

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 2021 г.**

Новосибирск-2022

СОДЕРЖАНИЕ

Научно-организационная деятельность.....	4
Основные результаты научных исследований в 2021 г.	14
Лаборатория методов Монте-Карло.....	27
Лаборатория численного анализа стохастических дифференциальных уравнений	36
Лаборатория стохастических задач	43
Лаборатория вычислительной физики.....	61
Лаборатория математических задач химии	65
Лаборатория математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере.....	72
Лаборатория математического моделирования гидротермодинамических процессов в природной среде.....	99
Лаборатория численного анализа и машинной графики	118
Лаборатория математических задач геофизики	123
Лаборатория обратных задач естествознания.....	134
Лаборатория математического моделирования волн цунами	145
Лаборатория геофизической информатики	155
Лаборатория системного моделирования и оптимизации	170
Лаборатория синтеза параллельных программ	183
Лаборатория суперкомпьютерного моделирования.....	195
Справочная информация	211

НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Награды сотрудников ИВМиМГ СО РАН в 2021 г.:

– медалью "За безупречный труд и отличие 3 степени" награжден д-р физ.-мат. наук, проф. РАН, директор Марченко М. А. (приказ Минобрнауки России от 17.09.2021 г. № 1031 к/н);

– медалью "За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технологического развития" награжден д-р техн. наук, зам. директора по научной работе Ковалевский В. В. (приказ Минобрнауки России от 17.09.2021 г. № 1031 к/н);

– медалью "За вклад в реализацию государственной политики в области научно-технологического развития" награжден главный научный сотрудник, д-р физ.-мат. наук Пененко В. В. (приказ Минобрнауки России от 17.09.2021 г. № 1031 к/н);

– почетное звание "Заслуженный ветеран Сибирского отделения РАН" присвоено канд. техн. наук Медведеву Ю. Г., канд. физ.-мат. наук Пьяновой Э. А., канд. техн. наук Русину Е. В.

Проведено 22 заседания 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", "Математическое обеспечение высокопроизводительных вычислительных систем", "Численные методы прямого и обратного моделирования природных процессов" и "Объединенный семинар".

Продолжена или начата работа по одиннадцати 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. (два гранта), д.ф.-м.н. Сабельфельд К. К., д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М., к.ф.-м.н. Черных И. Г., д.ф.-м.н. Шишленин, д.ф.-м.н. М. А. Голубева Е. Н., к.ф.-м.н. Новиков Н. С., к.ф.-м.н. Каргаполова Н. А.

В 2021 г. проводились работы по 19 проектам Российского фонда фундаментальных исследований, из них 10 инициативных, 2 региональных, 4 международных, 1 грант "Аспиранты-2020", 2 гранта областного бюджета.

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 24.1.047.01 (председатель чл.-корр. РАН Кабанихин С. И.). В 2021 г. состоялись четыре защиты на соискание ученой степени кандидата наук: Журавлев С. С. (Институт вычислительных технологий СО РАН), Хандеева Н. А. (Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН), Булгакова Т. Е. (работа выполнена в ИВМиМГ СО РАН, присуждена степень кандидата физико-математических наук), Гренева К. В. (работа выполнена в ИВМиМГ СО РАН, присуждена степень кандидата физико-математических наук).

В 2021 г. присуждена степень доктора физико-математических наук Пененко А. В.

В рамках сотрудничества с компанией Хуавей в 2021 г. заключены следующие договоры: Хуавей Kunpeng LAPACK оптимизация GT/PTSV, адаптация решателя уравнения эйконала на экосистему Хуавей Atlas 800 (модель 9010), переупорядочивание разреженных матриц для разреженного решателя на процессорах Хуавей Kunpeng, создание (развитие) научно-технической экосистемы Хуавей в Сибирском регионе на базе оборудования Atlas 800 (модель 9010) и технологий Хуавей MindSpore и OpenEuler.

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 автоматизации 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 2021 г. проходили обучение очно 9 аспирантов, из них 5 окончили аспирантуру; приняты на обучение 2 человека.

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 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, 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 2021 г. проведено пять международных конференций:

1. 13-я Международная молодежная научная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.

2. 17-я Международная азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем", Алматы (Республика Казахстан) – Новосибирск – Москва, 13–17 сентября 2021 г.

3. 16-я Международная конференция "Параллельные компьютерные технологии-2021", Калининград, 13–18 сентября 2021 г.

4. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

5. Международное рабочее совещание "Численные методы в магнитной газовой динамике и в физике плазмы: модели, методы, результаты", Новосибирск, 12–14 октября 2021 г.

Международные соглашения, контракты, гранты

Выполнялись, либо были заключены три меморандума о взаимопонимании, четыре договора, семь 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 (Dongho Won).

Срок меморандума: 01.01.2007 г. – 31.12.2022 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 (Республика 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", 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, Шанхай (Китай) и ИВМиМГ СО РАН.

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

Срок соглашения: 06.12.2016 г. – 06.12.2022 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, Улаанбаатар (Монголия).

Координаторы: от ИВМиМГ СО РАН – зам. директора 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, 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 города Пизы (Италия) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от университета Пизы – ректор П. М. Манкарелла (P. M. Mancarella); 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 на проведение 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 совместным исследованиям по топологии и функциональному анализу, вычислительной математике, математическому моделированию и методам прикладной математики, теории обратных задач и экономико-математическим методам между ИВМиМГ СО РАН и Институтом математики национальной Академии наук, Бишкек (Республика Кыргызстан).

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

Срок соглашения: 25.12.2019 г. – 25.12.2024 г.

11. Меморандум о взаимопонимании на проведение исследований новых климатических сценариев и оценки будущего Северной Евразии между представителями Программы Пан-Евразийский эксперимент (PEEX), университет Хельсинки (Финляндия) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от Программы Пан-Евразийский эксперимент – директор Программы, академик, проф. университета Хельсинки Маркку Кулмала (Markku Kulmala); от ИВМиМГ СО РАН – директор, д.ф.-м.н., проф. РАН М. А. Марченко.

Срок меморандума: с 04.03.2020 г. – 04.03.2025 г.

12. Договор № YBN20200951137 о выполнении научно-исследовательских работ по разработке функции системы LAPACK 3 diagonal solver для решения трехдиагональных систем уравнений для архитектуры Кунпен 920 между Компанией Хуавэй Технологии, ООО, г. Шеньчжэнь пров. Гуандун (Китай) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от Компании ООО Хуавэй Технологии (от имени руководителя) – уполномоченный представитель Хоу Жуй (Hou Rui); от ИВМиМГ СО РАН – директор, д.ф.-м.н., проф. РАН М. А. Марченко.

Срок договора: с 02.10.2020 г. до завершения проекта.

13. Соглашение № MAR-ОАА 20092200405193А 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 пров. 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. – 11.06.2021 г.

14. Соглашение № MAR-ОАА21092100591747А о проведении работ по адаптации версии 1.0 решателя уравнения Эйконала на серверном решении Хуавэй Atlas 800 между Компанией Хуавэй Технологии, ООО, г. Шеньчжэнь пров. Гуандун (Китай) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от Компании Хуавэй Технологии, ООО – Президент Ассенд Хуавей Сюй Ин Тун (Xu Yingtong); от ИВМиМГ СО РАН – директор, д.ф.-м.н., проф. РАН М. А. Марченко.

Срок соглашения: с 26.10.2021 г. до завершения работ.

Выполнялись либо были получены гранты:

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

Зарубежный участник – университет города Вены (Австрия).

Координаторы: руководители проекта с австрийской стороны – профессор Мануэль Юдель и профессор Эдуард Воробьев; руководитель проекта с российской стороны – с.н.с., д.ф.-м.н. И. М. Куликов (ИВМиМГ СО РАН).

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

2. Грант РФФИ Болг_а 2020 "Новые высокоэффективные методы стохастического моделирования и приложения".

Зарубежный участник – Институт математики и информатики Болгарской академии наук.

Координаторы: руководитель проекта с болгарской стороны – проф. Иван Димов; руководитель проекта с российской стороны – д.ф.-м.н. Карл Сабельфельд (ИВМиМГ СО РАН).

Даты начала и окончания работ по теме: 14.01.2021 г. – 31.12.22 г.

3. Грант РФФИ 20-51-54004 "Идентификация коэффициентов в эллиптических и параболических уравнениях".

Зарубежный участник – Институт математики Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой (Вьетнам).

Координаторы: руководитель проекта с российской стороны – чл.-корр. РАН, проф. С. И. Кабанихин (ИВМиМГ СО РАН); руководитель проекта с вьетнамской стороны – проф. Динх Нхо ХАО (Dinh Nho Hao).

Даты начала и окончания работ по теме: 28.02.2020 г. – 28.02.2022 г.

4. Грант Европейского исполнительного агентства по климату, инфраструктуре и окружающей среде в рамках полномочий, делегированных Европейской комиссией по теме "Климатические взаимодействия и обратная связь: ключевая роль морского льда и снега в полярной и глобальной климатической системе".

Зарубежный участник – Финский метеорологический институт, Хельсинки (Финляндия).

Координаторы: руководитель проекта с российской стороны – г.н.с., д.ф.-м.н. Г. А. Платов (ИВМиМГ СО РАН); руководители проекта с финской стороны – Ристо Маккинен (Risto Makkinen) и Дженни Томас (Jennie Thomas).

Даты начала и окончания работ по теме: 01.09.2021 – 31.08.2025 г.

Командирование по странам

В 2021 г. за рубеж командирован один сотрудник вместо двух в 2020 г.

1. Токтошов Г. Ы., н.с. Согласование планов совместных работ в рамках соглашения с Институтом математики национальной Академии наук, Бишкек (Республика Кыргызстан), с 18.10.2021 г. по 28.10. 2021 г. (командирование за счет принимающей стороны).

Прием зарубежных ученых и представителей фирм

В 2021 г. было принято 46 иностранных гостей из 4 четырех стран: Китай – 40; Казахстан – 3; Узбекистан – 2; Кыргызстан – 1. Из них: студентов – 14 (8 из Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин (Китай)), сотрудников новосибирского и московского представительств китайской компании ООО "Техкомпания Хуавэй" – 32.

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".

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".

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".

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".

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, г. 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".

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

6. ЛИ Чжаоян / LI Zhaoyang, студентка Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай.

Срок визита: 07.10.2019 г. – 31.08.2021г.

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

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

7. 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.

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

8. 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 ИВМиМГ СО РАН по теме "Идентификация математических моделей экономики".

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

9. 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.).

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

Делегация ООО Техкомпания Хуавэй, Китай (12.03.2021 г.):

10. ЮЙ Лю / YU Liu, директор департамента интеллектуальных вычислений представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

11. ЧУНЬПЭН Сяо /CHUNPENG Xiao, директор новосибирского представительства ООО Техкомпания Хуавэй.

12. ХОНБО Жао / HONGBO Zhao, ведущий менеджер по работе с клиентами, представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

13. ЛИХУА Сюй /LIHUA Xu, ведущий технический менеджер новосибирского представительства ООО Техкомпания Хуавэй.

14. ЮЙИН Сун /YUYING Song, ассистент директора ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

15. ЦИНВЭНЬ Янь / QINGWEN Yan, переводчик новосибирского представительства ООО Техкомпания Хуавэй.

Срок визита: 12.03.2021 г.

Цель визита: ознакомление с деятельностью ИВМиМГ СО РАН и Сибирского суперкомпьютерного центра (в составе делегации ООО Техкомпания Хуавэй), обсуждение перспектив сотрудничества.

Ответственный – зав. отделом информационных технологий Маринин И. В.

Делегация ООО Техкомпания Хуавэй, Китай (09.04.2021 г.):

16. Джоу Хонг / Zhou Hong, Президент Европейского исследовательского института Huawei, Китай (руководитель делегации).

17. Джоу Ксинронг / Zhou Xinrong, директор стратегического планирования, представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

18. Ян Симинг / Yang Siming, директор представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

19. Жу Ксинчен / Zhu Xincheng, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

20. Хуан Вэй / Huang Wei, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

21. Ли Ян / Li Yang, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

22. Сун Юйин / Song Yuying, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

23. Сюй Лихуа / Xu Lihua, ведущий технический менеджер новосибирского представительства ООО Техкомпания Хуавэй.

24. Вэй Сянюй / Wei Xiangyu, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

25. Сюй Шисинь / Xu Shixin, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

26. Лю Вэй / Liu Wei, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

27. Суй Хун / Sui Hong, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

28. Ван Чжунь / Wang Zhongyi, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

29. Ван Чжиин / Wang Zhiying, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

30. Сяо Юйлэй / Xiao Yulei, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

31. Го Гэ / Guo Ge, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, г. Москва;

32. Сяо Чуньпэн / Xiao Chunpeng, директор новосибирского представительства ООО Техкомпания Хуавэй.

33. Янь Цинвэнь / Yan Qingwen, переводчик новосибирского представительства ООО Техкомпания Хуавэй.

Цель визита: ознакомление с деятельностью ИВМиМГ СО РАН и Сибирского суперкомпьютерного центра, обсуждение перспектив сотрудничества.

Ответственный – зав. отделом информационных технологий Маринин И. В.

Делегация ООО Техкомпания Хуавэй, Китай (23.08.2021 г.):

34. Чжоу Хонг / ZHOU HONG, Президент Европейского исследовательского института и Российского исследовательского института ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

35. Тянь Синпу / TIAN XINGP, инженер ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

36. Сяо Чуньпэн / XIAO CHUNPENG, директор ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

37. Суй Хонг / SUI HONG, ведущий менеджер по техническому сотрудничеству ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

38. Янь Цинвэнь / YAN QINGWEN, инженер ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

39. Чжоу Синьжун / ZHOU XINRONG, технический эксперт ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

40. Лю Вэй / LIU WEI, инженер ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

41. Ван Чжиин / WANG ZHIYING, сотрудник ООО Техкомпания Хуавэй, Москва.

Цель визита: ознакомление с деятельностью ИВМиМГ СО РАН и Сибирского суперкомпьютерного центра (ССКЦ), обсуждение перспектив сотрудничества.

Ответственный – зав. отделом информационных технологий Маринин И. В.

42. Ли Шэннань / Li Shengnan, студентка Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай

Срок визита: 25.10.2021 г. – 30.07.2023 г.

Цель визита: обучение по магистерской программе механико-математического факультета Новосибирского государственного университета на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН.

Ответственный – в.н.с. лаборатории стохастических задач Пригарин С. М.

43. Ли Цзэкай / Li Zekai, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай

Срок визита: 25.10.2021 г. – 30.07.2022 г.

Цель визита: обучение по магистерской программе механико-математического факультета Новосибирского государственного университета на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН.

Ответственный – в.н.с. лаборатории стохастических задач Пригарин С. М.

44. Чжан Сюэ / Zhang Xue, студентка Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай

Срок визита: 25.10.2021 г. – 30.07.2022 г.

Цель визита: обучение по магистерской программе механико-математического факультета Новосибирского государственного университета на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН.

Ответственный – в.н.с. лаборатории стохастических задач Пригарин С. М.

45. Гао Ди / Gao Di, студентка Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай.

Срок визита: 15.11.2021 г. – 30.07.2022 г.

Цель визита: обучение по магистерской программе механико-математического факультета Новосибирского государственного университета на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН.

Ответственный – г.н.с. лаборатории стохастических задач Огородников В. А.

46. Ван Синьюй / Wang Xinyu, студентка Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай.

Цель визита: обучение по магистерской программе механико-математического факультета в области вычислительной математики Новосибирского государственного университета на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН.

Ответственный – зав. лабораторией математических задач химии, д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИВМИМГ СО РАН ЗА 2021 г.

Предобусловленные итерационные методы в подпространствах Крылова для решения больших разреженных СЛАУ

Д.ф.-м.н. Ильин В. П., Гололобов С.В., к.ф.-м.н. Гурьева Я. Л., Крылов А. М., Петухов А. В.

Предложен и исследован цикл итерационных методов в подпространствах Крылова с ускоряющими предобуславливающими матрицами для решения больших разреженных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), возникающих из аппроксимации актуальных многомерных задач математического моделирования с реальными данными на неструктурированных сетках. Алгоритмы базируются на различных вариационных, ортогональных и проекционных свойствах, включая экономичные схемы переменного-треугольных и вложенных неполных факторизаций, а также дефляционные подходы при многократном решении симметричных и несимметричных СЛАУ с последовательно определяемыми правыми частями. Исследованы вопросы повышения производительности и масштабируемого распараллеливания алгоритмов на суперкомпьютерах гетерогенной архитектуры с распределенной и иерархической общей памятью.

Результаты исследований изложены в пленарном докладе на международных конференциях:

1. Parallel Computational Technologies (PCT'2021)., Волгоград, 30 марта – 1 апреля 2021 г.
2. "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Компьютерные модели сферических линз для виртуальных оптических экспериментов

Д.т.н. Дебелов В. А., Долгов Ю. А.

Компьютерные модели сферических линз выполнены в виде набора библиотек на языке C++, которые обеспечивают задание и использование сферических линз в пользовательских приложениях. Модель линзы построена на основе теоретико-множественных пересечений внутреннего или внешнего пространства геометрических примитивов: сферы, цилиндра, конуса и

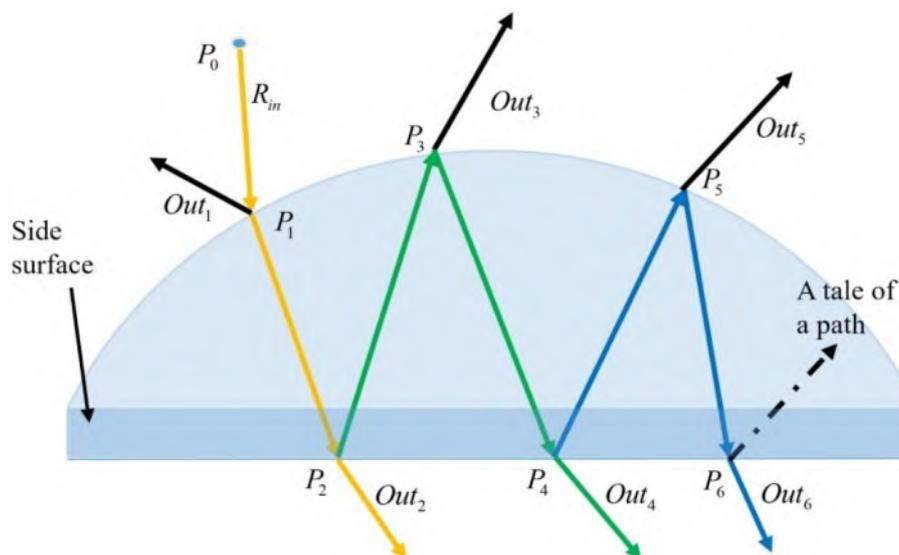


Рис. 1 – Поддерево трассировки лучей глубины 5 внутри линзы: R_{in} – падающий луч; Out_* – выходящие из линзы лучи; P_* – узлы; E_* – внутренние отраженные лучи; Side surface – сферическая или коническая монтажная часть боковой поверхности

полупространства (плоскости). Для линейно поляризованного светового луча, падающего на линзу, физически корректно вычисляются выходные линейно поляризованные световые лучи – отраженный и заданное количество прошедших лучей с учетом внутренних переотражений. Аналогии не известны, хотя существуют мощные программные продукты, такие как TracePro®, ASAP®, которые позволяют решать аналогичные задачи. Однако указанные системы громоздки, дорогостоящи, автономны и не позволяют использовать отдельные полезные функции в пользовательской программе.

Результаты исследований изложены в пленарном докладе на международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Двухпотоковая структура закона сохранения массы двухфазной несжимаемой жидкости в пористой среде

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

Сформулировано общее представление о двухпотоковой структуре закона сохранения масс в задачах о течении двухфазной жидкости. Основу двухпотоковой структуры составляет представление фазовых скоростей в виде суммы двух компонент – сонаправленных суммарной скорости и противоположно направленных. Примером применения предложенной конструкции является построенная нами ранее балансная разностная схема ЕНУ (Explicit Hybrid Upwinding) для задачи о гравитационной сегрегации двухфазной несжимаемой жидкости в пористых средах, удовлетворяющая слабому принципу максимума, в которой отсутствуют нефизичные сеточные артефакты.

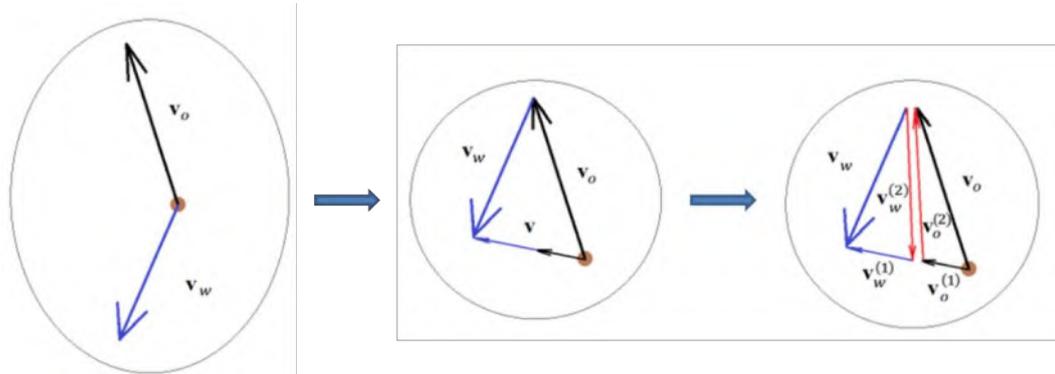


Рис. 2 – Двухпотоковая структура фазовых скоростей для системы "вода – нефть"

Результаты исследований изложены в пленарных докладах на международных конференциях:

1. "Математическое моделирование, обратные задачи и большие данные", Якутск, 18–25 июля 2021 г.
2. "Вычислительная математика и приложения", Математический центр Sirius (Сочи), 2–6 августа 2021 г.
3. 19-я Всероссийская школа молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования", Абрау-Дюрсо, 13–18 сентября 2021 г.
4. "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Идентификация агентной модели и анализ сценариев распространения COVID-19 в регионах Сибирского федерального округа

Чл.- корр. РАН Кабанихин С. И., к.ф.-м.н. Криворотько О. И., к.т.н. Зятыков Н. Ю.

Разработан численный алгоритм идентификации чувствительных параметров агентно-ориентированной модели распространения COVID-19 в регионах Сибирского федерального округа по статистической информации о количестве ежедневно протестированных, выявленных, критических и летальных случаев. Алгоритм основан на уменьшении границ чувствительных параметров методами идентифицируемости и последующем решении задачи минимизации целевого функционала с помощью комбинация стохастических и градиентных методов. На рис. 3 представлены средние значения модели по сценариям распространения COVID-19 в Новосибирской обл. при различных мерах в регионе, рассчитанные 16.10.2021 на 45 дней вперед. Верификация модели с реальными данными (400 человек) на 08.11.2021: 416 человек – синяя линия, 349 человек – красная линия, 356 человека – зеленая линия.

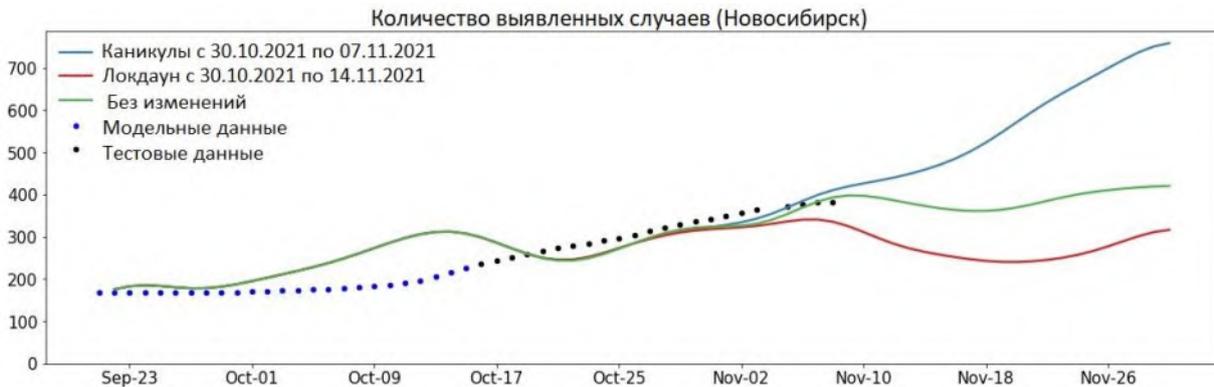


Рис. 3 – Сценарии распространения ежедневно выявляемых случаев COVID-19 в Новосибирской обл. с 17.10.2021 по 30.11.2021: синяя линия –нерабочие дни с 30.10 по 07.11 (число людей, присутствующих на работе и учебе, уменьшилось на 40 %, затем заболеваемость увеличилась в 2 раза вследствие привезенных случаев); красная линия –локдаун на 2 недели до 14.11 (полностью закрыть школы, 50 % общественных мест и 50 % сотрудников переведены на удаленную работу); зеленая линия – базовый сценарий развития на 16.10.2021; синие точки –данные по 16.10.2021, используемые в моделировании; черные точки – данные с 17.10.2021 по 08.11.2021 по сведениям www.стопкоронавирус.рф)

Новые корреляционно рандомизированные алгоритмы статистического моделирования переноса излучения в стохастической среде

Чл.-корр. РАН Михайлов Г. А., к.ф.-м.н. Медведев И. Н.

Для решения задач радиационного баланса, оптического зондирования и томографии бывает необходимо учесть многократное рассеяние излучения в стохастически неоднородной среде. Для реальных радиационных моделей с этой целью используется численно-статистический "метод максимального сечения" (ММС) на основе выравнивания поля оптической плотности путем добавления искусственного "дельта-рассеивателя". Однако трудоемкость соответствующей несмещенной оценки осредненного решения задачи неограниченно возрастает при уменьшении корреляционного масштаба (корреляционного радиуса r) среды. В связи с этим авторами построена дающая асимптотически, при $r \rightarrow 0$, несмещенные оценки требуемых функционалов рандомизация ММС – КР алгоритм (КРА), в котором значение физического коэффициента ослабления случайно выбирается в конце свободного пробега l кванта при условии $l > r$, а иначе сохраняется из начальной точки пробега. Трудоемкость КРА алгоритма ограничена при $r \rightarrow 0$. Он позволяет строить асимптотически несмещенные оценки и для бесконечно протяженных сред. Разработана методика для определения такого значения r_m , что при $r < r_m$ КРА дает удовлетворительные результаты. Решалась также задача о прохождении гамма-излучения (начальная энергия 1 мэВ) с комптоновским рассеянием через слой воды толщины 200 см, "разбавленный" ансамблем пустых

шаров радиуса r_b , центры которых образуют случайный пуассоновский поток интенсивности s , подбираемой так, что средняя плотность среды равна 0.9.

Таблица 1 – Значения корреляционного радиуса r , несмещенной оценки вероятностей прохождения P и КР-оценки P_s в зависимости от r_b

r_b	5	2	1	0.1	
r	3.67	1.47	0.74	0.074	∞
P	9.6	8.1			7.3
P_s	9.5	8.0	7.7	7.4	

Табл. 1 убедительно подтверждает стохастический предельный переход, который аналитически доказать не представляется возможным в данном случае. Отметим, что выигрыш в трудоемкости КРА сравнительно с несмещенной оценкой в данном случае определяется величиной $(1500 \times (r_b)^{-1})^3$, равной 1.5×10^6 при $r_b = 0.1$.

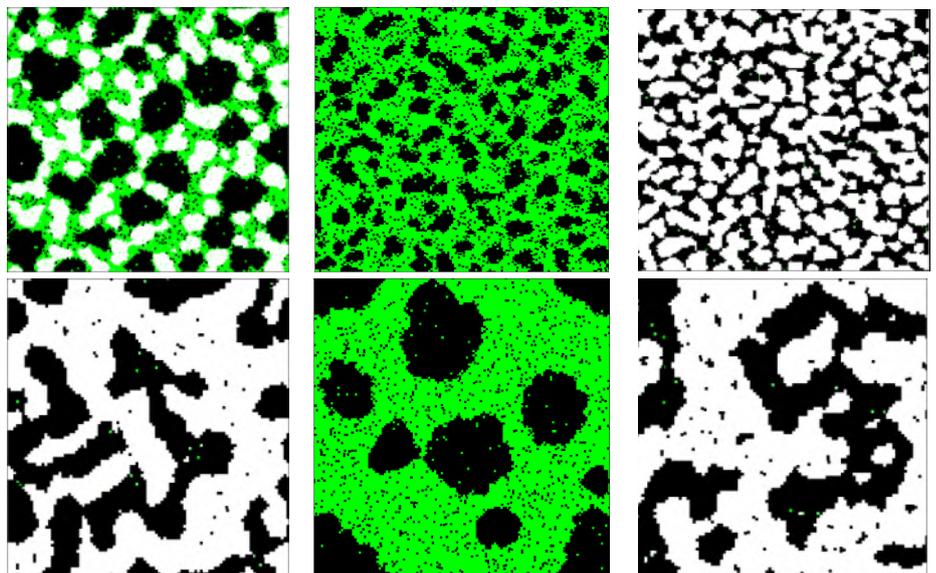
Результаты исследований изложены в пленарном докладе на международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Стохастическая модель и компьютерное моделирование агрегации нанокристаллов сульфида кадмия при испарении матрицы Ленгмюра – Блоджетт

Д.ф.-м.н. Сабельфельд К., Киреев С., Свит К.

Разработана стохастическая модель формирования и роста нанокристаллов, реализованная для моделирования агрегации нанокристаллов сульфида кадмия при испарении матрицы Ленгмюра – Блоджетт. Результаты моделирования поддержаны экспериментальными исследованиями группы физиков из ИФП им. Ржанова. Построенная модель учитывает мобильность как индивидуальных нанокристаллов, так и кластеров. Были проанализированы большие серии всевозможных паттернов, которые моделируются данным алгоритмом, и влияние растворителя на эти распределения. В модели введены вероятности отрыва нанокристалла от кластера, зависящие от температуры и связывающей энергии между нанокристаллами. Метод моделирования основан на минимизации энергии системы, для которой выписан гамильтониан, алгоритм минимизации построен в виде модификации метода Метрополиса.

Рис. 4 – Результаты моделирования – паттерны для различных условий: черный цвет – кристаллы CdS; зеленый – растворитель; белый – свободная поверхность



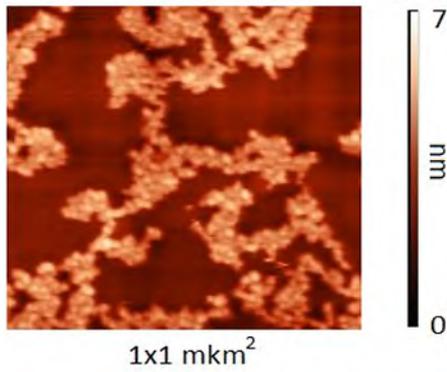


Рис. 5 – Микрофотография:
эксперимент (ИФП СО РАН)

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 19-11-00019).

Применение метода максимального сечения в задаче фильтрации для непрерывных систем с марковскими переключениями

К.ф.-м.н. Аверина Т. А.

При решении задачи фильтрации требуется оценивать процессы, т. е. находить текущие оценки изменяющегося во времени сигнала, искаженного помехой, и в силу этого недоступного непосредственному измерению. Предложены новые алгоритмы решения задачи оптимальной фильтрации

для динамических систем со случайной структурой с непрерывным временем.

По результатам измерений $Y(t)$, модель которых является системой диффузионного типа, оценивается состояние динамической системы $(X(t), L(t))$ по критерию минимума среднеквадратического отклонения ошибки оценивания в текущий момент времени. Математическая модель системы включает нелинейные стохастические дифференциальные уравнения (СДУ) с винеровской составляющей, правая часть которых определяет структуру динамической системы, или режим функционирования. Правая часть может изменяться в случайные моменты времени. Число структур системы предполагается конечным, а процесс смены структуры марковским или условно марковским. Вектор состояния такой системы состоит из двух компонент: вектора с вещественными координатами $X(t)$ и целочисленного номера структуры $L(t)$. Закон изменения номера структуры определяется распределением случайного промежутка времени между переключениями с заданной интенсивностью, зависящей от состояния системы.

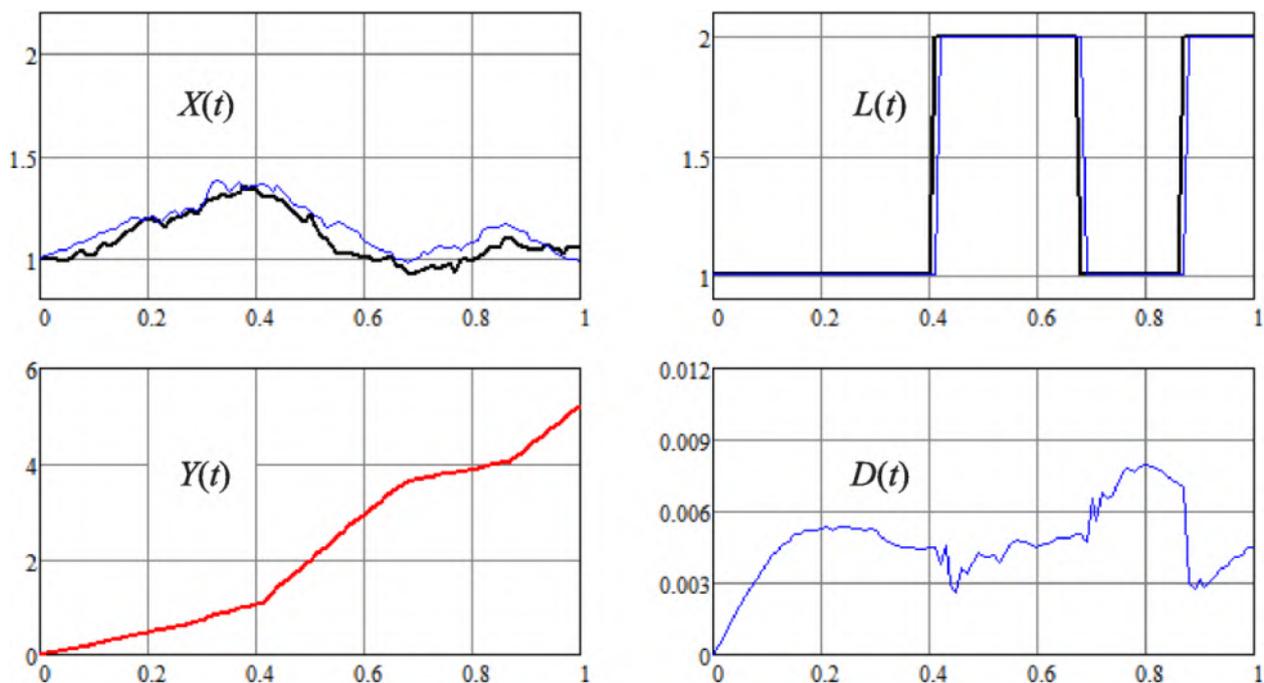


Рис. 6 – Выборочные траектории случайных процессов $X(t)$, $L(t)$ и их оценки;

$D(t)$ – дисперсия оценки $X(t)$; $Y(t)$ – измерения

Разработанные алгоритмы типа фильтров частиц для оценивания текущего состояния систем со случайной структурой построены на основе метода статистического моделирования с использованием численных методов решения СДУ и экономичной модификации метода максимального сечения.

Морские волны тепла Сибирского шельфа и прилегающих акваторий

Д.ф.-м.н. Голубева Е. Н., Крайнева М. В., д.ф.-м.н. Платов Г. А., Якшина Д. Ф., Тарханова М. А.

Проведено исследование климатической изменчивости Северного Ледовитого океана и его окраинных морей с помощью трехмерной физико-математической модели, описывающей законы взаимодействия атмосферы, океана и морского льда, в численной реализации, разработанной в ИВМиМГ СО РАН. Результаты моделирования, подкрепленные анализом данных наблюдений, показали нарастающую интенсивность повышения летней температуры в сибирских арктических морях и прилегающих глубоководных акваториях во втором десятилетии 21 в. Формирование максимальных значений температуры, превышающих 90-процентный порог всех среднемесячных значений за период с 1981 по 2010 гг., позволяет рассматривать это климатическое явление как одно из самых опасных, а именно как морские волны тепла. Серия численных экспериментов на основе модели продемонстрировала, что возникновение морских волн тепла в сибирских арктических морях и прилегающей акватории тесно связано с освобождением региона ото льда, которое в равной степени вызвано тепловым и динамическим состоянием атмосферы и обусловлено происходившими в течение последних двух десятилетий сокращением ледового покрова и повышением температуры атлантических вод, поступающих в Северный Ледовитый океан.

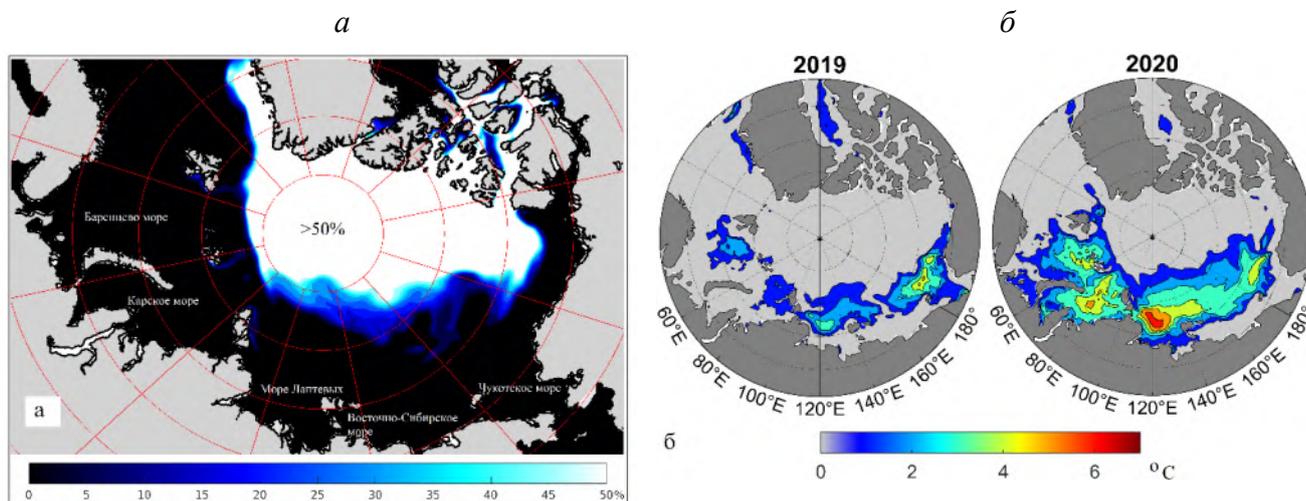


Рис. 7 – Результаты численного моделирования: средняя концентрация морского льда (в %) для сентября 2018–2020 гг. (а); морские волны тепла – аномалии среднемесячной поверхностной температуры (сентябрь), превышающие 90-процентный порог всех среднемесячных значений за период с 1981 по 2010 г. (б)

Обнаружение угловых структур в 3d-массивах с использованием масштабируемых масок

Д.ф.-м.н. Казанцев И. Г.

Проведены теоретические исследования масок (образцы для сравнений, или эталоны), моделирующих угловые структуры, для их обнаружения на трехмерных изображениях при ис-

пользовании в традиционном методе скользящих окон. Этот метод основывается на согласованной фильтрации и многократных вычислениях свертки маски с текущей окрестностью отдельного элемента массива. Одним из актуальных приложений является проблема распознавания лиц, где метод имеет конкретное применение при поиске доминантных (опорных) точек.

Ранее нами были сконструированы масштабируемые маски для выделения угловых конструкций на двумерных изображениях, в настоящее время показано обобщение угловых масок на трехмерный случай. Свойство масштабируемости, состоящее в иерархии подматриц, дающей возможность построения матриц большего размера простым повторением самоподобных элементов, удалось распространить на трехмерный случай. Это отличает новые маски от использовавшихся традиционных, для которых элементы маски зависят от размера матрицы.

Излагается общий подход к конструированию масок для различных телесных углов, способствующий разработке иерархических вычислений трехмерных данных с целью ускорения. Выполнен сравнительный анализ коэффициентов усиления шума традиционных угловых детекторов (Кирш, Робинсон) и новых масок.

Исследования по геоэкологии техногенных шумов в интересах безопасности инфраструктуры города

Д.т.н. Хайретдинов М. С., д.т.н. Ковалевский В. В., Копылова О. А.

В связи с резким нарастанием на современном этапе уровня шумового загрязнения городской инфраструктуры из-за интенсивно развивающейся автомобилизации, масштабов строительных работ и других природно-техногенных факторов актуальной является проблема оценивания и предупреждения экологических рисков от шумов для здоровья человека и окружающей социальной инфраструктуры. Уровень опасности резко возрастает в области инфранизких частот, соответствующих основным процессам жизнедеятельности организма человека, собственным частотам колебаний сооружений. Авторами разработан многофакторный методический подход для решения задач обнаружения критических уровней шумов, определяемых вибрациями в земле и акустическими колебаниями в атмосфере, оценивания их степени угрозы для человека, а также

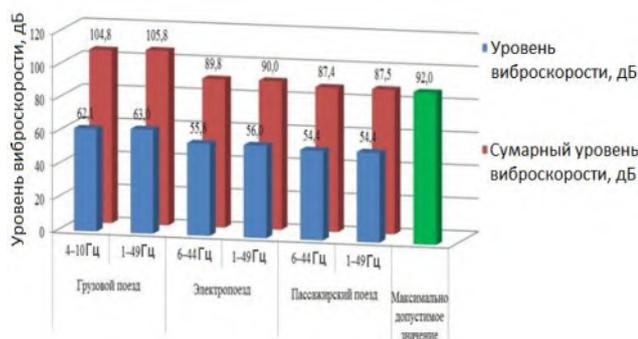


Рис. 8 – Нормированный (синий) и суммарный (красный) уровни виброскорости в диапазонах частот от различных источников: грузовой поезд, электропоезд, пассажирский поезд (дБ). Критический (максимально допустимый) уровень (зеленый) для частот 4–80 Гц

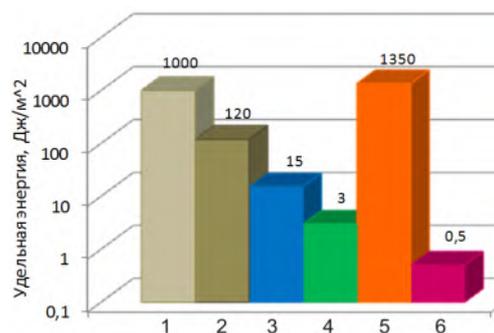


Рис. 9 – Критические значения удельной энергии (УЭ) от взрывов: 1 – жилое здание при однократном взрыве; 2 – жилое здание при многократных взрывах; 3 – оконное стекло толщиной 2–3 мм; 4 – человек. Значения УЭ от взрыва с тнт 125 кг: 5 – на удалении от взрыва 0,5 км; 6 – на удалении 10 км

распознавания и определения местоположения источников шумов. Получены практически важные теоретические и экспериментальные результаты в решении перечисленных задач в отношении различных типов тяжелого транспорта, полигонных и карьерных взрывов. Разработаны практические рекомендации по безопасности с учетом пространственно-частотно-временных факторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (коды грантов 18-47-540006p_a, 20-07-00861a).

Результаты исследований изложены в двух пленарных докладах на международной конференции

The 21th Multidisciplinary scientific geoconference SGEM-2021, Albena (Bulgaria), Aug. 14–22, 2021.

Новая смешанная вариационная задача и система Стокса с сингулярной правой частью

Д.ф.-м.н. Урев М. В.

С помощью расширенной схемы абстрактной смешанной вариационной задачи рассмотрена смешанная вариационная постановка двумерной задачи Стокса в ограниченной области с сингулярной правой частью, в частности дельта-функцией. Сформулированы условия, при выполнении которых доказана теорема о разрешимости и устойчивости решения такой обобщенной задачи.

Выбор оптимальной конфигурации системы наблюдения для точной характеристики источника цунами.

К.ф.-м.н. Воронина Т. А.

Ключевым вопросом оценки возможных характеристик проявления волны цунами на побережье являются начальные условия задачи, т. е. исходная форма смещения воды в области очага цунами. Инверсия мареограмм (волновых форм цунами) – широко распространенный в настоящее время подход для реконструкции источника цунами. В данной работе задача восстановления первоначальной формы источника цунами по измеренным колебаниям уровня на серии удаленных приемников ставится как обратная задача математической физики и является некорректной. Регуляризация оператора в этом случае осуществляется путем сужения оператора на подпространство, являющееся линейной оболочкой первых правых сингулярных векторов. Меняя величину размерности этого подпространства на основе анализа свойств оператора прямой задачи, определяемых системой наблюдения и батиметрией, можно контролировать погрешность решения.

Такой подход позволяет ставить вопрос об оптимальном планировании системы донных датчиков в районе прогнозной цунамигенной активности для достоверного восстановления параметров источника цунами от ожидаемых подводных землетрясений. Показано, что использование оптимальной системы наблюдения не только повышает точность восстановления источника цунами, но и обеспечивает вычисление высот волны без дополнительных расчетов в любых заранее фиксированных точках акватории, что важно для успешного прогнозирования высот цунами на побережье. Для поиска наиболее информативной части системы наблюдения в настоящей работе предложена методика, основанная на оценке переноса энергии волной цунами. Наиболее информативные данные регистрируются на направлениях наиболее интенсивного распространения энергии цунами. Вывод полезен при разработке новых систем предупреждения о цунами.

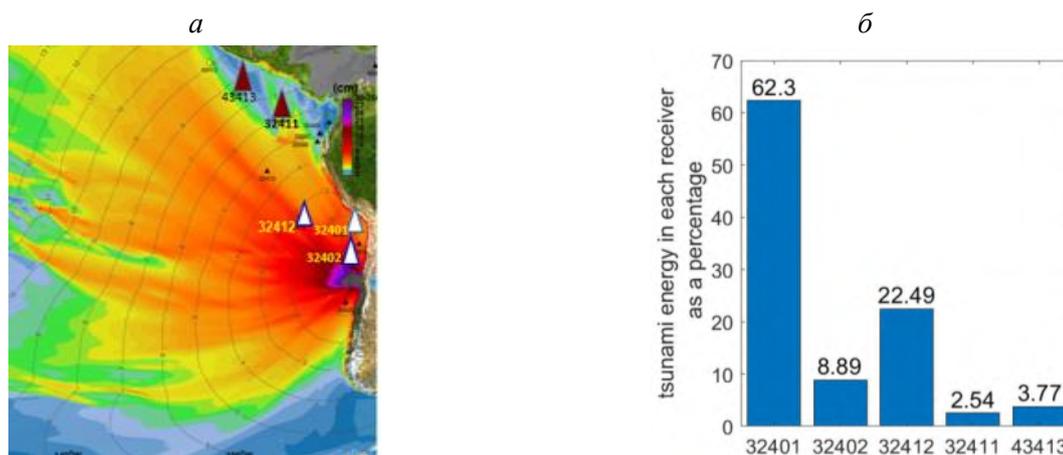


Рис. 10 – Диаграмма распространения энергии волны цунами с учетом топографии морского дна при цунамигенном землетрясении в Чили 16 сентября 2015 г. (а); треугольными маркерами показана система наблюдения из буев DART, данные которых использовались в инверсии: 32401, 32402, 32412, 32411, 43413; наиболее информативная часть системы наблюдения показана белыми маркерами; распределение энергии волны цунами в процентах между буями DART (б); на оси абсцисс – номера буев

Высокопроизводительная вычислительная модель плазменных течений в открытых ловушках в режиме диамагнитного удержания

Д.ф.-м.н. Вшивков В. А., д.ф.-м.н. Дудникова Г. И., к.ф.-м.н. Боронина М. А., к.ф.-м.н. Генрих Е. А.

Создана численная модель удержания и нагрева плазмы в осесимметричной открытой магнитной ловушке для установок УТС. Гибридная модель с использованием метода частиц-в-ячейках основана на кинетическом приближении для ионных компонент фоновой плазмы и инжектируемого пучка и МГД приближении для электронной компоненты. Создан комплекс программ для проведения численного моделирования диамагнитного режима ловушки, эксперименты по исследованию которого планируются на установке КОТ ИЯФ СО РАН. Проведены вычислительные эксперименты по исследованию эволюции структуры магнитного поля и плазмы, получены временные и пространственные характеристики фоновой и удерживаемой плазмы в зависимости от энергии, тока и ионного состава инжектируемого пучка и других параметров.

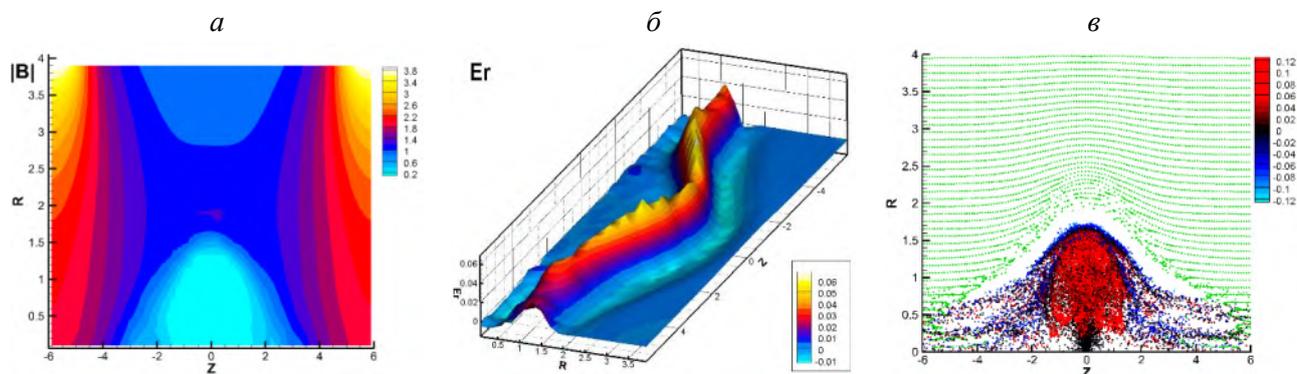


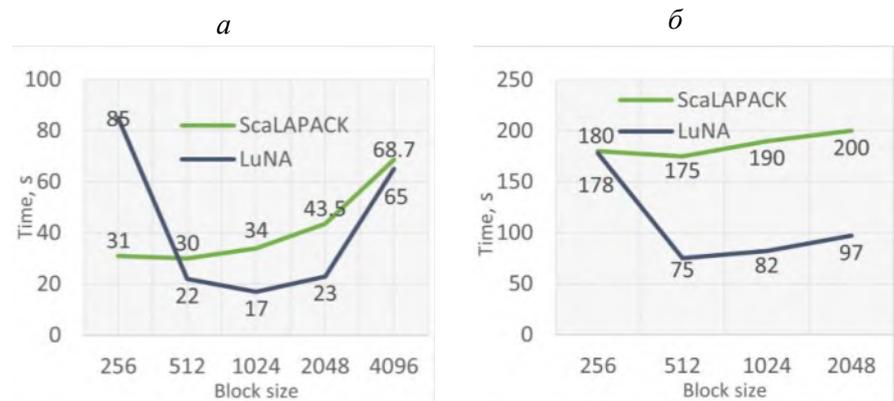
Рис. 11 – Значения модуля магнитного поля: формирование магнитной каверны (а); образование барьера электрического поля (б); распределение ионов в области решения (в); зеленым цветом обозначены частицы фона, остальные цвета – частицы инжектируемой и удерживаемой плазмы в зависимости от азимутальной скорости

Реализация высокоэффективной специализированной поддержки операций над плотными матрицами в системе LuNA

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

В системах автоматического конструирования параллельных программ, таких как LuNA, достижение высокой эффективности конструируемых программ возможно в частных предметных областях за счет наличия в системе специализированной поддержки для этой предметной области в виде частных системных алгоритмов. В 2021 г. в системе LuNA были разработаны и реализованы специализированные алгоритмы, обеспечивающие высокую эффективность конструируемых программ в области операций над плотными матрицами. Класс поддерживаемых приложений включает, но не ограничивается, разложениями LU, LL^T , LDL^T . Достигнуто качество конструирования программ, не уступающее качеству подпрограмм распространенной библиотеки ScaLAPACK. Результаты подтверждают возможность обеспечения высокой эффективности конструируемых параллельных программ в системе LuNA (рис. 12), по крайней мере для некоторых практически значимых классов приложений. Результат существенно расширяет область практического применения системы LuNA.

