклада (Ефимова А. А., Дудникова Г. И., Вшивков В. А.).

9. 47-я Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (ICPAF-2020), Звенигород, 6–20 марта 2020 г. – 1 доклад (Дудникова Г. И., Вшивков В. А.).

10. Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ 2020), 31 марта – 2 апреля 2020 г., Пермь – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г., Генрих Е. А., Сапетина А. Ф., Ломакин С. В.).

11. NIC Symposium, Юлих (ФРГ), 27–28 февраля 2020 г. – 1 доклад (Лисейкина Т. В.).

12. ELI-Beamlines user conference 2020 (онлайн), Прага (Чехия), 12–14 октября 2020 г. – 1 доклад (Лисейкина Т. В.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Боронина М. А.:

– член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.,

– член программного комитета конференции The 3rd Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes. Honor of Academician G. I. Marchuk 95th Birthday, Novosibirsk, 12–16 октября 2020 г.;

2. Вшивков В. А. – председатель программного комитета конференции The 3rd Virtual workshop on numerical modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, tools, and outcomes. Honor of Academician Guri I. Marchuk 95th Birthday, Novosibirsk, 12–16 октября 2020 г.

3. Глинский Б. М.:

– заместитель председателя организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.,

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.,

– член программного комитета Международной конференции "Суперкомпьютерные дни в России, Москва 21–22, сентября 2020 г.

– член программного комитета Международной конференции "Параллельные вычислительные технологии", Пермь, 31 марта – 2 апреля,

– член программного комитета конференции The 3rd Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes. Honor of Academician G. I. Marchuk 95th Birthday, Novosibirsk, 12–16 октября 2020 г.;

4. Дудникова Г. И. – член программного комитета конференции The 3rd Virtual Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes. Honor of Academician Guri I. Marchuk 95th Birthday, Novosibirsk, 12–16 октября 2020 г.;

5. Ефимова А. А. – член организационного комитета The 11th Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Albena (Bulgaria), June 24–29, 2020;

6. Куликов И. М. – конференции The 3rd Virtual Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes. Honor of Academician Guri I. Marchuk 95th Birthday, Novosibirsk, 12–16 октября 2020 г.;

7. Черных И. Г.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2020), посвященной 95-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 19–23 октября 2020 г.,

– член программного комитета Международной конференции "Российские суперкомпьютерные дни", Москва, 21–22 сентября 2020 г.

Итоговые данные по лаборатории

Монографий, глав в монографиях – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 12

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 26

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 37

Докладов на конференциях – 30, в том числе 6 пленарных

Членов организационных или программных комитетов конференций – 13

Кадровый состав

1.	Черных И. Г.	зав. лаб.	к.ф.-м.н.
2.	Берендеев Е. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
1.	Боронина М. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
2.	Винс Д. В.	н.с.	к.т.н.
3.	Вшивков В. А.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
4.	Генрих Е. А.	н.с.,	к.ф.-м.н.
5.	Глинский Б. М.	г.н.с.	д.т.н.
6.	Дудникова Г. И.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
7.	Ефимова А.А.	м.н.с.	
8.	Зернова Л. В.	ведущ. программист	
9.	Кононов А. А.	электроник 1-й катег.	
10.	Куликов И. М.	н.с.	д.ф.-м.н.
11.	Кучин Н. В.	гл. специалист по СПО	
12.	Лисейкина Т. В.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
13.	Ломакин С. В.	гл. специалист по ИС	
14.	Макаров И. Н.	ведущ. программист	
15.	Сапетина А. Ф.	м.н.с.	
16.	Снытников Н. В.	н.с.	к.ф.-м.н.
17.	Титов П. А.	м.н.с.	

Берендеев Е. А., Винс Д. В., Генрих Е. А., Ефимова А. А., Сапетина А. Ф., Титов П. А. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность**Руководство студентами**

- Переладова А. Е. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Куликов И. М.
Горнова А. Л. – 6-й курс ММФ НГУ, руководитель Куликов И. М.
Завьялов О. Р. – 4-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Куликов И. М.
Воропаева Е. С. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Вшивков В. А.

Руководство аспирантами

- Пригарин В. Г. – 2-й год аспирантуры, НГТУ, руководитель Куликов И. М.
Ульяничев И. С. – 3-й год аспирантуры, НГТУ, руководитель Куликов И. М.
Судаков А. С. – 1-й год аспирантуры, ИВМиМГ, руководитель Вшивков В. А.

Защита дипломов

- Макаров И. О. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Сапетина А. Ф.

Защита диссертации

Лисейкина Т. В. – докторская диссертация (Dr. rer. nat. habil) "Extreme laser-matter interactions: kinetic modeling of relativistic, ultrarelativistic and radiation dominated plasma", Теоретическая физика, 25.11.2020 (Университет г. Росток, ФРГ). DOI: 10.18453/rosdok_id00002875.

Адриан Хануш – кандидатская диссертация (Dr. rer. nat.) (руководитель Лисейкина Т. В.), "Particle acceleration at collisionless shocks Hybrid Simulations in the Era of High-Precision Cosmic Ray Observations", Теоретическая физика, 16.10.2020 (Университет г. Росток, ФРГ).