Рис. 12 – Время выполнения разложения Холецкого для квадратных матриц размера 32768 (а) и 65536 (б) элементов



Анализ и структурная оптимизации линейных беспроводных сенсорных сетей с ненадежными элементами

К.ф.-м.н. Мигов Д. А., д.т.н. Родионов А. С., к.ф.-м.н. Шахов В. В.

Разработан ряд алгоритмов для расчета и оценивания надежности линейных беспроводных сенсорных сетей, а также структурной оптимизации таких сетей для повышения надежности. На основе ранее разработанного декомпозиционного подхода предложен рекурсивный алгоритм расчета надежности ЛБСС (имеющих множество поперечных двухвершинных сечений, рис. 1), что позволяет выполнять расчет надежности ЛБСС из сотен и тысяч узлов за приемлемое время. Для оценки надежности таких сетей также были разработаны параллельные алгоритмы для графических ускорителей. Аналитически доказан оптимальный по критерию средней вероятности связности пары узлов выбор расположения ребер, существенно отличающихся по надежности от остальных, в длинных цепях, моделирующих линейные сети с ненадежными связями. Для оптимальной по критерию надежности расстановки стоков ЛБСС разработан ряд генетических алгоритмов. Для ускорения поиска оптимальных решений используется подход с кумулятивным уточнением границ надежности сети и оценкой надежности по тренду. Также разработаны параллельные алгоритмы расстановки стоков. Разработаны модели оценки надежности ребер в случайных графах, моделирующих топологию беспроводных сетей с помехоустойчивыми каналами.

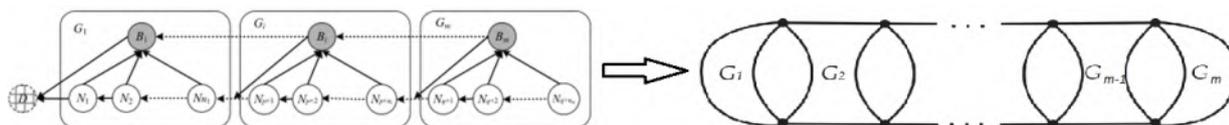


Рис. 13 – ЛБСС и схематический граф ее структуры с продольными сечениями



Рис. 14 – Оптимальное по вероятности установления произвольного парного соединения размещение одного слабого или "сильного" ребра

Публикации

1. Ильин, В. П. Итерационные предобусловленные методы в подпространствах Крылова: тенденции XXI века // ЖВМиМФ. 2021. Т. 61, № 11. С. 1786–1813. DOI: 10.31857/S0044466921110090.

2. Gurieva, Y. L., Il'in, V. P. Conjugate direction methods for multiple solution of SLAEs // J. of Math. Sci. 2021. Vol. 255, No. 3. P. 231–241. DOI: 10.1007/s10958-021-05365-8.

3. Gololobov, S. V., Il'in V. P., Krylov, A. M., Petukhov, A. V. Nested alternating – triangular incomplete factorization methods // J. of Phys.: Conf. Ser. Vol. 1715, International Conference "Marchuk Scientific Readings 2020" (MSR-2020), dedicated to the 95th anniversary of the birthday of RAS Academician Guri I. Marchuk, Novosibirsk, Oct. 19–23, 2020. Art. Num. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012003.

4. Il'in, V. P. On moment methods in Krylov subspaces // Dokl. Math. 2020. Vol. 495. P. 38–43. DOI: 10.1134/S1064562420060241.

5. Debelov, V. A., Dolgov, N. Yu. Spherical lenses for virtual optic experiments // Sci. Visual. 2021. Vol. 13, No. 4. P. 111–126. DOI: 10.26583/sv.13.4.09.

6. Свидетельство № 2021614574. Программа для ЭВМ "Программный комплекс SphL": свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Дебелов В. А., Долгов Н. Ю. Дата регистрации: 26.03.2021.

7. 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. P. 17–32. DOI: 10.1515/rnam-2021-0002.

8. Ivanov, M. I., Kremer, I. A., Laevsky Yu. M. Mesh filtration problems with a two-flow structure of phase velocities // J. of Phys.: Conf. Ser. Vol. 1715, International Conference "Marchuk Scientific Readings 2020" (MSR-2020), dedicated to the 95th anniversary of the birthday of RAS Academician Guri I. Marchuk, Novosibirsk, Oct. 19–23, 2020. Art. Num. 012006. Doi: DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012006.

9. Криворотько, О. И., Кабанихин, С. И., Зятыков, Н. Ю., Приходько, А. Ю., Прохошин Н. М., Шишленин М. А. Математическое моделирование и прогнозирование COVID-19 в Москве и Новосибирской области // СибЖВМ. 2020. Т. 23, № 4. С. 395–414. DOI: 10.15372/SJNM20200404. (Q3).

10. Кабанихин, С. И., Криворотько, О. И. Математическое моделирование эпидемии Уханьского коронавируса COVID-2019 и обратные задачи // ЖВМиМФ. 2020. Т. 60, № 11. С. 1950–1961. DOI: 10.31857/S004446692011006X. (Q2).

11. Криворотко, О. И., Кабанихин, С. И., Сосновская, М. И., Андорная, Д. В. Анализ чувствительности и идентифицируемости математических моделей распространения эпидемии COVID-19 // Вавиловский журн. генетики и селекции. 2021. Т. 25(1). С. 82–91. DOI: 10.18699/VJ21.010. (Q4).
12. Krivorotko, O., Sosnovskaia, M., Vashchenko, I., Kerr, C., Lesnic, D. Agent-based modeling of COVID-19 outbreaks for New York state and UK: parameter identification algorithm // Infectious Disease Modelling. 2022. Vol. 7. P. 30–44. DOI: 10.1016/j.idm.2021.11.004. (Q1).
13. Svit, K., Kireev, S., Sabelfeld, K. A stochastic model, simulation, and application to aggregation of cadmium sulfide nanocrystals upon evaporation of the Langmuir – Blodgett matrix // Monte Carlo Meth. and Appl. 2021. Vol. 27, No. 4. P. 289–299. DOI: 10.1515/mcma-2021-2100.
14. Averina, T. A., Rybakov, K. A. Maximum cross section method in the filtering problem for continuous systems with Markovian switching // RJNAMM. 2021. Vol. 36, No 3. P. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.1515/rnam-2021-0011>.
15. Medvedev, I. N., Mikhailov G. A. New correlative randomized algorithms for statistical modeling of radiation transfer in stochastic medium // RJNAMM. 2021. Vol. 34, No. 1. P. 43–55. DOI 10.1515/rnam-2021-0018.
16. Михайлов, Г. А., Медведев И. Н. Новый корреляционно рандомизированный алгоритм оценки влияния стохастичности среды на перенос частиц // ДАН. Матем., информ., проц. управл. 2021. Т. 498, № 1. С. 55–58. DOI: 10.1134/S1064562421030133.
17. Golubeva, E., Kraineva, M., Platov, G., Iakshina, D., Tarkhanova M. Marine heatwaves in Siberian Arctic Seas and adjacent region // Remote Sens. 2021. Vol. 13, iss. 21. P. 4436. DOI: 10.3390/rs13214436. (WoS, Scopus Q1)
18. Golubeva, E., Platov, G., Kraineva, M. Numerical modeling of the consequences of "marine heatwaves" in the North Pacific for the Arctic Ocean // EGU General Assembly 2021, Apr. 19–30, 2021. EGU21-6921. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-6921.
19. Kraineva, M., Golubeva, E. Formation of heat anomalies in the Laptev Sea (2000–2020 years), Processes in GeoMedia. 2021. Vol. V. Springer Geology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85851-3_19.
20. Kazantsev, I. G., Mukhametzhanova, B. O., Iskakov, K. T. Detection of the corner structures in 3D arrays using scalable masks // Сиб. Электрон. Матем. Изв. 2021. № 1. С. 61–71. DOI 10.33048/semi.2021.18.006 (Q2 Scopus).
21. Kopylova, O., Dobrorodny, V., Khairtdinov, M. Optimization of frequency parameters choice in the polarization analysis of transport noise // Proc. of 17th Intern. Asian School-Semin. "Optimization Problems of Complex Systems 2021" (OPCS 2021), Moscow – Novosibirsk – Almaty (Kazakhstan), Sep. 13–17, 2021. P. 44–48. Publication in IEEE Xplore. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588728.
22. Kopylova, O. A., Khairtdinov, M. S. Geoeological risks of technogenic noise at low frequencies. // Information Innovative Technologies: Materials of the Intern. sci.-pract. conf. Prague (Czech Rep.), Apr. 26–30, 2021 / Ed. S. U. Uvaysov, I. A. Ivanov. M.: Assoc. of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2021. P. 132–138. ISSN 2542-1824. [Electron. resource]. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46447634>.

23. Урев, М. В. Новая смешанная вариационная задача и система Стокса с сингулярной правой частью // ЖВМиМФ. 2021. Т. 61, № 12. С. 227–234. DOI: 10.31857/S0044466921120152. (Q2 Web of Science, Scopus).

24. Voronina, T. A., Voronin, V. V. A Study of implementation features of the r-solution method for tsunami source recovery in the case of the Illapel tsunami 2015 // Pure and Applied Geophysics. 2021. Vol. 178. P. 4853–4863. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02843-7>.

25. Boronina, M. A., Chernykh, I. G., Dudnikova, G. I., Genrikh, E. A., Vshivkov, V. A. Mathematical modelling of beam dynamics in diamagnetic confinement regime of open trap // J. of Phys.: Conf. Ser. 2028, 012020, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012020.

26. Belyaev, N., Perepelkin, V. High-efficiency specialized support for dense linear algebra arithmetic in LuNA system // Malyshkin V. (eds.) Parallel Computing Technologies (PaCT 2021). Lect. Notes in Comput. Sci. 2021. Vol. 12942. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86359-3_11.

27. Д. А. Мигов, К. А. Волжанкина, А. С. Родионов. Алгоритмы структурной оптимизации сетей различного назначения с использованием кумулятивных оценок границ надежности // Автоматрия. 2021. С. 19–29.

[Migov, D. A., Volzhankina, K. A., Rodionov, A. S. Genetic algorithms for drain placement in wireless sensor networks optimal by the reliability criterion // Optoelectron. Instrum. and Data Proc. 2021. Vol. 57, No 3. P. 240–249. DOI: 10.3103/S8756699021030110.] (WoS, Scopus Q3).

28. Migov, D. A., Snytnikova, T. V., Rodionov, A. S., Kanevsky V. I. Network reliability calculation with use of GPUs // PaCT 2021. LNCS 12942. 2021. P. 210–219. DOI:10.1007/978-3-030-86359-3_16. P. 210–219 (WoS, Scopus Q2).

29. Shakhov, V. V., Migov D. An effective method for ensuring the reliability of a critical infrastructure monitoring network // LNCS. 2021. Vol. 12956. P. 526–535. DOI: 10.1007/978-3-030-87010-2_39 (WoS, Scopus Q3).

30. Tarasov, A., Migov, D. Parallel genetic algorithm for sink nodes placement to maximize network reliability // Proc. of the IEEE 17th Intern. Asian school-seminar "Optimization Problems of complex systems", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 126–129. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588716 (Scopus).

31. Rodionov, A. Optimal structures of random graphs // Proc. of the IEEE 17th Intern. Asian school-seminar "Optimization Problems of complex systems", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 96–99. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588692.

32. Shakhov, V., Yurgenson, A. Towards edge computing based monitoring for smart ports // Comput. Sci. and Its Appl. (ICCSA 2021). P. 262–271. DOI:10.1007/978-3-030-87016-4_20.

ЛАБОРАТОРИЯ МЕТОДОВ МОНТЕ-КАРЛО

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

Важнейшие достижения**Новые корреляционно рандомизированные алгоритмы статистического моделирования переноса излучения в стохастической среде**

Чл.-корр. РАН Михайлов Г. А., к.ф.-м.н. Медведев И. Н.

Для решения задач радиационного баланса, оптического зондирования и томографии бывает необходимо учесть многократное рассеяние излучения в стохастически неоднородной среде. Для реальных радиационных моделей с этой целью используется численно-статистический метод максимального сечения (ММС) на основе выравнивания поля оптической плотности путем добавления искусственного дельта-рассеивателя. Однако трудоемкость соответствующей несмещенной оценки осредненного решения задачи неограниченно возрастает при уменьшении корреляционного масштаба (корреляционного радиуса r) стандартных мозаичных моделей случайной плотности среды. В связи с этим авторами была построена рандомизация ММС, дающая асимптотически несмещенные оценки требуемых функционалов при $r \rightarrow 0$, в которой значение физического коэффициента ослабления выбирается случайным образом в конце свободного пробега кванта l при условии $l > r$, иначе сохраняется из начальной точки пробега. В более точном варианте такого нового корреляционного рандомизированного алгоритма (КРА) коэффициент сохраняется с вероятностью, определяемой корреляционной функцией. Трудоемкость КРА алгоритма ограничена при $r \rightarrow 0$; он позволяет строить асимптотически несмещенные оценки и для бесконечно протяженных сред. Разработана методика определения такого значения r_m , при котором КРА дает удовлетворительные результаты, если $r < r_m$. Для случая предельно анизотропного рассеяния доказан стохастический предельный переход, состоящий в том, что среднее значение несмещенных и КРА оценок при $r \rightarrow 0$ сходится к решению задачи с осредненной средой. Решалась также задача о прохождении гамма-излучения с комптоновским рассеянием и поглощением за счет фотоэффекта через слой воды толщины 200 см, "разбавленный" ансамблем пустых шаров радиуса r_b , центры которых образуют пуассоновский поток интенсивности s , подбираемый так, что средняя плотность среды равна 0.9; начальная энергия кванта равна 1 мэВ. Все оценки далее умножены на 10^5 , а их среднеквадратическая погрешность определяется единицей последнего приводимого разряда. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Значение $r = \infty$ соответствует детерминированной среде. Расчет величины P для $r_b = 2$ ($s = 6937.39$) составил примерно 30 ч. для величины $P_s = 8.5$ мин. Табл. 1 убедительно подтверждает стохастический предельный переход, который аналитически доказать здесь не представляется возможным. Отметим, что выигрыш в трудоемкости КРА сравнительно с несмещенной оценкой в данном случае определяется величиной $(1500 \times (r_b)^{-1})^3$, равной $1.5 \cdot 10^6$ при $r_b = 0.1$.

Таблица 1 – Значения корреляционного радиуса r , интенсивности s , несмещенной оценки вероятностей прохождения P и КР-оценки P_s в зависимости от r_b

r_b	5	2	1	0.1	
r	3.67	1.47	0.74	0.074	∞
s	511.12	6937.39	52861.7	$5 \cdot 10^7$	
P	9.6	8.1			7.3
P_s	9.5	8.0	7.7	7.4	

Кроме того, представлены способы применения экспоненциального преобразования моделируемого распределения плотности длины свободного пробега и его рандомизированной модификации с ветвлением траектории цепи Маркова в методе максимального сечения для решения задач переноса гамма-излучения в стохастически неоднородной среде. Проведено численное исследование эффективности упомянутых выше алгоритмов по сравнению со стандартным методом моделирования на примере переноса гамма-излучения сквозь толстый "брусочек" воды, содержащий случайное количество шаров из воздуха или "чистого" алюминия.

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Medvedev, I. N. Mikhailov G. A. New correlative randomized algorithms for statistical modeling of radiation transfer in stochastic medium // RJNAMM. 2021. Vol. 34, No 1. P. 43–55. DOI 10.1515/rnam-2021-0018.

2. Михайлов, Г. А., Медведев, И. Н. Новый корреляционно рандомизированный алгоритм оценки влияния стохастичности среды на перенос частиц // ДАН. Математика, информатика, процессы управления. 2021. Т. 498, № 1. С. 55–58. DOI 10.1134/S1064562421030133.

3. Medvedev, I. N. On the efficiency of an exponential transformation method for solving stochastic problems of gamma-ray transport theory // Num. Analysis. Appl. 2021. V. 14. P. 372–378. <https://doi.org/10.1134/S1995423921040066>.

Результаты исследований представлены на конференции:

"Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2021 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 0251-2021-0002.

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

Этап 2021 г.

1. Для построения тренда эпидемиологического процесса обычно используются дифференциальные SEIR модели, в которых индивидуумы (элементы) разбиваются на группы (типы): восприимчивые, инфицированные, выздоровевшие и т. д. Соответствующие системы дифференциальных уравнений получаются из локального баланса, что вполне обоснованно в линейном варианте задачи, когда группы не взаимодействуют, но испытывают превращения с изменением типа. При наличии взаимодействий (например, инфицирования больными) фактически используется эвристическое предположение об асимптотической (по начальной численности N) некоррелированности взаимодействующих групп ("каждый с каждым"), которое дает известные системы нелинейных дифференциальных уравнений. Отметим, что в работе Д. Гребенникова и И. Сазонова была доказана сходимость при $N \rightarrow \infty$ функциональных характеристик эпидемии к решению дифференциальных SEIR-уравнений в естественном предположении о том, что реализуется случайный марковский пуассоновский процесс рождения и гибели с превращениями и взаимодействием групп. Интервалы времени между событиями процесса предполагаются экспоненциально распределенными, соответственно моменты времени составляют точечные пуассоновские потоки с

заданными интенсивностями, которые изменяются в моменты взаимодействий и превращений. Моделирование такого процесса радикально упрощается вследствие того, что объединение элементарных пуассоновских потоков дает также пуассоновский поток с суммарной интенсивностью, причем после выбора коллективного момента времени он полагается соответствующим элементарному потоку с вероятностью, пропорциональной соответствующей интенсивности. Для отдельной группы эти вероятности одинаковы и соответствующий индивидуум выбирается случайно. Таким образом, в этой стохастической модели, в отличие от агентного моделирования, учитывающего неоднородность популяции, непрерывно по времени моделируется стохастическая эволюция всех индивидуумов с корректной реализацией взаимодействий. Однако можно отметить, что среднее число шагов в объединенном потоке в общем случае растет как N^2 , но для численности $N \approx 3 \cdot 10^6$ (г. Новосибирск) такое моделирование удалось реализовать и на современном РС.

Путем варьирования начальной численности вида $N = n \times m$ при $m \geq 2$ показано, что среднестатистические числа случаев выявления заболевших меньше соответствующих дифференциальных значений на величину, статистически неотличимую от $C(t) / m$, причем для последнего момента времени в проведенных расчетах значение $C \approx 27.3$; это соотношение позволяет использовать стохастическую модель для больших значений N .

Важной деталью модели эпидемии являются запаздывания, соответствующие инкубационным периодам, в основном между инфицированием и заболеванием. В работах Н. В. Перцева для учета запаздывания M введены нарушающие марковость процесса последовательности моментов времени выхода элементов из инкубации; они также рассматриваются при выборе момента очередного события в системе. Отметим, что в настоящей работе, в отличие от работ Н. В. Перцева, элементы этих последовательностей участвуют в превращениях, приводящих к выздоровлениям в течении периода M .

В качестве тестовой задачи было использовано приложение дифференциальной SEIRD модели для анализа заболеваемости COVID-19 в Новосибирске в период с 23 марта по 21 июня 2020 г.

Расчеты показали, что практически полезный доверительный интервал ("два сигма") при $1.06.20 \leq t \leq 21.06.20$ составляет около 100 % от изучаемой оценки числа выявленных случаев заболевания и содержит реальную статистическую оценку этой величины (рис. 1). Таким образом, полученная разность указанных оценок статистически незначима, т. е. может быть получена чисто случайно. Для дифференциальной SEIRD модели эта разность несколько больше, но также статистически незначима. Отметим, что для Новосибирска увеличение прогноза числа заболевших даже на 100 %, по-видимому, практически допустимо. Проведенные расчеты для различных значений начальной численности N показали, что относительное значение указанного доверительного интервала убывает как $N^{-1/2}$.

Исследовано влияние на прогноз введения запаздывания, т. е. инкубационного периода перехода от первично зараженных "бессимптомников" к "симптомникам" (или к "бессимптомникам", способным заражать) с пуассоновской вероятностью, соответствующей длине периода. В отличие от Н. В. Перцева, в инкубационном периоде реализуется "пуассоновское выздоровление". Показано, что это влияние является существенным и может улучшить прогноз.

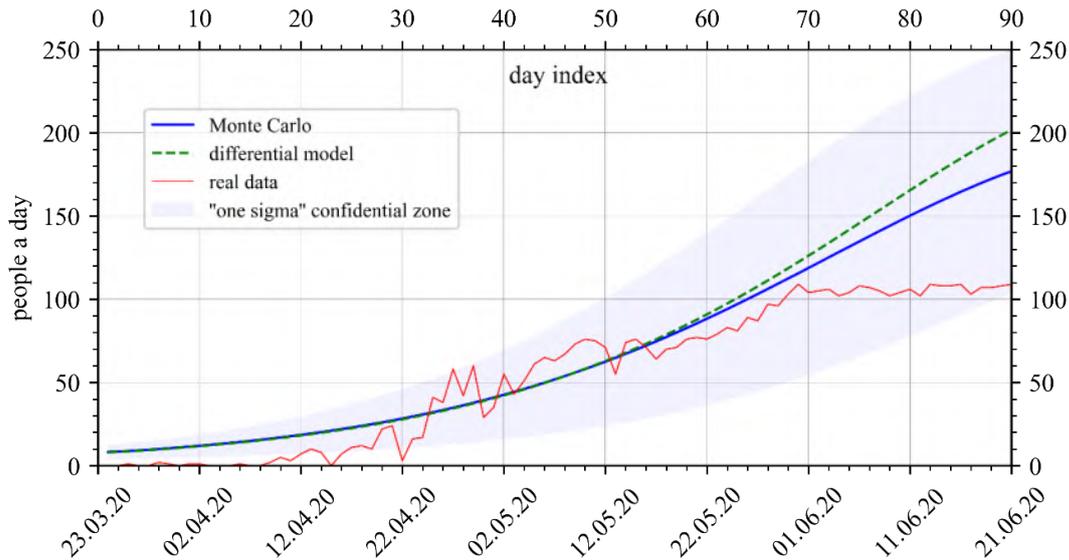


Рис. 1 – Число выявленных больных за сутки

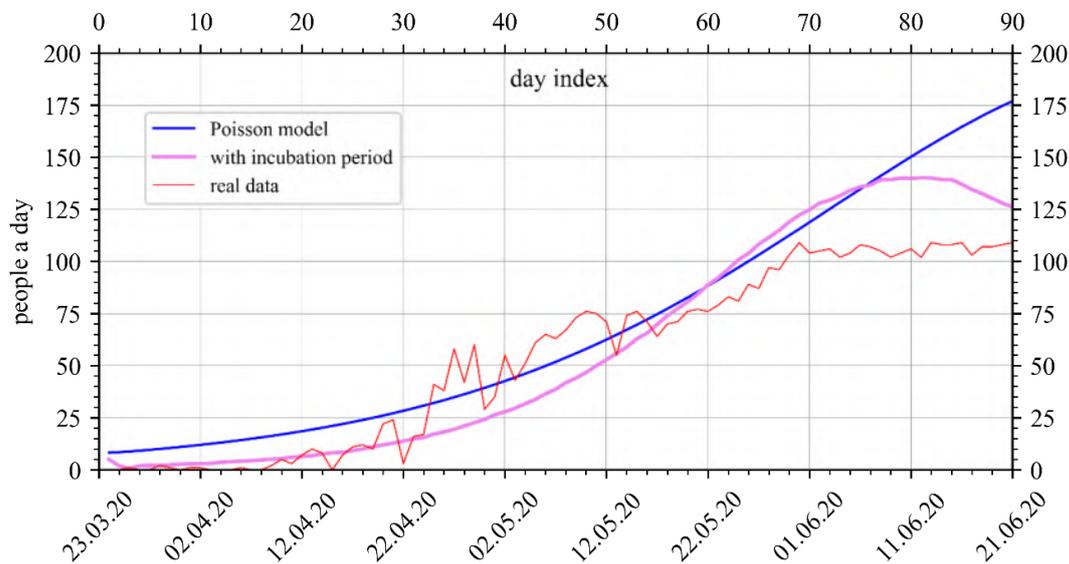


Рис. 2 – Число выявленных больных за сутки (модель с инкубационным периодом)

Была определена возможность использования поправки к дифференциальному SEIRD-решению для уточнения параметров модели на основе линейризации МК-среднего с использованием производных по влиятельным параметрам из дифференциальной SEIRD модели, а также метода наименьших квадратов для решения соответствующей переопределенной системы линейных уравнений при заданных ограничениях.

2. Проведен сравнительный анализ различных вариантов проекционных алгоритмов метода Монте-Карло для оценки потока частиц через слой вещества с рассеянием типа Хенри –Гринштейна. Исследована возможность минимизации среднего квадрата погрешности оценок $\delta(m)$ путем уравнивания слагаемого, описывающего средний квадрат стохастической части погрешности $\delta_1(m)$ и детерминированного слагаемого $\delta_2(m)$. Показано, что эта возможность и соотношения $m_{opt} \approx \sqrt{N}$, $\delta(m_{opt}) \approx 1/\sqrt{N}$ обеспечиваются равенствами

$$\delta_1(m) = C_1 m, \quad \delta_2(m) = C_2 / m, \quad m_{opt} = \sqrt{C_2 / C_1}. \quad (*)$$

Рассматривалась последовательность полиномов, ортонормированных с весом $p(x)$, $\{\Psi_i(x)\}: \int_x \Psi_i(x) \Psi_j(x) p(x) dx = \delta_{ij}$. Известные статистические проекционные оценки представля-

вимы в виде $\tilde{\varphi}(x) = p^\alpha(x) \sum_{i=1}^m \tilde{a}_i \Psi_i(x)$, $0 \leq \alpha \leq 1$, где $\tilde{a}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p^{1-\alpha}(\xi_k) \Psi_i(\xi_k)$, причем

$E\tilde{\varphi}(x) = p^\alpha(x) \sum_{i=1}^m a_i \Psi_i(x)$. Здесь ξ – случайная величина, которая в случае оценки плотности φ

моделируется согласно φ . Если же φ – искомое решение интегрального уравнения 2-го рода, то ξ – траектория моделируемой цепи Маркова "столкновений", а $\{a_i(\xi)\}$ – "оценки по столкнове-

ниям" специального вида; N – объем выборки. Заметим, что детерминированный вариант разложения по полиномам Эрмита со значением $\alpha = 0.5$ был представлен ранее. В качестве тестовой рассматривалась задача об оценке плотности $\varphi(z)$ столкновений частицы в полубесконечном слое

$z \geq 0$ (коэффициент ослабления $\sigma = 1$) рассеивающего (вероятность рассеяния $\frac{\sigma_s}{\sigma} = 0.9$) и погло-

щающего (вероятность поглощения $\frac{\sigma_c}{\sigma} = 0.1$) вещества, индикатриса рассеяния Хеньи – Грин-

стейна со средним косинусом угла рассеяния 0.9 для источника столкновений с плотностью

$f(z_1, z_2, z; \omega) = e^{-z} \delta(z_1) \delta(z_2) \delta(\omega - \omega_0)$, $z > 0$, где $\omega_0 = (0, 0, 1)$ – направление скорости частицы, вызы-

вающей начальное столкновение. Для данной задачи довольно высокую точность имеет трансп-

ортное приближение, которое дает для $\varphi(z)$ следующую асимптотическую оценку $\varphi_{as}(z) \asymp e^{-\lambda z}$,

$\lambda \approx 1/5.4$. Для построения полиномов Лагерра полагалось $p(z) = \varphi_{as}(z)$; они использованы в ука-

занных выше оценках. Было реализовано статистическое моделирование с целью оценки коэф-

фициентов a_i , $i = 1, \dots, 200$ для вариантов с $\alpha = 0, \frac{1}{2}, 1$, т. е. для проекционных представлений вида

$$(1) : \sum_{i=0}^M a_i \Psi_i(x); \quad (2) : p^{\frac{1}{2}}(x) \sum_{i=0}^M a_i \Psi_i(x); \quad (3) : p(x) \sum_{i=0}^M a_i \Psi_i(x)$$

Анализ результатов показал, что соотношение $\delta_2(m) \approx C_2/m$ в данном случае выполняется. Было реализовано 30 независимых оценок по $N = 10^6$ траекториям. На их основе путем уравни-

вания $\delta_1(m)$ и $\delta_2(m)$ были получены приближенные значения m_{opt} и $\delta(m_{opt})$. В табл. 2 эти резуль-

таты обозначены *eq*.

Таблица 2 – Результаты расчетов для тестовой задачи

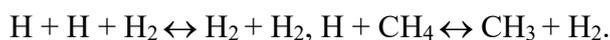
Тип оценки		$\alpha = 0$		$\alpha = 0.5$		$\alpha = 1$	
		m_{opt}	$\delta(m_{opt})$	m_{opt}	$\delta(m_{opt})$	m_{opt}	$\delta(m_{opt})$
eq	average	46	$1.6 \cdot 10^{-5}$	35	$3.2 \cdot 10^{-5}$	16	$2.9 \cdot 10^{-4}$
	min	19	$1.2 \cdot 10^{-5}$	13	$2.4 \cdot 10^{-5}$	7	$1.9 \cdot 10^{-4}$
	max	114	$2.3 \cdot 10^{-5}$	67	$4 \cdot 10^{-5}$	32	$5.9 \cdot 10^{-4}$
ЛЗ	average	45	$1.8 \cdot 10^{-5}$	36	$3 \cdot 10^{-5}$	17	$2.7 \cdot 10^{-4}$
	min	22	$8.5 \cdot 10^{-6}$	19	$1.6 \cdot 10^{-5}$	11	$1.7 \cdot 10^{-4}$
	max	72	$2.9 \cdot 10^{-5}$	59	$5 \cdot 10^{-5}$	21	$5.7 \cdot 10^{-4}$

Были также получены оценки m_{opt} и $\delta(m_{opt})$ по формулам (*) с помощью осреднения коэффициентов: C_1 в интервале $0 \leq m \leq 20$, C_2 в интервале $10 \leq m \leq 20$ для $\alpha = 1$ и C_1 в интервале $0 \leq m \leq 40$, C_2 в интервале $20 \leq m \leq 40$ для $\alpha = 0, 1/2$. В табл. 2 эти значения обозначены ЛЗ.

3. Метод прямого статистического моделирования (ПСМ) широко используется для решения задач различной степени разреженности от свободномолекулярного режима до сплошного. Он заключается в моделировании движения отдельных частиц и их столкновений, поэтому в его алгоритме естественным образом используется возможность учета химических реакций и различных моделей взаимодействия с поверхностями. К недостаткам метода следует отнести значительную трудоемкость, особенно для корректного моделирования потоков газа с малой примесью.

В последние годы развивается метод синтеза алмазных структур из газовой фазы, основанный на термической активации газов-предшественников (обычно смеси водорода с метаном) при контакте с протяженными активирующими поверхностями при течении через цилиндрический канал. Отличительной особенностью такого подхода является использование гетерогенных процессов диссоциации при многократном столкновении молекул с горячей поверхностью канала. При численном исследовании особенностей газоструйного осаждения алмазных структур важно иметь информацию о малых примесях углеродсодержащих газов, возникающих в результате газофазного разложения метана. Поэтому для анализа разложения метана вследствие газофазных реакций в силу геометрии рассматриваемой задачи естественным выглядит использование одномерного подхода, включающего расчет течения без газофазных реакций методом ПСМ и расчет изменения состава смеси вследствие газофазных реакций на основе решения уравнений равновесной химической кинетики.

Основная цель проведенной работы – анализ возможности использования одномерного подхода для приближенного расчета изменения состава газа при течении через цилиндрический канал. Для решения поставленной задачи разработан алгоритм метода ПСМ, позволяющий моделировать газофазное и гетерогенное разложение метана и водорода. В газовой фазе моделировались следующие реакции:



Для его верификации выполнено моделирование изменения состава смеси в равновесном по температуре резервуаре и сравнение с данными, полученными в результате расчетов изменения состава смеси при фиксированной температуре в рамках равновесной химической кинетики.

Определяющими параметрами задачи (течения смеси газов через канал) являются число Кнудсена $K_n = \lambda/D$ (λ – длина свободного пробега в невозмущенном течении водорода, D – диаметр канала), отношение длины канала к его диаметру L/D , коэффициенты аккомодации α , определяющие взаимодействие частиц с поверхностью, и коэффициенты диссоциации и рекомбинации α_d и α_r . Проведено сравнение изменения состава смеси, полученное методом ПСМ с газофазными реакциями, с изменением состава смеси, рассчитанным с использованием одномерного подхода в широком диапазоне степени разреженности, длины канала и состава исходной смеси.

Проведенный численный анализ показал, что в рассматриваемых условиях диссоциация и рекомбинация водорода вследствие газофазных реакций вносят незначительный вклад в формирование течения. Так как доля метана в составе моделируемой смеси мала, то ее вклад в формирование течения также достаточно ограничен. Следует отметить существенное влияние

коэффициентов аккомодации на формирующееся в канале течение, в частности на степень различия скоростей и температур различных компонент смеси. Важным фактором также являются граничные условия на входе в канал и на подложке. Все это оказывает влияние на состав моделируемой смеси. Однако цилиндрическая геометрия в целом в рассматриваемых условиях формирует достаточно равномерное распределение по радиальным ячейкам, что позволяет использовать одномерный подход. Проведенные исследования показывают, что при использовании одномерного подхода увеличение длины канала позволяет получать более точный состав смеси. Кроме того, уменьшение степени разреженности приводит к меньшей погрешности. Проведенное численное исследование показало возможность корректного использования одномерного подхода для приближенного вычисления изменения состава вследствие газофазных реакций при течении через цилиндрический канал.

4. Выполнено численное исследование двух статистических оценок, разработанных нами в 2016–2020 гг. для изучения характеристик функции, пропорциональной некоторой плотности вероятностного распределения. Одна из оценок – проекционная рандомизированная оценка – основана на разложении исследуемой функции по ортонормированному полиномиальному базису. Для одномерной задачи оценки временной асимптотики интенсивности излучения в полупространстве были исследованы базисы, построенные на основе полиномов Лагерра, а также на основе полиномов, полученных с помощью экспоненциальной замены из полиномов Лежандра. Численные исследования показали, что базис по экспоненциальным полиномам Лежандра обеспечивает более быструю сходимость, чем базис по полиномам Лагерра. Для случая двумерной функции можно также построить комбинированную ядерно-проекционную оценку. Для оценки такого типа ранее были получены интервалы оптимальных параметров в рамках некоторых предположений относительно скорости сходимости используемого проекционного разложения для одной из переменных. Проведено численное сравнение двух описанных выше двумерных оценок в задаче исследования угловых характеристик интенсивности излучения в слое заданной оптической толщины. Показано, что построенная проекционно-ядерная оценка является эффективной для решения подобного типа задач при правильном подборе оптимальных параметров оценки.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Medvedev, I. N., Mikhailov, G. A. New correlative randomized algorithms for statistical modeling of radiation transfer in stochastic medium // RJNAMM. 2021. V. 34. No 1. P. 43–55. DOI: <https://doi.org/10.1515/rnam-2021-0018>.

2. Михайлов, Г. А., Медведев И. Н. Новый корреляционно рандомизированный алгоритм оценки влияния стохастичности среды на перенос частиц // ДАН. Математика, информатика, процессы управления. 2021. Т. 498. № 1. С. 55–58. DOI <https://doi.org/10.1134/S1064562421030133>.

3. Lotova, G. Z., Mikhailov, G. A. Numerical-statistical and analytical study of asymptotics for the average multiplication particle flow in a random medium // Comput. Math. and Math. Phys. 2021. V. 61. P. 1330–1338. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965542521060075>.

4. Lotova, G. Z., Lukinov, V. L., Marchenko, M. A., Mikhailov, G. A., Smirnov, D. D. Numerical-statistical study of the prognostic efficiency of the SEIR model // RJNAMM. 2021. V. 36. No 6. P. 337–345. DOI: <https://doi.org/10.1515/rnam-2021-0027>.

5. Plotnikov, M. Yu., Shkarupa, E. V. DSMC simulation of two-step dissociation-recombination of hydrogen on tantalum surface // *Comput. and Fluids*. 2021. V. 214. 104778. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2020.104778>.

6. Plotnikov, M. Yu., Shkarupa, E. V. Two approaches to calculating composition of rarefied gas mixture exposed chemical reactions at flow through cylindrical channel // *Comput. and Fluids*. 2021. V. 214. 104775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2020.104775>.

7. Plotnikov, M. Y., Shkarupa, E. V. Application of the heat balance for estimating the hydrogen dissociation rate constant on the tantalum surface // *Thermophys. Aeromech.* 2021. V. 28. P. 555–562. DOI 10.1134/S0869864321040090.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Medvedev, I. N. On the efficiency of an exponential transformation method for solving stochastic problems of gamma-ray transport theory // *Num. Analyses Appl.* 2021. V. 14. P. 372–378. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995423921040066>.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Burmistrov, A. V., Korotchenko M. A. Double randomization method for estimating the moments of solution to the coagulation equation // *Marchuk Scientific Readings-2021: Abst. of the Intern. conf. Oct. 4–8, 2021*. P. 68–69. DOI: 10.24412/cl-35065-2021-1-00-72.

2. Tracheva, N. V., Ukhinov, S. A. Numerical study of randomized projective estimator and combined kernel-projective statistical estimator // *Marchuk Scientific Readings-2021: Abst. of the Intern. conf. Oct. 4–8, 2021*. P. 79. DOI: 10.24412/cl-35065-2021-1-00-94.

3. Korda, A. S., Mikhailov, G. A., Rogasinsky, S. V. Comparative analysis of various projective algorithms of the Monte Carlo method in problems of the theory of particle transfer // *Marchuk Scientific Readings-2021: Abst. of the Intern. conf. Oct. 4–8, 2021*. P. 73. DOI: 10.24412/cl-35065-2021-1-00-81.

4. Lotova, G. Z., Lukinov, V. L., Marchenko, M. A., Mikhailov, G. A., Smirnov, D. D. Numerically statistical investigation of efficacy of SEIR model // *Marchuk Scientific Readings-2021: Abst. of the Intern. conf. Oct. 4–8, 2021*. P. 19. DOI: 10.24412/cl-35065-2021-1-00-82.

5. Shkarupa, E. V., Plotnikov, M. Yu. Using DSMC calculations to estimate heterogeneous reaction constants based on experimental data // *Marchuk Scientific Readings-2021: Abst. of the Intern. conf. Oct. 4–8, 2021*. P. 77–78. DOI: 10.24412/CL-35064-2021-091.

Участие в конференциях и совещаниях

1. "Марчуковские научные чтения" Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 7 докладов (2 пленарных) (Корда А. С., Коротченко М. А., Лотова Г. З., Медведев И. Н., Михайлов Г. А., Роженко С. А., Трачева Н. В., Шкарупа Е. В., Ухинов С. А.).

2. 13th International Conference on Monte Carlo Methods and Applications, MCM 2021, Мангейм, Германия, 16 – 20 августа 2021 г – 1 доклад (Трачева Н. В.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Медведев И. Н. – член оргкомитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

2. Лотова Г. З. – секретарь программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

3. Михайлов Г. А. – председатель программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 7

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 8

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 13

Докладов на конференциях – 8, в том числе 2 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 3

Кадровый состав

- | | | |
|----------------------|------------------------------|-----------|
| 1. Рогазинский С. В. | зав. лабораторией | 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. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 7. Михайлов Г. А. | советник РАН, чл.-корр. РАН, | д.ф.-м.н. |
| 8. Роженко С. А. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 9. Трачева Н. В. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 10. Ухинов С. А. | в.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 11. Усов А. Г. | ведущ. программист | |
| 12. Шкарупа Е. В. | с.н.с. | к.ф.-м.н. |
- Роженко С. А. – молодой научный сотрудник (до 35 лет).

Педагогическая деятельность

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

Руководство студентами

Семущина А. И. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Лотова Г. З.

ЛАБОРАТОРИЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА СТОХАСТИЧЕСКИХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

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

Важнейшие достижения

Применение метода максимального сечения в задаче фильтрации для непрерывных систем с марковскими переключениями

К.ф.-м.н. Аверина Т. А.

Предложены новые алгоритмы решения задачи оптимальной фильтрации для систем со случайной структурой с непрерывным временем, использующие метод максимального сечения и экономичный способ моделирования случайных величин.

Рассматриваемая задача оптимальной фильтрации состоит в оценивании текущего состояния $(X(t), L(t))$ системы по результатам измерений $Y(t)$. Математическая модель системы включает нелинейные стохастические дифференциальные уравнения (СДУ), правая часть которых определяет структуру динамической системы, или режим функционирования. Правая часть может изменяться в случайные моменты времени. Число структур системы предполагается конечным, а процесс смены структуры – марковским или условно марковским. Вектор состояния такой системы состоит из двух компонент: вектора с вещественными координатами $X(t)$ и целочисленного номера структуры $L(t)$. Закон изменения номера структуры определяется распределением случайного промежутка времени между переключениями с заданной интенсивностью, зависящей от состояния системы.

Вклад ИВМиМГ СО РАН – алгоритмы типа фильтров частиц для оценивания текущего состояния систем со случайной структурой, построенные на основе метода статистического моделирования с использованием разработанных в ИВМиМГ численных методов решения СДУ и экономичной модификации метода максимального сечения.

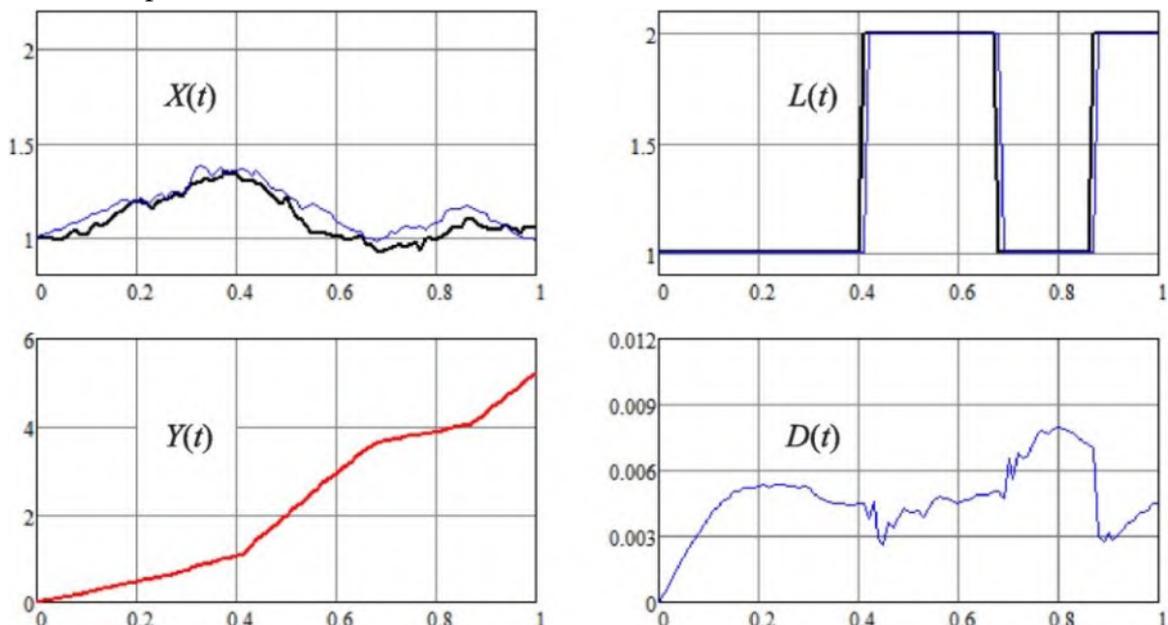


Рис. 1 – Выборочные траектории случайных процессов $X(t)$; $L(t)$ и их оценки;
 $D(t)$ – дисперсия оценки $X(t)$; $Y(t)$ – измерения

Результаты исследований опубликованы в работе

Averina, T. A., Rybakov, K. A. Maximum cross section method in the filtering problem for continuous systems with Markovian switching // RJNAMM. 2021. Vol. 36, No 3. P. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.1515/rnam-2021-0011>.

Результаты исследований представлены на конференции:

"Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2021 г. в соответствии с планом НИР института

Проект НИР "Численное статистическое моделирование и методы Монте-Карло: теория и алгоритмы для решения задач естествознания на основе стохастических моделей".

Номер государственной регистрации 0315-2019-0002.

Руководители: д.ф.-м.н. Рогазинский С. В., д.ф.-м.н. Каргин Б. А., к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.

Раздел 1.1.2 "Методы статистического моделирования и анализа данных".

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

Этап 2021 г.

Предложены новые алгоритмы решения задачи оптимальной фильтрации для систем со случайной структурой с непрерывным временем, использующие экономичный способ моделирования случайных величин. Предложенные алгоритмы оценивания текущего состояния систем со случайной структурой относятся к типу фильтров частиц и построены на основе метода статистического моделирования с использованием разработанных численных методов решения СДУ и экономичной модификации метода максимального сечения.

Разработана математическая модель каталитического риформинга бензина в виде задачи Коши для системы ОДУ. Решалась задача определения неизвестных кинетических параметров

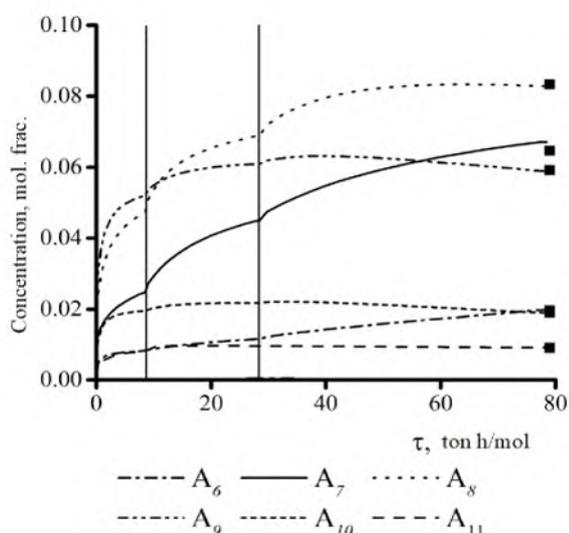


Рис. 2 – Профиль концентрации ароматических углеводородов в процессе каталитического риформинга бензина

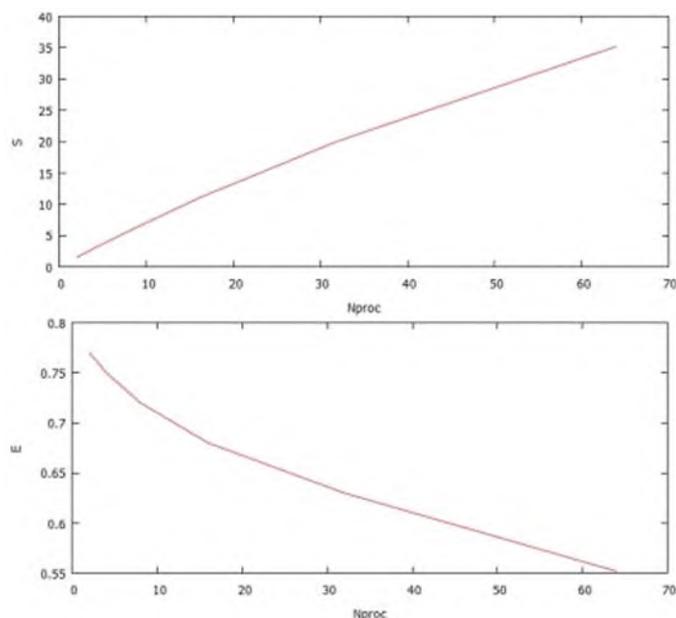


Рис. 3 – Зависимость относительной скорости (S) и эффективности (E) параллельного стохастического генетического алгоритма от числа процессов (N_{proc})

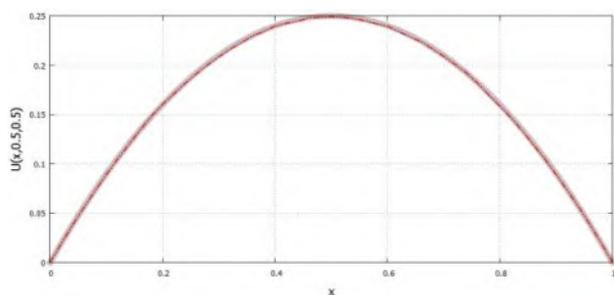


Рис. 4 – Сравнение решения *GRWG* алгоритмом с аналитическим решением уравнения Пуассона

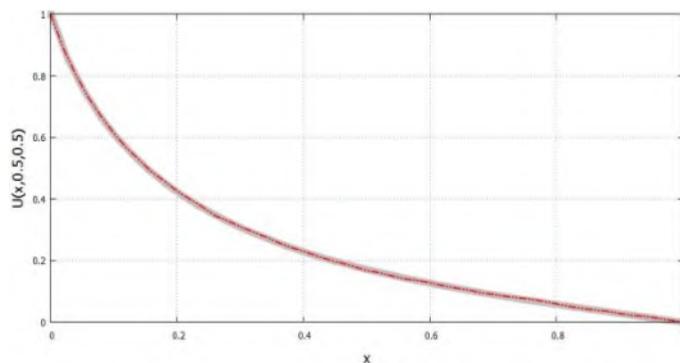


Рис. 5 – Сравнение решения *GRWG* алгоритмом с методом "блуждания по эллипсоидам"

ступеней путем решения обратной кинетической задачи по известным промышленным данным. В работе с помощью генетического алгоритма решена обратная задача химической кинетики, определены оптимальные значения кинетических параметров реакции. Использовались известная последовательная версия генетического алгоритма и разработанная параллельная стохастическая версия поиска минимума функционала невязки решения. Параллельная версия генетического алгоритма реализована в виде программы с использованием технологий глобального распараллеливания master-slave и динамической балансировки вычислительной нагрузки, проведены расчеты на суперкомпьютере. Показано, что модель корректно описывает имеющиеся производственные данные. В ходе работы над проектом найдено 346 оптимальных значений кинетических параметров реакции (38 веществ, 173 стадии).

Предложен метод глобального случайного блуждания по сетке (*GRWG*) для решения эллиптических уравнений второго порядка. Уравнение может иметь постоянные или переменные коэффициенты. Метод *GRWS* позволяет вычислять решение в любом желаемом семействе из m заданных точек решетки, в отличие от классического стохастического дифференциального уравнения, основанного на формуле Фейнмана – Каца, а также обычного алгоритма случайных блужданий по сферам (*RWS*). Метод использует только N траекторий вместо mN траекторий в алгоритме *RWS* и формуле Фейнмана – Каца. Идея основана на свойстве симметрии функции Грина и методе двойной рандомизации. Корректность вычислений алгоритма проверена на решении уравнения Пуассона в сравнении с известным аналитическим решением, на решении эллиптического

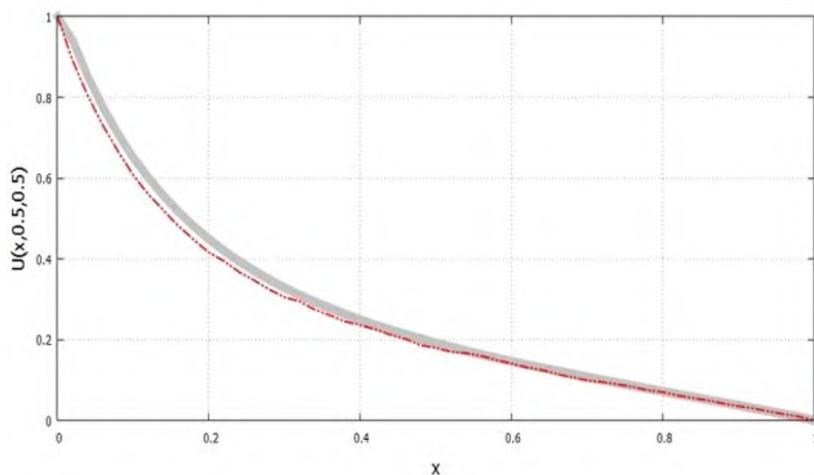


Рис. 6 – Сравнение решения *GRWG* алгоритмом с методом по формуле Фейнмана – Каца

уравнения с переменными коэффициентами в сравнении с методом "блуждания по эллипсоидам", на решении эллиптического уравнения с переменными коэффициентами в сравнении с решением по формуле Фейнмана – Каца.

Рассмотрено нелинейное кинетическое уравнение Смолуховского со случайными линейными коэффициентами коагуляции, зависящими от размеров взаимо-

действующих частиц. Построены новые алгоритмы метода Монте-Карло для численной оценки вероятностных моментов линейных функционалов от решения исходного уравнения. Алгоритмы разработаны с использованием метода двойной рандомизации в рамках подхода, основанного на переходе от исходного уравнения к интегральному уравнению второго рода и моделированию динамики многочастичной системы согласно соответствующей марковской цепи.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Lotova, G. Z., Lukinov, V. L., Marchenko, M. A., Mikhailov, G. A., Smirnov, D. D. Numerical-statistical study of the prognostic efficiency of the SEIR model (2021) // RJNAMM. 2021. Vol. 36, No. 6. P. 337–345. DOI: 10.1515/rnam-2021-0027.

2. Averina, T. A., Rybakov, K. A. Maximum cross section method in the filtering problem for continuous systems with Markovian switching // RJNAMM. 2021. Vol. 36, No. 3. P. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.1515/rnam-2021-0011>.

3. Gusev, S. A., Nikolaev, V. N. Numerical and statistical simulation technique for the aircraft wing thermal state in icing conditions // AIP Conf. Proc. 2021. Vol. 2351 : Intern. conf. on the methods of aerophysical research (ICMAR 2020), Novosibirsk, Nov. 1–7. 2020. Art. num. 030049. DOI: 10.1063/5.0052867.

4. Gusev, S. A., Nikolaev, V. N. Theoretical studies of the cockpit systems thermophysical parameters using stochastic differential equations // AIP Conf. Proc. 2021. Vol. 2351 : Intern. conf. on the methods of aerophysical research (ICMAR 2020), Novosibirsk, Nov. 1–7. 2020. Art. num. 0052868. DOI: 10.1063/5.0052868.

5. Kalybekova, A. T., Rakhmonov, S. S., Lukinov, V. L., Chernyavsky, A. M. Comparative characteristics of a pacemaker implantation after biatrial or left atrial ablation of atrial fibrillation in combination with coronary artery bypass grafting in patients with ischemic heart disease and long-standing persistent atrial fibrillation // Kardiologiya. 2021; Vol. 61, No. 10. P. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.18087/cardio.2021.10.n1513>.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Sabelfeld, K. K., Smirnov, D. A global random walk on grid algorithm for second order elliptic equations // Monte Carlo Meth. and Appl. 2021. Vol. 27, iss. 3. P. 211–225. DOI: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/mcma-2021-2092/html>.

2. Vitkovskaya, I. V., Lebedeva, M. N., Rerikh, V. V., Lukinov, V. L. Venous thromboembolic complications in spinal cord injury at the cervical level // Tromboz, Gemostaz i Reologiya. 2021. Vol. 84. P. 47–55. DOI: 10.25555/THR.2021.1.0961.

3. Mikhaylovskiy, M. V., Lukinov, V. L. Scheuermann's disease surgery. Major problems: non-systematic literature review. Part I // Hirurgiâ pozvonočnika (Spine Surgery). 2021. Vol. 18, No. 3. P. 6–18. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14531/ss2021.3.6-18>.

4. Kalybekova, A. T., Rakhmonov, S. S., Lukinov, V. L., Chernyavskiy, A. M. Comparative efficacy and safety of biatrial versus left atrial ablation in the surgical treatment of long-standing persistent atrial fibrillation with concomitant coronary artery bypass grafting in patients with ischemic heart disease // Sibirskij Zurnal Kliniceskoj i Eksperimental'noj Mediciny, 2021. Vol. 36, No. 2. P. 107–114. DOI: 10.29001/2073-8552-2021-36-2-107-114.

5. Kozlov, B. N., Panfilov, D. S., Lukinov, V. L. Predictors of early adverse events after the frozen elephant trunk procedure // *Angiologiya i sosudistaya khirurgiya* [Angiology and vascular surgery]. 2021. Vol. 27, No. 4. P. 94–102. DOI: 10.33529/ANGIO2021413.

6. Eliseenko, I. A., Struts, S. G., Lukinov, V. L., Stupak, V. V. Factors influencing the development of recurrence and continued growth of primary extramedullary tumors removed using Nd:YAG laser // *Hirurgia Pozvonochnika*. 2021. Vol. 18, No. 4. P. 91–100. DOI: 10.14531/SS2021.4.91-100.

7. Kalybekova, A. T., Rakhmonov, S. S., Lukinov, V. L., Chernyavsky, A. M. Quality of life in patients with long-standing persistent atrial fibrillation after surgical ablation and simultaneous coronary artery bypass grafting // *Cardiovascular Therapy and Prevention (Russian Federation)*. 2021. Vol. 20, No. 6. P. 42–51. DOI: 10.15829/1728-8800-2021-2848.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Smirnov, D., Koledina, K., Gubaydullin, I. Parallel genetic algorithm for solving the inverse problem of catalytic reforming of gasoline // *Параллельные вычислительные технологии : тез. 15-й Международ. конф. "ПаВТ'2021"*, Волгоград, 30 марта – 1 апреля 2021 г. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2021. С. 291. DOI: <https://doi.org/10.14529/pct2021>.

2. Хидирова, Л. Д., Яхонтов, Д. А., Лукинов, В. Л. Прогрессирование фибрилляции предсердий у коморбидных больных среднего возраста // *Международный журнал сердца и сосудистых заболеваний*. 2021. Т. 9, № 30. С. 43–52. DOI: 10.15829/2311-1623-9-30.

3. Ищенко, И. О., Рылова, П. М., Лукинов, В. Л. Методы создания сайта // *Инновации и научно-техническое творчество молодежи : матер. рос. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2021*. С. 378–381.

4. Наискулов, Д. А., Лукинов, В. Л. Веб-сервис для создания калькуляторов риска // *Инновации и научно-техническое творчество молодежи : матер. рос. науч.-техн. конф. Новосибирск, 2021*. С. 395–398.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 окт. 2021 г. – 5 докладов, из них 1 пленарный (Аверина Т. А., Бурмистров А. В., Гусев С. А., Лукинов В. Л., Смирнов Д. Д.).

2. 15-я Международная конференция "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ'2021), Волгоград, 30 марта – 1 апреля 2021 г – 1 доклад (Смирнов Д. Д.).

3. Российская научно-техническая конференция "Инновации и научно-техническое творчество молодежи", Новосибирск, 22–23 апреля 2021 г. – 4 доклада (Лукинов В. Л.).

4. Евразийская конференция по прикладной математике, Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г – 1 доклад (Аверина Т. А.)

Участие в оргкомитетах конференций

1. Лукинов В. Л. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;

2. Смирнов Д. Д. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 5
Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 12
Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 18
Докладов на конференциях – 11, в том числе 1 пленарный
Участников оргкомитетов конференций – 2

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. Смирнов Д. Д.	м.н.с.	
7. Якунин М. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
8. Юзов Д.А.	инженер	

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

Педагогическая деятельность

Аверина Т. А. – доцент НГУ
Бурмистров А. В. – старший преподаватель НГУ
Гусев С. А. – профессор НГТУ
Лукинов В. Л. – доцент СибГУТИ, ассистент НГУ

Руководство студентами

1. Юзов Д. А.	– 6-й курс СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
2. Угольникова Е. А.	– 4-й курс СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
3. Дорошук Н. А.	– 4-й курс СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
4. Соснин Д. Н.	– 4-й курс СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
5. Конради Д. В.	– 4-й курс СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
6. Сальников В. М.	– 4-й курс СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
7. Грузинов И. С.	– 4-й курс СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
8. Ворошин И. В.	– 4-й курс СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
9. Самила К. В.	– 4-й курс СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.

Защита дипломов

1. Наискулов Д. А.	– магистрант СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
2. Рылова П. М.	– магистрант СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
3. Ищенко И. О.	– магистрант СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
4. Филатов А. В.	– магистрант СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
5. Щербакова Ю. С.	– магистрант СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
6. Лоскутов С. Д.	– магистрант СибГУТИ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
7. Береснев А. В.	– магистрант ВКИ НГУ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.

8. Востриков И. А. – магистрант ВКИ НГУ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
9. Ерешков Д. М. – магистрант ВКИ НГУ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
10. Мельников А. В. – магистрант ВКИ НГУ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.
11. Богданов К. А. – магистрант ВКИ НГУ, руководитель к.ф.-м.н. Лукинов В. Л.

ЛАБОРАТОРИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

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

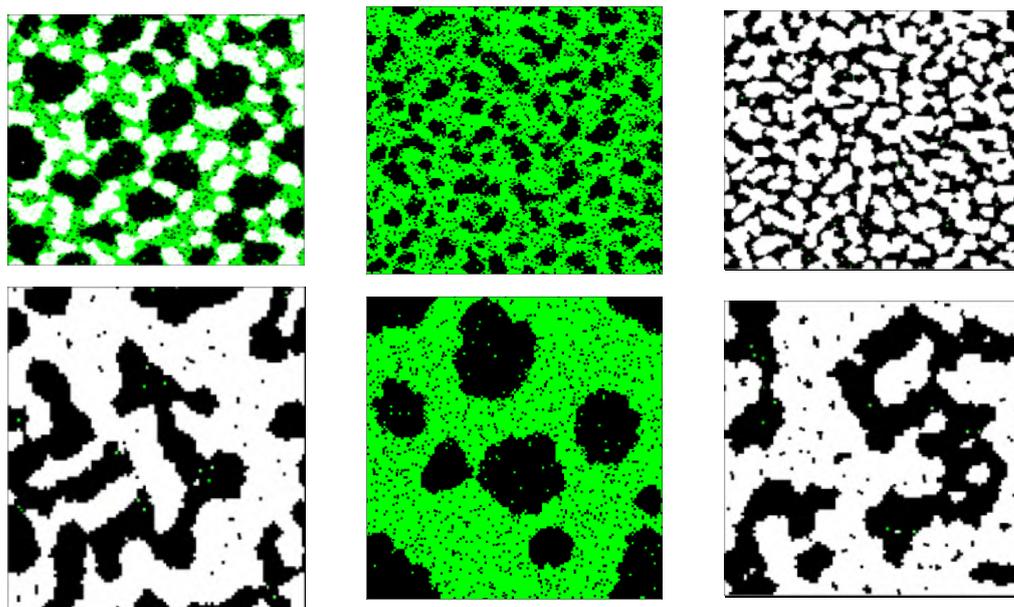
Важнейшие достижения

Стохастическая модель и компьютерное моделирование агрегации нанокристаллов сульфида кадмия при испарении матрицы Ленгмюра – Блоджетт

Д.ф.-м.н. Сабельфельд К., Киреев С., Свит К.

Разработана стохастическая модель формирования и роста нанокристаллов, которая реализована для моделирования агрегации нанокристаллов сульфида кадмия при испарении матрицы Ленгмюра – Блоджетт. Результаты моделирования поддержаны экспериментальными исследованиями группы физиков из ИФП им. Ржанова. Построенная модель учитывает мобильность как индивидуальных нанокристаллов, так и кластеров. Проанализированы большие серии всевозможных паттернов, которые моделируются данным алгоритмом, и влияние растворителя на эти распределения. В модели введены вероятности отрыва нанокристалла от кластера, зависящие от температуры и связывающей энергии между нанокристаллами. Метод моделирования основан на минимизации энергии системы, для которой выписан гамильтониан, алгоритм минимизации построен в виде модификации метода Метрополиса.

Рис. 1 – Результаты моделирования (паттерны для различных условий):
 черный цвет – кристаллы CdS, зеленый – растворитель, белый – свободная поверхность



Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-11-00019.

Результаты исследований опубликованы в работе

Svit, K., Kireev, S., Sabelfeld, K. A stochastic model, simulation, and application to aggregation of cadmium sulfide nanocrystals upon evaporation of the Langmuir – Blodgett matrix // Monte Carlo Meth. and Appl. 2021. V. 27, N 4. P. 289–299.

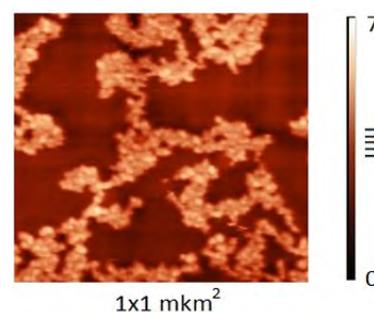


Рис. 2 – Микрофотография эксперимента (ИФП СО РАН)

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2021 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 0315-2016-0002.

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

Этап 2021 г.

Разработаны и численно исследованы алгоритмы моделирования условных негауссовских процессов с условиями двух типов: точечными и интервальными. Построенные алгоритмы основаны на комбинации метода обратных функций распределения, метода исключения и методов моделирования условных гауссовских процессов. Для случая интервальных условий предложен приближенный алгоритм, позволяющий уменьшить трудоемкость моделирования по сравнению с алгоритмом на основе метода исключения.

Исследованы свойства специального класса кусочно-постоянных и кусочно-линейных процессов, конструктивно определенных на основе различных типов точечных потоков. Показано, что рассмотренные процессы являются периодически коррелированными или асимптотически периодически коррелированными.

Продолжены исследования корреляционной функции периодически коррелированного процесса непрерывного аргумента, построенного с помощью приближенной спектральной модели, основанной на разложении Фурье процессов, полученных с помощью кусочно-постоянной и кусочно-линейной интерполяции периодически коррелированных процессов дискретного аргумента.

Разработана и реализована трехмерная клеточно-автоматная (КА) модель транспорта электронов и дырок в полупроводнике. Транспорт зарядов описывается нелинейной системой нестационарных уравнений дрейфа – диффузии – Пуассона, которая включает уравнения изменения концентрации электронов и дырок под воздействием дрейфа и диффузии и уравнение Пуассона для потенциала, градиент которого определяет скорость дрейфа. Рассматривается дивергентная форма уравнений дрейфа – диффузии. Система уравнений дрейфа – диффузии – Пуассона решается с помощью итерационной процедуры, включающей попеременное моделирование процессов дрейфа – диффузии и вычисление градиента решения уравнения Пуассона. В трехмерной области строится равномерная сетка. На каждом шаге итерационной процедуры в каждом узле сетки: 1) с помощью КА модели дрейфа – диффузии вычисляется концентрация электронов и дырок; 2) для полученной концентрации зарядов с помощью КА модели диффузии вычисляется решение уравнения Пуассона; 3) с помощью конечно-разностной аппроксимации производных от решения уравнения Пуассона вычисляется скорость дрейфа. Показана корректность реализованных КА алгоритмов путем сравнения результатов моделирования с точными решениями уравнений дрейфа – диффузии и Пуассона для тестовых задач. Реализована параллельная версия программы для моделирования транспорта зарядов на суперкомпьютере. Вычислено пространственно-временное распределение зарядов и скорости дрейфа для значений модельных параметров, характерных для полупроводниковых материалов GaN. Полученные результаты позволяют утверждать, что при использовании постоянного источника и поглощающих граничных условий система достигает устойчивого состояния, в котором концентрация зарядов и скорость дрейфа не изменяются (рис. 3).

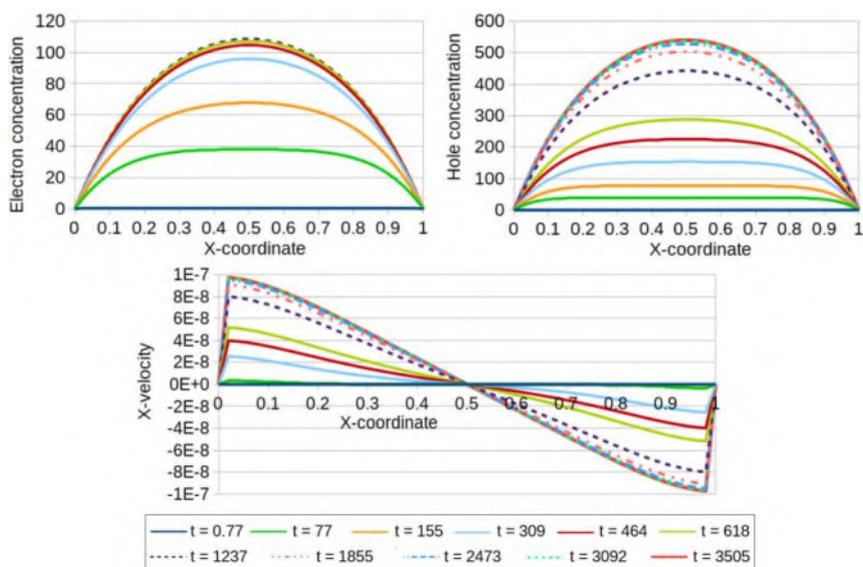


Рис. 3 – Концентрация зарядов и скорость дрейфа вдоль оси X , полученные с помощью КА моделирования для различных моментов времени t , нс

Построены вычислительные модели случайных полей оптической толщины слоистой облачности. Для воспроизведения одномерного распределения и корреляционной структуры случайного поля был использован метод нелинейного преобразования гауссовских функций.

При построении гауссовских полей применялась либо схема авторегрессии первого порядка, либо метод условных математических ожиданий и векторная схема авторегрессии. В первом случае корреляционная функция случайного поля являлась прямым произведением экспоненциальных корреляционных функций в перпендикулярных направлениях и аппроксимировала двумерную корреляционную функцию поля оптической толщины облачности вдоль двух горизонтальных координат. Второй способ моделирования, значительно более трудоемкий, позволил аппроксимировать двумерную корреляционную структуру случайного поля. Вычислительные модели случайных полей были построены с использованием натуральных наблюдений арктической слоистой облачности. Разработанные модели применялись для исследования методом Монте-Карло особенностей переноса солнечного излучения в слоистой облачности с учетом горизонтальной неоднородности.

Выполнены вычисления альбедо и пропускания облачных полей в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн. Предполагалось, что альбедо однократного рассеяния для видимого излучения равно 1. В данном случае замена случайного слоя оптической толщины облака однородным слоем с постоянным коэффициентом ослабления в видимом диапазоне длин волн привела к незначительному увеличению пропускания излучения (в пределах 1 %) по сравнению с детерминированным слоем и уменьшению альбедо не более чем на 2.5 %.

Показано, что пропускание облачного слоя возрастает при увеличении дисперсии одномерного распределения: при увеличении среднеквадратического отклонения одномерного распределения поля оптической толщины в 2.5 раза значение пропускания стохастическим слоем становится на 4.6 % больше по сравнению с пропусканием для детерминированного слоя.

Показано, что для инфракрасного излучения случайность поля оптической толщины слабо влияет на альбедо облачного слоя, но оказывает значительный эффект на пропускание. Тестовые расчеты для ламбертовского источника излучения с длиной волны 10 мкм и альбедо однократного рассеяния 0.688 показали, что для стохастической модели пропускание может увеличиваться более чем в 1.5 раза по сравнению с пропусканием однородным слоем.

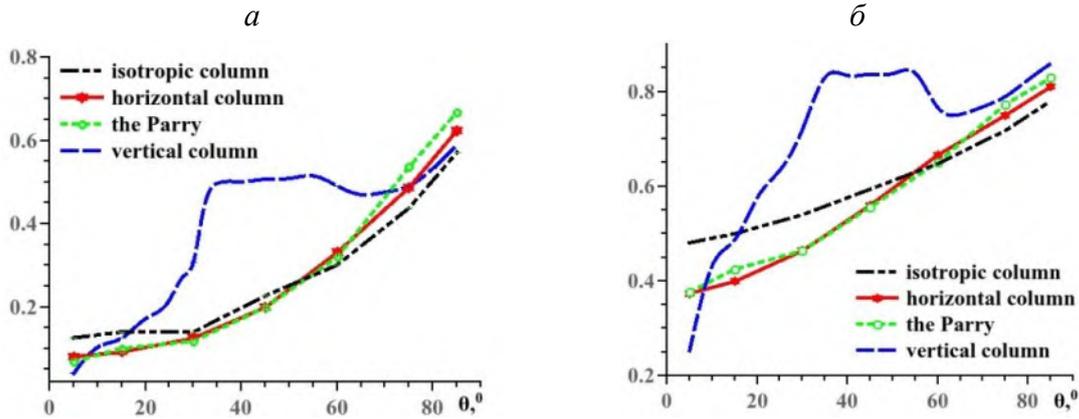


Рис. 4 – Альbedo перистого облака оптической толщины 1 (а) и оптической толщины 5 (б) в зависимости от зенитного угла в случаях, когда облачные частицы являются гексагональными призмами с изотропной, горизонтальной, вертикальной ориентацией и ориентацией Парри (горизонтальная ориентация кристалла, когда одна из боковых граней расположена горизонтально)

Представлены результаты численного статистического моделирования переноса солнечного излучения в кристаллических облаках. Основное внимание исследования направлено на образование таких атмосферных явлений как гало и "антигало" (образование светящихся колец или дуг с повышенной яркостью на небе в направлении, противоположном источнику излучения). Исследуется вид и форма гало в зависимости от микрофизического состава и оптической толщины кристаллических облаков, ориентации кристаллов и высоты солнца над горизонтом. Моделирование переноса излучения в перистых облаках производится методом Монте-Карло для анизотропных рассеивающих сред с учетом многократного рассеяния. При этом матрицы рассеяния излучения для различных начальных углов падения рассчитаны по алгоритму трассировки лучей в приближении геометрической оптики. Визуализация результатов моделирования имитирует проекцию изображения на небесную сферу.

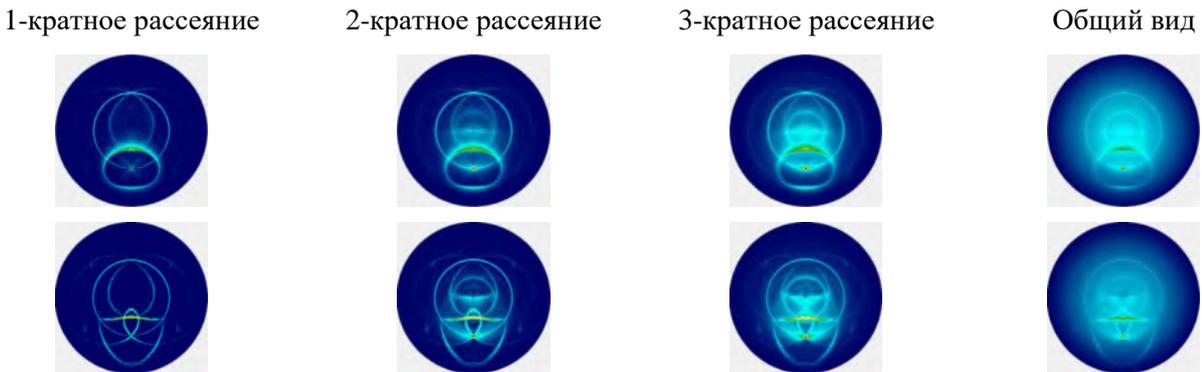


Рис. 5– Вид гало, полученного при одно-, дву-, трехкратном рассеяниях и его общий вид при учете рассеяния всех кратностей для облачного слоя с оптической толщиной 5, состоящего из гексагональных призм (столбиков) с горизонтальной ориентацией (верхняя строка) и ориентацией Парри (нижняя строка)

Методом Монте-Карло проведено численное моделирование рассеяния лазерного импульса в водной среде с учетом отражения на границе раздела вода – воздух и подстилающей поверхности. Результаты статистического моделирования показывают, что при распространении

короткого лазерного импульса в водном слое могут возникать разнообразные кольцевые структуры рассеянного света.

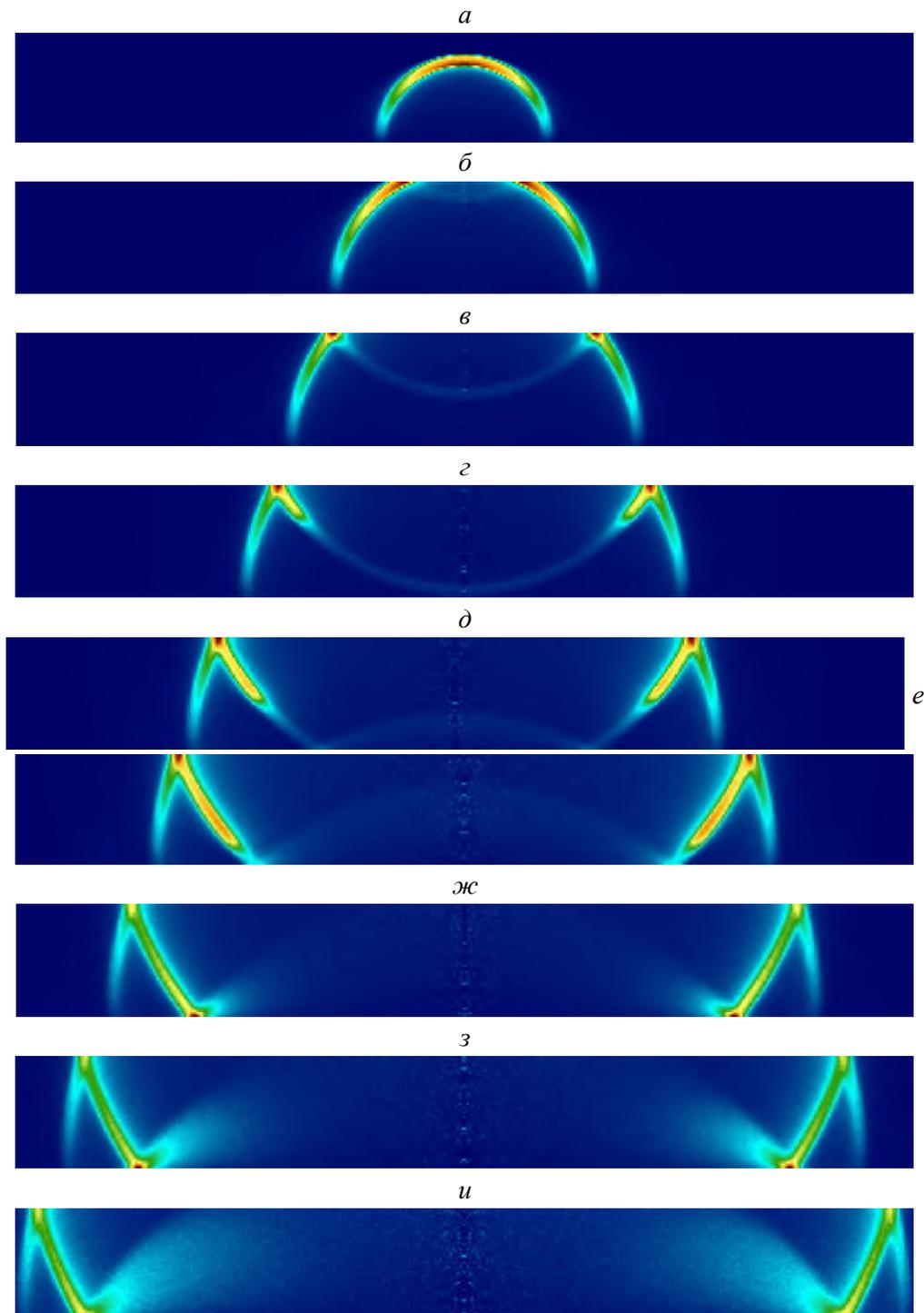


Рис. 6 – Распределения фотонов, испытывающих рассеяние в водном слое глубиной 50 м в моменты времени 388 (а), 477 (б), 565 (в), 654 (г), 743 (д), 831 (е), 920 (ж), 1009 (з), 1097 (и) наносекунд после попадания лазерного импульса на верхнюю границу водного слоя с учетом многократного рассеяния излучения, а также отражения на границах вода – воздух и вода – подстилающая поверхность. Альбедо поверхности на нижней границе водного слоя 0.8. Показаны вертикальные сечения осесимметричных трехмерных распределений для участков слоя протяженностью 400 м по горизонтали

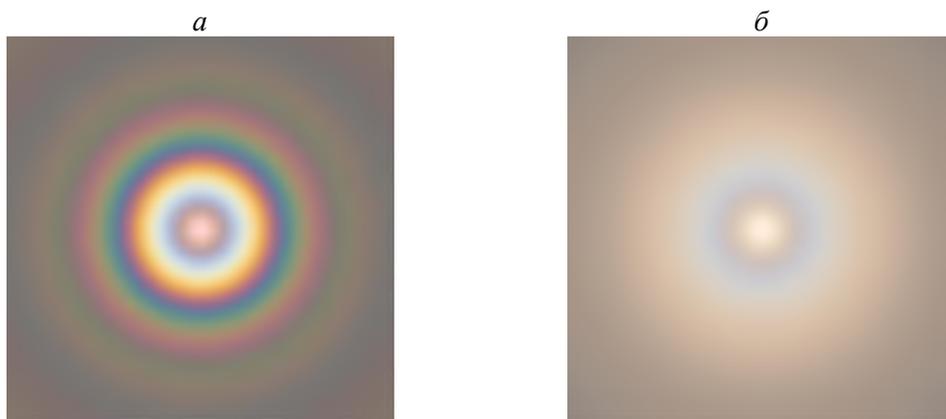


Рис. 7 – Результаты компьютерного моделирования глорий для облачности (модель С4) и радиационного тумана. Угловой радиус изображений 15°

Выполнено численное моделирование и компьютерная визуализация оптических явлений, возникающих в облачной атмосфере. Изучены условия возникновения венцов, глорий и белых радуг для различных типов облачностей и туманов. Разработано программное обеспечение, которое позволяет вычислять индикатрисы рассеяния для произвольных спектров облачных капель на основе теории Ми. Для быстрых вычислений индикатрис рассеяния используются специальные приемы интерполяции и численного интегрирования. Метод Монте-Карло применялся для расчетов с учетом многократного рассеяния излучения.

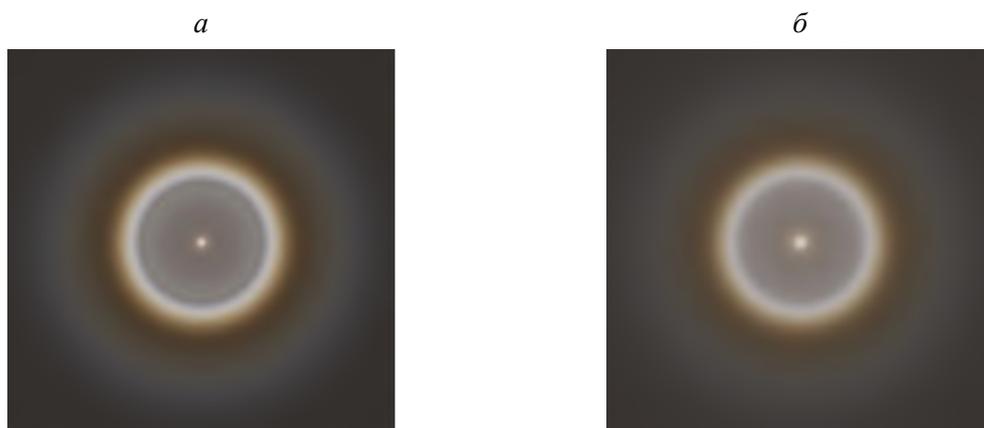


Рис. 8 – Белые радуги для облачных моделей OPAC Cumulus Maritime (а) и MODTRAN Cumulus (б). Угловой радиус изображений 65°

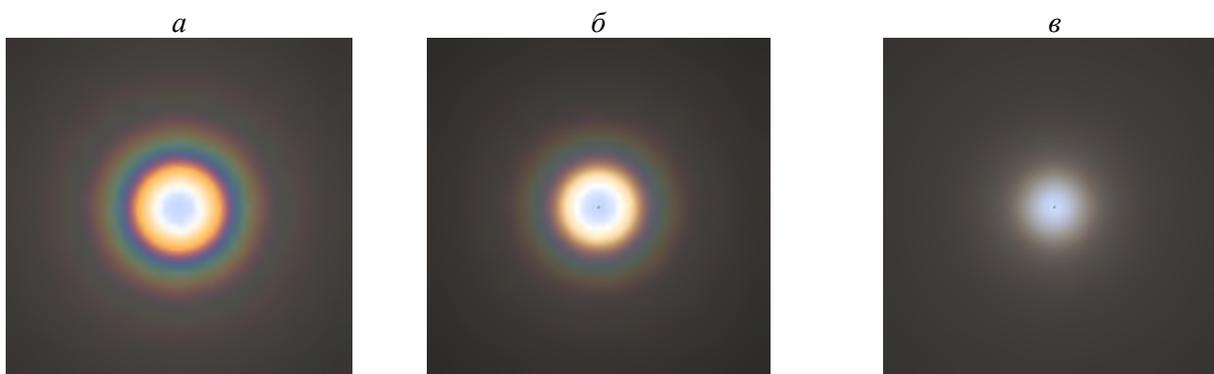


Рис. 9 – Моделирование венцов для облачности С4 с учетом однократного рассеяния (а) и с учетом многократного рассеяния для облачного слоя с оптической толщиной 1 (б) и 5 (в). Угловой радиус изображений 15°

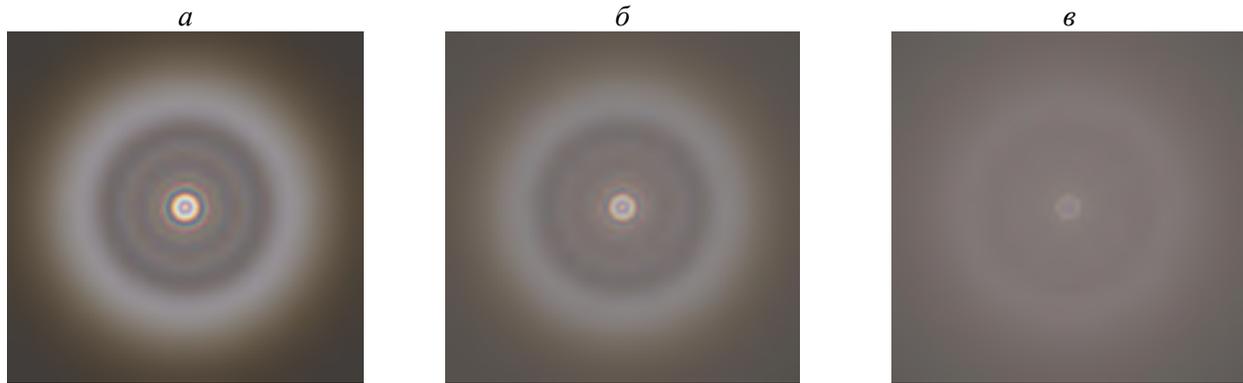


Рис. 10 – Результаты моделирования глории для модели облачности С4 без многократного рассеяния (*а*), с учетом многократного рассеяния для слоя с оптической толщиной 1 (*б*) и 5 (*в*). Кроме глорий (в центре изображений) видны белые радуги с угловым радиусом около 40° . Угловой радиус изображений 50°

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) является методом ядерной медицины, предназначенным для диагностики сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний. Для создания томографических изображений пациенту вводится радиофармацевтический препарат, который накапливается в существенно различных концентрациях в здоровых и пораженных тканях. Испускаемые препаратом гамма-кванты регистрируются с помощью камеры, вращающейся вокруг пациента. Один из главных элементов камеры – коллиматор, позволяющий регистрировать излучение в узком телесном угле, что играет принципиальную роль при решении обратной задачи реконструкции ОФЭКТ изображений. Вероятность прохождения гамма-квантов через коллиматор задается в виде функции рассеяния точки, которая определяет пространственное распределение на детекторе камеры потока излучения, испущенного точечным источником и прошедшего через коллиматор. Можно выделить три подхода к расчету функции рассеяния точки (ФРТ) для коллиматоров в однофотонной эмиссионной компьютерной томографии: аппроксимация ФРТ гауссовским распределением, расчет ФРТ на основе геометрической модели коллиматора и вычисление ФРТ методом Монте-Карло. В данном исследовании выполнен сравнительный анализ этих подходов. Поскольку коммерческие коды по расчету ФРТ недоступны, были разработаны программы с использованием метода Монте-Карло. Созданные программы предназначены для дальнейшего использования в математическом моделировании процедуры обследования пациентов методом ОФЭКТ. Они будут включены в разрабатываемое программное обеспечение по моделированию виртуальной томографической системы.

Разработана численная модель индикатрис рассеяния оптического излучения кристаллическими ледяными частицами нерегулярной формы на основе геометрической оптики с использованием метода трассировки лучей, что позволит дополнить оптические модели перистой облачности новыми данными. В качестве моделей ледяных частиц нерегулярной формы используются многогранники, являющиеся выпуклыми оболочками случайного множества точек, распределенных по некоторому закону в ограниченном объеме. Для оценки оптических характеристик ледяных кристаллов использованы модели с гладкими и шероховатыми поверхностями. Показано, что свойства рассеяния излучения кристаллами в виде гексагональных призм, типичных для большинства теоретических и прикладных работ, и предложенными выпуклыми многогранниками

имеют значительные различия. Предложенные модели дают новую интерпретацию индикатрис рассеяния ледяных частиц, наблюдаемых в атмосфере.

Представлена компьютерная реализация алгоритмов, предназначенных для численного моделирования трехмерных выпуклых тел со случайным числом вершин. Задача построения выпуклых многогранников является классической проблемой вычислительной геометрии. Интерес к таким моделям возникает в ряде задач физики, биологии, медицины. В работе модели построения выпуклых тел ориентированы на приложения, связанные с решением задач расчета характеристик рассеяния оптического излучения ледяными кристаллами перистых облаков. Алгоритмы построения выпуклых многогранников были положены в основу программы ConvexHull, предназначенной для моделирования кристаллов произвольных выпуклых форм в 3-мерном пространстве. В работе описаны алгоритмы построения и результаты визуализация с помощью библиотеки OpenGL.

Проведен сравнительный анализ кусочно-постоянных, кусочно-линейных и кусочно-полиномиальных приближений вероятностных плотностей с точки зрения их точности и возможности применения в численных стохастических моделях (конкретнее, в алгоритмах модифицированного метода дискретной суперпозиции).

Выполнен сравнительный анализ затрат на основные математические операции с помощью системы моделирования вероятностных одномерных распределений NMPUD.

Проведена систематизация численных (реализуемых на компьютере) рандомизированных функциональных алгоритмов приближения решения интегрального уравнения Фредгольма второго рода, при этом выделены три вида таких алгоритмов: проекционные, сеточные и проекционно-сеточные. Подробно исследована возможность использования рассматриваемых численных алгоритмов при решении практически важных задач. Выявлены недостатки сеточных алгоритмов, требующих подсчета значений ядра интегрального уравнения в фиксированных точках (на практике ядра уравнений имеют интегрируемые особенности, и такой подсчет невозможен). Таким образом, для прикладных задач, связанных с решением интегральных уравнений Фредгольма второго рода, целесообразно использовать не сеточные, а проекционные или проекционно-сеточные рандомизированные алгоритмы.

Представлена компьютерная система моделирования одномерных случайных величин NMPUD, разработанная в лаборатории математического моделирования лица № 130 Новосибирска. Приведены результаты численных экспериментов и соображения, обосновывающие использование в системе: элементарных плотностей, полученных с помощью технологии последовательных (вложенных) замен, плотностей, представляющих собой взвешенную сумму элементарных плотностей, моделируемых с помощью модифицированного метода дискретной суперпозиции, алгоритмов кусочно-линейной аппроксимации неизвестных плотностей по заданной выборке, алгоритмов модифицированного метода суперпозиции для моделирования случайных величин с кусочно-линейными плотностями.

Рассмотрена задача получения численного функционального приближения вероятностной плотности по заданным или моделируемым выборочным значениям с заданным уровнем погрешности и наименьшими затратами. Для решения этой задачи предложен вычислительный

алгоритм, представляющий собой функциональную версию ядерной оценки вероятностной плотности, аналогичный функциональному вычислительному ядерному статистическому алгоритму приближения решения интегрального уравнения Фредгольма второго рода, для которого была построена теория условной оптимизации. В данной работе эта теория применяется для построения функционального вычислительного ядерного алгоритма приближения вероятностной плотности.

Представлена оптимальная форма записи методов типа Розенброка с точки зрения числа ненулевых параметров и вычислительных затрат на шаге. Получены условия согласованности и устойчивости, теоремы сходимости решения (m, k) -схем для задач индекса два и ниже. 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.

Результаты работ по проектам РФФИ

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.

Завершены работы, связанные с разработкой, численной реализацией и верификацией численных полупараметрических стохастических моделей нестационарных временных рядов различного разрешения, пространственных и пространственно-временных полей ряда биоклиматических индексов, характеризующих тепловое воздействие окружающей среды на человека. Получены оценки вероятностей возникновения ряда экстремальных биоклиматических явлений и их характеристик. Предложенные и реализованные модели позволили провести исследование влияния климатических изменений, характеризующихся изменением средней температуры воздуха, на свойства рядов биоклиматических индексов. Кроме того, показано, что с использованием построенных моделей можно получать вероятностный прогноз рассмотренных индексов с достаточно высокой точностью.

Проект РФФИ № 20-51-18009 "Новые высокоэффективные методы стохастического моделирования и приложения".

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

Реализован векторный рандомизированный алгоритм решения систем линейных алгебраических уравнений $x = Ax + b$. Рассматривались матрицы со спектральным радиусом, меньшим единицы. В этом случае решение системы может быть представлено в виде ряда Неймана. К. К. Сабельфельдом предложен алгоритм рандомизированного вычисления матричных итераций $A^k b$, который основан на выборе столбцов матрицы A в соответствии с распределениями вероятности, представленных вектором b и столбцами матрицы A . Этот алгоритм требует, чтобы столбцы матрицы A и вектор b были стохастическими векторами. Доказана теорема, позволяющая преобра-

зовать неотрицательную неприводимую матрицу A и неотрицательный вектор b к стохастическому виду. Для преобразования к стохастической матрице требуется вычислить максимальное собственное число транспонированной матрицы A^T и соответствующий ему собственный вектор. Максимальное собственное число вычисляется с помощью степенного метода.

Проанализированы трудоемкость и дисперсия метода в зависимости от размера матрицы N и числа итераций K . Время вычислений линейно растет с ростом N и K , поведение дисперсии зависит от структуры матрицы.

Результаты работ по проектам РНФ

Проект РНФ № 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.

В 2021 г. завершена работа над данным проектом, отправлен итоговый отчет, и подана заявка на продление работ на 2022–2023 годы. Ниже приведены полученные результаты.

Разработаны и реализованы алгоритмы типа first passage time для вычисления различных функционалов от решения уравнения дрейфа-диффузии как в стационарной, так и в нестационарной постановках. Специальные модификации построены для вычисления практически интересных функционалов, в частности потоков экситонов на малые участки границ, например поверхности дислокаций и другие дефекты в полупроводниковых материалах. Алгоритмы позволяют рассчитывать и другую важную характеристику – интенсивность катодолюминесценции, которая определяется временем жизни экситонов и величиной числа Пекле, которое определяет относительный вклад в движение экситона за счет дрейфа сравнительно с его диффузионным движением.

Разработан также глобальный вариант блуждания по сеткам, позволяющий вычислять не только функционалы от решения, но и сами поля решений, описывающие распределение выживших экситонов, на одном ансамбле траекторий.

Разработан эффективный алгоритм рандомизированного вычисления итераций операторов, основанный на предложенном нами преобразовании перроновских матриц к стохастическим. На этой основе построен стохастический векторный алгоритм решения больших систем уравнений. Трудоемкость метода оказалась весьма высокой, она зависит от размерности задачи линейным образом и не допускает высокую степень параллелизации.

Получены новые результаты по построению катодолюминесцентных карт с помощью решения уравнений дрейфа-диффузии экситонов в полупроводниковых материалах методами стохастического моделирования. В совместных исследованиях с группой немецких физиков из Института твердотельной электроники в Берлине (Paul Drude Institute of solid state electronics, Berlin) удалось обнаружить новый эффект нерадиационной рекомбинации экситонов в пьезоэлектрическом поле, создаваемом упругими напряжениями вокруг дислокаций в полупроводниках. Были выполнены работы по различным аспектам, связанным с данным эффектом.

Разработана модель стохастического моделирования зарождения и агрегации нанокристаллов сульфида кадмия, синтезированных в матрице Ленгмюра – Блоджетт. Эти исследования проводились совместно с группой физиков из Института физики полупроводников им. Ржанова СО РАН, Новосибирск.

Проект РФФИ 21-71-00007 "Разработка и исследование численных стохастических моделей временных рядов и пространственно-временных полей биоклиматических индексов в Арктической зоне России".

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

В рамках проекта планируется построить численные стохастические модели временных рядов и пространственно-временных полей биоклиматических индексов в Арктической зоне РФ, используя два подхода: первый основан на применении стохастических "генераторов погоды", второй строится на основе определяющих формул. За первые 6 месяцев работы над проектом подготовлены к работе данные многолетних наблюдений на метеостанциях, расположенных в Арктической зоне РФ. Определены предположения о вероятностной структуре временных рядов и пространственно-временных полей комплексов метеопараметров, которые будут использованы при построении стохастических "генераторов погоды", учитывающих специфику рассматриваемого региона, связанную с отсутствием выраженного суточного хода метеопараметров во время полярного дня (полярной ночи). Начата разработка "генераторов погоды" для моделирования совместных временных рядов метеопараметров и последующего вычисления по их реализациям модельных значений индекса холодного стресса и биоклиматического индекса суровости метеорежима.

Прочие гранты

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

Исполнители: д.ф.-м.н. Огородников В. А., к.ф.-м.н. Каргаполова Н. А., Акентьева М. С.

Численно реализована и верифицирована стохастическая модель пространственно-временного поля комплекса метеорологических параметров на сети метеостанций (рис. 11), расположенных в южной части Байкальской природной территории. Модель построена в предположении, что совместное поле приземной температуры воздуха и ортогональных компонент скорости ветра с трехчасовым разрешением и полусуточного количества осадков является негауссовским, нестационарным по времени и неоднородным по пространству.

Кроме того, построена численная стохастическая модель совместных пространственно-временных полей суточных сумм осадков на территории водосбора р. Слюдянка и временных рядов суточного стока (расхода) этой реки (рис. 12). По модельным траекториям (рис. 13) исследована зависимость различных характеристик стока от режима выпадения осадков (в том числе в случае экстремальных режимов).

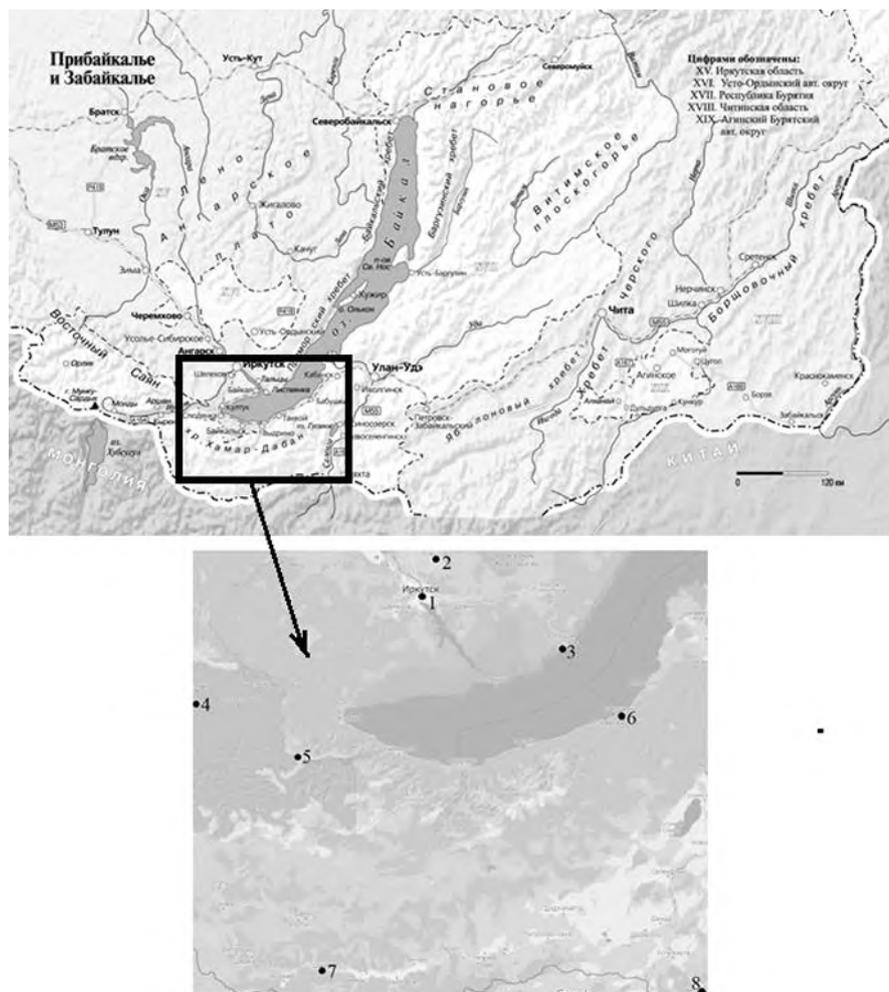


Рис. 11 – Расположение метеостанций в южной части Байкальской природной территории:
 1 – Иркутск; 2 – Хомутово;
 3 – Большое Голоустное;
 4 – Тунка; 5 – Хамар-Дабан; 6 – Бабушкин;
 7 – Цакир; 8 – Кяхта

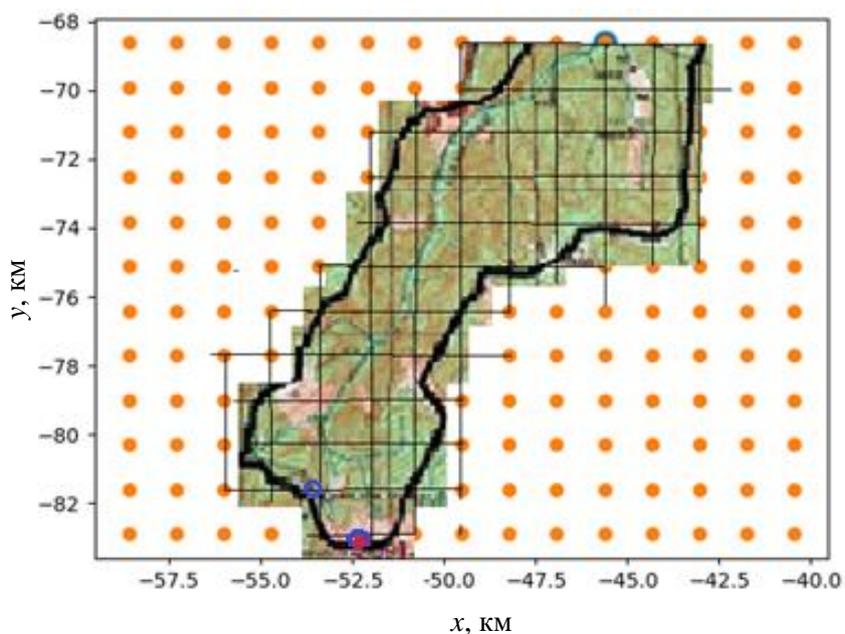
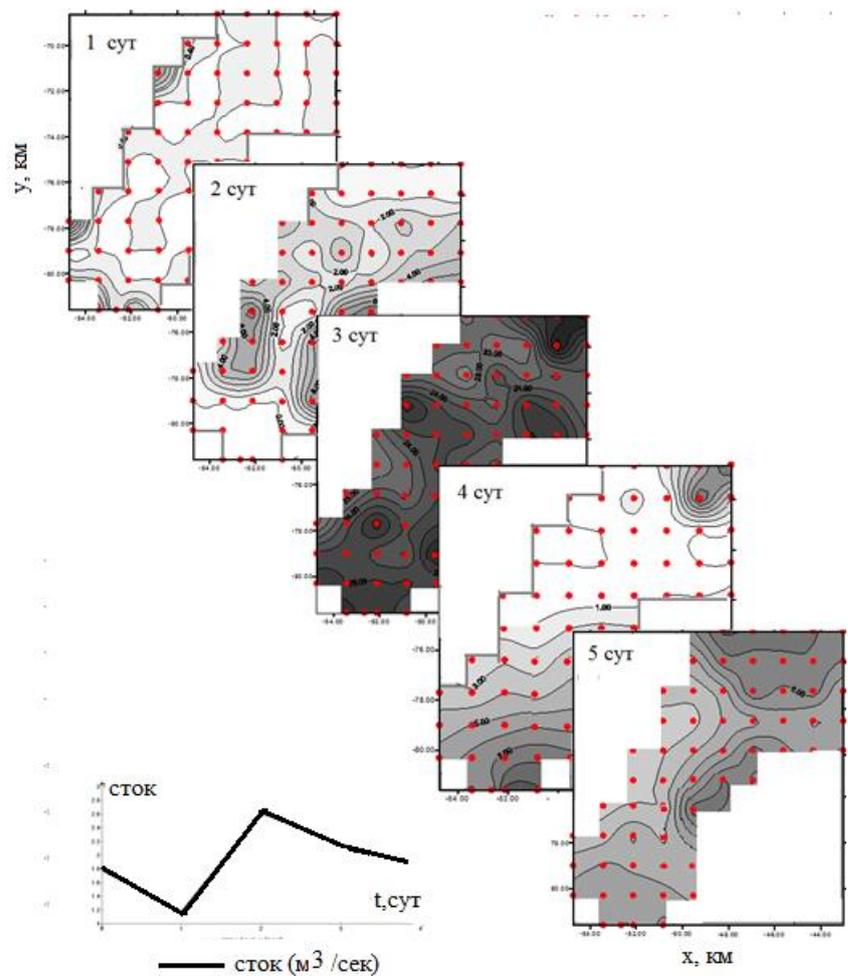


Рис. 12 – Карта водосбора р. Слюдянка и пространственная сетка

Рис. 13 – Пример реализации пространственно-временного поля суточных сумм жидких осадков в районе водосбора р. Слюдянка и ряда речного стока (6–10 июля)



Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Новиков А. Е., Новиков Е. А., Левыкин А. И. Алгоритмы интегрирования на неявных одношаговых схемах : Учеб. пособ. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2021. 85 с.
2. Войтишек А. В. О лаборатории математического моделирования лица № 130 г. Новосибирска // Базовые школы РАН: концептуальные положения и опыт реализации проекта : сб. статей. М.: Изд-во РАН, 2021. С. 120–122.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Sabelfeld, K. A new randomized vector algorithm for iterative solution of large linear systems // Appl. Math. Lett. 2021. Vol. 126. Art. num. 107830. DOI: 10.1016/j.aml.2021.107830.
2. Kireeva, A., Sabelfeld, K. K., Kireev, S. Parallel simulation of drift-diffusion-recombination by cellular automata and global random walk algorithm // J. Supercomput. 2021. Vol. 77. P. 6889–6903. DOI: 10.1007/s11227-020-03529-y.
3. Sabelfeld, K., Smirnov, D. A global random walk on grid algorithm for second order elliptic equations // Monte Carlo Meth. and Appl. 2021. V. 27, iss. 3. P. 211–225. DOI: 10.1515/mcma-2021-2092.

4. Sabelfeld, K., Kireeva, A. A Global random walk on spheres algorithm for calculating the solution and its derivatives of drift-diffusion-reaction equations // *Math. Methods Appl. Sci.* 2021. Vol. 45, No. 3. P. 1420–1431. DOI: 10.1002/MMA.7861.
5. Sabelfeld, K. K., Smirnov, D., Dimov, I., Todorov, V. A global random walk on grid algorithm for second order elliptic equations // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2021. Vol. 27, iss. 4. P. 325–339. DOI: 10.1515/mcma-2021-2097.
6. Shalimova, I. A., Sabelfeld, K. K. Random walk on spheres algorithm for solving steady-state and transient diffusion-recombination problems // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2021. Vol. 27, iss. 4. P. 301–313. DOI: 10.1515/mcma-2021-2099.
7. Sabelfeld, K., Kireev, S., Kireeva, A. Parallel implementation of cellular automata model of electron-hole transport in a semiconductor // *J. of Parall. and Distrib. Comput.* 2021. Vol. 158. P. 186–195. DOI: 10.1016/j.jpdc.2021.08.006.
8. Svit, K., Kireev, S., Sabelfeld, K. A stochastic model, simulation, and application to aggregation of cadmium sulfide nanocrystals upon evaporation of the Langmuir – Blodgett matrix // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2021. Vol. 27, iss. 4. P. 289–299. DOI: 10.1515/mcma-2021-2100.
9. Kablukova, E. G., Prigarin, S. M. Statistical simulation of radiation transfer in horizontally inhomogeneous stratus clouds // *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol. 1715, iss. 1. Art. num. 012062. Intern. conf. on Marchuk Scientific Readings 2020, (MSR 2020), Novosibirsk, Oct. 19–23. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012062.
10. Q. Mu, E.G. Kablukova, B. A. Kargin S. M. Prigarin, Monte Carlo simulation of halos in the crystal clouds// *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol. 1715, iss. 1. Art. num. 012067. Intern. conf. on Marchuk Scientific Readings 2020, (MSR 2020), Novosibirsk, Oct. 19–23. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012067.
11. Mironova, D. E., Prigarin, S. M. Monte Carlo simulation of the laser pulse propagation in water layers with reflection on boundaries // *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol. 1715, iss. 1. Art. num. 012065. Intern. conf. on Marchuk Scientific Readings 2020, (MSR 2020), Novosibirsk, Oct. 19–23. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012065.
12. Zakovryashin, V., Prigarin, S. M. Computer simulation of coronas, glories and fogbows in atmospheric clouds and fogs // *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol. 1715, iss. 1. Art. num. 012024. Intern. conf. on Marchuk Scientific Readings 2020, (MSR 2020), Novosibirsk, Oct. 19–23. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012024.
13. Gurko, M. A., Konovalov, A. N., Prigarin, S. M. Study of gamma radiation transfer through collimator in nuclear medicine applications // *AIP Conf. Proc.* 2351, 040016. 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0052205>.
14. Cherkashin, D. A., Voytishchek, A. V. Using the inverse distribution function method and the modified superposition method in the NMPUD computational system // *J. of Physics: Conf. Ser.* 2021. Vol. 2099. Art. num. 012071. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012071.
15. Kargapolova, N. A., Ogorodnikov V. A. Numerical stochastic modelling of spatial and spatio-temporal fields of the wind chill index in the South of Western Siberia // *RJNAMM.* 2021. V. 36, No. 1. P. 33–42. <https://doi.org/10.1515/rnam-2021-0003>.

16. Kargapolova, N., Ogorodnikov, V. Stochastic model of conditional non-stationary time series of the wind chill index in West Siberia // *Method. Comput. Appl. Probab.* 2021. <https://doi.org/10.1007/s11009-021-09861-x>.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Булгакова, Т. Е., Войтишек, А. В. Условная оптимизация функционального вычислительного ядра алгоритма приближения вероятностной плотности по заданной выборке // *ЖВМиМФ.* 2021. Т. 61, № 9. С. 1431–1446. DOI: 10.31857/S0044466921090076.

2. Bulgakova, T. E., Voytishek, A. V. Conditional optimization of the computational kernel algorithm for approximating the probability density on the basis of a given sample // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2021. Vol. 61, No. 9. P. 1401–1415. DOI: 10.1134/S0965542521090062.

3. Levykin, A. I., Novikov, A. E., Novikov E. A. (m, k)-methods for DAEs of index 2 // *Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021) : thes. of the Intern. conf., Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021.* P. 53. DOI 10.24412/cl-35065-2021-1-00-37.

4. Voytishek A. V. Classification and applications of randomized functional numerical algorithms for the solution of second-kind Fredholm integral equations // *J. of Math. Sci.* 2021. Vol. 254, No. 5. P. 589–605. DOI: 10.1007/s10958–021–05328–z.

5. Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E. Random walk on spheres based algorithm for transients of exciton transport in semiconductors with near singular behavior of recombination rates around the dislocations // *Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021) : thes. of the Intern. conf., Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021.* P. 22–23. DOI 10.24412/cl-35065-2021-1-00-88.

6. Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E. A vector Monte Carlo algorithm for large systems of linear equations // *Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021) : thes. of the Intern. conf., Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021.* P. 76–77. DOI 10.24412/cl-35065-2021-1-00-89.

7. Sabelfeld, K. K., Shalimova, I. A. A randomized iterative method for solving integral equations of the second kind // *Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021) : thes. of the Intern. conf., Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021.* P. 77. DOI 10.24412/cl-35065-2021-1-00-90.

8. Kablukova, E. G., Sabelfeld, K. K., Protasov, D. Yu., Zhuravlev, K. S. Numerical simulation of a two-dimensional electron gas transfer in a quantum well heterostructure // *Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021) : thes. of the Intern. conf., Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021.* P. 71–72. DOI 10.24412/cl-35065-2021-1-00-78.

9. Каблукова, Е. Г., Пригарин, С. М. Влияние неоднородности облачного слоя на перенос радиации // 27-й Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 5–9 июля 2021 г.

10. Mu, Q., Kablukova, E. G., Kargin, B. A., Prigarin, S. M. Monte Carlo simulation of halos in crystal clouds // *Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021) : thes. of the Intern. conf., Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021.* P. 75. DOI 10.24412/cl-35065-2021-1-00-86.

11. Абдразакова, А. Р., Булгакова, Т. Е., Войтишек, А. В. Об особенностях выбора ортонормированных систем функций в рандомизированных численных проекционных функциональных алгоритмах // *Информационные технологии и математическое моделирование : труды 19-й Междунар. конф. им. А. Ф. Терпугова, Томск, 2–5 дек. 2020 г.* С. 350–355.

12. Войтишек А. В., Постовалов Я. С., Черкашин Д. А. Система численного моделирования одномерных случайных величин NMPUD: формирование банка плотностей, автоматизация

математических выкладок и приложения // Информационные технологии и математической моделирование : труды 19-й Междунар. конф. им. А. Ф. Терпугова, Томск, 2–5 дек. 2020 г. С. 363–368.

13. Cherkashin, D. A., Voytishkek, A. V. Using the modified superposition method in the computational system NMPUD // Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021) : thes. of the Intern. conf., Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021. P. 69–70. DOI: 10.24412/cl-35065-2021-1-00-74.

14. Akenteva, M. S., Ogorodnikov, V. A., Kargapolova N. A. Stochastic model of the joint spatio-temporal field of precipitation and wind speed in the southern part of the Lake Baikal region // Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021) : thes. of the Intern. conf., Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021. P. 67. DOI: 10.24412/cl-35065-2021-1-00-69.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 8 докладов, из них 1 пленарный (Сабельфельд К. К., Киреева А. Е., Каблукова Е. Г., Каргин Б. А., Пригарин С. М., Шалимова И. А., Акентьева М. С., Огородников В. А. Каргаполова Н. А., Войтишек А. В., Левыкин А. И.).

2. 27-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 5–9 июля 2021 г. – 2 доклада (Каблукова Е. Г., Пригарин С. М.).

3. 19-я Международная конференция им. А. Ф. Терпугова "Информационные технологии и математической моделирование", Томск, 2–5 декабря 2020 г. – 2 доклада (Войтишек А. В.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Пригарин С. М. – член экспертного совета секции "Математика" 59-й Международной студенческой научной конференции (МНСК-2021), Новосибирск, 12–23 апреля 2021 г., 2.

2. Каргин Б. А. – член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;

3. Сабельфельд К. К.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021"; Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН, 4–8 октября 2021 г.,

– член экспертного совета секции "Математика" 59-й Международной студенческой научной конференции (МНСК-2021), Новосибирск, 12–23 апреля 2021 г.,

– член программного комитета 59-й Международной студенческой научной конференции МНСК-2021; Новосибирск, НГУ; 12 – 23 апреля 2021 г.;

4. Войтишек А. В.:

– член программного комитета 20-й Международной конференции им. А. Ф. Терпугова "Информационные технологии и математической моделирование", Томск, 1–5 декабря 2021 г.,

– член экспертного совета секции "Математика" 59-й Международной студенческой научной конференции (МНСК-2021), Новосибирск, 12–23 апреля 2021 г.;

5. Огородников В. А. – член экспертного совета секции "Математика" 59-й Международной студенческой научной конференции (МНСК-2021), Новосибирск, 12–23 апреля 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Монографий, глав в монографиях – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 16

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 30

Докладов на конференциях – 12, в том числе 2 пленарных

Членов организационных или программных комитетов конференций – 8

Кадровый состав

- | | | |
|----------------------|-------------------|-----------|
| 1. Каргин Б. А. | зав. лабораторией | д.ф.-м.н. |
| 2. Огородников В. А. | гнс | д.ф.-м.н. |
| 3. Сабельфельд К. К. | гнс | д.ф.-м.н. |
| 4. Пригарин С. М. | внс | д.ф.-м.н. |
| 5. Войтишек А. В. | внс | д.ф.-м.н. |
| 6. Левыкин А. И. | снс | к.ф.-м.н. |
| 7. Шалимова И. А. | снс | к.ф.-м.н. |
| 8. Каблукова Е. Г. | снс | к.ф.-м.н. |
| 9. Каргаполова Н. А. | снс | к.ф.-м.н. |
| 10. Киреева А. Е. | снс | к.ф.-м.н. |
| 11. Ухинова О. С. | нс | к.ф.-м.н. |
| 12. Сересева О. В. | снс | к.ф.-м.н. |
| 13. Каргин А. Б. | ведущ. инженер | |
| 14. Заковряшин В. | инженер | |
| 15. Акентьева М. С. | инженер | |

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

Педагогическая деятельность

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

Руководство студентами

- | | |
|-------------------|---|
| Дюбенкова А. С. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Войтишек А. В. |
| Гаджихмедов М. Г. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Войтишек А. В. |
| Гао Ди | – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Огородников В. А. |
| Сюанью Су | – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Огородников В. А. |
| Сапожников В. А. | – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К. |

Долганов И. В.	– 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.
Аксюк И. А.	– 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.
Бухашеев О. В.	– 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.
Глазков С. П.	– 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.
Наумов В. Т.	– 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.

Руководство аспирантами

Абдразакова А. Р.	– 2-й год, НГУ, руководитель Войтишек А. В.
Му Цюань	– 4-й год, НГУ, руководители Каргин Б. А., Каблукова Е. Г.
Чжен Пэнфэй	– 3-й год, НГУ, руководители Каргин Б. А., Каблукова Е. Г.
Акентьева М. С.	– 1-й курс НГУ, руководитель Огородников В. А.

Защита дипломов

Акентьева М. С.	– магистр ММФ НГУ, руководитель Огородников В. А.
-----------------	---

Защита диссертаций

Булгакова Т. Е. "Оптимизация функциональных вычислительных статистических оценок и алгоритмов", специальность 01.01.07 – вычислительная математика, дата защиты: 26 мая 2021 г. (научный руководитель д.ф.м.н. Войтишек А. В.).

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ

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

Важнейшие достижения

Предложен и исследован цикл итерационных методов в подпространствах Крылова с ускоряющими предобуславливающими матрицами для решения больших разреженных систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), возникающих из аппроксимации актуальных многомерных задач математического моделирования с реальными данными на неструктурированных сетках. Алгоритмы базируются на различных вариационных, ортогональных и проекционных свойствах, включая экономичные схемы переменного-треугольных и вложенных неполных факторизаций, а также дефляционные подходы при многократном решении симметричных и несимметричных СЛАУ с последовательно определяемыми правыми частями. Исследованы вопросы повышения производительности и масштабируемого распараллеливания алгоритмов на суперкомпьютерах гетерогенной архитектуры с распределенной и иерархической общей памятью.

Д.ф.-м.н. Ильин В. П.

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Il'in, V. P. Iterative preconditioned methods in Krylov spaces // Trends of the XXI Century. Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2021. Vol. 61, No 11. P. 1750–1775. DOI: 10.1134/S0965542521110099Y. L. Q2.
2. Il'in, V. P. On moment methods in Krylov subspaces // Dokl. Math. 2020. Vol. 495. P. 38–43. DOI: 10.1134/S1064562420060241. Q2.
3. Il'in, V. Parallel intelligent computing in algebraic problems // Sokolinsky L., Zymbler M. (eds.) Parallel Computational Technologies. PCT 2021. Communications in Computer and Information Science. Vol. 1437. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81691-9_8.
4. Gurieva, Y., Il'in, V. Conjugate direction methods for parallel deflation // Sokolinsky L., Zymbler M. (eds.) Parallel Computational Technologies. PCT 2021. Communications in Computer and Information Science. Vol. 1437. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-81691-9_14.

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. Parallel Computational Technologies (PCT'2021), Волгоград, 30 марта – 1 апреля 2021 г.
2. Marchuk Scientific Readings-2021, Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2021 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Методы вычислительной математики и информационно-вычислительные технологии решения прямых и обратных задач математической физики, и их приложения в естествознании, включая науки о жизни".

Номер государственной регистрации 0251-2021-0001.

Руководители: д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Кабанихин С. И., д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

1. Предложен и исследован цикл итерационных методов в подпространствах Крылова с ускоряющими предобуславливающими матрицами для решения больших разреженных систем

линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), возникающих из аппроксимации актуальных многомерных задач математического моделирования с реальными данными на неструктурированных сетях. Алгоритмы базируются на различных вариационных, ортогональных и проекционных свойствах, включая экономичные схемы переменного-треугольных и вложенных неполных факторизаций, а также дефляционные подходы при многократном решении симметричных и несимметричных СЛАУ с последовательно определяемыми правыми частями. Исследованы вопросы повышения производительности и масштабируемого распараллеливания алгоритмов на суперкомпьютерах гетерогенной архитектуры с распределенной и иерархической общей памятью.

2. Разработан эффективный численный метод решения обратной задачи Захарова – Шабата. Эта задача сводится к системе двух интегральных уравнений, так называемой системе интегральных уравнений Гельфанда – Левитана – Марченко. Метод основан на прямой аппроксимации интегральных уравнений квадратурными формулами второго, третьего и четвертого порядков. В результате аппроксимации получается система линейных алгебраических уравнений, которая, в свою очередь, сводится с помощью дополнения Шура к системе меньшего размера, необходимой для определения потенциальной функции. Метод позволяет получить значение искомой потенциальной функции в произвольной точке с высокой точностью вплоть до четвертого порядка. Отметим, что разработанные методы значительно ускоряются при использовании распараллеливания алгоритмов.

3. Проведено экспериментальное исследование решателей краевых задач на подсетках квазиструктурированных прямоугольных сеток. Характерной чертой данных сеток является малое число узлов в подсетках и большое число повторов решений на каждой подсетке. Было рассмотрено три решателя: прямой – метод циклической редукции Бунемана и два итерационных – метод продольно-поперечных прогонок Писмана – Рэчфорда и метод последовательной верхней релаксации. Расчеты проводились в одиночном и серийном режимах (в последнем случае имитируя внешний сходящийся итерационный процесс). На основании проведенных численных экспериментов предложен подход, согласно которому начальные этапы серии считаются ЦР, а затем включается итерационный метод. При большом числе повторов наиболее эффективным для этого оказался ПВР. Кроме того к достоинствам метода ПВР относится то, что для его реализации требуется наименьшее количество памяти.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Il'in, V. P. Iterative preconditioned methods in Krylov spaces // Trends of the XXI Century. Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2021. Vol. 61, No 11. P. 1750–1775. DOI 10.1134/S0965542521110099.

2. Il'in, V. P. On moment methods in Krylov subspaces // Dokl. Math. 2020. Vol. 495. P. 38–43. DOI: 10.1134/S1064562420060241.

3. Il'in, V. Parallel intelligent computing in algebraic problems // Sokolinsky L., Zymbler M. (eds.) Parallel Computational Technologies. PCT 2021. Communications in Computer and Information Science. Vol. 1437. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-81691-9.

4. Gurieva, Y., Il'in, V. Conjugate direction methods for parallel deflation // Sokolinsky L., Zymbler M. (eds.) *Parallel Computational Technologies. PCT 2021. Communications in Computer and Information Science*. Vol. 1437. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-81691-9.
5. Gorbenko N. I., Il'in V. P., Krylov A. M, Frumin L. L. Numerical solution of the direct Zakharov – Shabat scattering problem // *Num. Analys. Appl.* 2020. Vol. 13. P. 95–102, DOI:10.1134/S1995423920020019.
6. Il'in, V. P. Parallel variable-triangular iterative methods in Krylov subspaces // *J. of Math. Sci.* 2021. 255(3). P. 281–290. DOI: 10.1007/s10958-021-05371-w.
7. Gololobov, S. V., Il'in, V. P., Krylov, A. M., Petukhov A. V. Nested alternating – triangular incomplete factorization methods // *MSR 2020 J. Phys.: Conf. Ser.* 1715 (2021) 012003. IOP Publ. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012003.
8. Il'in, V. P. Two-level iterative methods for solving the saddle point problems // *MSR 2020. J. Phys.: Conf. Ser.* 1715 (2021) 012004. IOP Publishing 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012004.
9. Gurieva, Y. L., Il'in, V. P. Conjugate direction methods for multiple solution of Slaes // *J. of Math. Sci.* 2021. Vol. 255, No 3. P. 231–244, DOI: 10.1007/s10958-021-05365-8.
10. Il'in, V. P., Kozlov, D. I., Petukhov, A. V. On the minimal residual methods for solving diffusion-convection SLAEs // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. 2099. 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012005.
11. Козырев, А. Н., Свешников, В. М. Экспериментальное исследование эффективности решения двумерных краевых задач на подсетках квазиструктурированных прямоугольных сеток // *СибЖВМ.* 2021. Т. 24, № 3. С. 277–288. DOI: 10.15372/SJNM20210304.
12. Savchenko, A. O. The magnetic moment of a superconducting ball in a axisymmetric magnetic field // *J. Supercond. Nov. Magn.* 2021. Vol. 34. P. 2041–2045. DOI: 10.1007/s10948-021-05896-w.
13. Gladkikh, V. S., Il'in, V. P., Petukhov, A. V., Krylov A. M. Numerical modeling of non-stationary heat problems in a two-phase medium // *MSR 2020. J. Phys.: Conf. Ser.* 1715. 2021. 012002 IOP. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012002.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Marchuk Scientific Readings 2021, Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 9 докладов (Гладких В. С., Гурьева Я. Л., Горбенко Н. И., Омарова Г. А., Перевозкин Д. В., Ильин В. П., Петухов А. В., Савченко А. О., Козлов Д. И., Пехтерев М. С., Климонов И. А.).
2. *Parallel Computational Technologies (PCT'2021)*, Волгоград, 30 марта – 1 апреля 2021 г. – 1 доклад (Гурьева Я. Л., Ильин В. П.).

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 13
Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 13
Докладов на конференциях – 10

Кадровый состав

1. Горбенко Н. И. и.о. зав. лабораторией к.ф.-м.н.
2. Гладких В. С. инженер 1-й катег.

3. Гурьева Я. Л.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
4. Дебелов В. А.	в.н.с.	д.т.н.
5. Ильин В. П.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
6. Козырев А. Н.	н.с.	
7 Корнеев В. Д.	с.н.с.	к.т.н.
8. Крылов А. М.	инженер	
9. Максимова А. Г.	м.н.с.	
10. Омарова Г. А.	м.н.с.	к.ф.-м.н.
11. Перевозкин Д. В.	м.н.с.	
12. Петухов А. В.	м.н.с.	
13. Савченко А. О.	с.н.с.	д.ф.-м.н.
14. Свешников В. М.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
15. Сорокин С. Б.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
16. Чимаева Е. В.	ведущ. программист	
17. Козлов Д. И.	инженер	

Максимова А. Г., Козлов Д. И., Крылов А. М. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

Свешников В. М. – профессор НГУ
Ильин В. П. – профессор НГУ
Горбенко Н. И. – доцент НГУ, ВКИ
Омарова Г. А. – доцент НГУ

Руководство студентами

Козлов Д. И. – магистрант НГУ инженер ЛВФ, руководитель Ильин В. П.
Баталов М. А. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Ильин В. П.
Шаранов Д. А. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Ильин В. П.
Кладов А. В. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Ильин В. П.
Власов А. Ю. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Горбенко Н. И.
Герб А. Р. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Омарова Г. А.
Кекеев С. Ю. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Омарова Г. А.

Руководство аспирантами

Пехтерев М. С. – аспирант НГУ, руководитель Ильин В. П.

ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ХИМИИ

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

Важнейшие достижения

Двухпотоковая структура закона сохранения масс

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

Сформулировано общее представление о двухпотоковой структуре закона сохранения масс в задачах о течении двухфазной жидкости. Основу двухпотоковой структуры составляет представление фазовых скоростей в виде суммы двух компонент – сонаправленных суммарной скорости и противоположно направленных. Примером применения предложенной конструкции является построенная нами ранее балансная разностная схема Explicit Hybrid Upwinding (EHU) для задачи о гравитационной сегрегации двухфазной несжимаемой жидкости в пористых средах, удовлетворяющая слабому принципу максимума, в которой отсутствуют нефизичные сеточные артефакты.

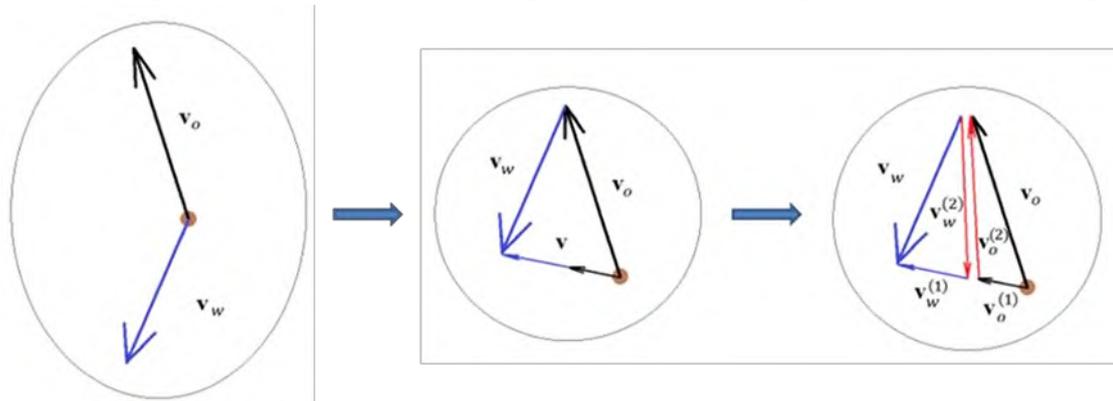


Рис. 1 – Двухпотоковая структура фазовых скоростей для системы "вода – нефть"

Результаты исследований изложены в работах:

1. 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. P. 17–32.
2. Ivanov, M. I., Kremer, I. A., Laevsky Yu. M. Mesh filtration problems with a two-flow structure of phase velocities // J. of Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2099. Art. Num. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012006.

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. Международная конференция "Математическое моделирование, обратные задачи и большие данные", Якутск, 18–25 июля 2021 г.
2. Конференция "Вычислительная математика и приложения", Сочи, 2–6 августа 2021 г.
3. 17-й Всероссийский семинар с международным участием "Динамика многофазных сред" (ДМС-2021), Новосибирск, 27 августа – 4 сентября 2021 г.
4. 19-я Всероссийская школа молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования", Абрау-Дюрсо (Россия), 13–18 сентября 2021 г.
6. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2021 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Методы вычислительной математики и информационно-вычислительные технологии решения прямых и обратных задач математической физики, и их приложения в естествознании, включая науки о жизни".

Номер государственной регистрации 0251-2021-0001.

Руководители: член-корр. РАН Кабанихин С. И., д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

Раздел 1.1.2 "Вычислительная математика".

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

Сформулировано общее представление о двухпоточковой структуре закона сохранения масс в задачах о течении двухфазной жидкости. Основу двухпоточковой структуры составляет представление фазовых скоростей в виде суммы двух компонент – сонаправленных суммарной скорости и противоположно направленных. Примером применения предложенной конструкции является балансная разностная схема Explicit Hybrid Upwinding (EHU) для задачи о гравитационной сегрегации двухфазной несжимаемой жидкости в пористых средах, удовлетворяющая слабому принципу максимума, в которой отсутствуют нефизичные сеточные артефакты.

Разработаны новые противопотоковые разностные схемы решения задач фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости. В частности, для задачи о гравитационной сегрегации в пористой среде построена явная схема EHU, основанная на двухпоточковой структуре закона сохранения масс, не уступающая по точности, но существенно превосходящая по производительности схему Implicit Hybrid Upwinding (IHU). При этом рассматривается задача в рамках модели Баклея – Леверетта с разрывными решениями, для которой строится обобщенная смешанная постановка с пространственной аппроксимацией смешанным методом конечных элементов для нахождения суммарной скорости и давления, и центрированным методом конечных объемов для определения насыщенности. Построена противопотоковая схема для задачи фильтрации в трещиновато-пористой среде в рамках двухконтинуальной модели Барблатта – Каземи. Особенностью данного построения является организация противопотоковой аппроксимации не только для ячеек каждого континуума, но и для перетоков между континуумами. Для разработанных методов установлен принцип максимума и в явном виде указаны условия устойчивости Куранта – Фридрихса – Леви.

Разработан вычислительный алгоритм решения 3D задач фильтрации при наличии скважин. При этом постановка задачи использует обобщенную смешанную формулировку, в которой легко конструируется описание скважин в виде некоторых констант. Для введенных подпространств несложно построить конечномерные аппроксимации.

Разработан вычислительный алгоритм решения задачи неизотермической фильтрации в трещиновато-пористых средах. Данный алгоритм основан на явно-неявной схеме, являющейся расширением широко применяемой при решении задач фильтрации IMPES схемы. На каждом временном шаге осуществляется последовательное выполнение некоторых этапов: по явной противопотоковой схеме вычисляются новые значения функций насыщенности фаз, далее по явно-неявной схеме вычисляются диффузионная часть теплового потока и температура с учетом конвективной части теплового потока на явном слое по противопотоковой схеме, и на последнем этапе

смешанным методом конечных элементов вычисляются суммарная скорость и давление. Разработанный алгоритм обеспечивает балансы массы и энергии.

Разработана явно-неявная схема расщепления для решения многомерных систем уравнений теплопереноса в неоднородных средах с реакцией. При этом рассматриваются задачи в обобщенных смешанных постановках. Для закона сохранения энергии речь идет о системе интегральных тождеств для одновременного нахождения температуры (энтальпии) и потока тепла. Закон сохранения массы рассматривается в виде системы интегральных тождеств для одновременного нахождения плотности и диффузионно-конвективного потока. Численный алгоритм представляет собой комбинацию смешанного метода конечных элементов аппроксимации по пространству с локально-одномерной схемой расщепления по времени. При этом слагаемое реакции представляется в явно-неявном виде, обеспечивающем устойчивость метода. Реализация алгоритма осуществляется специфической матричной прогонкой для блочно-трехдиагональных систем с блоками размерности 2×2 .

Описан алгоритм нахождения наилучших (в определенном смысле) кубатурных формул на сфере, инвариантных относительно преобразований диэдральных групп поворотов с инверсией. Этот алгоритм применяется для нахождения параметров всех лучших кубатурных формул этого типа симметрии до 35-го порядка точности.

Разработанная библиотека программ ODE solver протестирована на системах уравнений, описывающих динамику некоторых генных сетей. Для этой цели функциональность библиотеки расширена до работы с системами уравнений с запаздывающим аргументом. Подготовлена документация библиотеки, включающая описание этих функций и соответствующих тестов.

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 – д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

В рамках данного проекта в 2021 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. На основе методики, разработанной в рамках НИР института, были созданы программные комплексы для решения ряда задач моделирования процессов нефтедобычи на суперЭВМ. При этом разработка осуществлялась для методов, учитывающих двухпотокую структуру течения двухфазной жидкости в пористых средах. В частности, осуществлена программная реализация для 3D моделей гравитационной сегрегации двухфазной жидкости (всплывание легкой нефти).

Разработаны компьютерные программы для моделирования течений в трещиновато-пористых средах. При этом программная реализация основана на использовании алгоритмов, в которых противопотоковая технология распространена на двухконтинуальную модель. Ключевым моментом получения монотонных схем является выбор подходящей функции перетока между трещинами и поровыми блоками. При этом монотонность схем весьма своеобразна – для сильно

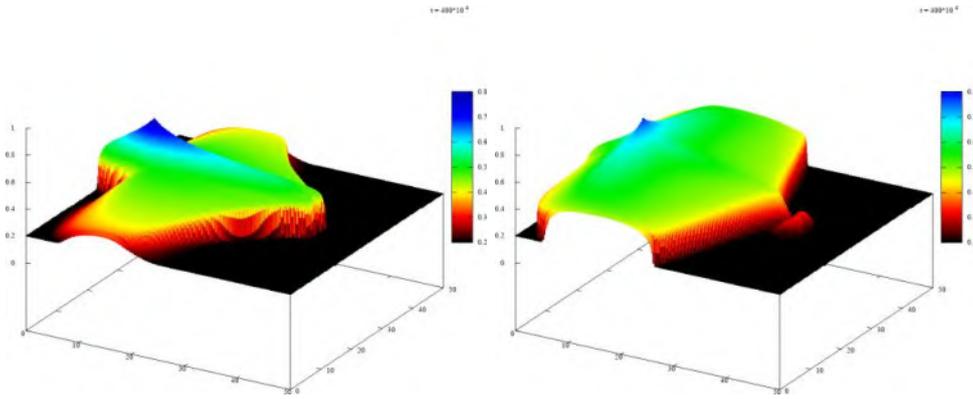


Рис. 2 – Водонасыщенность в поровых блоках и в трещинах

анизотропных сред поток воды в поровых блоках может существенно опередить поток воды в трещинах и проникнуть в трещины, опережая основной поток по трещинам. Соответствующий пример расчета показан на рис. 2.

В рамках проекта осуществлена программная реализация алгоритмов моделирования процессов неизоэтермической фильтрации двухфазной жидкости. На рис. 3, 4 приведены результаты вычислений.

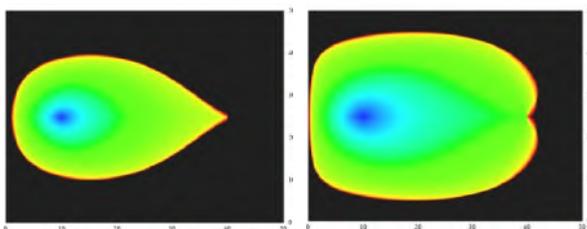


Рис. 3 – Водонасыщенность в разные моменты времени

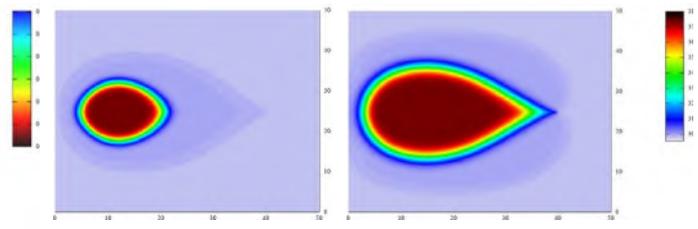


Рис. 4 – Температура (К) в разные моменты времени

В 2021 г. разработано и протестировано алгоритмическое и программное обеспечение для решения нестационарной задачи теплопроводности с учетом фазовых переходов. Разработан и детально протестирован численный алгоритм на основе схемы "предиктор-корректор". Полученные результаты экспериментально показали, что разработанная схема "предиктор-корректор" имеет 2-й порядок аппроксимации. К разработанной схеме в трехмерной постановке добавлен алгоритм учета фазового перехода. В этом случае коэффициенты уравнения есть функции температуры и согласно численному алгоритму происходит их пересчет на каждом шаге итерации по времени. Проведенные модельные расчеты с источником тепла в виде вертикально ориентированной скважины показали работоспособность алгоритма вместе со схемой "предиктор-корректор". Рассмотрена возможность проведения численных расчетов поля температуры в зоне многолетнемерзлых грунтов для нескольких скважин и для случаев, когда температура в скважинах распределена неравномерно. Экспериментально проверено на модельных задачах: однородная область с тремя скважинами (модель 1, температура в скважинах стационарна и не зависит от времени), однородная область с тремя скважинами (модель 2, температура в каждой скважине распределена линейно), моделирование поля температуры для "куста" скважин. Рассчитано распределение поля температуры в трехмерной однородной области для представленных вариантов. Данная работа осуществлялась совместно с сотрудником лаборатории геофизической информатики к.ф.-м.н. Д. А. Караваемым.

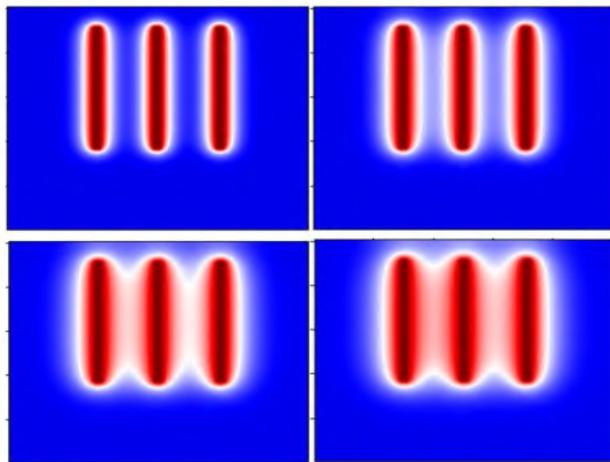


Рис. 5 – Распределение температуры в окрестности куста скважин в разные моменты времени

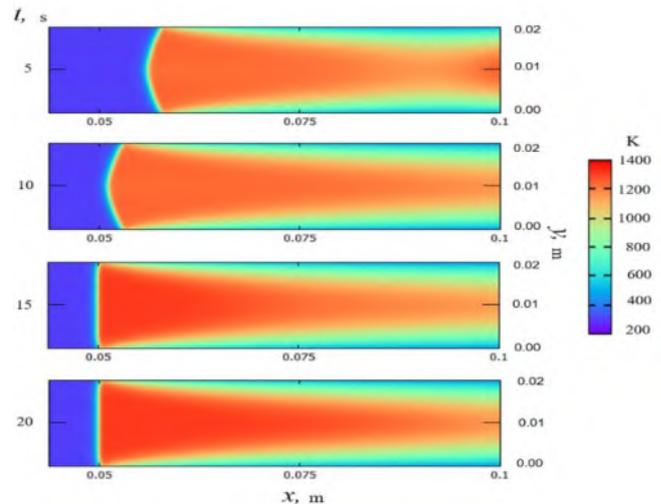


Рис. 6 – Стабилизация фронта ФГГ

Методика решения многомерных задач фильтрационного горения газа (ФГГ) в неоднородных средах, разработанная в рамках НИР института, была успешно применена для моделирования некоторых процессов ФГГ в составных пористых каркасах. Исследования показали возможность стабилизации фронта пламени на границе скачка теплофизических характеристик. В частности, выполнено моделирование стабилизации фронта горения в каркасе, состоящем из двух пористых тел с различной пористостью.

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.

В рамках данного проекта разработано и оптимизировано программное обеспечение для решения линейных алгебраических уравнений с произвольными трехдиагональными вещественными и комплексными матрицами для архитектуры Kunpeng 920. В частности, были осуществлены следующие исследования:

- разработка функций LAPACK $\{d, s, c, z\}$ *gt* $\{sv, trf, trs\}$;
- функциональное тестирование с использованием тестов Netlib LAPACK;
- разработка тестов производительности;
- сравнительный анализ с соответствующими функциями от Intel® MKL на архитектуре Xeon 6248;
- сравнительный анализ с соответствующими функциями от ArmPL на архитектуре Kunpeng 920.

В данных работах принимали участие сотрудница лаборатории вычислительной физики к.ф.-м.н. Я. Л. Гурьева (разработка методики тестирования и сравнительный анализ) и сотрудник лаборатории геофизической информатики к.ф.-м.н. Д. А. Караваяев (программная реализация альтернативного метода).

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Popov, A. S. Cubature formulas on the sphere that are invariant under the transformations of the dihedral groups of rotations with inversion // *Sib. Electron. Math. Rep.* 2021. V. 18, No 1. P. 703–709. DOI: 10.33048/semi.2021.18.050.
2. 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. V. 36, iss. 1. P. 17–32. DOI: 10.1515/rnam-2021-0002.
3. Ivanov, M. I., Kremer, I. A., Laevsky, Yu. M. A computational model of fluid filtration in fractured porous media // *Num. Analysis and Appl.* 2021. Vol. 14, iss. 2. P. 126–144. DOI: 10.1134/S1995423921020038.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Mikhailov, G. A., Kabanikhin, S. I., Laevsky, Yu. M., Penenko, V. V., Glinsky, B. M., Zagorulko Y. A., Shishlenin, M. A., Podkolodnyy, N. L., Penenko A. V. // *J. of Phys.: Conf. Ser. Intern. conf. "Marchuk Scientific Readings 2021".* Vol. 2099. P. 011001. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/011001.
2. Ivanov, M. I., Kremer, I. A., Yu. M. Laevsky. Mesh filtration problems with a two-flow structure of phase velocities // *J. of Phys.: Conf. Ser. Vol. 2099. Art. Num. 012006.* DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012006.
3. Karavaev, D. A., Laevsky, Yu. M. Simulation of heat transfer with considering permafrost thawing in 3D media // *J. of Phys.: Conf. Ser. Vol. 2099. P. 012007.* DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012007.
4. Laevsky, Yu. M., Nosova, T. A. Multidimensional computational models of gas combustion in heterogeneous porous medium // *J. of Phys.: Conf. Ser. Vol. 2099. P. 012010.* DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012010.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Математическое моделирование, обратные задачи и большие данные", Якутск, 18–25 июля 2021 г. – 1 пленарный доклад (Лаевский Ю. М.).
2. Конференция "Вычислительная математика и приложения", Сочи, 2–6 августа 2021 г. – 1 пленарный доклад (Лаевский Ю. М.).
3. 17-й Всероссийский семинар с международным участием "Динамика многофазных сред" (ДМС-2021), Новосибирск, 27 августа – 4 сентября 2021 г. – 1 доклад (Лаевский Ю. М., Иванов М. И., Кремер И. А., Носова Т. А.).
4. 19-я Всероссийская школа молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования", Абрау-Дюрсо, 13–18 сентября 2021 г. – 1 пленарный доклад (Лаевский Ю. М., Иванов М. И., Кремер И. А.).
5. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 4 доклада, из них 1 пленарный (Лаевский Ю. М., Иванов М. И., Кремер И. А., Носова Т. А.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Лаевский Ю. М.:

– член программного комитета Международной конференции "Математическое моделирование, обратные задачи и большие данные", Якутск, 18–25 июля 2021 г.,

– член программного комитета 19-й Всероссийской школы молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования", Абрау-Дюрсо, 13–18 сентября 2021 г.,

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 3

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 7

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 10

Докладов на конференциях – 8, в том числе 4 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 3

Кадровый состав

1. Лаевский Ю. М. г.н.с. д.ф.-м.н.

2. Голубева Л.А. н.с. к.ф.-м.н.

3. Иванов М.И. н.с.

4. Кремер И.А. с.н.с. к.ф.-м.н.

5. Литвиненко С. А. ведущ. инженер к.ф.-м.н.

6. Носова Т.А. м.н.с. к.ф.-м.н.

7. Попов А.С. с.н.с. к.ф.-м.н.

8. Сандер И. А. ведущ. программист

Носова Т. А. – молодой научный сотрудник.

Педагогическая деятельность

Лаевский Ю. М. – профессор НГУ, зав. кафедрой НГУ

Голубева Л. А. – доцент НГУ

Кремер И. А. – старший преподаватель НГУ

Литвиненко С. А. – ассистент НГУ

Руководство студентами

Синишина Е. А. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Лаевский Ю. М.

Ван Синьюй – 1-й курс магистратуры 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

Морские волны тепла сибирского шельфа и прилегающих акваторий

Д.ф.-м.н. Голубева Е. Н., Крайнева М. В., д.ф.-м.н. Платов Г. А., Якшина Д. Ф., Тарханова М. А.

Проведено исследование климатической изменчивости Северного Ледовитого океана и его окраинных морей с помощью трехмерной физико-математической модели, описывающей законы взаимодействия атмосферы, океана и морского льда, в численной реализации, разработанной в ИВМиМГ СО РАН. Результаты моделирования, подкрепленные анализом данных наблюдений, показали нарастающую интенсивность повышения летней температуры в сибирских арктических морях и прилегающих глубоководных акваториях во втором десятилетии настоящего столетия. Формирование максимальных значений температуры, превышающих 90 %-ный порог всех среднемесячных значений за период с 1981 по 2010 гг., позволяет рассматривать это климатическое явление как одно из самых опасных, а именно как морские волны тепла. Серия численных экспериментов на основе модели продемонстрировала (рис. 1), что возникновение морских волн тепла в сибирских арктических морях и прилегающей акватории тесно связано с освобождением региона ото льда (рис. 2), которое в равной степени вызвано тепловым и динамическим состоянием атмосферы и обусловлено происходившими в течение последних двух десятилетий сокращением ледового покрова и повышением температуры атлантических вод, поступающих в Северный Ледовитый океан.

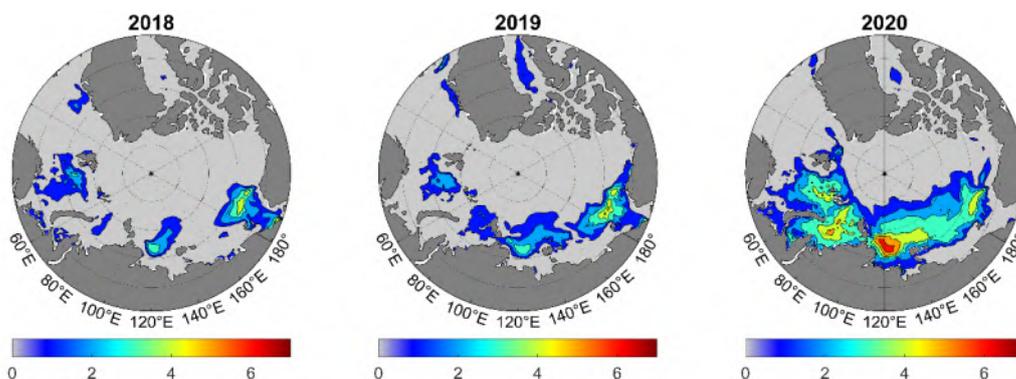


Рис. 1 – Аномалии модельной среднемесячной (сентябрь) поверхностной температуры, превышающие 90 %-ный порог всех среднемесячных значений за период с 1981 по 2010 гг.

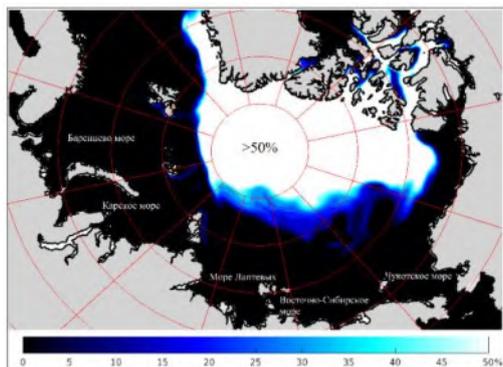


Рис. 2 – Среднее состояние концентрации морского льда (в %) для сентября 2018–2020 гг., полученное по результатам численного моделирования

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Golubeva, E., Kraineva M., Platov, G., Iakshina, D., Tarkhanova, M. Marine heatwaves in Siberian arctic seas and adjacent region // *Remote Sens.* 2021, 13(21), 4436. DOI: 10.3390/rs13214436 (WoS, Scopus Q1).
2. Golubeva, E., Platov, G., Kraineva, M. Numerical modeling of the consequences of "marine heatwaves" in the North Pacific for the Arctic Ocean // *EGU Gen. Assemb. Apr. 19–30, 2021.* EGU21-6921. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-6921.
3. Kraineva, M. V., Golubeva E. N. (2022) Formation of temperature anomalies in the Laptev Sea (2000–2020 Years) // *Processes in GeoMedia.* Chaplina T. (eds.). Springer Geology. Springer, Cham. Vol. V. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85851-3_19.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2021 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Математические модели физики атмосферы, гидросферы, экологии и методы решения прямых и обратных задач с усвоением данных, задач дистанционного зондирования Земли для исследования климата, природных и техногенных воздействий на окружающую среду".

Номер государственной регистрации 0251-2021-0003.

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 2021 г.

На этапе 2021 г. работы велись по следующим направлениям:

1. Разработка и тестирование новой версии модели климатической системы на основе модели INMCM5 (ИВМ РАН) и совместной модели океана и морского льда SibCIOM (ИВМиМГ СО РАН).

Модель ИВМ РАН версии INMCM48 является совместной моделью атмосферы и океана. Атмосферный блок имеет разрешение 2×1.5 градусов по долготе и широте и 21 вертикальный уровень. В нем интерактивно рассчитываются концентрации 10 аэрозолей и их радиационные свойства. Океанический блок имеет разрешение 1×1.5 градусов по долготе и широте.

Атмосферный и океанический блок могут работать независимо друг от друга, если настроить считывание необходимых океанических и атмосферных полей соответственно, например, из данных реанализа. При совместной работе связь между блоками осуществляется с помощью интерфейса MPI. Атмосферный блок передает океаническому 11 различных полей: коэффициенты трения CU, CT; давление на поверхности океана SLP; коротковолновая и длинноволновая радиации SW и LW; абсолютная температура TA; влажность QA; скорости атмосферы UA и VA; осадки PREC; потоки пресной воды OFWFLX.

Также осуществляется передача концентрации CO₂ в атмосфере и количество воды, попадающей в океан из устьев рек RIV (имеет размерность количества рек в модели). Блок океана и льда передает атмосферному блоку два поля: температуру поверхности океана SST и сплоченность льда CICE. Кроме того, передаются две постоянные: поток углерода в атмосферу SCC и общая концентрация углерода в океане SCOC.

Модель SibCIOM – совместная модель океана и льда. Океанический блок имеет разрешение от 1 до 0.25° в зависимости от конфигурации. Ледовые и океанические поля рассчитываются интерактивно, а другие необходимые данные, такие как атмосферные данные или данные с земли, считываются из баз данных. Работа модели осуществляется с помощью вспомогательной программы coupler, которая в определенные моменты получает от ледового и океанического блоков, атмосферных данных и данных земли необходимые поля, обрабатывает их и отправляет нужные данные ледовому и океаническому блоку для дальнейших расчетов. Обмен полями осуществляется также с помощью интерфейса MPI.

В новой совместной модели используется атмосферный блок модели INMCM и организуется передача необходимых атмосферных полей в coupler вместо использования готовых данных. В свою очередь, coupler передает необходимые атмосферному блоку океанические и ледовые данные модели SibCIOM.

Набор передаваемых атмосферным блоком данных включает следующие поля: zlvl – высота нижнего уровня скорости ветра, ztlvl – высота нижнего уровня температуры и влажности воздуха, uatm, vatm – компоненты скорости ветра, potT – потенциальная температура воздуха, Tair – абсолютная температура у поверхности, Qa – влажность воздуха, rhoa – плотность воздуха, Fsw, Flw – низходящие потоки коротковолновой и длинноволновой радиации, Frain – скорость выпадения осадков в виде дождя, Fsnow – скорость выпадения осадков в виде снега, cld – балл общей облачности, small_riv – расход речных стоков, CO₂ – концентрация углекислого газа

Атмосферный блок получает два поля и две константы: SST – температура поверхности океана, SICE – сплоченность льда, SCC – суммарный поток углерода из океана в атмосферу, SCOC – общая концентрация углерода в океане.

Решена задача создания дополнительных функций, осуществляющих передачу описанных полей между блоком coupler и атмосферным блоком с помощью интерфейса MPI. Протестирована техническая работа данной модели. Проведен предварительный тестовый расчет. Подготовлена серия численных экспериментов для исследования реакции климатической системы на увеличение концентрации CO₂ в атмосфере с учетом его поглощения океаном.

Усовершенствована базовая версия численной крупномасштабной модели океана SibCIOM. Новая версия модели включает эффект погружения льда в поверхностный слой океана. Модифицирован алгоритм расчета скорости течений с целью оптимизации проведения вычислений на параллельных компьютерах.

Численная модель океана и морского льда показала свою эффективность в исследовании климатических изменений, происходящих в Северном Ледовитом океане и его окраинных морях. На основе численных экспериментов было промоделировано экстремальное повышение температуры поверхностных вод в сибирских арктических морях в конце второго десятилетия настоящего столетия.

Проведены эксперименты по тестированию модели INMCM4.8. Значимый вклад в динамику климатической системы вносит стратосфера, поэтому для решения задач о чувствительности климатической системы к тем или иным изменениям важно, чтобы атмосферный блок модели адекватно описывал стратосферные динамические процессы. Проведен численный эксперимент, воспроизводящий современный климат. Численный эксперимент проводился для 100 лет модельного времени, из которых анализировались последние сорок. Были рассмотрены динамические поля в стратосфере Южного полушария за период с августа по декабрь, полученные с помощью INMCM4.8.

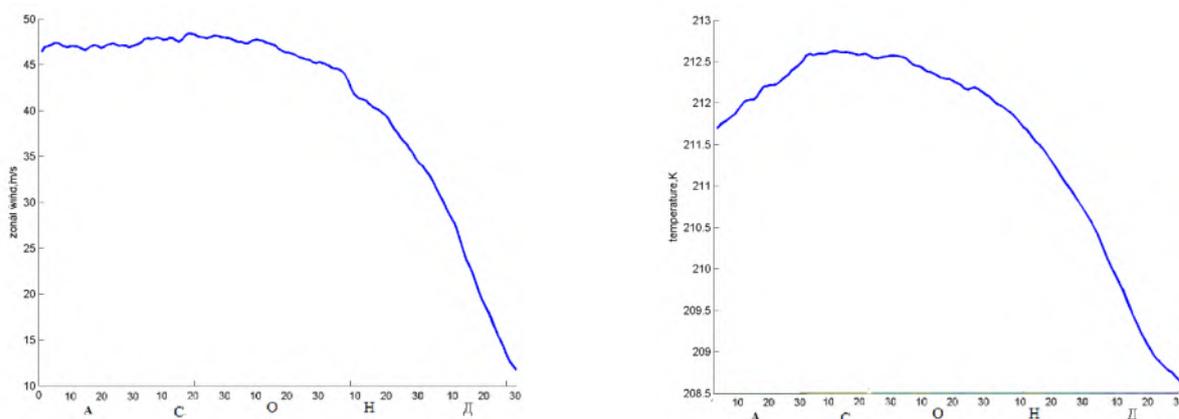


Рис. 3 – Средняя скорость западного ветра на 60° ю. ш. и средняя температура в области 20° ю. ш. – 40° ю. ш. на уровне $p = 50$ гПа в зависимости от времени года (с августа по декабрь)

Исследования показали, что определяющее влияние на устойчивость и характер разрушения полярного вихря оказывает температура субтропической стратосферы. На рис. 3 показан средний ход температуры субтропической стратосферы и скорости на 60° ю. ш. с августа по декабрь по модельным данным. В целом можно утверждать, что модель хорошо описывает эти величины, хотя процесс разрушения вихря в модели несколько запаздывает по сравнению с данными наблюдений: средняя дата разрушения антарктического полярного вихря – 18 декабря. Видно, что в этот период ход скорости зонального ветра повторяет ход температуры стратосферы, что может указывать на то, что основным фактором разрушения вихря является уменьшение градиента температуры стратосферы. Разрушение полярного вихря происходит посредством взаимодействия планетарных волн с зональным потоком. Общепринятым методом диагностики распространения волн является метод потоков Элиассена – Пальма. На рис. 4 показана вертикальная составляющая потока Элиассена – Пальма для модельных данных, характеризующая распространение волн в вертикальном направлении. В начале декабря, непосредственно перед разрушением вихря, происходит усиление вертикального распространения планетарных волн в стратосферу.

Модельные данные в целом адекватно описывают процессы взаимодействия планетарных волн со средним потоком и разрушения полярного вихря, несмотря на некоторую количественную погрешность.

2. Подготовлена концепция модели климата для долгосрочного прогнозирования, включающая блок биогеохимии атмосферы, суши и океана.

Согласно подготовленной концепции, биогеохимический блок включает четыре компонента, функционирующие в составе соответствующих подпрограммных модулей в каждой из компо-

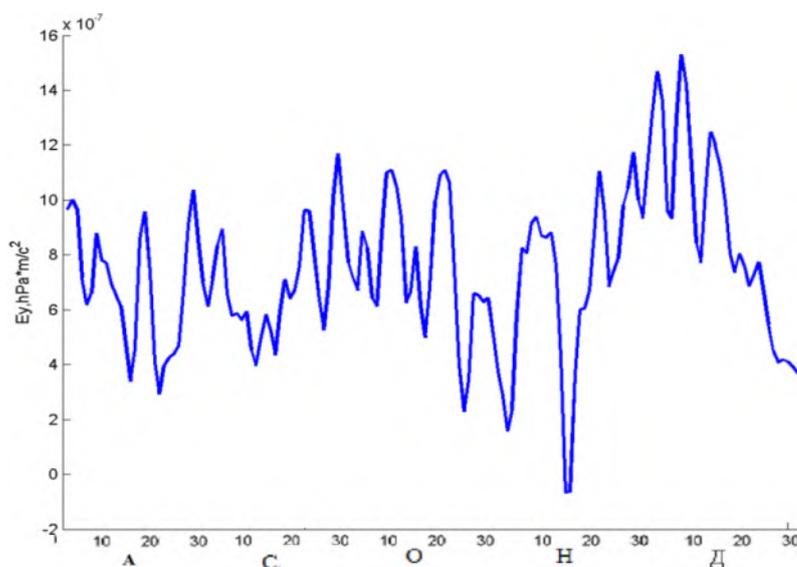


Рис. 4 – Вертикальная компонента потока Элиассена – Пальма на 60° ю. ш. при уровне давления 50 гПа

нент климатической системы: суша, атмосфера, океан и лед. Цель – дать максимально исчерпывающее описание динамики парниковых газов, существенно влияющих на климат планеты и ее регионов. Блок взаимодействия модулей *coupler* обеспечивает взаимодействие этих модулей друг с другом, а также, в отсутствие социо-экономической составляющей, обеспечивает необходимым набором антропогенных и вулканических источников парниковых и других газов. В составе модуля суши биогеохимический блок описывает эволюцию источников и поглотителей этих газов в составе растительных ландшафтов, болот, озер, почвы, вечной мерзлоты. В атмосферном блоке обеспечивается описание распространения и химической трансформации основных парниковых газов. Блок океана описывает поступление газов на границе с нижней атмосферой, его трансформацию в биологической цепочке и в цепи химических превращений, а также поглощение в результате выпадения остатков жизнедеятельности на дне океана. Блок морского льда призван описать или параметризовать биологическую активность, формирующуюся на нижней поверхности льда на границе с морской водой. В свою очередь, наличие парниковых газов в атмосфере определяет ее прозрачность для прямой и отраженной коротковолновой радиации, для длинноволнового излучения с поверхности суши, океана и льда (снега). Наличие биологической активности в верхнем слое океана и на границе льда и воды определяет их прозрачность для проникающего коротковолнового излучения.

3. Разработка концепции модели речного стока для регионального моделирования.

Цель работы – на основе концептуальной климатической модели формирования речного стока не только воспроизвести скорость добега воды с бассейна р. Лены к замыкающему створу, но и меженные расходы р. Лены в течение холодного периода гидрологического года. При достаточной точности расчета стока меженные и минимальные расходы могут позволить оценить естественные ресурсы подземных вод. В обновленную версию модели включена параметризация болот с помощью коэффициента задержки, который напрямую влияет на скорость как поверхностного, так и речного стоков.

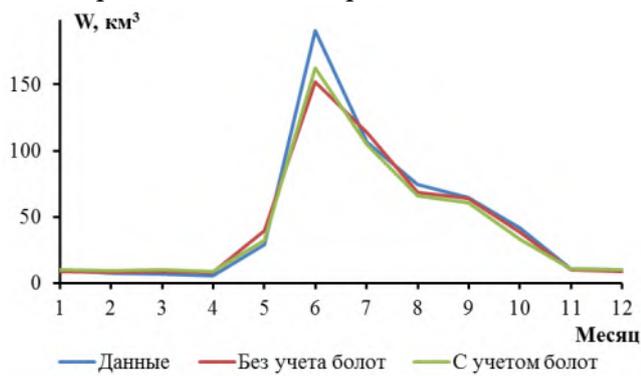


Рис. 5 – Среднегодовой модельный объем стока за период с 1980–2011 гг. на г/п Кюсюр

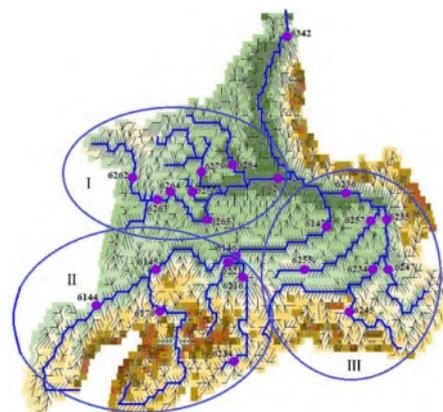
На рис. 5 представлены результаты моделирования с учетом болот в долине нижнего течения р. Лены и Центрально-Якутской низменности и без болот.

Проведенный анализ характера колебаний речного стока на основе кумулятивной кривой стока выявил три однородных гидрологических района (рис. 6). Калибровка сосредоточенных параметров модели для каждого из районов позволила выполнить моделирование зимнего меженного стока, согла-

сующегося с данными базы R-ArcticNet для расходов воды. Ранее основным фактором увеличения зимнего сезонного стока в замыкающем створе Кюсюр являлось регулирование стока Вилюйским водохранилищем. Переход от модели с сосредоточенными параметрами к модели с полураспределенными параметрами позволил моделировать зимний меженный сток в рамках концептуальной климатической модели речного стока.

Рис. 6 – Схематизация бассейна р. Лены разрешением $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ с выделенными гидрологическими районами:

- I* – бассейн реки Вилюй (закрывающий створ Хатырык-Хомо 6266);
- II* – бассейн верховья р. Лены (закрывающий створ Солянка 6146),
- III* – бассейн р. Алдан (закрывающий створ Верхоянский Перевоз 6236)



На рис. 7 представлены результаты моделирования по двум вариантам модели: с сосредоточенными (модельные расчеты *I*) и полураспределенными параметрами (модельные расчеты *II*) в закрывающих створах Хатырык-Хомо (бассейн р. Вилюй), Табага (Верхняя и Средняя р. Лена), Верхоянский Перевоз (бассейн р. Алдан) и Кюсюр (бассейн р. Лены). На врезанных диаграммах представлено сравнение модельного зимнего стока с результатами наблюдений.

На основе модели с полураспределенными параметрами проведено моделирование межгодовой изменчивости годового стока по данным реанализа MERRA. Результаты моделирования показали небольшой линейный тренд для годового стока с бассейна р. Лены за период исследования с 1985–2011 гг. (рис. 8). Отчасти разницу между модельными результатами и данными на г/п Кюсюр можно объяснить тем, что разность "осадки – испарение" по данным реанализа MERRA

Рис. 7 – Данные объемов воды в соответствующих закрывающих створах и модельные расчеты по двум вариантам модели

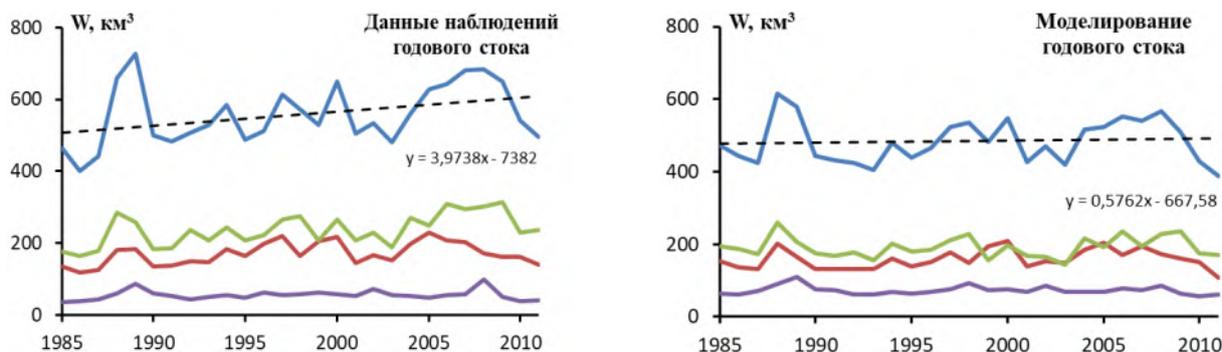
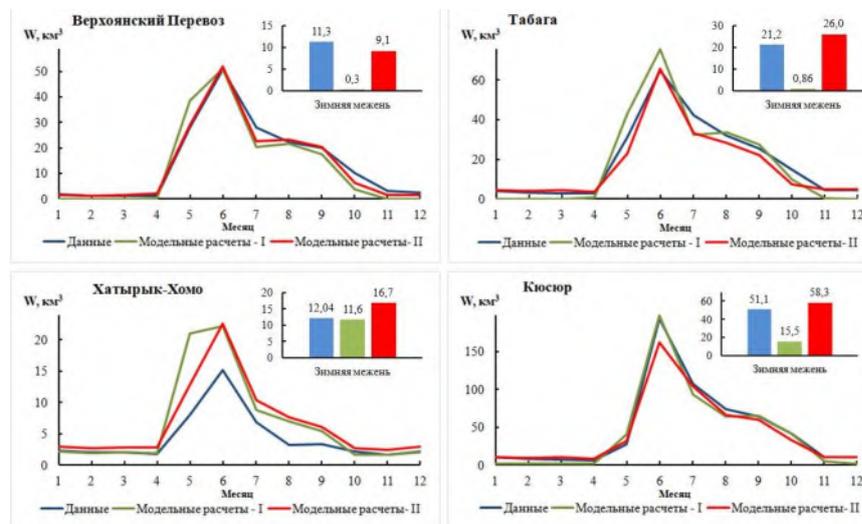


Рис. 8 – Многолетние колебания годового стока по данным R-ArcticNet, ANYST и модельным результатам на реках Лены (Кюсюр, Табага), Алдан (Верхоянский Перевоз) и Вилюй (Хатырык-Хомо)

Многолетний среднегодовой водный баланс по бассейну р. Лены
за период 1980–2011 гг. по данным MERRA (мм)

	Осадки, P	Испарение, E	P-E	Речной сток (Кюсюр)
Бассейн р. Лены	888,7	732,3	156,4	229,5

на 31,8 % меньше наблюдаемого стока (табл.), хотя в долгосрочной перспективе эти слагаемые уравнения баланса должны быть близки друг другу.

4. Разработка численной модели для оценки современного состояния субмаринной криолитозоны в донных отложениях арктического шельфа. Верификация модели.

Исследование пространственного распространения и состояния шельфовых многолетнемерзлых пород (ММП) возможно лишь на основе ретроспективного математического моделирования теплофизического состояния грунта за достаточно длительные промежутки времени (десятки и сотни тысяч лет). Такие модели базируются на палеотемпературных сценариях, описывающих ход температур на поверхности пород при трансгрессиях, регрессиях моря и оледенениях. Разработанная модель субмаринной криолитозоны основана на решении нестационарной тепловой задачи Стефана при наличии в расчетной области движущихся фронтов фазовых превращений влаги, а на границах области – переменных граничных условий разных родов. Модель включает два связанных одномерных уравнения диффузии – тепла и соли. Для уравнения диффузии тепла на границе между мерзлыми и талыми породами используются условие равенства температуры грунта температуре замерзания воды и условие Стефана для движения границы раздела фаз. Теплоемкость и теплопроводность зависят от состояния отложений (замороженные или незамерзшие). Значения этих двух коэффициентов также зависят от глубины под морским дном и состава пород. Допускается распространение соли только в незамерзших слоях. Скрытая теплота плавления во время образования и таяния порового льда учитывается явно.

Влияние солености на температуру замерзания приводит к зависимости между уравнениями тепло- и солепереноса для мерзлого слоя, при этом распространение тепла и соли в незамерзшем грунте не зависят друг от друга. Донные отложения считаются насыщенными влагой, и содержание воды в каждом слое соответствует его пористости. Принципиальная особенность математической модели такой задачи состоит в учете не только фазовых переходов, но и переноса соли в пористой среде. В отличие от классической задачи Стефана, температура фазового перехода зависит от давления и солености. Эта особенность является существенной, поскольку приводит к возникновению ситуации, когда фазовые переходы реализуются в протяженной области.

Для задания верхних граничных условий используются палеогеографические сценарии изменений температуры поверхности пород, различавшиеся в соответствии с районированием каждого шельфа по истории их развития. При разработке сценариев учитывался ряд существенно изменяющихся факторов природной среды. В результате температура на поверхности пород в расчетный период получалась как синтез нескольких зависимостей: зависимости изменения среднегодовых температур водной толщи моря с глубиной; зависимости скорости поднятия (опускания) уровня моря от времени; изменения температур поверхности пород на осушенных участках в расчетный период; широтных и секторальных изменений климатических характеристик. На нижней границе расчетной области задавалась постоянная во времени плотность глинного потока тепла (условие II рода), основанная на пространственных данных.

Для решения задачи используется метод ловли фронта в узел пространственной сетки. Размеры расчетной области по вертикали составили 1500 м. Согласно предварительным численным оценкам, такие размеры области обеспечивают отсутствие влияния нижней границы на динамику подошвы мерзлых толщ. Моделирование проводится для области СЛО в каждой сеточной ячейке с пространственным разрешением 1° при глубине воды менее 150 м. Период расчета – один полный ледниковый цикл (120 тыс. лет). Численная реализация модели основана на методе прогонки на дискретной вычислительной сетке с вертикальным шагом 0.5 м и неявной схеме по времени с шагом 1 месяц.

Проведено тестирование разработанной модели субмаринной криолитозоны с помощью математического моделирования на участке, обеспеченном геокриологическими данными. Так как фактические данные для шельфа отсутствуют, были использованы данные буровой скважины (с-А) прибрежной области о. Новая Сибирь. Геологический разрез задавался в соответствии с результатами бурения в верхних 200 метрах (глубина скважины), а в нижних слоях (до 1500 м) – в соответствии с данными геологических исследований на островах Новая Сибирь и Фаддеевский и справочных данных (рис. 9а). По геотермическим наблюдениям в скважине среднегодовая температура составила -13.2°C , мощность мерзлого слоя, вычисленная по геотермическому градиенту, 235–255 м. При построении модели имеющиеся по фактическим данным пласты бурого угля объединялись в один или два пласта с суммарной мощностью 46 и 35 м. На рис. 9б приведены три модельные термограммы. Наиболее близкие к измеренной температуре на глубине 200 м в скважине с-А (-2°C) значения получены для разреза, включающего один объединенный пласт мощностью 46 и 35 м при теплопроводности $\lambda = 0.55$ и 0.42 мВт/м·К соответственно. Отклонения от измеренной температуры составили $+0.2$ и -0.5°C .

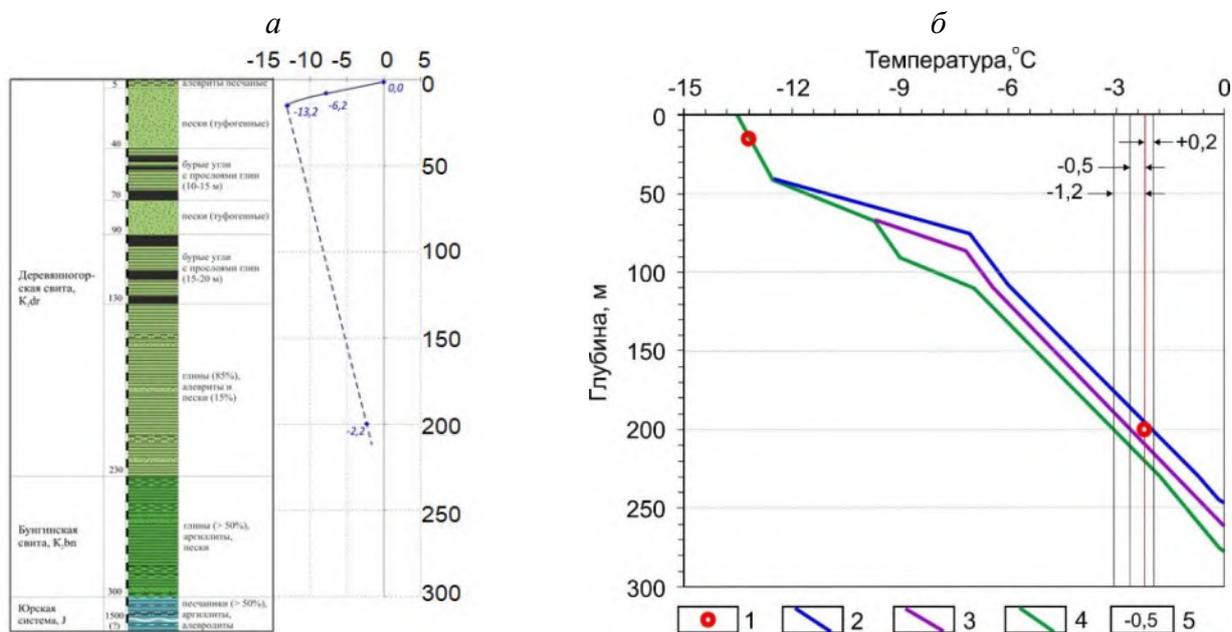


Рис. 9 – Верификация модели субаквальной мерзлоты: а – геологический разрез скважины по фактическим данным; б – модельные оценки мощности мерзлоты: 1 – температура по данным геотермических наблюдений в скважине на глубинах 15 и 200 м; 2–4 – модельные оценки при задании различных пластов бурого угля (2 – мощностью 35 м и $\lambda = 0,42$ Вт/м·К; 3 – мощностью 46 м и $\lambda = 0,55$ Вт/м·К; 4 – тоже при задании в виде двух пластов общей мощностью 46 м при $\lambda = 0,55$ и $0,7$ Вт/м·К в верхнем и нижнем слоях соответственно); 5 – величина отличия модельной температуры пород от натурной, $^\circ\text{C}$

5. Разработка модели анализа данных наземного и спутникового мониторингов загрязнения в окрестностях точечного источника.

Разработана численная модель восстановления характеристик активной фазы подъема дымового шлейфа по данным наблюдений.

Достаточно полная картина распространения дымовых шлейфов от труб крупных промышленных предприятий и ТЭЦ фиксируется на снимках из космоса, позволяющих детально проследить активную фазу подъема дымовых факелов и их дальнейший пассивный перенос в атмосфере. Траектории шлейфов характеризуют скорость и направление ветра. При определенных метеорологических условиях визуальная протяженность шлейфов может достигать нескольких десятков километров.

Методы численного решения уравнений гидротермодинамики атмосферы дают возможность описать процессы распространения дымовых смесей в локальном и региональном масштабах. Для этого необходимо использование больших объемов информации, включающей сведения о текущих метеорологических условиях и характеристиках источников выбросов примеси. Как правило, часть параметров источников отсутствует либо требует существенного уточнения. К ним, в частности, следует отнести эффективную высоту подъема дымового шлейфа и интенсивность эмиссии источника. Необходима также детальная информация о высотном профиле ветра.

Разработана численная модель восстановления характеристик активной фазы подъема дымового шлейфа по данным наблюдений. Базовыми условиями в модели оценивания являются решения уравнений гидротермодинамики атмосферы. С использованием спутниковой информации (рис. 10а) проведено численное восстановление изменения температуры и скорости подъема газозвушной смеси от высотной трубы Гусиноозерской ГРЭС (рис. 10б, 10в).

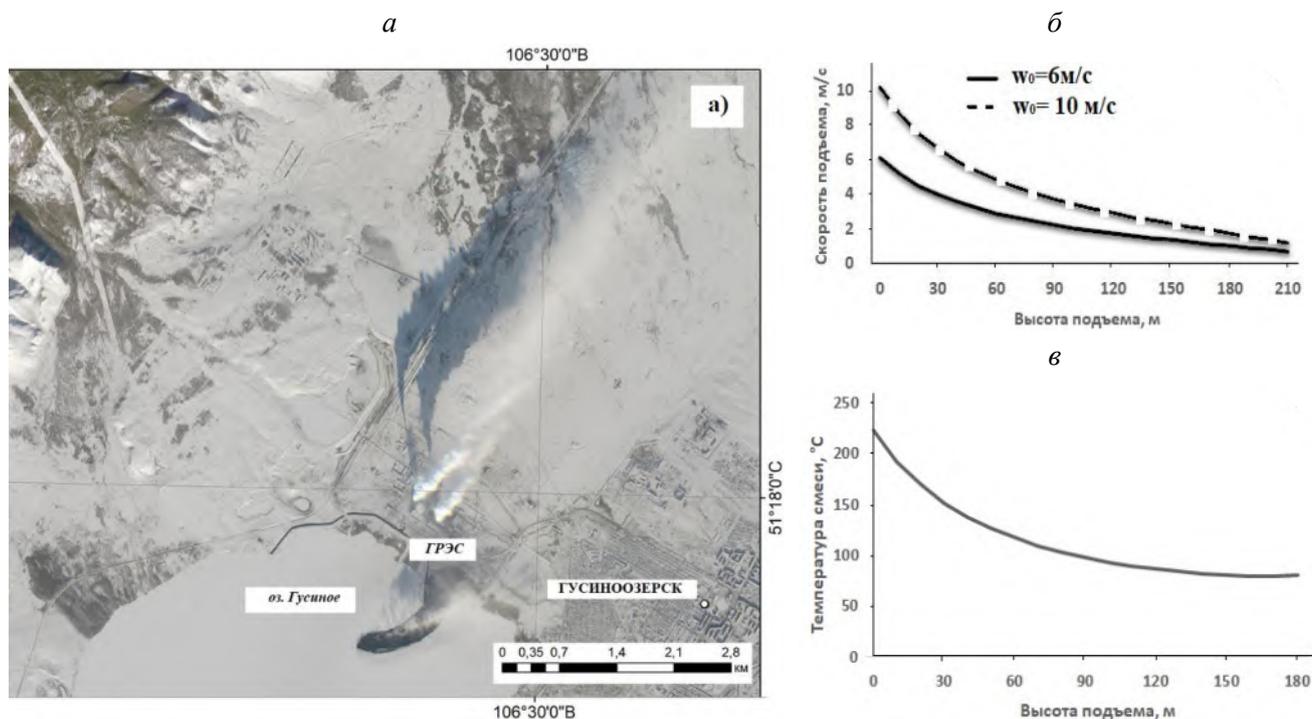


Рис. 10 – Спутниковый снимок Гусиноозерской ГРЭС (а); оценки скорости подъема (б) и изменения температуры (в) по оси дымового шлейфа от основной трубы станции

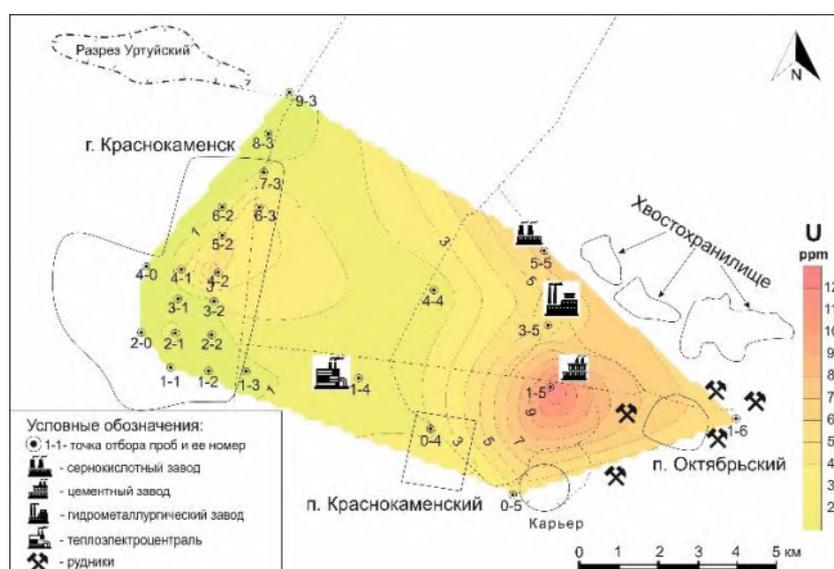
Проведенные исследования показали, что применение предлагаемого подхода наиболее эффективно в зимний период. На спутниковых снимках благодаря снежному покрову обеспечивается цветовая однородность земной поверхности. При таких условиях наблюдается наиболее высокая контрастность тени шлейфов на поверхность. Использование спутниковых наблюдений позволяет получить объективную оценку высоты подъема дымового факела. В зависимости от метеорологических условий и параметров выбросов дополнительная высота подъема дымовых шлейфов может достигать нескольких сотен метров, что необходимо учитывать при расчетах распространения примесей в атмосфере.

Разработаны модели оценивания полей концентраций примесей в окрестностях пылящих площадных источников.

Цель данного исследования – изучение процессов атмосферных выносов урана от хвостохранилищ в окрестностях г. Краснокаменск Забайкальского края по данным изучения листьев тополя – биогеохимического индикатора и разработка методов численной интерпретации результатов экспериментальных исследований атмосферного загрязнения под воздействием нерегулярных наземных источников.

Разработаны модели оценивания полей концентраций примесей в окрестностях пылящих площадных источников. В качестве базового соотношения используются соотношения баланса массы легкой примеси в приземном слое атмосферы. Проведена апробация предложенного подхода на данных биомониторинга урана в районе г. Краснокаменск. В исследованиях использовались листья бальзамического и черного тополей. Этот вид древесной растительности широко применяется для озеленения селитебных и промышленных зон городов, что обеспечивает возможность пробоотбора по относительно равномерной сети и заданным направлениям. Схема отбора проб представлена на рис. 11. Анализ данных биомониторинга показал существенную динамику уменьшения содержания урана в листьях с удалением от хвостохранилища в западном и северо-западном направлениях. Западное направление включает точки отбора проб (1-5), (0-4), (1-4), (1-3), (1-2), (1-1). Северо-западное направление содержит точки (3-5), (4-4), (8-3), (6-2), (9-3). Для указанных выше направлений на основе предложенных моделей оценивания проведено численное восстановление концентраций урана в листьях. Результаты численного моделирования представлены на рис. 12.

Рис. 11 – Схема отбора проб листьев тополя. Ореол рассеяния урана от хвостохранилища Приаргунского горно-химического комбината (г. Краснокаменск) по данным биомониторинга



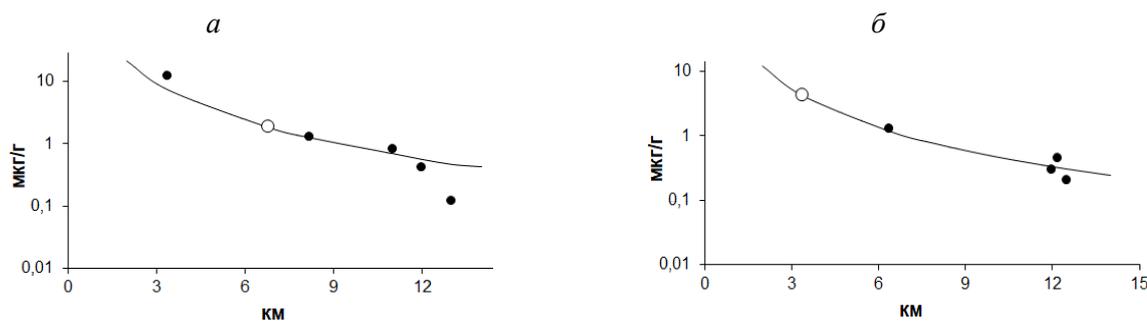


Рис. 12 – Измеренные и численно восстановленные содержания урана в западном (а) и северо-западном направлениях (б) от источника

Совместный анализ экспериментальных исследований и данных численного моделирования позволяет оценить экологическую ситуацию на определенных территориях, выявлять и контролировать источники примесей. В перспективе это создает возможности для разработки соответствующих геоинформационных систем. Для дальнейшего развития эффективных моделей оценивания атмосферного загрязнения от наземных источников необходимо создание информативных сетей биогеохимического мониторинга.

Проведены численные исследования влияния метеорологических условий на процессы длительного атмосферного загрязнения городских территорий.

Целью исследования является анализ взаимосвязей между режимом ветра и повышенными концентрациями бенз(а)пирена (БП) в воздухе г. Искитиме в зимние периоды. Проведены численные исследования влияния метеорологических условий на процессы длительного атмосферного загрязнения городских территорий, базирующиеся на совместном анализе данных метеорологических станций и информации, получаемой со стационарных постов контроля качества воздуха на сети Росгидромета. Предложенный подход был апробирован на г. Искитиме, включенном в программу "Чистый воздух". По данным Росгидромета, в 2018 г. среднегодовая концентрация БП в городе составила 5.2 ПДК. В зимний период 2018 г. среднемесячная концентрация БП достигала 15–20 ПДК.

Выполнен анализ связей повторяемости выносов примесей от доминирующих источников с измеренными концентрациями БП на стационарном пункте наблюдения г. Искитима для зимних периодов времени. Исследовано влияние повторяемости ветров различных направлений на формирование уровня атмосферного загрязнения на посту контроля. С учетом взаимного расположения пункта наблюдения и основной автомагистрали города показан заметный вклад ветров юго-западных направлений в увеличение концентраций БП.

Получена статистическая зависимость между количеством штилей, фиксируемых в течение месяца на метеорологической станции г. Искитима, и значениями концентраций БП. На рис. 13 приведены значения повторяемостей штилей и концентраций БП для январей, февралей 2014–2019 гг. Выполнен анализ статистических связей данных наземного мониторинга загрязнения снежного покрова со снеговым индексом (NDSI), полученным с использованием спутниковой информации. На основе полученных зависимостей проведен анализ пространственной картины загрязнения территории г. Искитима и его окрестностей.

Результаты проведенных исследований позволили выявить существенный вклад влияния повторяемостей штилей и слабых ветров в повышенные уровни содержания БП в атмосфере

г. Искитима в зимних условиях. С учетом взаимного расположения пункта контроля и находящейся рядом автомагистрали показано заметное влияние повторяемости ветров юго-западных направлений на увеличение концентрации БП.

Проекты 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 модели океана и морского льда проведены численные эксперименты по чувствительности гидрологических и ледовых полей Северного Ледовитого океана к формированию блокирующих атмосферных процессов в арктических шельфовых морях и прилегающей акватории. Рассматривались два варианта блокирующих режимов: циклонический и антициклонический. Эксперименты были проведены на 5 лет модельного времени. Введенные аномалии динамического атмосферного воздействия накладывались на поле ветра из данных реанализа NCEP/NCAR. Блокирующий антициклон (циклон) задавался повышением (понижением) атмосферного давления в выбранной точке моря с радиусом действия около 800 км. Скорость ветра, рассчитанная на основе геострофических соотношений, добавлялась к скорости ветра, поступающей в модель из данных реанализа. Дополнительное изменение температуры атмосферы, сопутствующее формированию блокирующего режима, не предполагалось. Центр действия добавочного циклона (антициклона), расположен в море Лаптевых, около западного побережья Новосибирских островов. Временной интервал расчета 2016–2020 гг. Результаты численных экспериментов показывают, что усиление южных ветров способствует раннему освобождению и позднему установлению ледового покрова на шельфе сибирских морей. Ветры нагонного характера способствуют сохранению ледового покрова даже в летний период. В зимний период также заметны изменения в ледовом покрове. В частности, при антициклоническом блокинге в море Лаптевых перестает формироваться припай в море Лаптевых, полынья формируется не на материковом склоне, а у побережья западной части моря. Увеличение периода открытой воды летом способствует повышению температуры поверхностного слоя: в Восточно-Сибирском море при заданном циклоне и в море Лаптевых, в том числе и в глубоководной части бассейна при антициклоне. Интересны изменения, происходящие ниже поверхностного слоя в южной части Евразийского бассейна. Для двух

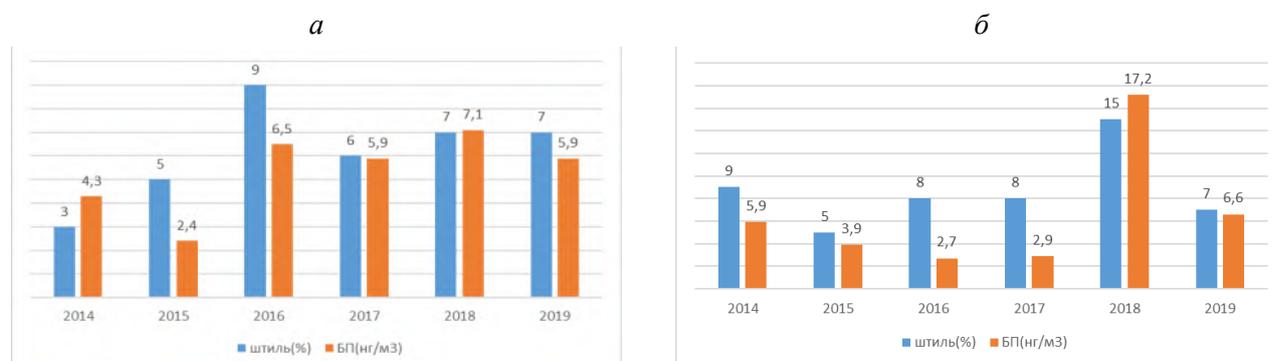


Рис. 13 – Повторяемости штилей (%) и измеренных концентраций БП (нг/м³) на стационарном посту г. Искитима в зимние месяцы 2014–2019 гг.: а – январь; б – февраль

вариантов добавочного форсинга (циклон/антициклон) численная модель показывает реакцию, противоположную поверхностной: повышение температуры поверхностного слоя с глубиной меняется на охлаждение в слое атлантических вод, и наоборот. Анализ результатов моделирования приводит к следующему заключению: сохранение ледового покрова в глубоководной части моря Лаптевых при циклоническом форсинге не позволяет прогреться верхнему слою океана, однако сохраняющийся ледовый покров препятствует выхолаживанию верхнего слоя и интенсивному перемешиванию в осенне-зимний период, тем самым сокращая и обмен тепла на верхней границе атлантических вод, что приводит к постепенному повышению температуры в слое атлантических вод. При включении антициклонического добавочного форсинга, наоборот, в летний период в море Лаптевых происходит прогрев поверхностных слоев, а в осенне-зимний период в дополнение к интенсивному перемешиванию усиливается апвеллинг вдоль материкового склона, способствующий охлаждению вод атлантического слоя. Анализ результатов моделирования показывает, что ниже поверхностного слоя различия в двух экспериментах наиболее выражены в Евразийском бассейне. Просмотр результатов моделирования в динамике показал, что отклонения в поле температуры от результатов контрольного эксперимента, возникшие на материковом склоне моря Лаптевых, сдвигаются на восток (в соответствии с траекторией следования атлантических вод) и постепенно там затухают.

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.

Оценки вклада океанических источников метана (2–40 Тг/год) невелики по сравнению с наземными источниками, такими как заболоченные территории. Однако океанические источники CH_4 в Арктике могут быть недооценены и играть значимую роль из-за больших объемов метана, которые находятся под морским дном в слое многолетнемерзлых пород и в зоне стабильности газовых гидратов. Количественная оценка выхода метана из морского дна и его дальнейшего потока в атмосферу – основные нерешенные вопросы, касающиеся морского цикла метана.

На основе региональной модели океан – лед SibCIOM выполнены расчеты по моделированию состояния водных масс, ледового покрова Северного Ледовитого океана и переноса растворенного метана для периода с 1970 по 2019 г. Проведен модельный анализ эмиссии метана на акватории арктических морей как следствие выхода газа на границе раздела океан – дно, вызванного деградацией субаквальной мерзлоты и увеличением ее проницаемости. Совместные расчеты по моделированию состояния водных масс, ледового покрова и переноса растворенного метана дали возможность:

- оценить перенос метана, поступившего из донных отложений в водную толщу;
- оценить, какое количество CH_4 сможет достичь атмосферы;
- оценить роль океана и морского льда в этом процессе;
- оценить влияние климатических изменений последних десятилетий в этом процессе.

Получены оценки эмиссии метана в ледовый период. Выбросы в этот период связаны с участками открытой воды в ледяном покрове – трещинами и полыньями. Концентрация CH_4 подо льдом в поверхностных водах может достигать 5000 нМ. В результате значительные выбросы получены в ледовый период с участков полыней. Однако количество таких выбросов ограничено

открытой акваторией. Полученная пространственная изменчивость потоков метана в атмосферу в первую очередь связана с особенностями циркуляции и ледовой обстановки. Самые высокие потоки CH_4 получены в осенние месяцы. Это указывает на роль конвективного перемешивания водного столба и увеличения скорости ветра в этот период. Расчетные выбросы метана из морей арктического шельфа в атмосферу не превысили 2 Тг CH_4 /год. Показано, что моря Восточно-Сибирского шельфа вносят наибольший вклад в общую эмиссию метана в регионе.

Впервые получена оценка количества поступившего из донных отложений метана, которое достигает атмосферы. В зависимости от рассматриваемого периода эта доля составляет 4–10 %. Более продолжительные периоды открытой воды и снижение сплоченности льда способствуют увеличению доли метана, который может выйти в атмосферу в осенние и зимние месяцы. Это в свою очередь приводит к росту суммарного годового потока метана. В условиях продолжающегося и прогнозируемого потепления климата в ближайшие годы рост выбросов метана в арктических морях будет определяться не только потоками газа из отложений, а также процессом изменения ледяного покрова Арктики.

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.

Разработаны малопараметрические модели реконструкции полей концентраций и определения параметров источников. На основе наземного и спутникового мониторингов снежного покрова проведено оценивание загрязнения территорий Искитимо-Линёвской промышленной зоны, численно восстановлены поля аэрозольных выпадений примесей от Чернореченского цементного и Новосибирского электродного заводов в зимнем сезоне 2020/21 гг. Предложена модель оценивания и проведено численное восстановление содержания урана на маршрутах отбора листьев тополя в окрестностях хвостохранилища Новосибирского завода химконцентратов и золоотвала Новосибирской ТЭЦ-4. На основе статистического анализа метеорологических условий и данных наблюдений на постах Росгидромета в г. Искитиме и Новосибирске установлены причины возникновения чрезвычайно высоких концентраций бенз(а)пирена в зимние месяцы 2018 г. По результатам проведенных исследований подготовлены базы данных многокомпонентного загрязнения снежного покрова в окрестностях Новосибирской ТЭЦ-5 и Чернореченского цементного завода. Разработана геоинформационная система для численного анализа данных наземного и спутникового мониторинга загрязнения территорий Новосибирской области.

Прочие гранты

Крупный научный проект Министерства образования и науки № 075-15-2020-787 "Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории".

Блок 4 "Численный анализ данных мониторинга загрязнения атмосферы"

Ответственные исполнители – д.ф.-м.н. Рапута В. Ф., к.ф.-м.н. Леженин А. А.

В рамках постановок обратных задач атмосферного переноса примесей проведено построение моделей реконструкции полей регионального загрязнения территорий точечными и площад-

ными источниками с использованием малого количества точек наблюдений. Предложены алгоритмы оценивания параметров моделей, оптимального размещения точек наблюдений. На основе предложенного подхода выполнено численное восстановление полей выпадений тяжелых металлов на снеговой покров в окрестностях г. Иркутска.

Разработана численная модель восстановления характеристик активной фазы подъема дымового факела по данным наблюдений. Базовыми условиями в модели оценивания являются решения уравнений гидротермодинамики атмосферы. Применение аналитического представления решений системы уравнений движения и притока тепла для нейтрально стратифицированной атмосферы позволило представить оценки параметров модели в явном виде. Выполнен численный анализ активной стадии подъема дымовых шлейфов от высотных труб Гусиноозерской ГРЭС и Ново-Иркутской ТЭЦ на базе на зимних спутниковых снимков.

На основе асимптотик решений уравнения турбулентной диффузии предложены модели оценивания полей концентраций диоксидов серы, азота, субмикронных фракций аэрозольных частиц по данным измерений в пос. Листвянка на станции EANET. Наиболее значимыми источниками этих примесей являются крупные ТЭЦ, расположенные в городах Иркутске, Ангарске, Шелехове. Основное внимание уделяется анализу эпизодов прохождения дымовых шлейфов ТЭЦ через пункт наблюдений. В качестве дополнительных сведений используются данные измерений с метеорологических и аэрологических станций. Для территории Южного Байкала представлены результаты численного восстановления полей концентраций и оценивания параметров трансформации загрязняющих примесей от удаленных источников.

Грант Министерства образования и науки № 075-15-2021-947 в форме субсидии из федерального бюджета на обеспечение проведения научных исследований российскими научными организациями совместно с организациями из стран – членом ЕС в рамках многостороннего сотрудничества в программе "Горизонт-2020" "Климатические взаимодействия и обратные связи: ключевая роль морского льда и снега в полярной и глобальной климатической системе".

Руководитель – д.ф.-м.н. Платов Г. А.

Цель проекта – улучшение представления о том, как быстрое сокращение морского льда взаимосвязано с физическими и химическими изменениями в полярных океанах и атмосфере. Для эффективного планирования жизнедеятельности и своевременной адаптации к полярным и глобальным климатическим изменениям проект стремится достичь более полного понимания причин и последствий климатических процессов в полярных широтах. Модели системы климата и Земли (ESM) являются ключевыми инструментами прогнозирования изменений климата с целью смягчения их воздействия на человека и экономику и способствуют их постепенной адаптации к новым условиям. Однако эти модели имеют существенные недостатки в описании процессов взаимодействия океана, льда/снега и атмосферы в полярных районах, что ограничивает их способность прогнозировать удаленные и обратные связи и взаимодействия в данной системе.

В ходе реализации 1-го этапа по направлению исследований в 2021 г. решены следующие задачи:

1. Проведен анализ климатических изменений последнего столетия исходя из данных многолетних наблюдений применительно к полярным регионам, выявлены атмосферные циркуляционные моды (ЕОФ), их тенденций. Получен синтезированный форсинг для проведения

экспериментов по оценке чувствительности климатической системы по отношению к индивидуальным возмущениям этих мод.

2. Проведены предварительные численные эксперименты с помощью модели SibCIOM для "исторического" периода. Настроены параметры модели для проведения основной серии экспериментов с моделью SibCIOM.

3. Выявлены основные циркуляционные моды для арктического региона и отдельных морей и их взаимосвязи с теплосодержанием верхнего слоя океана.

4. Проведена апробация новой национальной модели климатической системы Земли на основе имеющейся модели INMCM с включением модели океана и льда SibCIOM. Проведено техническое тестирование программного кода.

5. Выполнен анализ наиболее известных и востребованных интегрированных оценочных математических моделей экономики и климата и их модернизация с учетом целей проекта.

При решении задач проекта основным инструментом исследования является численное моделирование, основанное на использовании современных сложных моделей климатической системы, моделей промежуточной сложности и мезомасштабных региональных моделей с использованием данных натурных и спутниковых наблюдений. В рамках такой иерархии моделей возможна теоретическая интерпретация результатов моделирования сложных моделей в терминах более простых в широком спектре масштабов исследуемых процессов.

Проекты РНФ

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

Руководитель – д.ф.-м.н. Платов Г. А.

В отчетном году основное внимание было уделено исследованию чувствительности динамики крупномасштабной циркуляции и климата атмосферы Арктики к изменчивости Северного Ледовитого океана и морского льда. В рамках этой задачи с использованием модели INMCM48, разработанной в ИВМ им. Марчука РАН, проведена серия численных экспериментов для выявления непосредственной роли процесса сокращения морского льда в формировании климатических трендов в Северном полушарии. В качестве механизмов, способствующих сокращению морского льда, использовались увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере и уменьшение отражательной способности льда и снега. Одним из мотивов для изучения реакции атмосферы на сокращение морского льда в Арктике являлась ее возможная связь с экстремальными погодными явлениями в средних широтах, одна из основных причин возникновения которых – рост волновой активности струйных течений в атмосфере.

Численные результаты показали следующие наиболее заметные последствия уменьшения ледового покрова: ослабление температурного градиента на уровне тропопаузы в средних широтах, уменьшение скорости зонального ветра в районе 50–60°N и ее увеличение в субтропиках, а также усиление волновой активности в Европе, Западной Америке и Чукотке и ее ослабление на юге Сибири и в Казахстане. Изменения волновой активности атмосферных струйных течений приводят к изменению частоты и интенсивности блокирующих процессов в атмосфере. Проведенный по результатам численных экспериментов анализ интенсивности блокирования показал, что в

результате сокращения арктических льдов максимум интенсивности у Британских островов смещается на восток, усиливая зимние уральские блокирования на 3–6 %. Исследования взаимосвязи между уральским блокированием и фоновыми условиями, связанными с потеплением Арктики над Баренцевым и Карским морями, подчеркивают, что интенсивность уральского блокирования в значительной степени связана с этим потеплением. Зимой интенсивность блокировок в районе Аляски и Охотского моря также увеличивается. Летом изменения интенсивности незначительны, около 1 %, и в основном касаются участков, свободных ото льда. Сравнение частоты и интенсивности блокирования показало, что чем чаще происходят блокировки, тем меньше их интенсивность.

Также в экспериментах по сокращению арктических льдов выделены общие сезонные тенденции преобразования волновой энергии в блокирующую, которые показали одновременное увеличение энергии блокирований в северных и снижение в южных районах Северного полушария зимой. Летние тренды включают ослабление блокирующих процессов в атмосфере в районах, близких к субтропикам, а также их ослабление вдоль линии морей Баренцева, Карского, Лаптевых и усиление в Беринговом и Чукотском морях. Кроме того, в летний период блокирования усиливаются в Восточной Европе, однако при чрезмерной потере льда это усиление становится незначительным.

В рамках обозначенной выше задачи рассмотрено еще одно опасное климатическое явление – морские волны тепла (МВТ). В условиях климатического тренда ослабленный полярный вихрь способствует увеличению локальной волновой активности и, как следствие, увеличению меридиональных потоков между континентом и Северным Ледовитым океаном. В течение отчетного периода были выполнены следующие работы: проанализированы межгодовые изменения температуры поверхности моря на основе спутникового набора данных о глобальной суточной температуре поверхности океана (SST), чтобы выявить наиболее заметные процессы и области большинства изменения в 2000–2020 гг.; с помощью численного моделирования выявлены наиболее важные для этого изменения физические процессы.

Проведенный анализ данных спутниковых и наземных наблюдений показал, что в сибирских арктических морях наиболее аномальные события происходили с 2018 по 2020 г. Наиболее сильные МВТ возникли у береговой линии, но потепление распространилось на северные глубоководные районы и приблизилось до 80°N. Линейные тренды общей продолжительности МВТ указывают на их интенсивное увеличение над шельфовой зоной, а не только в устьях рек. В среднем продолжительность МВТ в Карском море, море Лаптевых и Восточно-Сибирском море увеличилась на 10–12 дней в год. Значительная часть (около 40 %) этих трендов объясняется трендом потепления климата в арктических морях. Также выявлено, что в течение 2016–2020 гг. происходило постепенное расширение площади, занимаемой МВТ в море Лаптевых и прилегающей глубоководной области. В 2018–2020 гг. в море Лаптевых наблюдалось потепление, превышающее климатический тренд.

Трехмерное численное моделирование Северного Ледовитого океана, основанное на совместной модели морского льда и океана SibCIOM, показало ускоренное сокращение морского льда и рост SST в сибирских арктических морях к концу 2011–2020 гг. Серия тестов на чувствительность показала, что

– основными факторами, влияющими на потерю морского льда в Арктике и формирование аномальной температуры к северу от сибирских арктических морей, в равной степени являются термическое и динамическое состояние нижних слоев атмосферы;

– SST значительно увеличивается в начале лета в полынье, образованной морскими ветрами на краю припайного льда; припай и полыньи вносят существенный вклад в распространение МВТ в направлении глубоководных районов океана;

– тепловое воздействие р. Лены в основном способствует лишь повышению температуры воды в самой мелководной части моря Лаптевых, особенно важным и продолжительным оказалось повышение температуры придонной воды;

– состояние морского льда, сложившееся в зимний период в масштабе одного года, является одним из определяющих факторов наряду с тепловыми и динамическими эффектами атмосферы; чувствительность модели к изменениям состояния океанических полей на этом масштабе менее значительна;

– различия, связанные с начальным распределением ледяного поля, уменьшаются в первые три года; отклонения ледяного поля, вызванные различиями исходных термохалинных океанических полей, наоборот, увеличиваются в течение первых 2–3 лет, а затем постепенно уменьшаются до уровня 15–20 % относительно среднегодового распределения;

– уменьшение таяния на нижней поверхности льда летом из-за более холодного состояния океана способствует лучшему сохранению ледяного покрова;

– наличие льда летом препятствует поглощению атмосферного тепла и образованию областей аномально теплых поверхностных вод даже при чрезвычайно теплом состоянии атмосферы региона;

В ходе выполнения проекта также проведено исследование с целью изучения и оценки поглощения тепла глубоким океаном, оценки влияния поглощения CO_2 океаном на глобальный углеродный цикл и на глобальный и региональный климат. На основе численного моделирования потоков CO_2 из атмосферы и дальнейшего его переноса морскими течениями получена правдоподобная картина распространения CO_2 в океане. Выявлена необходимость проведения модельного эксперимента на период не менее 1000 лет при активном включении биогеохимического блока для более полного описания процесса.

Дополнительное исследование, расширяющее рамки представленного проекта в направлении исследования чувствительности динамики крупномасштабной циркуляции и климата к процессам таяния ледниковых щитов Арктики и формирования баланса пресной воды в океане на примере ледника Гренландии, завершилось в отчетном году опубликованием статьи в *Journal of Climate* (WoS, Scopus, Q1). В ходе проведенных исследований роли стока пресной воды ледников Гренландии получены оценки масштабов времени формирования и времени пребывания Гренландской пресноводной аномалии (ГПА) в Приполярной Северной Атлантике при реализации различных режимов поступления пресной воды. Получена связь между реакцией пресной воды и временем пребывания ГПА в регионе. Главный вывод состоит в том, что ГПА в основном накапливается в приповерхностных слоях, что отличает эту пресноводную аномалию от других, но в итоге она оказывается сильно рассредоточена в толще воды и оказывает относительно небольшое влияние на итоговую соленость.

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

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

На основе численных расчетов с использованием модели океана и морского дна SibCIOM и данных реанализа NCEP/NCAR проанализировано изменение температуры придонного слоя морей Сибирского шельфа с начала 21 столетия до настоящего времени. По результатам численного моделирования выделены области, в которых получено повышение температуры придонного слоя моря. В Карском море выделяется область, граничащая с устьями Оби и Енисея, и его восточная часть; в море Лаптевых – западная часть около п-ва Таймыр и глубоководная часть. В шельфовой области заметно повышение температуры около дельты р. Лены и в юго-восточной части моря. Графики среднемесячных значений температуры поверхностного и придонного слоев в отдельных точках показывают, что в прошедшем десятилетии увеличилась амплитуда сезонных колебаний, заметно повышение температуры не только в осенние, но и в зимние месяцы. Наименьшие изменения за период расчета произошли в придонном слое Восточно-Сибирского моря.

Получены оценки состояния и области распространения субаквальной мерзлоты в донных отложениях шельфовых морей Арктики (Карского, Восточно-Сибирского и Лаптевых) с учетом климатических изменений в регионе для последних 20 тыс. лет. Результаты моделирования мощности многолетнемерзлых пород показывают, что они отражают влияние глубины моря, географического положения и геотермического потока из земных недр. Влияние глубины моря – это влияние продолжительности периодов осушения и периодов затопления шельфа для тех или иных изобат. Многолетнемерзлые породы во внеледниковых условиях непрерывно существуют в течение всего расчетного периода (120 тыс. л. н. – современность) в мелководной части шельфа. На внешнем шельфе (глубина воды более 75 м) на протяжении среднего плейстоцена голоцена ММП возникали и деградировали.

Площадь распространения ММП на шельфе морей (Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского) в период максимального охлаждения шельфа 20 тыс. лет назад составила 2.2×10^6 км². Объем донных отложений, которые могли находиться в мерзлом состоянии, составил 9.8×10^{14} м³. Дальнейшее затопление шельфа в период голоцена привело к деградации подводной мерзлоты. Полученная площадь распространения субаквальных мерзлых отложений для 1950 г. составила около 2×10^6 км². Объем мерзлых донных отложений уменьшился и составил 7×10^{14} м³. Более 80 % площади, занимаемой ММП, расположено в морях Восточно-Сибирского шельфа. В пределах каждого шельфового моря мощность мерзлоты наибольшая у берега, где затопление произошло недавно, и уменьшается к бровке шельфа. Моря Лаптевых и Восточно-Сибирское имеют среднюю мощность вечной мерзлоты, превышающую 300 м. В Карском море распространение мерзлоты сильно смещено в сторону восточной части моря. Районы с мерзлотой мощностью более 600 м расположены в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море около Новосибирских островов (рис. 15а).

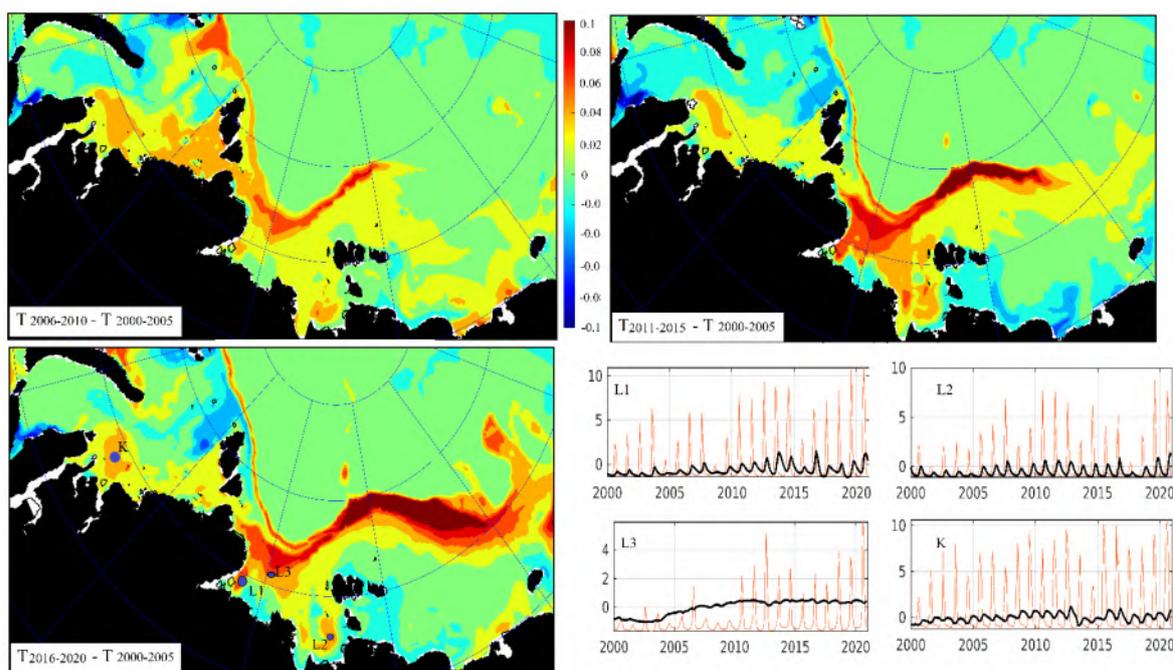


Рис. 14 – Изменение температуры придонного слоя сибирских арктических морей в период 2000–2020 гг. по результатам численного эксперимента. Представлены поля разности среднегодовой температуры, осредненной за пятилетний период, и начальный период шести лет расчета 2000–2006 гг.

В выделенных точках морей Лаптевых и Карского показан сезонный ход температуры в поверхностном (красный цвет) и придонном (черный цвет) слоях

Верхняя граница субаквальной мерзлоты находится ниже морского дна. Толщина протаивания верхнего слоя донных отложений зависит от глубины моря, температуры придонной воды и засоленности осадков. Глубина моря определяет период затопления данного участка шельфа морской водой. Получено, что верхняя граница мерзлого слоя для 1950 г. расположена на глубине 2–20 м ниже морского дна в зависимости от области шельфа (рис. 15б). Максимальное заглубление верхней границы ММП получено для западной части Карского моря, внешнего шельфа и южной части моря Лаптевых в районе дельты р. Лены.

Скорость деградации мерзлоты с момента затопления шельфа морской водой до 1950 г. составила 1.0–2.5 см в год. Максимальные скорости деградации получены для внешнего шельфа всех морей, а также для западной части Карского моря. Сокращение ММП более выражено со стороны нижней границы и происходит за счет геотермического потока.

Получены оценки мощности зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) для всей области мелководных арктических шельфов (рис. 16). Формирование и существование зоны стабильности газовых гидратов коррелирует с динамикой нижней границы многолетнемерзлого слоя. Толщина зоны стабильности составила до 800 м для внутреннего шельфа (глубина воды 10–20 м) и менее 200 м для внешнего шельфа (глубина воды 70–100 м) (рис. 16а). Глубина нижней границы ЗСГГ зависит от значений геотермического потока и глубины моря, подобно динамике подошвы слоя мерзлых пород. Положение верхней границы зависит прежде всего от глубины моря, что объясняется влиянием на ЗСГГ дополнительного давления за счет водного слоя. Верхняя граница расположена на 140–220 м ниже морского дна (рис. 16б). Повышенная интенсивность потока тепла в рифтовых структурах приводит к отсутствию условий образования газогидратов в северной части моря Лаптевых.

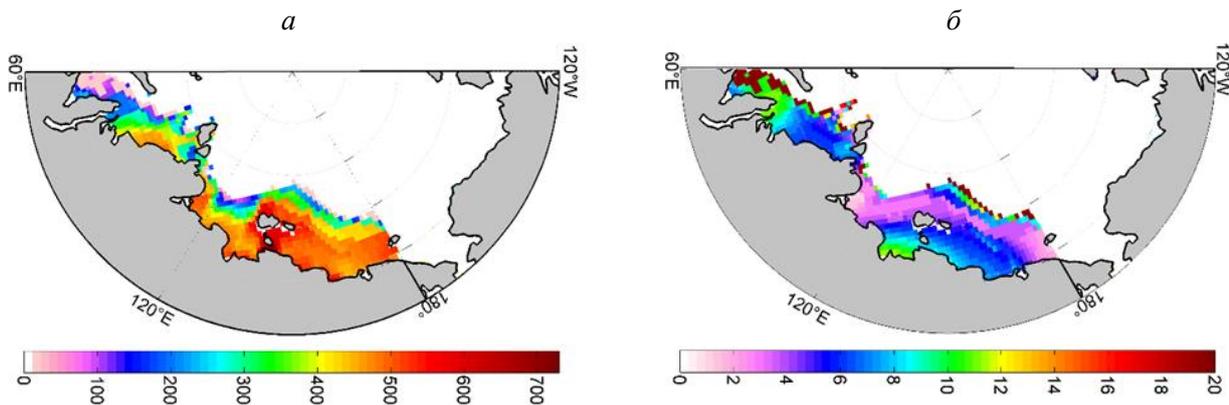


Рис. 15 – Модельное распространение и мощность субаквальной мерзлоты в донных отложениях шельфа арктических морей (Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское), полученное для 1950 г.:

- a* – глубина нижней границы ММП под морским дном (м);
б – глубина верхней границы ММП под морским дном (м)

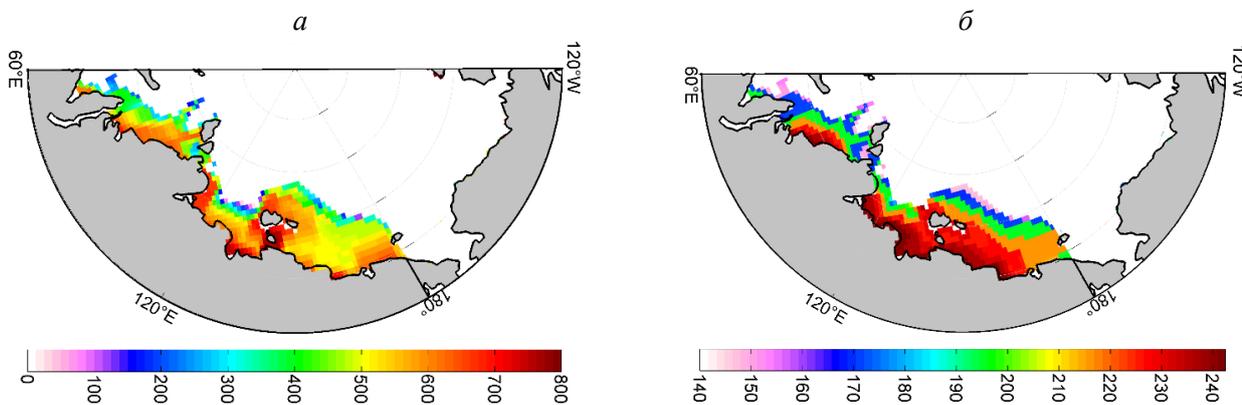


Рис. 16 – Зона стабильности гидратов метана:

- a* – рассчитанная мощность (м); *б* – глубина залегания верхней границы под морским дном (м)

Увеличение концентрации соли в порах сдвигает границу термодинамической устойчивости гидратов метана в сторону более высокого давления и более низкой температуры. Заглубление верхней границы ЗСГГ до глубины более 140 м ниже морского дна делает газовые гидраты изолированными слоем мерзлых пород. Наиболее сильное засоление на такой глубине характерно для внешнего шельфа и составляет примерно 20 %. Дополнительное смещение вниз верхней границы ЗСГГ составило 15 м на внешнем шельфе и 2 м на внутреннем. Изменения нижней границы ЗСГГ, глубина залегания которой соответствует мало засоленным (внешний шельф) или незасоленным грунтам (внутренний шельф), слабо выражены. Влияние засоления при расчете термобарических условий устойчивости метангидрата приводит к сокращению ЗСГГ, однако из-за большой глубины залегания в донных отложениях это влияние составляет не более нескольких процентов.

Проведено исследование роли покровного оледенения в эволюции и современном состоянии криолитозоны и зоны стабильности гидратов газов на примере северной части Восточно-Сибирского шельфа, где сохранились пластовые льды в отложениях островов Анжу (Новая Сибирь и Фаддеевский) мощностью 20–30 м и протяженностью 2–3 км. Построены палеогеографический сценарий развития шельфа в последние 200 тыс. лет и модель геологического строения, характеризующая состав и теплофизические свойства пород.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Dukhovskoy, D. S., Yashayaev, I. E., Chassignet, P., Myers, P. G., Platov, G., Proshutinsky A. Time scales of the Greenland freshwater anomaly in the Subpolar North Atlantic // *J. Climate*. No 34. P. 8971–8987. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0610.1.
2. Golubeva, E., Kraineva, M., Platov, G., Iakshina, D., Tarkhanova, M. Marine heatwaves in Siberian Arctic Seas and adjacent region // *Remote Sens.* 2021. Vol.13(21), 4436. DOI: 10.3390/rs13214436.
3. Gavrillov, A., Malakhova, V., Pizhankova, E. The role of paleogeographic events in the evolution and current state of the East Siberian Shelf permafrost // *Proc. SPIE, 27th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. Vol. 11916, 1191656. DOI: 10.1117/12.2602055.
4. Gochakov, A. V., Antokhina, O. Y., Krupchatnikov, V. N. Martynova Yu. Method for identifying and clustering Rossby wave breaking events in the Northern hemisphere // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2021. No 46. P. 10–18. <https://doi.org/10.3103/S1068373921010027>.
5. Krylova, A. I., Lapteva, N. A. Modeling of the long-term annual and seasonal runoff in the Lena River basin // *Proc. SPIE, 27th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. Vol. 11916, 119165P. DOI: 10.1117/12.2603165.
6. Malakhova, V. V., Golubeva, E. N. Impact of climate change on methane emissions in the Arctic seas // *Proc. SPIE, 27th Intern. Symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. V. 11916, 1191657. DOI: 10.1117/12.2602061.
7. Platov, G., Krupchatnikov, V., Gradov, V., Borovko, I., Volodin, E. Analysis of the Northern hemisphere atmospheric circulation response to Arctic ice reduction based on simulation results // *Geosci.* 2021. Vol. 11, iss. 373. <https://doi.org/10.3390/geosciences11090373>.
8. Platov, G. A., Krupchatnikov, V. N., Gradov, V. S., Volodin, E. M., Borovko, I. V. The role of Arctic ice reduction in the formation of climatic trends // *Proc. SPIE 11916, 27th Intern. Symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. 119166J. DOI: 10.1117/12.2603421.
9. Raputa, V. F., Lezhenin, A. A. Estimation of the dynamic and thermal characteristics of the rise of a smoke plume from satellite information // *Atmosph. and Ocean. Opt.* 2021. Vol. 34, No 5. P. 433–437. DOI: 10.1134/S1024856021050171.
10. Raputa, V. F., Grebenshchikova, V. I., Lezhenin, A. A., Yaroslavtseva, T. V., Amikishieva, R. A. Analysis of aerosol pollution processes in the vicinity of the Irkutsk aluminum plant // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2099 012030 (2021). DOI:10.1088/1742-6596/2099/1/012030.
11. Raputa, V. F., Lezhenin, A. A., Obolkin, V. A., Khodzher, T. V. Estimation of gas and aerosol concentrations with data of measurements in southern Baikal // *Proc. SPIE 27th Intern. Symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. Vol. 11916, 119166A. DOI: 10.1117/12.2603382.
12. Zaripov, R. B., Pavlyukov, Y. B., Krupchatnikov, V. N. Studying physical mechanisms of development of Black Sea quasi-tropical cyclones using a high-resolution atmosphere model // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2021. Vol. 46. P. 423–433. <https://doi.org/10.3103/S1068373921070013>.
13. Zuev, V. V., Savelieva, E., Borovko, I. V., Krupchatnikov, V. N. Influence of the subtropical stratosphere on the Antarctic polar vortex during spring 2019 // *Proc. SPIE, 27th Intern. Symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics.* 2021. Vol. 11916, 1191677. DOI: 10.1117/12.2599029.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Amikishieva, R. A., Raputa, V. F., Lezhenin, A. A. Ground and satellite monitoring of atmospheric pollution processes in urban areas // CEUR Workshop Proc., 3006. 2021. P. 392–398. DOI:10.25743/SDM.2021.12.66.046.
2. Kraineva, M., Golubeva, E. Formation of heat anomalies in the Laptev Sea aquatorium (2000–2020 years) // Proc. in GeoMedia. 2021. Vol. V.
3. Lezhenin, A. A., Raputa, V. F. Analysis of urban air pollution based on network observation // (2021) CEUR Workshop proc., 3006. P. 493–498. DOI:10.25743/SDM.2021.64.81.059.
4. Raputa, V. F., Lezhenin, A. A. Methods for estimate the dynamic and thermal characteristics of smoke plumes from high sources // CEUR Workshop Proc., 3006. 2021. P. 541–549. DOI: 10.25743/SDM.2021.53.21.065.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Амикишиева Р. А., Рапута В. Ф., Соловьёва И. А. Наземный и спутниковый мониторинг процессов загрязнения Искитимо-Линевской промышленной зоны // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4. № 1. С. 60–65. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-60-65.
2. Аржанов М. М., Малахова В. В. Оценка условий накопления газогидратов под влиянием покровного оледенения // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2021. Т. 1. № 6. С. 70–74.
3. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Деревягин А. Ю., Пижанкова Е. И., Попова А. А. Мерзлые породы Восточно-Сибирского шельфа и их связь с геологическими событиями среднего неоплейстоцена голоцена // Геология морей и океанов: Материалы 24-й Междунар. науч. конф. по морской геологии. М.: ИО РАН, 2021. Т. 4. DOI:10.29006/978-5-6045110-7-7.
4. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Пижанкова Е. И. Математическое моделирование эволюции субмаринных мерзлых толщ и зоны стабильности газогидратов (на примере Восточно-Сибирского шельфа) // "Современные методы и средства океанологических исследований" (МСОИ-2021) : Материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. М.: Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 2021. С. 255–259.
5. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Пижанкова Е. И., Попова А. А. Мощность многолетне-мерзлых пород о. Новая Сибирь: результаты численного моделирования // 14-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу : тез. докл. рос. конф. с междунар. участием " / Под ред. Е. А. Головацкой. Томск, 2021. С. 6–9.
6. Градов В. С., Платов Г. А. Оптимизация сеточного разбиения для параллельных вычислений в модели SibCIOM // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 111–117. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-111-117.
7. Градов В. С., Боровко И. А., Крупчатников В. Н. Влияние сокращения морского льда в Арктике на структуру циркуляции Атмосферы. // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 103–110. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-103-110.
8. Леженин А. А., Рапута В. Ф. Методы оценивания загрязнения атмосферы города по данным мониторинга // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 150–156. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-159-166.
9. Малахова В. В. Модельная оценка эмиссии метана в атмосферу с акватории арктических морей // 14-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому

мониторингу : тез. докл. рос. конф. с междунар. участием " / Под ред. Е. А. Головацкой. Томск, 2021. С. 29–32.

10. Мартынова Ю. В., Матюхина А. А., Воропай Н. Н., Крупчатников В. Н. Особенности формирования снежного покрова в Сибири и их связь с аномалиями динамики атмосферы Северного полушария // Экол. Экон. Информ. Сер.: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2021. Т. 6. С. 118–123. DOI: 10.23885/2500-395X-2021-1-6-118-125.

11. Мартынова Ю. В., Крупчатников В. Н., Гочаков А. В., Антохина О. Ю. Связь интенсивности формирования снежного покрова в Западной Сибири с особенностями динамики атмосферы Северного полушария в осенне-зимний сезон // Материалы Междунар. конф. и школы молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "СITES-2021", Москва, 22–27 нояб. 2021 г. С. 51–53.

12. Рапута В. Ф., Амикишиева Р. А., Ярославцева Т. В. Анализ выносов ртути с промплощадки "Усольехимпрома" // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4. № 1. С. 193–198. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-193-198.

13. Тарханова М. А. Влияние повышенного стока арктических рек на изменение гидрологических характеристик прилегающих акваторий Северного Ледовитого океана // Комплексные исследования Мирового океана : Материалы 6-й Всерос. науч. конф. молодых ученых, Москва, 18–24 апреля 2021 г. М.: Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова РАН, 2021. С. 198–199.

14. Тарханова М. А., Голубева Е. Н. Изменение гидрологических характеристик Северного Ледовитого океана под влиянием увеличивающегося речного стока // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 145–151. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-210-216.

Свидетельства о регистрации в Роспатенте

1. Свидетельство № 2021620907 РФ. База данных по содержанию пыли, рН, макро- и микроэлементов в снежном покрове в районе Искитимского цементного завода, Новосибирская область. : св-во об официальной регистрации программы для ЭВМ / Рапута В. Ф., Шуваева О. В., Коковкин В. В., Новикова И. И., Щербатов А. Ф., Михеев В. Н., Ярославцева Т. В., Крайнева М. В.; зарегистр. 14.05.2021.

Участие в конференциях и совещаниях

1. "Focus Siberian Permafrost – Terrestrial Cryosphere and Climate Change", Universität Hamburg, March 24–25, 2021 – 2 доклада (Малахова В. В.).

2. The EGU General Assembly 2021, 19–30 апреля 2021 г., Вена (Австрия) – 1 доклад (Тарханова М. А., Голубева Е. Н.).

3. 17-я Международная выставка и научный конгресс "Электронное геопространство на службе общества" в рамках Международной выставки "Интерэкспо Гео-Сибирь 2021", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. – 10 докладов (Малахова В. В., Тарханова М. А., Голубева Е. Н., Якшина Д. Ф., Рапута В. Ф., Леженин А. А., Ярославцева Т. В., Амикишиева Р. А., Крылова А. И., Платов Г. А., Градов В. С., Боровко И. В., Крупчатников В. Н.).

4. 17-я Международная научно-техническая конференция "Современные методы и средства океанологических исследований" (МСОИ-2021), Москва, 18–20 мая 2021 – 1 доклад (Малахова В. В.).

5. 27-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 5–9 июля 2021 г. – 8 докладов (Рапута В. Ф., Леженин А. А., Амикишиева Р. А., Малахова В. В., Голубева Е. Н., Боровко И. В., Крупчатников В. Н., Платов Г. А., Градов В. С., Крылова А. И.).

6. 14-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу, Томск, 19–22 октября 2021 г. – 2 доклада (Малахова В. В.).

8. 10-я Международная научно-практическая конференция "Морские исследования и образование: MARESEDU-2021", Москва, 25–29 октября 2021 г. – 2 доклада (Малахова В. В., Крайнева М. В.).

9. 19-я Всероссийская конференция-школа молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования", пос. Дюрсо Краснодарского кр., 13–18 сентября 2021 г. – 2 доклада (Якшина Д. Ф., Голубева Е. Н., Крайнева М. В., Малахова В. В.).

10. 9-я Всероссийская конференция "Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем (САМЭС) под эгидой объединенной конференции "Экология. Экономика. Информатика", пос. Дюрсо Краснодарского кр., 6–11 сентября 2021 г. – 2 доклада (Малахова В. В., Крупчатников В. Н.).

11. Всероссийская научно-практическая конференция "Комплексное изучение и освоения недр Европейского Севера России", Ухта, 16–17 сентября 2021 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).

12. "Ломоносовские чтения", секция "Геология", Москва, 20–29 апреля 2021 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).

13. 5-я юбилейная всероссийская конференции "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития", Санкт-Петербург, 14–15 декабря 2021 г. – 2 доклада (Малахова В. В., Голубева Е. Н.).

14. 6-я Всероссийская научная конференция молодых ученых "Комплексные исследования Мирового океана" (КИМО-2021), Москва, 18–24 апреля 2021 г. – 1 доклад (Тарханова М. А.).

15. Marchuk Scientific Readings-2021, Novosibirsk, October 4–8, 2021 – 7 докладов, из них 2 приглашенных (Платов Г. А., Градов В. С., Боровко И. В., Крупчатников В. Н., Рапута В. Ф., Леженин А. А., Амикишиева Р. А., Ярославцева Т. В., Крылова А. И., Голубева Е. Н., Крайнева М. В., Якшина Д. Ф.)

16. 13-я Международная молодежная научная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г. – 4 доклада, из них 2 пленарных (Рапута В. Ф., Леженин А. А.).

17. Всероссийская конференция с международным участием "Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2021)", Новосибирск, 24–27 августа 2021 г. – 3 доклада (Рапута В. Ф., Леженин А. А., Амикишиева Р. А.).

18. 6-я Международная конференция "Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека", Томск, 20–24 сентября 2021 г. – 2 доклада (Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В.).

19. Научно-практическая конференция по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири к 50-летию образования СибНИГМИ, Новосибирск, 20–22 октября 2021 г. – 5 докладов, из них 2 пленарных (Рапута В. Ф., Леженин А. А., Крупчатников В. Н., Платов Г. А., Градов В. С., Боровко И. В.).

20. 28-я Рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 23–26 ноября 2021 г. – 6 докладов (Рапута В. Ф., Леженин А. А., Амикишиева Р. А., Боровко И. В., Крупчатников В. Н., Градов В. С., Крылова А. И.).

21. 37-я Международная конференция "Ляпуновские чтения-2021", Иркутск, 6–9 декабря 2021 г. – 1 доклад (Рапута В. Ф.).

22. 3-я конференция "Проекты, поддержанные Правительством Новосибирской области и Российским фондом фундаментальных исследований, для экономики региона", Новосибирск, 23 декабря 2021 г. – 1 доклад (Рапута В. Ф.).

23. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде, посвященные памяти чл.-корр. РАН В. Н. Лыкова, CITES '2021, Москва, 22–27 ноября 2021 г. – 2 доклада (Платов Г. А., Градов В. С., Боровко И. В., Крупчатников В. Н.).

24. Евразийская конференция по прикладной математике, Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г. – 1 пленарный доклад (Платов Г. А.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Платов Г. А.:

– член оргкомитета конференции "Электронное геопространство на службе общества" в рамках 17-й Международной выставки и научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь 2021", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.,

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.,

– член программного комитета конференции "Евразийская конференция по прикладной математике", Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г.;

2. Крупчатников В. Н. – член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;

3. Леженин А. А.:

– член оргкомитета конференции "Электронное геопространство на службе общества" в рамках 17-й Международной выставки и научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь 2021", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.,

– член программного комитета научно-практической конференции по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири, посвящ. 50-летию образования СибНИГМИ, Новосибирск, 20–22 октября 2021 г.,

4. Крайнева М. В. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 13

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 17

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 31

Свидетельств о регистрации программ в Роспатенте – 1

Докладов на конференциях – 62 в том числе 7 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 7

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. Градова М. А.	инженер	
6. Градов В. С.	инженер	
7. Крайнева М. В.	н.с.	
8. Крупчатников В. Н.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
9. Крылова А. И.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
10. Леженин А. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
11. Малахова В. В.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
12. Рапута В. Ф.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
13. Яковенко Г. Т.	программист	
14. Якшина Д. Ф.	н.с.	
15. Ярославцева Т. В.	инженер	

Амикишиева Р. А., Градова М. А., Градов В. С., Крайнева М. В. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

Боровко И. В.	– доцент СГУПС
Голубева Е. Н.	– доцент НГУ
Крупчатников В. Н.	– доцент НГУ
Леженин А. А.	– доцент СИУ – филиала РАНХиГС при Президенте РФ
Платов Г. А.	– доцент НГУ
Рапута В. Ф.	– старший преподаватель НГУ
Ярославцева Т. В.	– доцент ВКИ НГУ

Руководство аспирантами

Градов В. С.	– 2-й год, НГУ, руководитель Платов Г. А.
Градова М. А.	– 2-й год, ИВМиМГ СО РАН, руководитель Голубева Е. Н.

Защита дипломов

Наконечный О. М.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Бреславец О. Д.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Глинский К. А.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Гостев К. А.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Красковский А. А.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Сауткин А. М.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
Соколов В. Р.	– программист ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.

Награды

Градов В. С. – стипендия мэрии города Новосибирска аспирантам за научную, творческую и инновационную деятельность.

ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДНОЙ СРЕДЕ

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

Важнейшие достижения

Обнаружение угловых структур в 3d-массивах с использованием масштабируемых масок Д.ф.м.-н. Казанцев И. Г.

Проведены теоретические исследования масок (образцы для сравнений, или эталоны), моделирующих угловые структуры для их обнаружения на трехмерных изображениях при использовании в традиционном методе скользящих окон. Этот метод основывается на согласованной фильтрации и многократных вычислениях свертки маски с текущей окрестностью отдельного элемента массива. Одним из актуальных приложений является проблема распознавания лиц, где метод имеет конкретное применение при поиске доминантных (опорных) точек.

Ранее нами были сконструированы масштабируемые маски для выделения угловых конструкций на двумерных изображениях. В этой работе показано обобщение угловых масок на трехмерный случай. Свойство масштабируемости, состоящее в иерархии подматриц, дающей возможность построения матриц большего размера простым повторением самоподобных элементов, удалось распространить на трехмерный случай. Это отличает новые маски от использовавшихся традиционных, элементы маски которых зависят от размера матрицы.

Излагается общий подход к конструированию масок для различных телесных углов. Этот подход помогает разрабатывать иерархические вычисления трехмерных данных с целью ускорения. Приводится сравнительный анализ коэффициентов усиления шума традиционных угловых детекторов (Кирш, Робинсон) и новых масок.

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Kazantsev, I. G., Mukhametzhanova, B. O., Iskakov, K. T. Detection of the corner structures in 3D arrays using scalable masks // Sib. Electron. Math. Rep. 2021. V. 18, No 1. P. 61–71. DOI: 10.33048/semi.2021.18.006 (Scopus, Q2).

2. Kazantsev, I. G., Mukhametzhanova, B. O., Suvorovsky, O. Yu. Corner detection in images and scalable masks // IEEE International conference on smart information systems and technologies, Nur-Sultan (Kazakhstan), Apr. 28–30, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9465940>. DOI: 10.1109/SIST50301.2029465940 (Scopus).

3. Казанцев И. Г. Масштабируемые маски детектора угловых точек на трехмерных изображениях // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4., № 1. С. 72–78. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1 (РИНЦ).

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. 2021 IEEE International conference on smart information systems and technologies, Nur-Sultan (Kazakhstan), Apr. 28–30, 2021.

2. Научная конференция "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 17-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершаенным в 2021 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Математические модели физики атмосферы, гидросферы, экологии и методы решения прямых и обратных задач с усвоением данных, задач дистанционного зондирования Земли для исследования климата, природных и техногенных воздействий на окружающую среду".

Номер государственной регистрации 0251-2021-0003.

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

Раздел 1. Этап 2021 г.

1.1. Разработка численных методов для развития комплекса мезорегиональных моделей гидротермодинамики атмосферы и охраны окружающей среды с учетом природных и техногенных воздействий.

В рамках развития общей концепции природоохранного прогнозирования и проектирования выполнен комплекс исследований из нескольких составляющих, отвечающих основным компонентам направления математического моделирования: построение алгоритмов, разработка моделей, реализация на современных вычислительных средствах и решение фундаментальных и прикладных задач разработанными средствами.

Процессы в окружающей среде, подверженной воздействиям природных и антропогенных факторов, происходят в различных составляющих Земной системы: в атмосфере, гидросфере, на поверхности Земли, в верхних слоях почвы и т. д. Эти процессы описываются моделями (системами уравнений), которые должны быть согласованы между собой. Объединение всех этих моделей в единую систему мы осуществляем на основе вариационных принципов в формулировках со слабыми ограничениями, допуская наличие неопределенностей во всех объектах системы моделирования и в данных наблюдений. Последние включаются в систему моделирования с помощью методов усвоения данных. В настоящее время основной объем данных от действующих систем мониторинга поступает об атмосфере и о поверхности Земли. Поэтому модели процессов и модели наблюдений при решении задач о Земной системе выступают в роли инструментов пространственно-временной экстраполяции-интерполяции для оценок функций состояния и параметров при решении прямых и обратных задач во всей системе в целом.

Разнообразие постановок задач обратного моделирования (например, обратных задач идентификации источников загрязнений, задач усвоения данных мониторинга, задач оценки информативности данных измерений), возникающих при решении задач природоохранного прогнозирования и проектирования, требуют разработки общего подхода к их решению и анализу. Такой подход предоставляют алгоритмы обратного моделирования на основе операторов чувствительности. В рамках этого подхода для обратной задачи строится семейство квазилинейных операторных уравнений, содержащих ее решение. Квазилинейная структура способствует как решению, так и анализу получающихся уравнений. Для построения операторов чувствительности требуется решать ансамбль независимых сопряженных уравнений с различными "правыми частями". Разработанные методы реализуют созданные алгоритмы.

В лаборатории развивается комплекс моделей разной степени сложности для решения природоохранных задач. В рамках проекта продолжилась работа по отладке и исследованию свойств базовой мезомасштабной модели гидротермодинамики атмосферы, которая является основой для

решения прямых и обратных задач по моделированию качества атмосферы. Модель предусматривает возможность построения версий с различными пространственными разрешениями и настройкой на регионы.

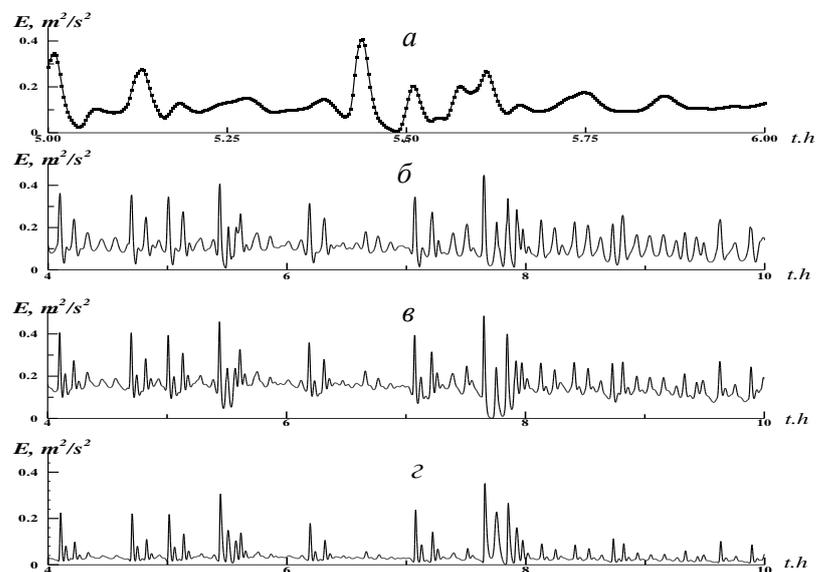
Сценарные расчеты на базе разрабатываемой модели проводились для части территории Новосибирской обл. и для Байкальского региона. В обоих случаях модельная территория представляет собой сушу с различными видами шероховатости подстилающей поверхности, значительную часть рассматриваемой территории занимает водоем, который вносит дополнительную термическую неоднородность подстилающей поверхности. Территории различаются масштабами и сложностью орографии. Расчеты выполнялись на ССКЦ СО РАН.

1.2. Тестирование разрабатываемого трехпараметрического RANS-приближения моделирования турбулентности применительно к пограничному слою для его нейтрального, неустойчивого и устойчивого состояний.

Структура пограничного слоя атмосферы зависит от атмосферной устойчивости (эффекты плавучести) и механизма генерации турбулентности. При неустойчивой стратификации (при нагревании поверхности) плавучесть способствует увеличению турбулентного перемешивания. В условиях устойчивой стратификации, которая формируется при охлаждении поверхности, турбулентность генерируется сдвигом и разрушается под действием отрицательной плавучести и вязкости. Разнонаправленность действия эффектов плавучести и сдвига ведет к ослаблению интенсивности турбулентности по сравнению с нейтральной стратификацией и конвективным перемешиванием. При использовании RANS-схемы турбулентности делается акцент на анализе возможности RANS-метода при описании некоторых особенностей вихревого перемешивания импульса и тепла в условиях сильно устойчивой стратификации в пограничном слое атмосферы. Одна из особенностей связана с возникновением перемежающейся турбулентности, характеризующейся короткими периодами турбулентного состояния (всплесками) и промежуточными периодами относительно слабых колебаний.

Представленные результаты вычислительного эксперимента показывают возможность использования трехпараметрической RANS-схемы к воспроизведению перемежающейся турбулентности как вблизи поверхности, так и "поднятой" турбулентности, генерируемой струйным течением низкого уровня в устойчивом пограничном слое атмосферы. На рис. 1 показана

Рис. 1 – Зависимость кинетической энергии турбулентности от времени в сильно устойчивом пограничном слое на различных расстояниях от поверхности, полученная при численном моделировании по RANS-схеме (шаг интегрирования по времени 1 с, шаг сетки по вертикали 3.125 м): $a - z = 10,9375$ м (точками обозначены моменты записи с интервалом 10 с в течение часа); $b - z = 10,9375$ м, $в - z = 7,812575$ м, $г - z = 4,6825$ м



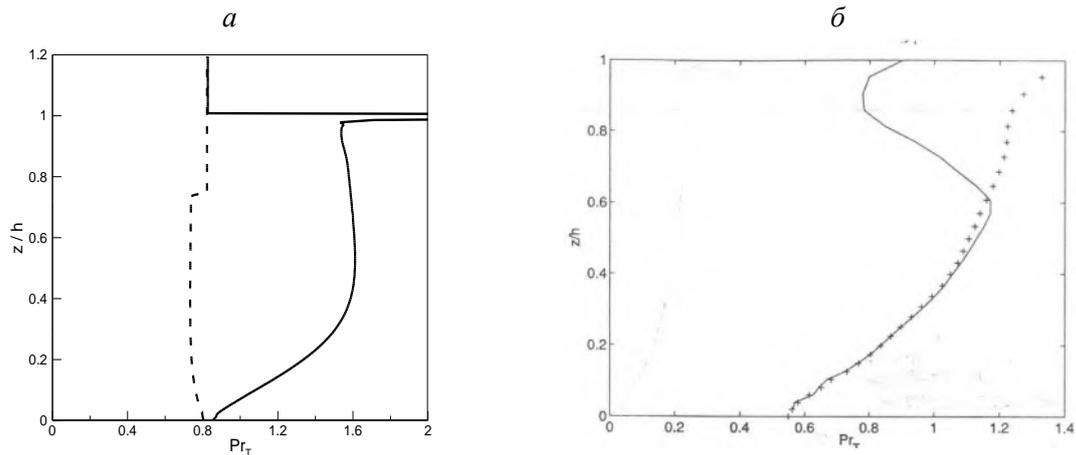


Рис. 2 – Поведение турбулентного числа Прандтля: *a* – вертикальный профиль турбулентного числа Прандтля, вычисленный по трехпараметрической RANS-схеме турбулентности, сплошная линия – вычисление с учетом эффекта внутренних гравитационных волн в поддержании импульса течения в устойчиво стратифицированном пограничном слое, штриховая – вычисление без учета эффекта внутренних волн; *б* – вертикальные профили турбулентного числа Прандтля для случая умеренного охлаждения поверхности $\overline{(w\theta)}_s = -0,02 \text{ K м с}^{-1}$, сплошная линия – LES моделирование, символы в форме крестиков – DNS моделирование перемежающаяся турбулентность вблизи поверхности, которая описывается зависимостью кинетической энергии турбулентности от времени.

Анализ результатов также показал, что вертикальный профиль турбулентного числа Прандтля, полученный по трехпараметрической RANS-схеме, учитывающей влияние внутренних гравитационных волн для поддержания импульса в условиях сильной устойчивости, согласуется с результатами LES- и DNS моделирования. Видно, что без учета влияния внутренних волн число Прандтля почти не меняется с высотой.

На рис. 2 показано поведение турбулентного числа Прандтля, характеризующего относительную интенсивность переноса импульса и тепла.

1.3. Параметризация и численное моделирование метеорологических эффектов лесного массива

В настоящее время известны лишь некоторые из многочисленных сложных воздействий высокого лесного покрова на метеорологическую структуру пограничного слоя атмосферы. Например, наблюдения в лесных массивах показывают, что по сравнению с ситуацией в случае низкого растительного покрова наблюдается пониженная скорость ветра и неустойчивый слой в ночное время, в то время как в дневное время температура повышается с высотой. Много полезной информации об этих явлениях может быть получено путем численного моделирования. Ограничением использования численных моделей часто является большое количество необходимого компьютерного времени. Поэтому в настоящем исследовании для описания воздействия высокого лесного массива на структуру атмосферного пограничного слоя приводятся результаты применения схемы параметризации, предложенной Шиллингом. Эта схема для описания воздействия высокого лесного покрова на структуру атмосферного пограничного слоя используется в расчетах по негидростатической атмосферной модели, основанной на конечных элементах. Основным преимуществом схемы является то, что динамические и термодинамические эффекты лесного

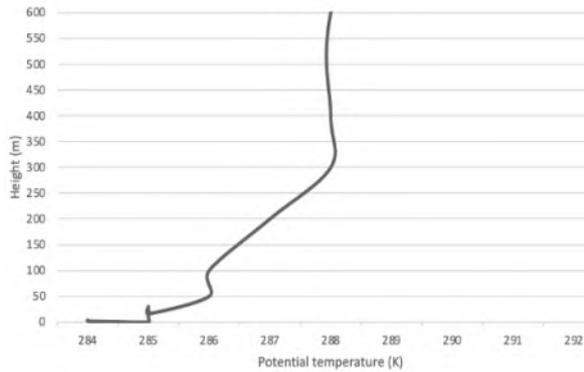


Рис. 3 – Распределение потенциальной температуры (К) с высотой (м)

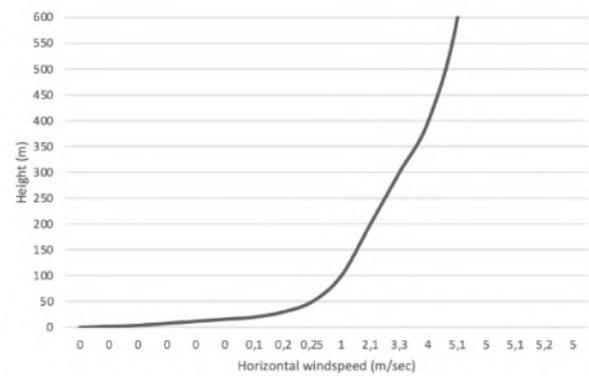


Рис. 4 – Распределение горизонтальной скорости ветра (м/с) по высоте (м)

покрова могут быть удовлетворительно моделированы с использованием невысокого разрешения в численной модели. Это позволяет экономить ресурсы при учете метеорологических эффектов в лесном массиве.

Применимость этого подхода в численных моделях показана с помощью двумерной модели конечных элементов для сжимаемой атмосферы. Результаты моделирования (рис. 3, 4) удовлетворительно воспроизводят известные метеорологические явления в лесных районах, такие как устойчивая стратификация температуры вблизи поверхности в течение дня, нейтральное или слегка неустойчивое состояние ночью время и уменьшение силы ветра в лесном покрове в целом.

2. Разработка и реализация согласованных численных схем для решения прямых задач и ансамблей сопряженных задач для трехмерной нестационарной модели адвекции-диффузии-реакции.

На данном этапе выполнения проекта в рамках разрабатываемой системы прямого и обратного моделирования реализованы алгоритмические конструкции, реализующие решение прямых и сопряженных задач для трехмерной модели адвекции-диффузии-реакции. При этом численные схемы для прямых и сопряженных задач согласованы в смысле дискретного аналога соотношений чувствительности, связывающих вариацию функции состояния математической модели и соответствующих вариаций параметров математической модели адвекции-диффузии-реакции ("источников"). Такая согласованность позволяет избежать неконтролируемых погрешностей при вычислении оператора чувствительности. Реализованы процедуры решения ансамблей сопряженных уравнений, отличающихся "правыми частями". Элементы такого ансамбля имеют одинаковые коэффициенты численных схем, что позволяет сэкономить на их вычислении. Распараллеливание реализовано на основе стандарта OpenMP.

Численные схемы для прямых и сопряженных уравнений строятся в рамках аддитивно усредненного метода расщепления по физическим процессам и пространственным переменным. Для одномерных стадий адвекции-диффузии используются неявные схемы типа направленных разностей. Для стадии трансформации используется дискретно-аналитическая схема первого порядка на основе локально сопряженных задач. Реализованные алгоритмические конструкции на следующих этапах выполнения проекта будут использованы для вычисления операторов чувствительности для трехмерных моделей адвекции-диффузии-реакции.

3. Построение новых численных методов и алгоритмов для решения задач гидротермодинамики и распространения примесей в оз. Байкал и их эффективная реализация.

Разработаны новые версии реализации крупномасштабных моделей гидротермодинамики и распространения примесей в оз. Байкал. Одной из главных целей было улучшить пространственное разрешение и, следовательно, построить соответствующую реализацию на параллельных компьютерах, а также подготовить базы данных для этого перехода. В результате равномерное разрешение было улучшено по каждому горизонтальному направлению в три раза, по вертикали разбиение осталось неравномерным ($721 \times 269 \times 50$). В рамках вариационного подхода исходным объектом численной реализации моделей является интегральное тождество, в котором участвуют все уравнения с граничными и начальными условиями. На основе этого тождества с использованием идей метода расщепления по физическим процессам и по пространственным переменным строятся конечно-разностные аппроксимации. В математических моделях физики атмосферы, океана и окружающей среды наиболее трудоемкими являются этапы расщепления, когда необходимо решать двумерные задачи для поверхности уровня и трехмерные задачи для полей давления, которые возникают на отдельных этапах расщепления. Для этих целей в новых версиях использованы итерационные методы с неполной факторизацией. Стандарт OpenMP использован для создания параллельных версий.

Новые версии моделей участвуют в качестве базисных при выполнении тематических исследований, связанных с изучением оз. Байкал. При моделировании природных процессов необходимо учитывать большое число параметров, влияющих на эти процессы. Так, гидродинамические процессы, протекающие в озере, находятся под большим влиянием внешних воздействий. Одним из самых значительных из них является ветер. В выполненных "климатических" сценарных расчетах проанализирована пространственно-временная изменчивость системы течений, поля температуры и областей распространения примесей от заданных источников, получающаяся при воздействии системы ветров различных направлений, заданных в краевых условиях на поверхности озера. С помощью модели изучается трехмерная горизонтально-вертикальная динамическая структура полей течений, температуры и концентрации примесей. На рис. 5 приведены фрагменты сценарных расчетов. В модели воспроизводится неустойчивость Кельвина – Гельмгольца, возникающая при наличии сдвига между слоями сплошной среды – атмосферой и водой

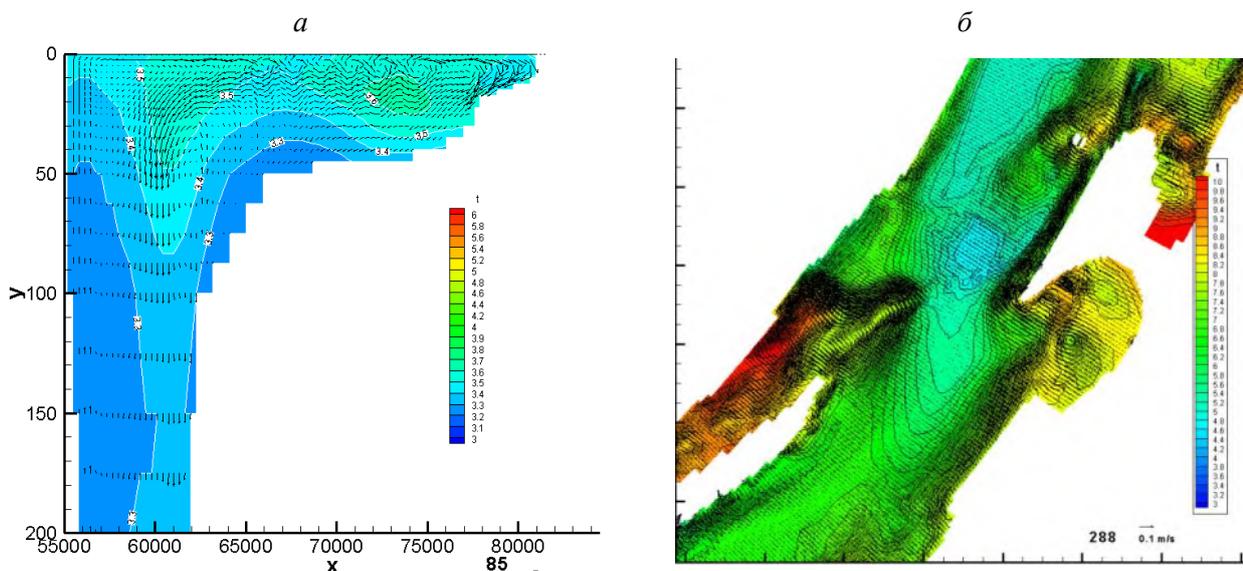


Рис. 5 – Поле течений и температуры: в верхнем 200-м слое в одном из вертикальных сечений области в Баргузинском заливе (а); на поверхности в районе Академического хребта (б)

(рис. 5,а). Сложная система течений и соответствующее ей поле температуры на поверхности (рис. 5,б) сформировались в модели озера в результате неравномерного прогрева вод над участками с разными глубинами при динамическом воздействии полей ветра и взаимодействии других внешних и внутренних факторов, учитываемых в 4D модели.

4. Облачная технология построения векторных полей перемещений природных сред по разновременным спутниковым снимкам с использованием координат опознаваемых объектов.

Технология состоит из трех частей:

1. Выполняемая на компьютере пользователя программа, предназначенная для ввода координат объектов на соседних по времени изображениях.

2. Скрытая в облаке вычислительная компонента, которая, используя файл с введенными координатами объектов, выполняет необходимые действия по построению полей перемещений.

3. Серверная компонента, обеспечивающая взаимодействие пользователя с удаленной вычислительной компонентой.

Опознаваемые объекты. Задача построения полей распространения загрязнений морской среды по разновременным спутниковым данным находится в тесной связи с задачей определения скорости и направления векторов пространственных перемещений водных масс. В качестве исходных данных в задаче используется спутниковая информация видимого, инфракрасного или микроволнового (радиолокационные данные) диапазонов. Используется метод построения полей пространственных перемещений водных масс по опознаваемым изменениям некоторых водных объектов (трассеров) на последовательных спутниковых изображениях, трансформированных в единую картографическую проекцию. В качестве трассеров на изображениях оптического диапазона используются водные объекты, сформировавшиеся в результате цветения вод (линейные и вихревые структуры распределения фитопланктона и водорослей). Для изображений инфракрасного диапазона в качестве трассеров используются в основном линейные и вихревые термические структуры, для радиолокационных изображений – нефтяные пленки и пленки биогенных загрязнений.

Аналогичный подход используется в мониторинге пространственных перемещений ледяных полей. В этом случае в основном используются мозаики, составленные из трансформированных в одну и ту же картографическую основу радиолокационных спутниковых снимков (наиболее часто используются снимки Северного Ледовитого океана из-за их высокой значимости для целей метеорологии и проводки судов).

Процесс ввода координат объектов-трассеров состоит в указании их положения на текущем и следующем по времени изображениях и сохранении введенных координат в файле, который будет передан в облачную среду для завершающей стадии обработки. При этом на спутниковых изображениях предварительно производится "закрепление" контуров береговой черты с помощью опорных точек, таким образом, на картах распределения полей пространственных перемещений природных объектов происходит отделение неподвижной суши от перемещающихся объектов.

Вычислительная компонента. По введенным координатам объектов на текущем изображении строится триангуляция Делоне. Каждому треугольнику триангуляции соответствует треугольник на следующем изображении. Такое множество пар треугольников задает множество кусочно-аффинных преобразований плоскости. Эти преобразования применяются к узлам регу-

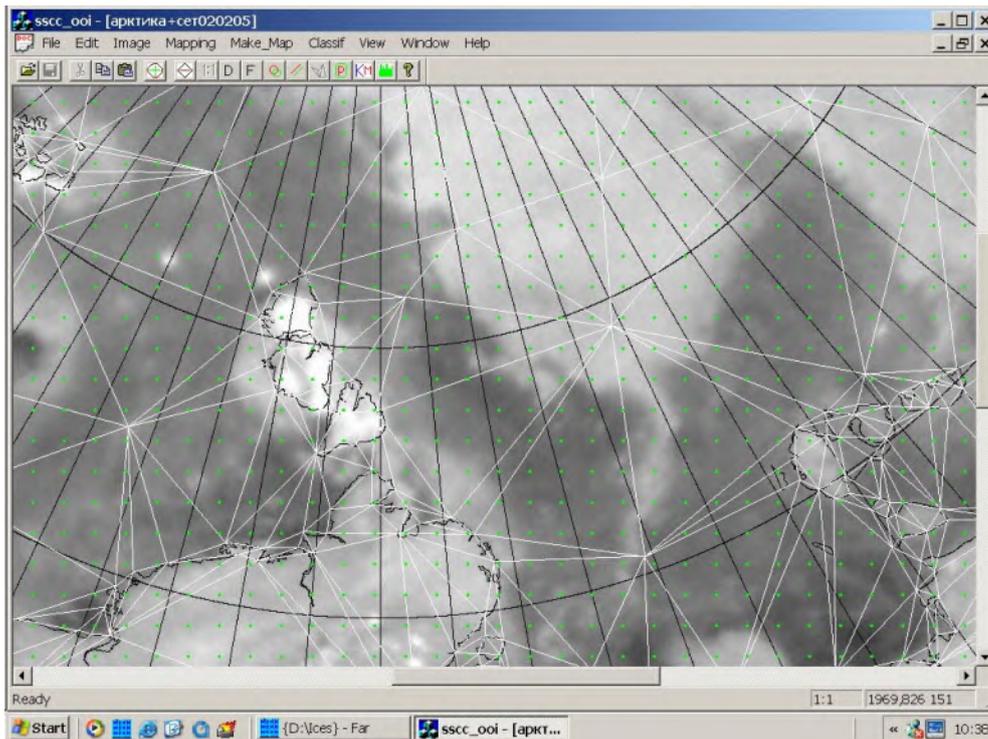


Рис. 6 – Фрагмент триангуляции Делоне с узлами сетки

лярной сетки на текущем изображении, формируя требуемые векторы перемещений. На рис. 6 приведен фрагмент изображения Северного Ледовитого океана с построенной по координатам объектов триангуляцией Делоне и узлами сетки.

На рис. 7 показан процесс переноса водных масс в Азовском море в течение двух суток 8–9 сентября 2006 г.

Одновременно с построением поля векторов пространственных перемещений природных

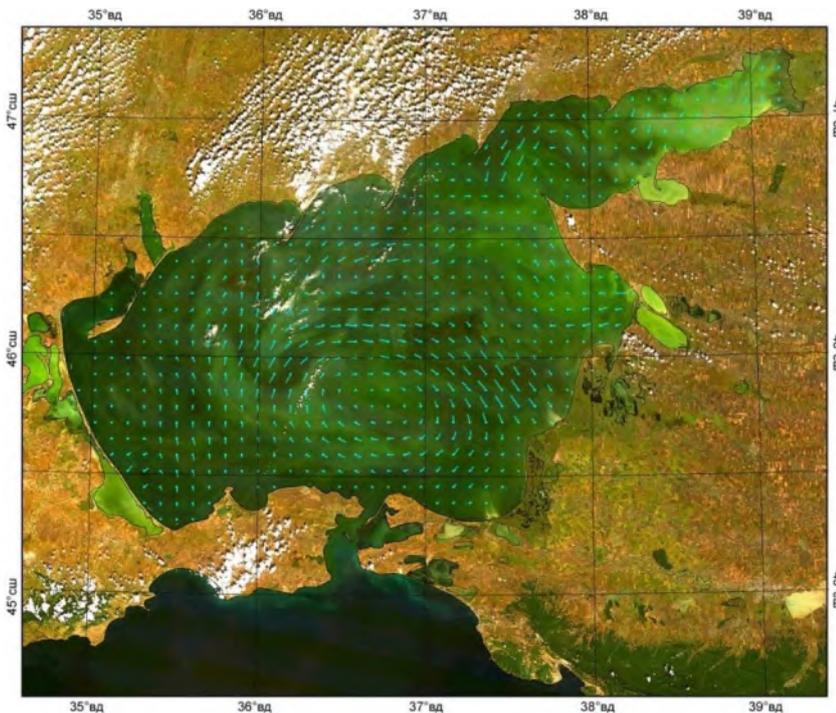


Рис. 7 – Перенос водных масс в Азовском море 8–9 сентября 2006 г.

объектов могут быть построены гистограммы скоростей и направлений этих векторов.

Серверная компонента реализована в рамках создаваемого в проекте фреймворка SSCCCloudIP, представляющего собой Web-сервер, разрабатываемый на языке Python с использованием Web-фреймворка Django. В рамках работ отчетного периода реализованы:

1. Макетный файловый HTTP-сервер для загрузки исходных данных и скачивания результатов.

2. Макетный Web-сервис Drift, позволяющий выполнить

на сервере построение поля векторов пространственных перемещений объектов. Сервер обеспечивает взаимодействие согласно спецификации JSON-RPC: клиент посылает серверу запрос HTTP POST, тело которого – JSON-объект со полями, содержащими значения параметров построения поля перемещений. После завершения вычислений (выполнения приложения вычислительной компоненты) сервер в ответе на запрос возвращает описание полученного результата (в случае сервиса Drift – пути к файлам результата).

Для автоматизации процесса выполнения удаленной обработки в проекте создается Python-пакет PySSCCloudIP, реализующий клиентскую часть протокола взаимодействия с сервером: загрузку исходных данных с компьютера пользователя на сервер, удаленное выполнение вычислений и скачивание результатов с сервера на компьютер пользователя.

Технология также может быть использована в Web-приложениях, выполняемых в современных Web-браузерах.

5. Обработка изображений на высокопроизводительных ЭВМ, оснащенных несколькими ускорителями Intel Xeon Phi.

Для получения возможности использования ЭВМ, оснащенных несколькими ускорителями Intel Xeon Phi, в развиваемую в проекте библиотеку ParImProLib для обработки изображений на высокопроизводительных ЭВМ введена возможность распараллеливания вычислений одновременно с помощью технологий MPI и OpenMP. Схема реализованного способа обработки: изображение распределяется ("разрезается", возможно с перекрытиями соседних фрагментов) между несколькими MPI-процессами, каждый из которых выполняет обработку отдельного фрагмента одновременно несколькими OpenMP-потоками. Этот способ обработки и созданный программный код очень близки способу и коду для обработки одновременно несколькими Intel Xeon Phi (так как вычисления на данном типе ускорителей также реализуются посредством OpenMP) и будут использованы для реализации выполнения вычислений непосредственно на микропроцессорах Intel Xeon Phi на следующих этапах проекта.

Разработка библиотеки ParImProLib ведется на гибридном кластере ССКЦ НКС-1П, получаемые результаты позволят расширить состав программного обеспечения суперкомпьютерных центров и облегчить использование трудоемких вычислительных алгоритмов в прикладных дистанционных исследованиях.

6. Синхронная визуализация локальных картографических объектов в "голографическом" режиме.

Работа направлена на развитие геометрических методов в многомерных пространствах. Важным индикатором этого формирующегося технологического тренда является патент США, в котором представлено устройство, создающее виртуальный четырехмерный объект. Для решения вопросов визуализации четырехмерных объектов в трехмерном пространстве предлагается выбрать подходящее многообразие, в данном случае шар, устанавливая гомеоморфизм с объектами, находящимися на четырехмерной гиперсфере, с помощью технологических средств картографии.

Схема такого соответствия, поясняющая взаимодействие гомеоморфных многообразий, показана на рис. 8 для меньших по размерности двумерных пространств.

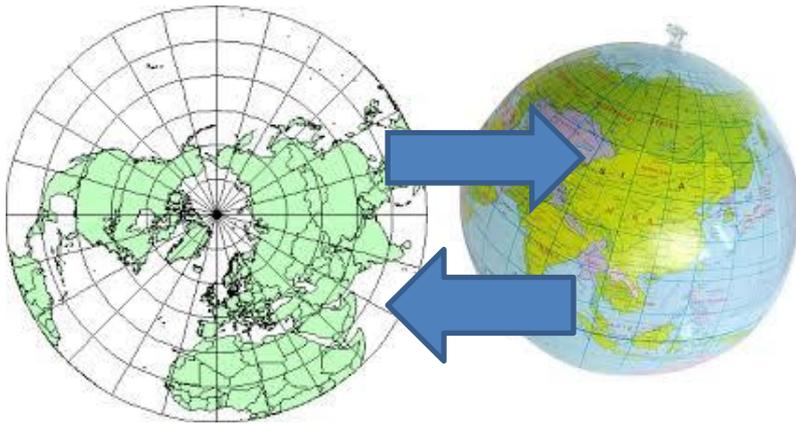


Рис. 8 – Географическая карта и глобус представляют собой информационно одну и ту же систему, визуализированную в разных пространствах



Рис. 9 – Динамическое развитие во времени картографического изображения Земли может быть представлено многослойными схемами его изменений

Задавая внутри шара соседние картографические поверхности сфер картами изменений географии Земли во времени, мы получим послойные параллели в четырехмерном пространстве, которые могут быть отслежены в виде кинокартины в технологии, отображающей процесс изменения мира (рис. 9), последовательно переходя к следующей по порядку слоев географической карте. При этом на поверхности гиперсферы графическое изображение не будет связано с существующими форматами киноотображения напрямую, и можно считать, что речь идет об ином прочтении или ином способе визуализации четырехмерной информации.

1.7. Решение задачи обращения Радона в полосе итерационными методами с нелинейными ограничениями для восстановления структуры грязевого вулкана по виброакустическим данным.

Для реконструкции структуры грязевого вулкана Карabetова применяются томографические методы. Рассматривается линеаризованная прямая задача с данными в виде интегралов по лучам подобно постановкам классической рентгеновской томографии. Геометрия сбора геофизических данных вибропросвечивания вулкана позволяет моделировать прямую задачу восстановления скоростных профилей приповерхностных объемов в виде преобразования Радона в полосе, на одной стороне которой находятся источники, на другой – приемники. Проведено сравнение результатов применения аналитического обращения преобразования Радона, использующего метод конечных характеристических элементов, и итерационного метода Качмажа для решения возникающих систем линейных алгебраических уравнений. Итерационный алгоритм модифицирован с использованием метода минимизации полной вариации. Для случая схемы просвечивания в виде пары ортогональных полос "источники – приемники" показано теоретически, что система двух интегро-дифференциальных уравнений прямой задачи факторизуется, и реконструкция сводится к двум известным вычислительным процедурам, результаты которых затем суммируются.

Результаты работ по проектам РФФИ

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

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

В настоящем проекте разрабатывается методология решения задач природоохранного прогнозирования и проектирования, которые формулируются как математические задачи продолжения. Основная идея проекта заключается в том, что функция состояния модели восстанавливается по неполной информации с помощью алгоритмов, идентифицирующих дополнительно введенные в модель функции неопределенности. Задание множества допустимых функций неопределенности позволяет регулировать свойства решений. Таким образом, задача о поиске функции неопределенности является вспомогательной для продолжения функции состояния из наблюдаемой области в ненаблюдаемую по пространству, времени или компонентам функции состояния. Кроме функций неопределенности в нашем подходе существенное значение имеют функции чувствительности и сопряженные уравнения, которые являются основой для решения обратных задач идентификации выбранных функций неопределенности.

В отчетном периоде изучались задачи продолжения для нелинейных моделей с многокомпонентными функциями состояния, элементы которых связаны между собой цепочками трансформаций. В качестве функций неопределенности выступали правые части моделей (источники) и коэффициенты операторов трансформации. Для идентификации функций неопределенности использовались оптимизационные метаэвристические и градиентные алгоритмы, а также алгоритмы на основе ансамблей решений сопряженных уравнений и операторов чувствительности. В частности, изучались задачи усвоения данных, которые рассматривались как последовательности связанных задач продолжения на последовательности подынтервалов по времени – окон усвоения. При этом в каждом окне усвоения имелся свой набор данных и функций неопределенности. Также изучалось соотношение между обратными задачами, когда все данные измерений имеются к началу работы алгоритма, и задачами усвоения данных, когда данные измерений поступают последовательно. Для моделей химии атмосферы было численно изучено, как на точность продолжения по элементам функции состояния влияет размер окна усвоения.

Проект РФФИ № 19-47-540011p_a "Сценарный подход для оценки качества воздуха в Новосибирске методами прямого и обратного моделирования".

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

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.

При построении реалистичных сценариев обратного моделирования учет городской специфики осуществлялся через параметры, отвечающие за перенос примесей в атмосфере над городом и характерные для города схемы расположения распределенных источников. В частности,

по реальным данным были построены параметризации и исследованы сценарии движения автотранспорта.

Алгоритмы идентификации источников тестировались в сценариях с данными измерений в виде снимков полей концентраций отдельных химических веществ, временных рядов концентраций на постах мониторинга. Новым в проекте является рассмотрение комбинации этих типов данных. Таким образом, количественно оценен эффект совместного использования различных типов данных. Также численно исследована возможность восстановления "тонкой" структуры распределенного источника в различных метеорологических сценариях. Исследована эффективность распараллеливания алгоритма в реалистичных условиях.

В рамках проекта разработана и протестирована методика моделирования качества воздуха для городских условий на основе операторов чувствительности и с использованием данных измерений распределенного и локализованного типов, а также их комбинации.

Проект РФФИ № 19-07-01135 "Разработка алгоритмов на основе ансамблей сопряженных функций для нахождения коэффициентов в моделях продукции – деструкции по данным точечных измерений".

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

В результате выполнения проекта разработаны и исследованы новые версии численных алгоритмов решения обратных коэффициентных задач для моделей продукции – деструкции на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений для точечных данных измерений функций состояния модели. В рамках использованного подхода к решению обратной задачи строится семейство квазилинейных операторных уравнений различных размерностей. Полученные операторные уравнения решаются алгоритмами типа Ньютона – Канторовича. Квазилинейная структура уравнений позволяет также анализировать свойства обратной задачи на основе анализа сингулярного разложения оператора чувствительности. В ходе выполнения проекта изучена возможность предсказывать решение обратной задачи на основе различных агрегатов оператора чувствительности. Проведены отладка и тестирование разработанных алгоритмов на моделях продукции – деструкции различной сложности для химических и химико-биологических систем. В частности, построены согласованные в смысле тождества Лагранжа дискретно-аналитические численные схемы для операторов чувствительности в дискретной форме. В проведенных численных экспериментах алгоритм продемонстрировал высокую эффективность в сравнении со стандартными реализациями безградиентных и градиентных алгоритмов, широко применяемых при исследовании химических, биологических, экономических и других процессов, описываемых моделями типа продукции – деструкции.

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.

Направление "Численный анализ области наблюдаемости систем мониторинга качества атмосферы в Байкальском регионе на основе операторов чувствительности обратной задачи идентификации источников".

Для целей проекта используются методы прямого и обратного моделирования. Одна из основных наших идей в этом проекте – предложить методику оценки эффективности гетерогенной системы мониторинга путем оценки точности идентификации расположенных в регионе источников выбросов, по данным, предоставляемым системой мониторинга. В разрабатываемом подходе обратного моделирования задача идентификации источника преобразуется в квазилинейное операторное уравнение с оператором чувствительности, состоящим из функций чувствительности, которые оцениваются на элементах ансамбля решений сопряженных уравнений. Элементы соответствуют заданным агрегатам элементов данных измерений. Такое построение ансамбля позволяет унифицированно работать с разнородными данными измерений в одном операторном уравнении. Квазилинейная структура полученного операторного уравнения позволяет как решать, так и прогнозировать решения обратной задачи поиска источников. В качестве основного агрегата для построения оценок рассматривался проектор оператора чувствительности на ортогональное дополнение к ядру, описывающий часть информации об источнике выбросов, содержащейся в данных измерений. Для сравнения различных оценок точности идентификации источников использовался набор сценариев обратного моделирования для Байкальского региона. При моделировании использовались данные о гидродинамических процессах за конкретные интервалы времени.

Протестирована эффективность различных оценок информативности данных гетерогенной системы мониторинга, основанных на оценке точности идентификации источников выбросов, расположенных в регионе (рис. 10,*a*), по тем данным, которые предоставляет система мониторинга (рис. 11).

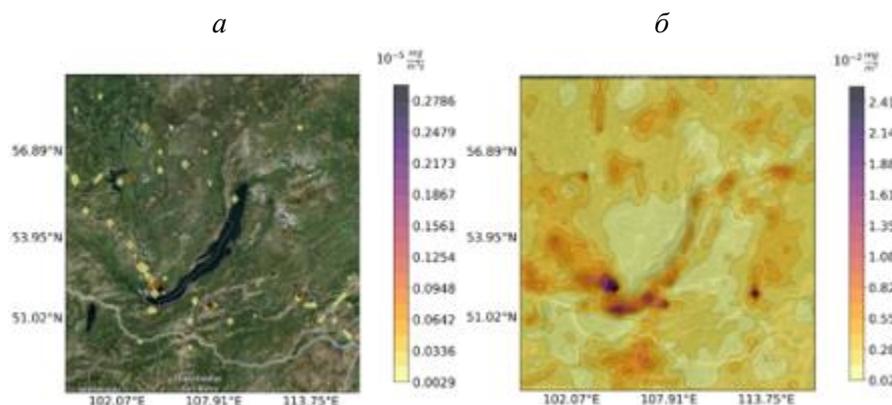


Рис. 10 – Одна из рассмотренных конфигураций источников выбросов (*a*). Средняя за временной интервал концентрация NO для данной конфигураций источников выбросов (*б*)



Рис. 11 – Расположение объектов мониторинга ОЗ: красные крестики – временные ряды; синие кружки – точечные измерения в пространстве и времени; пурпурные треугольники – интегралы за интервал времени

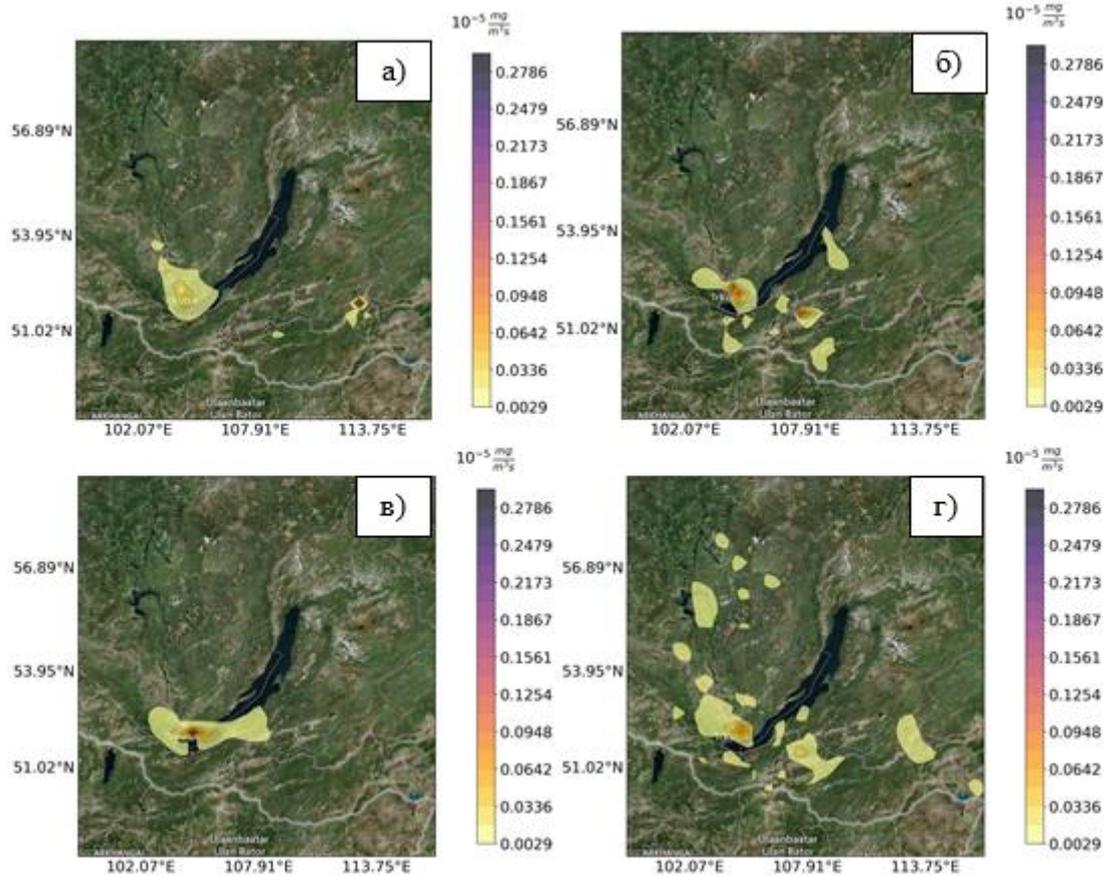


Рис. 12 – Идентификация источника в реалистичной конфигурации для отдельных типов измерений: точечный (а); временные ряды (б); интеграл (в); снимок (г)

Численно проанализированы области наблюдаемости систем мониторинга качества атмосферы, действующих в регионе (рис. 12). Исследование выполнено на основе программы для идентификации источников загрязнений и продолжения полей концентраций загрязняющих примесей по гетерогенным данным мониторинга на основе нестационарной модели переноса и трансформации примесей в атмосфере.

Для сравнения точности построенных оценок решения обратной задачи поиска источников были проведены численные эксперименты с разными компоновками систем мониторинга на характерных сценариях обратного моделирования для Байкальского региона. За прототип распределенной системы мониторинга была взята существующая в регионе сеть Росгидромета (контактные наблюдения) и другие типы сетей (спутниковые данные) (рис. 11). Рассматрива-

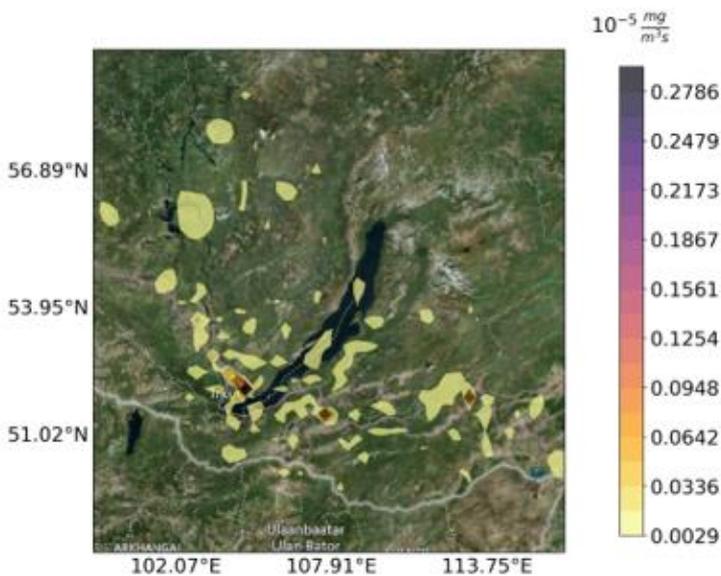
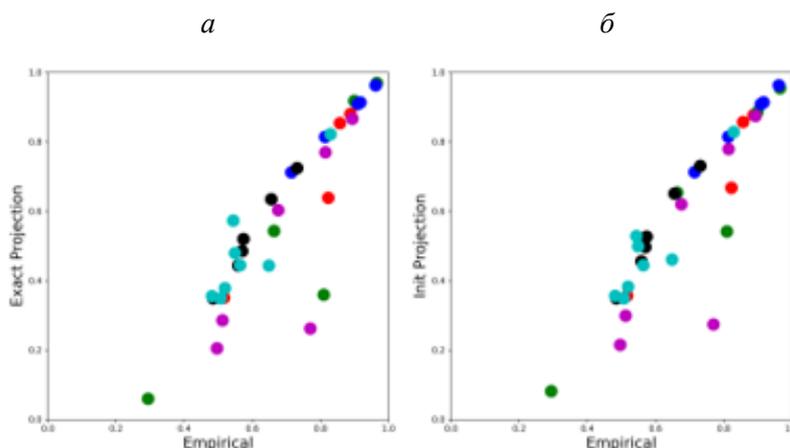


Рис. 13 – Результаты идентификации источника по составным данным

Рассматриваются различные варианты компоновки систем мониторинга, включая как традиционные наземные станции, так и современные спутниковые системы. Анализ показывает, что для точной идентификации источников необходимо использовать комплексные данные и продвинутое моделирование.

Рис. 14 – Соответствие эмпирической ошибки (решения обратной задачи) характеристикам "Exact Projection" (а) и "Init Projection" (б), полученным на основе проекции на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности в численных экспериментах



лись оценки для нескольких типов наблюдений: точечных в пространстве и времени, типа временных рядов, интегральных и данных типа изображений (снимков) – а также по отдельности (рис. 12), в разных сочетаниях и совместно (рис. 13).

В рассмотренных сценариях проекция на ортогональное дополнение ядра оператора чувствительности позволила предсказать результаты идентификации источника с наилучшей точностью по сравнению с другими типами оценок (рис. 14). Разные цвета обозначают разные эксперименты. Близость точек к диагонали характеризует точность оценки

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием известных положений теории сопряженных уравнений. Достоверность полученных численных результатов подтверждается схемой проведения численных экспериментов, когда задается "точное распределение источников", с которым сравниваются результаты решения обратных задач путем применения предлагаемых алгоритмов. Кроме того, выводы проверялись на различных сценариях обратного моделирования для Байкальского региона, задаваемых различными компоновками систем мониторинга.

Основная цель исследований с фундаментальной точки зрения – разработка новых методов прямого и обратного моделирования для эффективного использования данных наблюдений, поставляемых системами мониторинга для решения природоохранных задач, и для оценивания информативности систем мониторинга в регионе с целью их усовершенствования. Наш вклад заключается в разработке и тестировании набора инструментов на основе оператора чувствительности для анализа гетерогенных систем мониторинга качества воздуха. Мы предлагаем их для оценки и оптимизации систем наблюдений и натуральных экспериментов.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Кирилова, И. А., Подорожная В. Т., Шаркеев Ю. П., Николаев С. В., Пененко А. В., Уваркин П. В., Ратушняк П. В., Чебодаева В. В., Анастасиева Е. А., Голушко С. К., Корель А. В. Свойства деминерализованного костного матрикса для биоинженерии тканей // Физико-химические и механические свойства внеклеточного матрикса как сигналы для управления пролиферацией, дифференцировкой, подвижностью и таксисом клеток : моногр. / под ред. И. А. Кириловой. М.: Физматлит, 2021. Гл. 6. 248 с. ISBN 978-5-9221-1918-42.

2. Пененко А. В., Николаев С. В., Голушко С. К., Ромащенко А. В., Кирилова И. А. Численные алгоритмы идентификации коэффициента диффузии в задачах тканевой инженерии // Физико-химические и механические свойства внеклеточного матрикса как сигналы для управления пролиферацией, дифференцировкой, подвижностью и таксисом клеток : моногр. / под ред И. А. Кириловой. М: Физматлит, 2021. Гл. 7. 248 с. ISBN 978-5-9221-1918-4.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Penenko A., Penenko V., Tsvetova E., Gochakov A., Pyanova E., Konopleva V. Sensitivity Operator Framework for Analyzing Heterogeneous Air Quality Monitoring Systems // Atmosphere. – 2021. – 12(12). – 1697 DOI: 10.3390/atmos12121697.

2. 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 Nonlinear Sci. and Num. Simul. 2020. Vol. 22. P. 581–592. DOI: 10.1515/ijnsns-2019-0088 (Ahead of print 2020, published 2021).

3. Yudin, M. S., Some meteorological effects of forest canopy in an atmospheric finite-element model // Proc. SPIE 119166T, 27th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics, Dec. 15, 2021. <https://doi.org/10.1117/12.2603454>.

4. Tsvetova E. A. Mathematical modeling for estimating the distribution of impurities in the Barguzin Bay of Lake Baikal // Proc. SPIE 11916, 27th International symposium on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics, 119166K, Dec. 15, 2021. DOI: 10.1117/12.2603424.

5. Penenko, A. V., Konopleva, V. S., Golenko, P. M., Penenko, V. V. Uncertainty-function-based continuation framework in data assimilation algorithms for atmospheric chemistry models // Proc. SPIE 11916, 27th Intern. symp. on atmospheric and ocean optics, atmospheric physics, 119168O. Dec. 16, 2021. DOI: 10.1117/12.2603422.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Kurbatskaya, L. I. Eddy mixing of momentum and heat in stably stratified boundary layers: Numerical study // J. of Phys.: Conf. Ser. 1715. 2021. 012019 IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/-12019.

2. Kurbatskaya, L. I. Eddy mixing and the intermittent turbulence in atmospheric flows under stronger stratification // AIP Conf. Proc. 2351, 040008 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0052012> Published Online: May 24, 2021.

3. Buchnev, A. A., Getling, A. V., Krovotyntsev, V. A., Pyatkin, V. P. Visualization of the movements of natural objects based on remote sensing data // CEUR Workshop Proc. 2021. Vol. 3006. P. 32–38. DOI: 10.25743/SDM.2021.64.72.006.

4. Penenko, A., Gochakov, A. Parallel speedup analysis of an adjoint ensemble-based source identification algorithm // J. of Phys.: Conf. Ser., IOP Publishing, 2021, 1715, 012072-1-012072-6. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012072.

5. Mikhailov, G. A., Kabanikhin, S. I., Laevsky, Y. M., Penenko, V. V., Glinsky, B. M., Zagorulko, Y. A., Shishlenin, M. A., Podkolodnyy, N. L., Penenko, A. V. International conference "Marchuk scientific readings 2020" (MSR-2020), dedicated to the 95th anniversary of the birthday of academician Guri I. Marchuk // J. of Phys.: Conf. Ser., IOP Publishing, Intern. Conf. "Marchuk Scientific Readings 2021" (MSR-2021), 2021, 2099, 011001. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/011001.

6. Penenko, A., Konopleva, V., Bobrovskikh, A. Numerical comparison of the adjoint problem-based and derivative-free algorithms on the coefficient identification problem for a production-loss model 2021 // 17th International Asian school-seminar "Optimization Problems of Complex Systems (OPCS), IEEE, 2021. DOI: 10.1109/opcs53376.2021.9588680.

7. Казанцев, И. Г., Туребеков, Р. Ж., Султанов, М. А. Моделирование регулярных текстур на изображениях с помощью преобразования Радона // Сиб. журн. индустр. матем. 2021. Т. 24, № 2. С. 62–76. DOI: 10.33048/SIBJIM.2021.24.201.

8. Kazantsev I. G., Mukhametzhanova B. O., Iskakov K. T. Detection of the corner structures in 3D arrays using scalable masks // Sib. Electron. Math. Rep. 2021. V. 18, No 1. P. 61–71. DOI 10.33048/semi.2021.18.006.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Бучнев, А. А., Пяткин, В. П., Русин Е. В. Вычислительные компоненты облачных web-сервисов для обработки данных дистанционного зондирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 66–71. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-66-71.

2. Пененко, А. В., Гочаков, А. В. Численный анализ наблюдаемости источников выбросов от дорожной сети города с помощью оператора чувствительности модели переноса и трансформации примеси в атмосфере // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т. 4, № 1. С. 177–184.

3. Казанцев И. Г. Масштабируемые маски детектора угловых точек на трехмерных изображениях // Интерэкспо Гео-Сибирь. Т. 4. № 1. С. 72–78. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1.

Участие в конференциях и совещаниях

1. 28-я Рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 23–26 ноября 2021 г. – 8 докладов, из них 1 пленарный (Пененко В. В., Пененко А. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).

2. Научная конференция "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 17-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. – 8 докладов (Пененко В. В., Пененко А. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Бучнев А. А., Русин Е. В., Казанцев И. Г.).

3. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 11 докладов, из них 1 пленарный (Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Пененко В. В., Пененко А. В., Юдин М. С., Цветова Е. А., Коноплева В. С., Голенко П. М.).

4. 27-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 5–9 июля 2021 г. – 6 докладов (Пененко А. В., Пененко В. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).

5. All-Russian Conference with international participation "Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes" (SDM-2021), Novosibirsk, August 24–27, 2021. – 1 доклад (Бучнев А. А.).

6. The 13th International scientific conference and young scientist school "Inverse and Ill-Posed Problems: Theory and Numerics", Novosibirsk, April 12–22, 2021 – 1 пленарный доклад (Пененко А. В.).

7. The 13th International conference on large-scale scientific computations, Sozopol (Bulgaria), June 7–11, 2021 – 1 доклад (Пененко А. В., Пененко В. В., Цветова Е. А., Пьянова Э. А.).

8. Научно-практическая конференция по проблемам гидрометеорологических прогнозов, экологии, климата Сибири, посвящ. 50-летию образования ФГБУ "СибНИГМИ", Новосибирск, октябрь 2021 г. – 2 пленарных доклада (Пененко В. В., Пененко А. В.).

9. Международное мероприятие по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2021" включающее конференцию с элементами школы молодых ученых, Москва, 22–27 ноября 2021 г. – 2 доклада, из них 1 приглашенный (Пененко В. В., Пененко А. В.).

10. 3-я конференция "Проекты, поддержанные Правительством НСО и РФФИ, для экономики региона", Новосибирск, 23 декабря 2021 г. – 1 доклад (Пененко А. В.).

11. EGU General Assembly, April 19–30, 2021, EGU21-7510 – 1 доклад (Пененко А. В., Пененко В. В., Цветова Е. А., Пьянова Э. А.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Пененко В. В.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), посвященной 96-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.,

– член программного комитета Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "CITES-2021", Москва, 22–27 ноября 2021 г.,

– член программного комитета 27-го Международного симпозиума "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 5–9 июля 2021 г.,

– член программного комитета 28-й конференции "Аэрозоли Сибири", Томск, 23–26 ноября 2021 г.,

– член программного комитета 13-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.;

2. Пененко А. В.:

– зам. председателя программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), посвящ. 96-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.,

– член программного комитета 13-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.;

3. Пьянова Э. А. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2020" (МНЧ-2021), посвящ. 96-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;

4. Юдин М. С. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), посвящ. 96-летию со дня рождения акад. Г. И. Марчука, Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 5
Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 14
Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 17
Докладов на конференциях – 40, в том числе 6 пленарных
Участников оргкомитетов конференций – 9

Кадровый состав

1. Пененко В. В.	зав. лабораторией	д.ф.-м.н.
2. Бучнев А. А.	с.н.с.	к.т.н
3. Казанцев И. Г	в.н.с.	д.ф.-м.н.
4. Курбацкая Л. И.	с.н.с.	
5. Пененко А. В.	с.н.с.	д.ф.-м.н.
6. Пьянова Э. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
7. Русин Е. В.	с.н.с.	к.т.н.
8. Цветова Е. А.	внс.	к.ф.-м.н.
9. Юдин М. С.	с.н.с.	
10. Карагодина Т. И.	инженер	
11. Коноплева В. С.	инженер	
12. Голенко П. С.	техник	
13. Иванова Г. И.	техник	

Педагогическая деятельность

Пененко В. В. – профессор НГУ
Пененко А. В. – старший преподаватель НГУ

Руководство студентами

Скорик (Коноплева) В. С. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Защита диссертации

Пененко Алексей Владимирович "Математическое моделирование процессов адвекции-диффузии-реакции с усвоением данных наблюдений и решением обратных задач": д.ф.-м.н. 05.13.18. Новосибирск, 31.08.2021.

Защита дипломов

Голенко П. М. – магистр ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

ЛАБОРАТОРИЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА И МАШИННОЙ ГРАФИКИ

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

Важнейшие достижения

Компьютерные модели сферических линз для виртуальных оптических экспериментов

Д.т.н. Дебелов В. А., Долгов Ю. А.

Компьютерные модели сферических линз выполнены в виде набора библиотек на C++, обеспечивающих задание и использование сферических линз в пользовательских приложениях. Модель линзы построена на основе теоретико-множественных пересечений внутреннего или внешнего пространства геометрических примитивов: сферы, цилиндра, конуса и полупространства (плоскости). Для линейно поляризованного светового луча, падающего на линзу, физически корректно вычисляются выходные линейно поляризованные световые лучи – отраженный и заданное количество прошедших лучей с учетом внутренних переотражений (рис. 1). Аналоги не известны, хотя существуют мощные программные продукты, такие как TracePro[®], ASAP[®], которые позволяют решать аналогичные задачи. Однако системы громоздки, дорогостоящи, автономны и не позволяют использовать отдельные полезные функции в пользовательской программе.

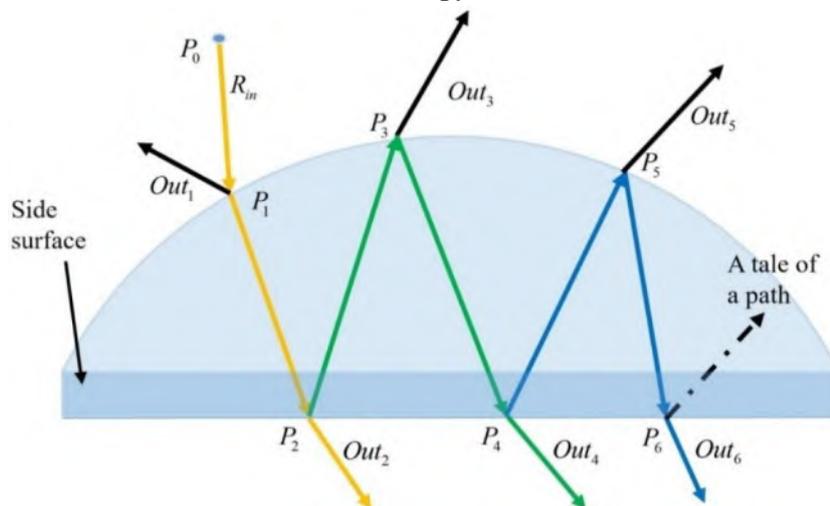


Рис 1 – Поддерево трассировки лучей глубины 5 внутри линзы: R_{in} – падающий луч; Out_* – выходящие из линзы лучи; P_* – узлы; E_* – внутренние отраженные лучи; Side surface – сферическая или коническая монтажная часть боковой поверхности

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Debelov V. A., Dolgov N. Yu. Spherical lenses for virtual optic experiments // Sci. Vis. 2021. Vol. 13, No. 4. P. 111–126. DOI: 10.26583/sv.13.4.09. (Scopus Q3)
2. Debelov V., Dolgov N. Lens library to facilitate composing of virtual scene for optic experiments // CEUR Workshop Proc. 2021. Vol. 3027. P. 339–348. DOI: 10.20948/graphicon-2021-3027-339-348. (Scopus)

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 окт. 2021 г.
2. 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, Нижний Новгород, 27–30 сент. 2021 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2021 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Методы вычислительной математики и информационно-вычислительные технологии решения прямых и обратных задач математической физики, и их приложения в естествознании, включая науки о жизни".

Номер государственной регистрации 121122500035-6.

Руководители: д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Кабанихин С. И., д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

Раздел 1. "Разработка и анализ методов идентификации параметров математических моделей".

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

Разработка экономичного прямого численного алгоритма определения потока тепла на недоступной границе. Для решения задачи Коши для эллиптических уравнений с переменными коэффициентами в стандартных расчетных областях (прямоугольник, круг, кольцо) предложен быстрый численный алгоритм, основанный на методе разделения переменных. Предлагаемый подход использует конечно-разностную аппроксимацию и позволяет получить решение дискретной задачи за число арифметических операций, порядок которого равен числу точек сетки. Решение задачи Коши для эллиптических уравнений, как правило, так или иначе связано с применением итерационных процедур. Известные прямые алгоритмы решения задачи Коши разработаны только для операторов с постоянными коэффициентами (Лапласа, Гельмгольца) и основаны на существовании аналитических решений для задач с такими операторами. Новизна настоящей работы состоит в том, что предложенный алгоритм может быть применен для эллиптического оператора с переменными коэффициентами. Принципиально, что в этом случае нельзя получать аналитические решения задачи.

Предложенный алгоритм существенно расширяет круг решаемых задач и может применяться при создании приборов, способных в реальном масштабе времени определять поток тепла на недоступных для измерения частях неоднородных конструкций, например для определения потока тепла на внутреннем радиусе трубы, выполненной из разных материалов, используя измерения температуры на внешнем радиусе трубы.

Разработка прямого численного метода решения обратной коэффициентной задачи для эллиптического уравнения с кусочно-постоянными коэффициентами. Предложен и численно обоснован оригинальный прямой метод решения обратной коэффициентной задачи для эллиптического уравнения с кусочно-постоянными коэффициентами. Метод основан на фундаментальных положениях линейной алгебры в области спектральных задач и возможности построения точных разностных схем для рассматриваемого класса задач.

Раздел 2 "Расширить класс естественных оптических явлений, отображаемых в компьютерных имитациях реальных обстановок".

Руководитель – д.т.н. Дебелов В. А.

Фактически можно выделить два основных направления исследований: 1) разработка алгоритмов физически корректного расчета взаимодействия поляризованного света с объектами 3D сцены, 2) разработка метода модификации рендеров 3D сцен для поддержки расчета интерференционных картин, возникающих при наличии прозрачных оптически изотропных объектов.

Разработан физически корректный алгоритм расчета интерференционных картин в сценах с оптически изотропными объектами и монохромным освещением. Работа выполнялась в рамках

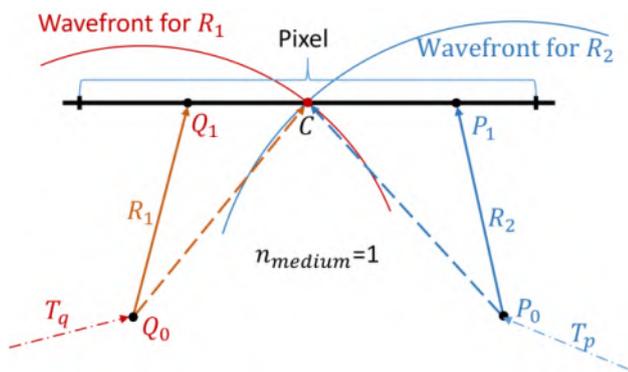


Рис. 2 – Корректировка оптического пути луча

задачи модификации рендеров 3D сцен, направленной на обеспечение расчета интерференционных картин, возникающих при наличии прозрачных оптически изотропных объектов. Предложено решение, включающее: а) более полную спецификацию оптических характеристик объектов сцены; б) более сложную информационную нагрузку трассирующего луча, учитывающую когерентность, поляризацию и фазу световой волны. В отчетном году разработан алгоритм расчета изображения 3D

сцены, основанный на трассировке лучом нулевой толщины. Суть предлагаемого алгоритма заключается в следующем. Для прямой трассировки поляризованных лучей осуществляется построение путей от источника (источников) до картинной плоскости, на которой формируется изображение. Поскольку размеры пикселя многократно превышают длину световой волны, для последних лучей, пересекающих картинную плоскость, на каждом пути, непосредственно пересекающем картинную плоскость, осуществляется корректировка в предположении, что световая волна на данном участке имеет плоский или сферический фронт (рис. 2). На рис. 2 показаны трассирующие пути T_q и T_p , их последние лучи-звенья, а также предполагаемые сферические фронты волн, испускаемых из точек Q_0 и P_0 . Расчет интерференции осуществляется в средней точке, в которой эти фронты пересекаются.

Тестирование осуществлялось на сценах из достаточно распространенного класса устройств интерферометров, начиная со сцен со стеклянным клином и воздушным клином, образованным двумя стеклянными пластинами, и др. В компьютерной графике в первую очередь необходимо подтвердить визуальное соответствие результата расчетов существующим реализациям. Для сравнения выбран интерферометр Ньютона и были использованы: 1) фотография колец Ньютона; 2) расчет на основе трассировки сцены телесным лучом, что, по сути, является трассировкой поля (field tracing) или трассировкой пучков (beam tracing) (рис. 3).

Отметим, что впервые получено изображение колец Ньютона на основе применения трассировки лучей нулевой толщины. Различные геометрические варианты телесных лучей для рендеринга рассматривались несколько десятилетий назад в компьютерной графике, но были отвергнуты в связи с непрактичностью из-за вычислительной сложности, которая непреодолима и в настоящее время.

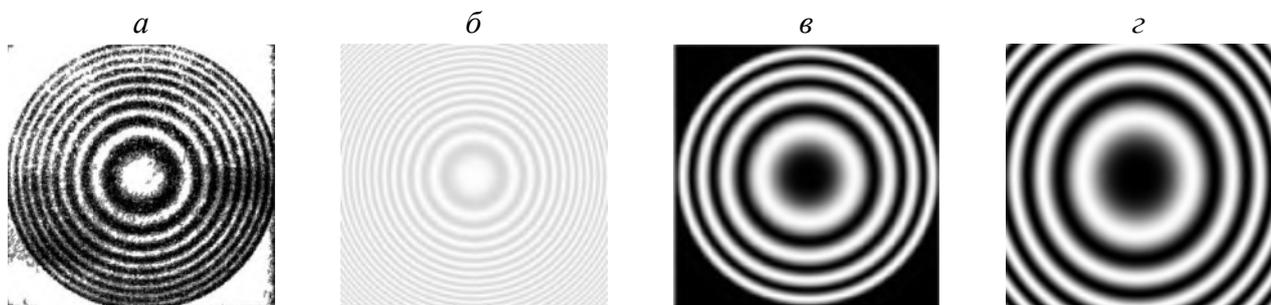


Рис. 3 – Фотография колец Ньютона в проходящем свете (а); изображение, рассчитанное с помощью разработанного алгоритма на основе трассировки лучом нулевой толщины (б); расчет телесным лучом колец Ньютона в отраженном свете (в); аналогичное изображение, рассчитанное на основе трассировки лучом нулевой толщины (г)

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Sorokin, S. B. A direct method for solving the inverse coefficient problem for an elliptic equation with piecewise constant coefficients // J. Appl. Ind. Math. 2021. Vol. 15. P. 331–342. DOI: 10.1134/S1990478921020150.
2. Debelov, V. A., Dolgov, N. Yu. Spherical lenses for virtual optic experiments // Sci. Vis. 2021. Vol. 13, No. 4. P. 111–126. DOI: 10.26583/sv.13.4.09.
3. Debelov, V., Dolgov, N. Rendering of Newton's rings in monochrome light // CEUR Workshop Proc. 2021. Vol. 3027. P. 116–125. DOI: 10.20948/graphicon-2021-3027-116-125.
4. Debelov, V., Dolgov, N. Lens library to facilitate composing of virtual scene for optic experiments // CEUR Workshop Proc. 2021. Vol. 3027. P. 339–348. DOI: 10.20948/graphicon-2021-3027-339-348.
5. Lazareva, G., Korneev, V., Maksimova, A., Arakcheev, A. Parallel algorithm for calculating the dynamics of the electron beam current distribution during pulsed heating of a metal target // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2028. P. 012009-1 – 012009-5. DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012009.
6. Lazareva, G., Korneev, V., Maksimova, A., Arakcheev, A. Parallel algorithm for calculating the dynamics of tungsten vapor distribution // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2028. P. 012010-1 – 012010-5. DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012010.

Свидетельства о регистрации в Роспатенте

Свидетельство № 2021614574. Программа для ЭВМ "Программный комплекс SphL" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Дебелов В. А., Долгов Н. Ю. Да-та регистрации: 26.03.2021.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 4 доклада (Дебелов В. А., Сорокин С. Б., Корнеев В. Д.).
2. 31-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, Нижний Новгород, 27–30 сентября 2021 г. – 2 доклада (Дебелов В. А., Долгов Н. Ю.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Коновалов А. Н. – член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;
2. Дебелов В. А. – член программного комитета 31-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению, Нижний Новгород, 27–30 сентября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 6

Свидетельств о регистрации программ в Роспатенте – 1

Докладов на конференциях – 6

Участников оргкомитетов конференций – 2

Кадровый состав

1. Дебелов В. А. зав. лабораторией д.т.н.
 2. Корнеев В. Д. снс к.т.н.
 3. Максимова А. Г. мнс
 4. Марусина О. А. техник 1-й катег.
 5. Роженко А. И. снс д.ф.-м.н.
 6. Сорокин С. Б. внс д.ф.-м.н.
- Максимова А. Г. – молодой научный сотрудник.

Педагогическая деятельность

Сорокин С. Б. – профессор НГУ

Защита дипломов

Долгов Н. Ю. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Дебелов В. А.

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ ГЕОФИЗИКИ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Имомназаров Х. Х.

Важнейшее достижение**Новая смешанная вариационная задача и система Стокса с сингулярной правой частью**

Д.ф.-м.н. Урев М.В.

В ограниченной $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ рассматривается задача Стокса

$$\begin{cases} -\nu \Delta \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{f}, \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \text{ в } \Omega \\ \mathbf{u} = \mathbf{0} \text{ на } \partial\Omega, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{f} \in \mathbf{H}^{-1-\varepsilon}(\Omega)$, $0 < \varepsilon < 1/2$, $\nu > 0$, $\mathbf{H}^s(\Omega)$ – пространство Соболева. Для $\mathbf{f} \in \mathbf{H}^s(\Omega)$ и $s \geq -1$ задача (1) вариационным смешанным методом изучена достаточно полно. Для $\mathbf{f} \in \mathbf{H}^{-1-\varepsilon}(\Omega)$ обобщенное решение задачи (1) будем искать с помощью расширенного смешанного вариационного метода.

Пусть $X_1 = \mathbf{H}_0^{1-\varepsilon}(\Omega)$, $X_2 = \mathbf{H}_0^{1+\varepsilon}(\Omega)$, $M_1 = H_{\perp}^{\varepsilon}(\Omega)$, $M_2 = M_1$. Требуется найти пару $(\mathbf{u}, p) \in X_1 \times M_2$:

$$\begin{cases} a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) + b_1(\mathbf{v}, p) = \langle \mathbf{f}, \mathbf{v} \rangle_{-1-\varepsilon, 1+\varepsilon} \quad \forall \mathbf{v} \in X_2, \\ b_2(\mathbf{u}, q) = 0 \quad \forall q \in M_1 \end{cases}, \quad (2)$$

где $a(\cdot, \cdot)$, $b_1(\cdot, \cdot)$, $b_2(\cdot, \cdot)$ – билинейные формы, связанные с операторами задачи (1).

Теорема. *Задача Стокса (1), когда $\mathbf{f} \in \mathbf{H}^{-1-\varepsilon}(\Omega)$ ($0 < \varepsilon < 1/2$), имеет единственное обобщенное решение $(\mathbf{u}, p) \in \mathbf{H}_0^{1-\varepsilon}(\Omega) \times (H_{\perp}^{\varepsilon}(\Omega))$ как решение смешанной вариационной задачи (2) и для него справедлива оценка*

$$\|\mathbf{u}\|_{1-\varepsilon, \Omega} + \|p\|_{-\varepsilon, \Omega} \leq C \|\mathbf{f}\|_{-1-\varepsilon, \Omega},$$

где $C > 0$ – положительная постоянная, не зависящая от \mathbf{f} .

Проведенный анализ расширенной смешанной постановки (2) задачи Стокса (1) с сингулярной правой частью может служить основой для построения и обоснования численных схем метода конечных элементов в дробных пространствах Соболева.

Результаты исследований опубликованы в работе

1. Urev M. V. New mixed variational problem and the Stokes system with a singular right-hand side // Comput. Math. and Math. Phys. 2021. Vol. 61, No. 12. P. 2086–2093. DOI: 10.1134/S0965542521120149 (Web of Science, Scopus).

Результаты исследований представлены на конференции

"Интерэкспо Гео-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершаемым в 2021 г.

в соответствии с планом НИР института

Проект НИР "Математические модели и методы решения прямых и обратных задач, численное моделирование на суперЭВМ для решения задач математической геофизики применительно к

разведке полезных ископаемых, активному мониторингу и исследованию природных и техногенных опасных явлений".

Номер государственной регистрации 0251-2021-0004.

Руководитель д. т. н. Ковалевский В. В.

Этап 2021 г. "Математическое моделирование. Высокопроизводительные вычисления. Информационно-вычислительные системы и среды в науке и образовании".

С помощью расширенной схемы абстрактной смешанной вариационной задачи рассмотрена смешанная вариационная постановка двумерной задачи Стокса в ограниченной области с сингулярной правой частью, в частности дельта-функцией. Сформулированы условия, при выполнении которых доказана теорема о разрешимости и устойчивости решения такой обобщенной задачи.

Разработаны методы математического моделирования эффективных параметров ядра на основе их томографических изображений для решения задач из области физики горных пород. На основе разработанного программного обеспечения проведено исследование оценки параметров, которые должны быть заложены при создании отечественной измерительной системы сбора данных акустической эмиссии и разработке прототипа программного обеспечения для моделирования процесса акустической эмиссии на реальных образцах ядра 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 к шумам и высокая разрешающая способность, обеспечивающая возможность определения оптимальной геометрии приемников при проектировании.

Исследовано классическое решение в полупространстве второй краевой задачи для переопределенной стационарной системы типа Стокса, возникающей в двухжидкостной среде с одним давлением. Получено решение с использованием преобразования Фурье по горизонтальным переменным. Показано влияние кинетических параметров среды на решение системы.

Построены две нелинейные динамические системы, моделирующие функционирование простейшего циркадного осциллятора. Получены условия единственности стационарных точек этих систем и условия существования циклов в их фазовых портретах.

Численно решена задача переноса растворителя и растворенного вещества в химически инертной упруго деформируемой горной породе с использованием метода интегрального преобразования Лагерра.

Проведены численные эксперименты с целью фиксации влияния изменений сейсмических волн в случае трансформирования границ магматической камеры. Известно, что плотность жидких магм равна 2,2-3,0 г/см³ и примерно на 10 % ниже, чем плотность твердых пород соответствующего состава. Проведенные численные эксперименты выполнены для моделей с резкими границами что, вероятно, нехарактерно для магматических камер. Важное значение имеет вязкость магм – свойство, определяющее их подвижность (текучесть). Вязкость магматических расплавов, которая зависит от состава и температуры, варьируется в широких пределах. Наименьшей вязкостью (наибольшей подвижностью) обладают высокотемпературные магмы ультраосновного и основного составов, а наибольшая вязкость характерна для кислых магм, возникающих при относительно низкой температуре.

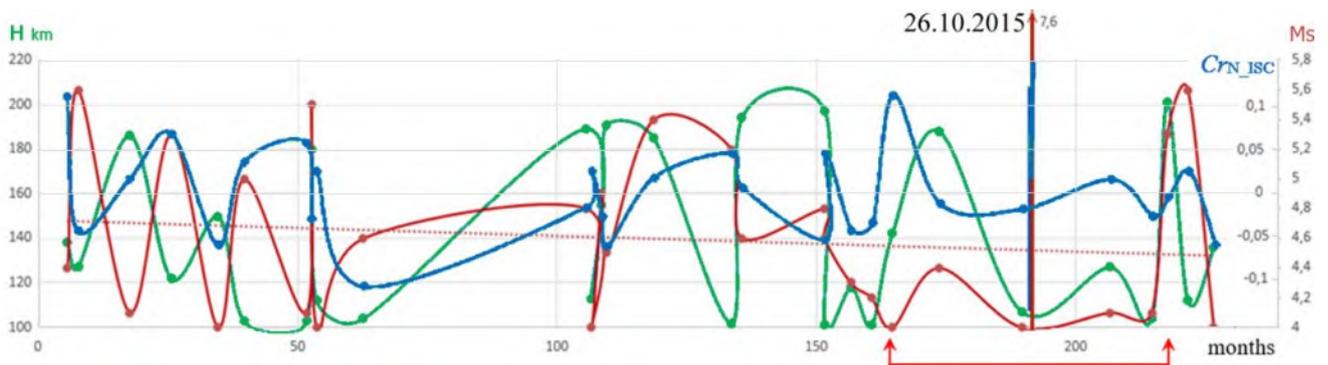


Рис. 1 – Динамика параметров H , M_s и CrN_{ISC} глубинных землетрясений с $H \geq 100$ км за 2000–2018 гг. в Памиро-Гиндукушской сейсмофокальной зоне (ПГСЗ); стрелками отмечен интервал синхронизации графиков до и после глубинного землетрясения ПГСЗ 26 октября 2015 г. ($M_s = 7.6$, $H = 206$ км)

Разработаны алгоритмы и протестирована программа для прямого 3D моделирования в методе электротомографии с учетом рельефа местности для установки SCALA-48 (с нагоняющим профилированием). Программа написана с использованием GPU, что позволяет оперативно проводить моделирование. Проведены расчеты разломных структур в южной и центральной частях Курайской впадины по данным методов постоянного тока. Трехмерное моделирование позволило уточнить конструктивные особенности южного (зона сочленения Юго-Западного и Ештыкельского прогибов) и центрального участков.

Реализованный в геоинформационной системе GIS-ENDDDB метод расчета статистической модификации нормированного крипекса CrN_{cat} позволяет использовать его в комплексном геодинамическом анализе, выявляя физически обоснованные закономерности процессов сейсмогенеза в крупных сейсмических очагах. В результате исследования в очаговых зонах ряда крупнейших землетрясений сделаны выводы о следующих закономерностях: положительные значения крипекса в его первые часы (объяснимые влиянием процесса дилатансии), резкие изменения крипекса при глубинных переходах (объяснимые термодинамическим влиянием и ростом давления с глубиной).

Установлены закономерности изменения во времени параметров M_s , H и CrN_{cat} на отдельных фрагментах роевых последовательностей для областей с различными геотектоническими обстановками. Не исключено, что прямо пропорциональная синхронность изменения параметров H , M_s и CrN_{cat} в рое характеризует состояние среды в активном очаге, благоприятное для завершения подготовки крупного землетрясения (рис. 1).

Исследовалась сила Лоренца. Доказано ее обнуление несиловыми магнитными полями.

Обобщены теоретические разработки по вычислению дифференциальных уравнений (ДУ). Ранее в двумерном случае были изучены свойства группы Ли G , являющейся группой эквивалентности уравнения эйконала, волнового уравнения и других ДУ; получены различные приложения к математической физике и дифференциальной геометрии. Затем систематически исследован трехмерный аналог группы G – 10-параметрическая группа G_{10} , которая является подгруппой основной группы эквивалентности трехмерного уравнения эйконала $(u_x)^2 + (u_y)^2 + (u_z)^2 = n^2(x, y, z)$ 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. Найдены дифференциальные инварианты (ДИ) этой группы и связи между ними, ее 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. Некоторые ДИ, геометрический смысл их и ОИД получены с помощью римановой и дифференциальной геометрий: это скалярная кривизна R риманова пространства с метрикой $dl^2 = n^2(x,y,z) \cdot (dx^2 + dy^2 + dz^2)$ и его первый и второй дифференциальные параметры Бельтрами Δ_{1u} , Δ_{2u} . Данная метрика ассоциирована с уравнением эйконала и определяет кинематику распространения волн в неоднородной среде с показателем преломления $n(x,y,z) = 1/v(x,y,z)$. Эти величины и формулы есть трехмерные аналоги свойств группы G двумерного случая. Получено выражение величины R через другие ДИ группы G_{10} с помощью методики подбора. Найти его, ДИ и ОИД группы G_{10} помогает также использование геометрических аналогий с результатами двумерного случая.

Рассмотрены оптимальные разностные схемы для решения волнового уравнения с использованием преобразования Лагерра. В разностную схему уравнений для гармоник вводятся дополнительные параметры. Численные значения этих параметров получаются минимизацией погрешности разностной аппроксимации уравнения Гельмгольца. Полученные таким образом оптимальные значения параметров используются при построении разностных схем – оптимальных разностных схем. Рассмотрены оптимальные разностные схемы 2-го и 4-го порядков аппроксимации. Приведены оптимальные параметры разностных схем. Значения этих параметров зависят только от отношения пространственных шагов разностной сетки. Показано, что использование оптимальных разностных схем ведет к повышению точности решения уравнений. Простая модернизация разностной схемы дает повышение эффективности алгоритма.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 21-51-15002а "Математическое моделирование распространение волн в анизотропных средах с сингулярными источниками"

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Имомназаров Х. Х.

В рамках проекта за отчетный период рассмотрена переопределенная стационарная система дифференциальных уравнений двухскоростной гидродинамики с одним давлением с сингулярным источником во всем пространстве.

Исследовано классическое решение в полупространстве второй краевой задачи для переопределенной стационарной системы типа Стокса, возникающей в двухжидкостной среде с одним давлением. Получено решение с использованием преобразования Фурье по горизонтальным переменным, которое может быть использовано для моделирования развития осадочных бассейнов, исследования тепловой конвекции в мантии, изучения влияния континентов на структуру тепловых потоков в мантии и ряда других задач.

Исследована внешняя двумерная краевая задача для переопределенной стационарной системы, возникающая в двухскоростной гидродинамике. Для рассматриваемой задачи установлена вариационная постановка задачи.

Показано, что вариационная задача для системы уравнений двухскоростной гидродинамики корректна в соответствующем пространстве Соболева. Также для нее установлена регулярность решений в специальных весовых соболевских пространствах.

Получена система уравнений типа Хопфа из системы нестационарных уравнений двухскоростной гидродинамики с одним давлением. Считается, что диссипация энергии происходит за счет коэффициента межкомпонентного трения.

Исследована задача Коши для данной системы уравнений в классе ограниченных измеримых функций на основе метода Кружкова.

Разработаны эффективные алгоритмы моделирования распространения акустико-гравитационных и сейсмических волн, возбуждаемых различного типа сингулярными источниками, и их взаимодействие на границе раздела в совмещенной модели "земля – атмосфера".

Проект РФФИ № 19-01-00347 "Цифровой керн: методология построения разномасштабной модели горных пород путем проведения виртуальных физических экспериментов"

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Решетова Г. В.

В рамках проекта в 2021 г. разработана математическая модель и метод численного решения для моделирования распространения волн малой амплитуды в флюидонасыщенной пористой среде в областях с разной пористостью, включая области с чистой жидкостью и чистым твердым телом. Основные уравнения получены из общей гиперболической термодинамически совместимой модели течения сжимаемой жидкости в деформированной пористой среде. Полученные линейные дифференциальные уравнения в частных производных (PDE) образуют симметричную гиперболическую систему, записанную для скоростей, относительных скоростей, давления и напряжения сдвига, что обеспечивает применение схемы конечных разностей высокого порядка точности на сдвинутых сетках. Подход с диффузной поверхностью применяется для моделирования волновых полей в областях с границами раздела сред с разной пористостью, включая чистые фазы. Последний позволяет проводить вычисления с использованием единой системы PDE на прямоугольных сетках без громоздкой техники отслеживания интерфейса. Проведенные численные эксперименты подтверждают эффективность предложенного подхода.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Urev, M. V. New mixed variational problem and the Stokes system with a singular right-hand side // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2021. Vol. 61, No 12. P. 2086–2093. DOI: 10.1134/S0965542521120149.

2. Mastryukov, A. F. Difference schemes based on the Laguerre transform // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2021. 61(3). P. 351–358. DOI: 10.1134/S0965542521030131.

3. Имомназаров, Б. Х., Михайлов, А. А., Хайдаров, И. К., Холмуродов, А. Э. Численное решение задачи переноса растворенного вещества в пороупругом глинистом сланце // *СЭМИ.* 2021. Т. 18, No 1. С. 694–702.

4. Имомназаров, Ш. Х., Михайлов А. А. Спектральный метод Лагерра для решения одномерной динамической задачи магнитоупругости // *Матем. заметки СВФУ.* 2021. Т. 28, No 2. С. 103–110. DOI: 10.255877SVFU.2021.46.60.007.

5. Reshetova, G., Romenski E. Diffuse interface approach to modeling wavefields in a saturated porous medium // *Appl. Math. and Comput.* 2021. V. 398, 125978. DOI: 10.1016/j.amc.2021.125978.
6. Reshetova, G. V., Anchugov, A. V. Digital core: Time reversal modeling of acoustic emission events // *Russ. Geol. and Geophys.* 2021. 62(4). P. 486–494. DOI: 10.2113/RGG20194152, 10.15372/GiG2020148.
7. Reshetova, G., Cheverda, V., Lisitsa, V. Digital twins of geological objects: Development and use // In: Sokolinsky L., Zymbler M. (eds) *Parallel Computational Technologies. PCT 2021. Communications in Computer and Information Science.* V. 1437. V. 300–311. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-81691-9_21.
8. Reshetova, G., Romenskiy E. I. Diffuse-interface simulation of wave fields in porous media // *Dok. Earth Sci.* 2021. V. 497, No 2. P. 319–322. DOI: 10.1134/S1028334X21040139.
9. Reshetova, G., Romenskiy, E. I. Diffuse-interface simulation of wave fields in porous media // *Appl. Math. and Comput.* 2021. V. 398, 125978. DOI: 10.1016/j.amc.2021.125978.
10. Romenski, E., Reshetova, G., Peshkov, I. Computational model for compressible two-phase flow in deformed porous medium. In: Gervasi O. et al. (eds) *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2021. ICCSA 2021. Lect. Notes in Comput. Sci.* V. 12949. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-86653-2_16.
11. Romenski, E., Reshetova, G., Peshkov, I. Two-phase hyperbolic model for porous media saturated with a viscous fluid and its application to wavefields simulation // *Appl. Math. Mod.* DOI: arxiv.org/abs/2103.06969.
12. Cheverda, V., Efimova, E., Reshetova, G. Full waveform inversion in viscoelastic media // Gervasi O. et al. (eds.) *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2021. ICCSA. 2021. Lect. Notes in Comp. Sci. Vol. 12950.* Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-86960-1_23.
13. Cheverda, V., Lisitsa, V., Protasov, M., Reshetova, G. Digital twins of hydrocarbon reservoir // Gervasi O. et al. (eds.) *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2021. ICCSA. 2021. Lect. Notes in Comput. Sci. Vol. 12958.* Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-87016-4_48.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Kuyuliev, S., Imomnazarov, K., Iskandarov, I. The regularity of a Stokes-type problem for a stationary system of the two-velocity hydrodynamics on the plane // *AIP Conf. Proc.* 2365, 070006 (2021). DOI: 10.1063/5.0059057.
2. Turdiyev, U., Imomnazarov, K. A system of equations of the two-velocity hydrodynamics without pressure // *AIP Conf. Proc.* 2365, 070002 (2021). DOI: 10.1063/5.0058372.
3. Imomnazarov, K., Kholmuradov, A. E., Dilmuradov, N. Direct and inverse dynamic quasilinear problems of poroelasticity // *AIP Conf. Proc.* 2365, 070020 (2021). DOI: 10.1063/5.0057154.
4. 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 // *MSR2020. J. of Physics: Conf. Ser.* 2021. V. 1715. Art. Num. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012057.
5. Nesterova, G. V., Surodina, I. V. Electric and electromagnetic synthetic logs in designing digital multi-physics reservoir model EAGE // *Геомодель 2021: труды 23-й конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа, г. Геленджик, 6–10 сент. 2021 г.; [Conf. Proc., Geomodel 2021, Sept. 2021, Vol. 2021. P. 1–5.]* DOI: 10.3997/2214-4609.202157121.

6. Mikhaylov, I., Surodina, I., Glinskikh, V., Nikitenko, M. Signals of electromagnetic tool with toroidal coils in highly deviated wells // J. of Phys. Conf. Ser. Vol. 2099, 012059, Intern. Conf. "Marchuk Scientific Readings 2021" (MSR-2021), Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012059.

7. Sanchaa, A. M., Nevedrova, N. N., Surodina, I. V. Numerical modeling of fault structures in the Kurai basin of Gorny Altai based on data from direct current methods // J. of Phys. Conf. Ser. Vol. 2099, 012059. Intern. Conf. "Marchuk Scientific Readings 2021" (MSR-2021), Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012061.

8. Glinskikh, V., Nikitenko, M., Surodina, I. Electromagnetic sounding with a toroidal source in vertical and deviated oil wells: Numerical simulation // EAGE. 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition, Amsterdam (Netherlands), Amsterdam, Oct. 18–21, 2021. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.202011426.

9. Mikheeva, A. V., Kalinnikov, I. I. Creepex as a parameter of seismo-geodynamic studies based on geo-information systems // CEUR Workshop proc.: All-Russian conf. "Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes", Novosibirsk, Aug. 24–27, 2021. P. 194–202. DOI: 10.25743/SDM.2021.18.89.024.

10. Kobalo, N. S., Kulikov, A. A., Titov, I. I. Mutation hotspots of SARS-CoV-2 RNA motifs conserved in betacoronaviruses // J. of Physics: Conference Series: V. 2099. P. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012037.

11. Голубятников, В. П., Подколотная, О. А., Подколотный, Н. Л., Аюпова, Н. Б., Кириллова Н. Е., Юношева Е. В. Об условиях существования циклов в двух базовых моделях циркадного осциллятора млекопитающих // СибЖИМ. 2021. Т. 24, № 4 (88). С. 39–53. DOI: 10.33048/SIBJIM.2021.24.403.

12. Имомназаров, Х. Х., Имомназаров, Ш. Х., Урев, М. В., Бахрамов, Р. Х. Решение одной переопределенной стационарной системы типа Стокса в полупространстве // СибЖИМ. 2021. Т. 24, № 4. С. 54–63. DOI: 10.33048/SIBJIM.2021.24.404.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Санчаа, А. М., Суродина, И. В., Неvedрова, Н. Н. Трехмерное моделирования разломной структуры в южной части Курайской впадины по данным вертикальных электрических зондирований // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология : Материалы 17-й Международной научной конференции "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. Т. 2, № 2. С. 265–271. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-265-271.

2. Лапковская, А. А. Сухорукова, К. В. Петров, А. М. Суродина, И. В. Трехмерное моделирования разломной структуры в южной части Курайской впадины по данным вертикальных электрических зондирований // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология : Материалы 17-й Международной научной конференции "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. Т. 2, № 2. С. 109–116. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-109-1161.

3. Михайлов, И. В., Никитенко, М. Н., Суродина, И. В. Обоснование физических экспериментов с электромагнитным зондом в тонкослоистых моделях по результатам численного моделирования // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и

разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология : Материалы 17-й Международной научной конференции "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. Т. 2. № 2. С. 168–173. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-168-173.

4. Урев, М. В., Имомназаров, Х. Х., Искандаров И. К. О краевой задаче для одной переопределенной системы в полуплоскости // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология : Материалы 17-й Международной научной конференции "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. Т. 4. № 1. С. 226–231.

5. Михеева, А. В. Примеры геоинформационного исследования сейсмичности Южно-Азиатского региона // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов : труды 8-й науч.-техн. конф., Петропавловск-Камчатский, 26 сент. – 2 окт. 2021 г. С. 187–191.

6. Калинин, И. И., Михеева, А. В. Особенности поведения крипекс-параметра в глубинных сейсмофокальных зонах // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений : тез. 2-й Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию акад. В. И. Кейлис-Борока, Москва, 29–30 сент. 2021 г. С. 52–53.

7. Михеева, А. В., Калинин, И. И. Крипекс-анализ процессов в очаговых зонах крупных землетрясений средствами GIS-ENDDB // Рос. сейсмол. журн. 2021. Т. 3, № 4. С. 7–17. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.4.01.

8. Аксенов, В. В. О свойствах силы Лоренца в естественном магнитном поле Земли // Наука и инновации –современные концепции : Сб. статей Междунар. науч. форума, Москва, 30 июля 2021 г. / отв. ред. Д. Р. Хисматуллин. С. 65–73.

9. Аксенов, В. В. О единственности разделения вихревого магнитного поля на тороидальную и полоидальную части // Наука и инновации –современные концепции : Сб. статей Междунар. науч. форума, Москва, 30 июля 2021 г. / отв. ред. Д. Р. Хисматуллин. С. 128–139.

10. Сапетина А.Ф., Глинский Б.М., Мартынов В.Н. Моделирование активного вибропросвечивания вулканической постройки для оценки возможности проведения мониторинга // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов: труды 8-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Петропавловск-Камчатский. 26 сент. – 2 окт. 2021 г.) / отв. ред. Д. В. Чебров; Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 293–297.

11. Имомназаров Х. Х., Куйлиев С. Б., Искандаров И. К., Ким В. В. Внешняя двумерная краевая задача для одной переопределенной системы // ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых : сб. трудов Регион. науч.-практ. конф., Хабаровск, 12–16 апр. 2021 г. С. 26–32.

12. Искандаров И. К., Имомназаров Х. Х., Куйлиев С. Б. О регулярности двумерной задачи для одной переопределенной системы // ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых : сб. трудов Регион. науч.-практ. конф., Хабаровск, 12–16 апр. 2021 г. С. 33–39.

13. Эркинова Д. А., Имомназаров Б.Х., Имомназаров Х.Х. Одномерная система уравнений типа Хопфа // ТОГУ-Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых : сб. трудов Регион. науч.-практ. конф., Хабаровск, 12–16 апр. 2021 г. С. 61–69.

Участие в конференциях и совещаниях

1. "Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов", Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г. – 3 доклада (Мартынов В. Н., Михеева А. В.).
2. "Наука и инновации – современные концепции", Москва, 30 июля 2021 г. – 2 доклада (Аксёнов В. В.).
3. "Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов" SDM-2021, Новосибирск, 24–27 августа 2021 г. – 1 доклад (Михеева А. В.).
4. "Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных", Новосибирск, 6–10 сентября 2021 г. – 1 доклад (Михеева А. В.).
5. "Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений", Москва, 29–30 сентября 2021 г. – 1 доклад (Михеева А. В. – 1 доклад).
6. "Интерэкспо Гео-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. – 4 доклада (Суродин И. В., Урев М. В., Имомназаров Х. Х.).
7. "Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI в.", Новосибирск, 14–15 сентября 2021 г. – 2 доклада (Суродин И. В.).
8. EAGE Annual Conference & Exhibition, Amsterdam (Netherlands), October 18–21, 2021 – 1 доклад (Суродин И. В.).
9. "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 3 доклада (Суродин И. В., Имомназаров Ш. Х., Куликов А. И.).
10. "Геомодель-2021": 23-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа, Геленджик, 6–10 сентября 2021 г. – 1 доклад (Суродин И. В.).
11. "Computational science and its applications" (ICCSA-202), Cagliari (Italy), September 13–16, 2021 – 3 доклада (Решетова Г. В.).
12. "Parallel computational technologies (PCT-2021)", Volgograd, March 30 – April 1, 2021 – 1 доклад (Решетова Г. В.).
13. "Optimization problems of complex systems" (OPCS'21), Moscow – Novosibirsk – Almaty, September 13–17, 2021 – 1 доклад (Михайлов А. А., Имомназаров Х. Х.).
14. Региональная научно-практическая конференция "ТОГУ–Старт: фундаментальные и прикладные исследования молодых", Хабаровск, 12–16 апреля 2021 г. – 3 доклада (Имомназаров Х. Х.).
15. Республика конференцияси "Глобаллашув даврида математика ва амалий математиканинг долзарб масалалари", Ташкент, 1–2 июня 2021 г. – 2 доклада (Имомназаров Х. Х., Михайлов А. А.).
16. Респ. научной конференции с участием зарубежных ученых "Сарымсаковские чтения", Ташкент, 16–18 сентября 2021 г. – 3 доклада (Имомназаров Х. Х., Урев М. В., Михайлов А. А.).
17. Международная научно-практическая конференция "Современные проблемы математики, физики и математического моделирования", Карши (Узбекистан), 3–4 декабря 2021 г. – 2 доклада (Имомназаров Х. Х., Урев М. В.).

18. 7-я Международная научная конференция "Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми 2021", г. Фергана (Узбекистан), 15–17 ноября 2021 г. – 3 доклада (Имомназаров Х. Х., Урев М. В., Михайлов А. А.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Суродина И. В. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;

2. Подколотный Н. Л. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;

3. Имомназаров Х. Х.

– член программного комитета Республиканской научной конференции с участием зарубежных ученых "Сарымсаковские чтения", Ташкент, 16–18 сентября 2021 г.,

– член программного комитета Международная научно-практическая конференция "Современные проблемы математики, физики и математического моделирования", Карши (Узбекистан), 3–4 декабря 2021 г.,

– член программного комитета 7-й Международной научной конференции "Актуальные проблемы прикладной математики и информационных технологий – Аль-Хорезми 2021", г. Фергана (Узбекистан), 15–17 ноября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 14

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 26

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 41

Докладов на конференциях – 37, в том числе 4 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 4

Кадровый состав

1. Имомназаров Х. Х.	зав. лабораторией	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. Куликов А. И.	ведущ. программист	
5. Мартынов В. Н.	с.н.с.	
6. Мاستрюков А. Ф.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
7. Меграбов А. Г.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
8. Михайлов А. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
9. Михеева А. В.	н.с.	к.ф.-м.н.
10. Подколотный Н. Л.	с.н.с.	
11. Решетова Г. В.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
12. Суродина И. В.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
13. Урев М. В.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
14. Шерстюгина Л. П.	техник 1-й катег.	

Педагогическая деятельность

- Аксенов В. В. – профессор СибУПК
Белоносов А. С. – доцент ММФ НГУ
Меграбов А. Г. – профессор НГТУ
Подколodный Н. Л. – старший преподаватель НГУ
Урев М. В. – доцент НГУ, профессор СибАГС

Руководство студентами

- Койнов В. В. – магистрант 2-го года ММФ НГУ, руководитель Решетова Г. В.

Руководство аспирантами

- Кобало Н. С. – 4-й год, ИВМиМГ, руководитель Имомназаров Х. Х.

Награды

- Койнов В. В., 1-е место МНСК-2021.

ЛАБОРАТОРИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Шишленин М. А.

Важнейшие достижения

Моделирование сценариев распространения COVID-19 в Новосибирской области

К.ф.-м.н. Криворотько О. И., к.т.н. Зятыков Н. Ю., Неверов А. В., Сосновская М. И.

Создан комплекс программ численного решения обратных задач для математических моделей распространения новой коронавирусной инфекции COVID-19 в Новосибирской области и построения сценариев развития распространения заболевания в зависимости от принятых карантинных мер и накопленного коллективного иммунитета. Комплекс программ основан на сборе и обработке эпидемиологических данных (<https://covid19-modeling.ru/>), оптимизационного алгоритма (состоящего из комбинации методов древовидных оценок Парзена и градиентного) решения обратной задачи определения вектора из 7 неизвестных кусочно-постоянных параметров для каждого 30-дневного временного участка для системы из 7 ОДУ и агентной модели по дополнительным измерениям количества случаев выявления, тестирования и летальных исходов в фиксированные моменты времени, а также использовании дополнительной информации о решении обратной задачи в виде накопленных населением антител к вирусу SARS-CoV-2 (по лабораторным данным компании "Инвитро" в Новосибирске). Показано, что учет коллективного иммунитета региона позволяет увеличить точность моделирования и прогнозирования количества выявленных случаев до 90 % (рис. 1).



Рис. 1 – Моделирование распространения ежедневно выявленных случаев COVID-19 в Новосибирской обл. с 12.03.2020 по 30.11.2021 (расчеты проведены 17.10.2021); красная линия – SEIR-HCD модель без учета коллективного иммунитета; синяя линия – SEIR-HCD модель с учетом доли выявленных антител IgG к COVID-19; красные точки – ежедневно выявленные случаи с 22.05.2020 по 17.10.2021; вертикальные пунктирные линии и серые области – ограничительные меры. Прогноз сделан на 44 дня с 18.10 по 30.11 при сохранении карантинных мер.

Сравнение прогноза с реальными данными на 20.11.2021: данные – 392 человека, SEIR-HCD – 604 человека (ошибка 54 %), SEIR-HCD уточненная – 356 человек (ошибка 9 %)

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Криворотко О. И., Кабанихин С. И., Сосновская М. И., Андорная Д. В. Анализ чувствительности и идентифицируемости математических моделей распространения эпидемии COVID-19 // Вавиловский журн. генетики и селекции. 2021. Т. 25(1). С. 82–91. DOI: 10.18699/ VJ21.010.
2. Krivorotko, O., Sosnovskaia, M., Vashchenko, I., Kerr, C., Lesnic, D. Agent-based modeling of COVID-19 outbreaks for New York state and UK: parameter identification algorithm // Infectious Disease Modelling. 2022. V. 7. P. 30–44. DOI: 10.1016/j.idm.2021.11.004.
3. Криворотко О. И., Кабанихин С. И. Математические модели распространения COVID-19. Препр. Ин-та математики им. С. Л. Соболева № 300, Новосибирск, 2021. 64 с.

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. Международная конференция "Dynamics in Siberia 2021", Новосибирск, 1–6 марта 2021 г.
2. 13-я Международная молодежная научная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.
3. Научная конференция "Математика в медицине", Томск, 28–29 мая 2021 г.
4. MOTOR 2021: Mathematical Optimization Theory and Operations Research, Irkutsk – Baikal, July 5–10, 2021.
5. Конференция международных математических центров мирового уровня, Сочи, 9–13 августа 2021 г.
6. Quasilinear Equations, Inverse Problems and Their Applications (QIPA-2021), Sochi, August 23–29, 2021.
7. 13-я Международная школа молодых ученых "Системная биология и биоинформатика" SBB-2021, Новосибирск, 4–9 октября 2021 г.
8. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.
9. Евразийская конференция по прикладной математике, Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2021 г.

в соответствии с планом НИР института

Проект НИР "Методы создания, исследования и идентификации математических моделей с помощью суперкомпьютеров".

Номер государственной регистрации 0315-2019-0005.

Руководитель – чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Кабанихин С. И.

Проведено исследование многомерных аналогов уравнений Гельфанда – Левитана – Крейна. Предложен новый аналог трехмерного уравнения Гельфанда – Левитана – Крейна для решения задачи определения акустической жесткости среды в случае, когда данные получены с помощью площадной системы наблюдений. На рис. 2 представлены результаты решения обратной задачи для модельной среды в зависимости от количества имеющейся информации (число источников и приемников).

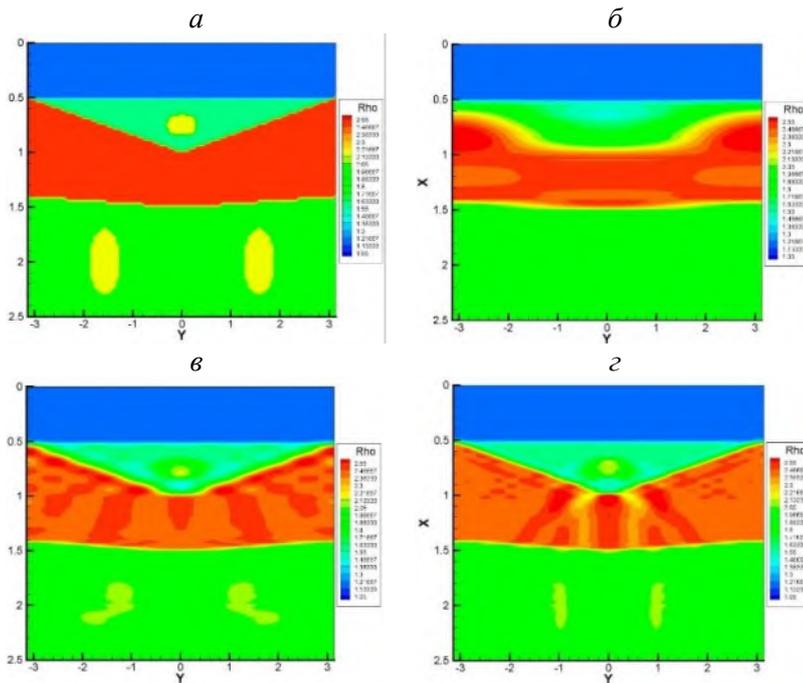


Рис. 2 – Модельная задача: восстановление акустической жесткости среды в зависимости от числа источников и приемников: точное решение (а); решение обратной задачи: 1 источник и 1 приемник (б); 5 источников и 5 приемников (в); 10 источников и 10 приемников (г)

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект 20-51-54004 "Идентификация коэффициентов в эллиптических и параболических уравнениях".

Руководитель – чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Кабанихин С. И.

Исследована некорректная задача Коши для уравнения Гельмгольца. Проведен анализ степени некорректности задачи в зависимости от плотности и скорости акустической среды. Доказана теорема единственности и условной устойчивости решения обратной задачи. Построен и реализован алгоритм численного решения, основанный на сведении некорректной задачи Коши к операторному уравнению первого рода с последующей минимизацией соответствующего целевого функционала. Получены оценки условной устойчивости решения обратной задачи и скорости сходимости по функционалу градиентного метода простой итерации.

Исследована обратная задача для параболического уравнения с данными на части границы области. Показано, что задание семейства данных Неймана и соответствующих им данных Дирихле однозначно определяет коэффициенты параболического уравнения. Численно оценена разрешающая способность и чувствительность данных обратной задачи по отношению к вариациям правой части, параметрам неоднородных включений и границы раздела сред.

Созданы и изучены новые алгоритмы регуляризации коэффициентных обратных задач с нелокальными данными (интегральная информация по времени и по области).

Исследованы обратные задачи для параболических уравнений с дополнительной информацией, заданной на кривых. Разработаны новые и обоснован ряд существующих численных методов регуляризации обратных задач с данными на дискретном множестве внутренних точек области и на подмножестве границы области. На основе разработанных алгоритмов зарегистрированы два комплекса программ.

Результаты работ по проектам РФФ

Проект РФФ № 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 изучена 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 (рис. 3).

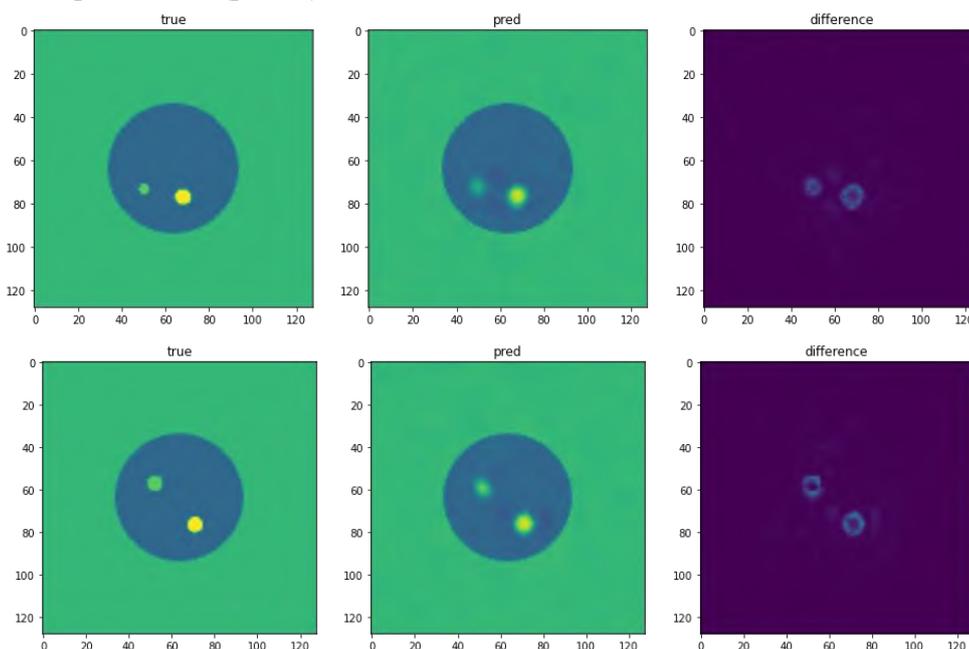


Рис. 3 – Результаты расчетов. Машинное обучение. Наборы данных содержат только одно включение – круг или эллипс

Исследована задача о моделировании диаграмм направленности источников в динамической области.

На основе технологий машинного обучения получены результаты в области определения скоростных параметров среды.

Проект РФФ № 20-71-00128 "Создание новых алгоритмов идентификации параметров геофизических моделей на основе прямых методов обработки данных".

Руководитель – к.ф.-м.н. Новиков Н. С.

Получен алгоритм решения задачи определения потенциала волнового уравнения, зависящего от двух пространственных переменных, по данным измерения площадной системы наблюдений для произвольной временной формы источника на основе сведения задачи к интегральному уравнению первого рода. Исследовано влияние временной формы источника на эффективность численного решения задачи на основе анализа обусловленности получаемой системы. Изучены способы использования априорной информации как на этапе решения плохо обусловленной задачи, так и на этапе деконволюции данных.

Проект РФФИ №18-71-10044 "Суперкомпьютерный анализ социальных, эпидемиологических и экономических процессов. Теория, алгоритмы и комплекс программ".

Руководитель – к.ф.-м.н. Криворотько О. И.

В рамках выполнения проекта сформулированы, разработаны, проанализированы и оптимизированы алгоритмы решения прямых и обратных задач, созданы параллельные комплексы программ и верифицированы математические модели социальных, эпидемиологических и экономических процессов, описываемые системами обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), уравнениями в частных производных (УЧПР) и стохастических дифференциальных уравнений (СДУ). Построены новые математические модели распространения туберкулеза и ОРВИ в Москве, COVID-19 в Новосибирской области, информации в Twitter, изменения цен на криптовалюты.

Проект РФФИ №18-71-10044-П "Суперкомпьютерный анализ социальных, эпидемиологических и экономических процессов. Теория, алгоритмы и комплекс программ".

Руководитель – к.ф.-м.н. Криворотько О. И.

Сформированы таблицы обработанных статистических и динамических эпидемиологических показателей распространенности туберкулеза, ВИЧ, СПИД и COVID-19 регионах РФ (часть из них доступны на сайте рабочей группы проекта по адресу: <http://covid19-modeling.ru/>). Показано, что данные о ежедневной смертности от COVID-19 слабо коррелируют с данными о захоронениях в результате COVID-19 в Новосибирской обл. Уточненные данные по смертности позволили увеличить точность сценариев распространения COVID-19 в регионе в 5 раз.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Криворотько О. И., Кabanikhin С. И. Математические модели распространения COVID-19. Препр. Ин-та математики им. С. Л. Соболева № 300. Новосибирск, 2021. 64 с.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Krivorotko, O. I., Kabanikhin, S. I., Sosnovskaya, M. I., Andornaya D. V. Sensitivity and identifiability analysis of COVID-19 pandemic models // Vavilov J. of Genetics and Breeding. 2021. V. 25(1). P. 82–91. DOI: 10.18699/VJ21.010.

2. Kabanikhin, S., Krivorotko, Takuadina, O. A., Andornaya, D., Zhang, S. Geo-information system of tuberculosis spread based on inversion and prediction // J. of Inverse and Ill-Posed Probl. 2021. V. 29. P. 65–79. DOI: 10.1515/jiip-2020-0022.

3. Krivorotko, O., Sosnovskaia, M., Vashchenko, I., Kerr, C., Lesnic D. Agent-based modeling of COVID-19 outbreaks for New York state and UK: parameter identification algorithm // Infectious Disease Mod. 2022. V. 7. P. 30–44. DOI: 10.1016/j.idm.2021.11.004.

4. Argun, R., Gorbachev, A., Lukyanenko, D., Shishlenin, M. On some features of the numerical solving of coefficient inverse problems for an equation of the reaction-diffusion-advection-type with data on the position of a reaction front // Math. 2021. M. 9 (22), No 2894. <https://doi.org/10.3390/math9222894>.

5. Klyuchinskiy, D. V., Novikov, N. S., Shishlenin, M. A. CPU-time and RAM memory optimization for solving dynamic inverse problems using gradient-based approach // *J. of Comput. Phys.* 2021. V. 439, No 110374. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110374>.
6. Lukyanenko, D. V., Borzunov, A. A., Shishlenin M. A. Solving coefficient inverse problems for nonlinear singularly perturbed equations of the reaction-diffusion-advection type with data on the position of a reaction front // *Commun. in Nonlinear Sci. and Num. Simul.* 2021. Vol. 99, No 105824. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.105824>.
7. Lukyanenko, D., Yeleskina, T., Prigorniy, I., Isaev, T., Borzunov, A., Shishlenin, M. Inverse problem of recovering the initial condition for a nonlinear equation of the reaction–diffusion–advection type by data given on the position of a reaction front with a time delay // *Math.* 2021. Vol. 9(4), No 342. P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/math9040342>.
8. Klyuchinskiy, D., Novikov, N., Shishlenin, M. Recovering density and speed of sound coefficients in the 2d hyperbolic system of acoustic equations of the first order by a finite number of observations // *Math.* 2021. Vol. 9(2), No 199. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/math9020199>.
9. Kozelkov, A. S., Krutyakova, O. L., Kurulin, V. V., Strelets, D. Yu., Shishlenin, M. A. The accuracy of numerical simulation of the acoustic wave propagations in a liquid medium based on Navier – Stokes equations // *Sib. Electron. Math. Rep.* 2021. Vol. 18, No 2. P. 1238–1250. <https://doi.org/10.33048/semi.2021.18.094>.
10. Kalmenov, T. S., Kabanikhin, S. I., Les, A. The Sommerfeld problem and inverse problem for the Helmholtz equation // *J. of Inverse and Ill-Posed Probl.* 2021. Vol. 29(1). P. 49–64. <https://doi.org/10.1515/jiip-2020-0033>.
11. Serovajsky, S., Nurseitov, D., Kabanikhin, S., Azimov, A., Ilin, A., Islamov, R. Identification of mathematical model of bacteria population under the antibiotic influence // *J. of Inverse and Ill-Posed Probl.* 2021. Vol. 26(5). P. 565–576. <https://doi.org/10.1515/jiip-2017-0102>.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Krivorotko, O., Zvonareva, T., Zyatkov, N. Numerical solution of the inverse problem for diffusion-logistic model arising in online social networks // *Math. Optim. Theory and Oper. Res.: Recent Trends.* 2021. V. 1476. P. 444–459. DOI: 10.1007/978-3-030-86433-0_31.
2. Zyatkov, N., Krivorotko, O. Forecasting recessions in the US economy using machine learning methods // *The 17th International Asian school-seminar "Optimization problems of complex systems" (OPCS).* 2021. P. 139–146. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588678.
3. Kabanikhin, S., Prikhodko, A., Shishlenin, M. Comparative analysis of methods of recovering the well flow-rate and water-cut by thermodynamic measurements // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2021.1715 (1). No 012042. DOI:10.1088/1742-6596/1715/1/012042.
4. Novikov, N. S., Klyuchinskiy, D. V., Shishlenin, M. A., Kabanikhin, S. I. On the modeling of ultrasound wave propagation in the frame of inverse problem solution // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2021. 2099. No 012044. DOI:10.1088/1742-6596/2099/1/012044.
5. Prikhodko, A., Shishlenin, M., Stadnichenko, O. Comparative analysis of numerical methods for determining parameters of chemical reactions from experimental data // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. 2092, No. 012011. DOI:10.1088/1742-6596/2092/1/012011.

6. Klyuchinskiy, D. V., Novikov, N. S., Shishlenin, M. A. Quantity of the inverse problem data for the system of conservation laws // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. 2092, No. 012020. DOI:10.1088/1742-6596/2092/1/012020.
7. Matyukhin, V., Kabanikhin, S., Shishlenin, M., Novikov, N., Vasin, A., Gasnikov, A. Convex optimization with inexact gradients in Hilbert space and applications to elliptic inverse problems // *LNCS.* 2021. No. 12755. P. 159–175. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77876-7_11.
8. Izzatullah, M., Peter, D., Kabanikhin, S., Shishlenin, M. Bayes meets Tikhonov: Understanding uncertainty within Gaussian framework for seismic inversion // *Stud. in Syst., Decision and Control.* 2021. Vol. 320. P. 121–145. 10.1007/978-981-15-8606-4_8.
9. Prikhodko, A., Shishlenin, M. Comparative analysis of the numerical methods for 3D continuation problem for parabolic equation with data on the part of the boundary // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2021. 2092, No. 012010. DOI:10.1088/1742-6596/2092/1/012010.
10. Kabanikhin, S. I., Novikov, N. S., Shishlenin, M. A. Gelfand – Levitan – Krein method in one-dimensional elasticity inverse problem // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2021. 2092, No. 012022. DOI:10.1088/1742-6596/2092/1/012022.
11. Shakhmatova, A., Shishlenin, M., Mirgalikyzy, T., Portnov, V. Application of GPR research for the diagnosis of decompaction zones of coal massif of Shubarkol field // *Proc. Of the IEEE Intern. conf. on smart information systems and technologies "SIST 2021".* 2021. No 9465955. DOI: 10.1109/SIST50301.2021.9465955.
12. Shishlenin, M. A., Izzatulah, M., Novikov, N. S. Comparative study of acoustic parameter reconstruction by using optimal control method and inverse scattering approach // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. 2092, No 012004. 10.1088/1742-6596/2092/1/012004.
13. Shishlenin, M. A., Novikov, N. S., Klyuchinskiy, D. V. On the recovering of acoustic attenuation in 2D acoustic tomography // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2021. 2099, No 012046. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012046.
14. Kabanikhin, S. I., Klyuchinskiy, D. V., Novikov, N. S., Shishlenin, M. A. On the problem of modeling the acoustic radiation pattern of source for the 2D first-order system of hyperbolic equations // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2021. 1715 (1), No 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012038.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Krivorotko, O., Neverov, A., Hohage, T. Optimization and regularization of the inverse problem for stochastic differential equation using graphics accelerators // *Труды Междунар. конф. "Суперкомпьютерные дни в России-2021"*, Москва, 27–28 сентября 2021 г. С. 32–42. DOI: 10.29003/m2454.RussianSCDays2021.

Свидетельства о регистрации в Роспатенте

1. Свидетельство № 2021614740. Программа для ЭВМ "Агентное моделирование распространения COVID-19 в Новосибирской области" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Сосновская М. И., Ващенко И. А., Криворотько О. И. Дата регистрации: 29.03.2021.
2. Свидетельство № 2021617927. Программа для ЭВМ "Программа расчета потока тепла на недоступной части границы в трехмерном случае градиентным методом" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Шишленин М. А., Приходько А. Ю. Дата регистрации: 20.05.2021.

3. Свидетельство № 2021617090. Программа для ЭВМ "Программа расчета температуры с части границы трехмерного параболического уравнения методом обращения разностной схемы" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Шишленин М. А., Приходько А. Ю. Дата регистрации: 06.05.2021.

4. Свидетельство № 2021669941. Программа для ЭВМ "Новый метод расчета градиента функционала для решения коэффициентной обратной задачи акустической томографии и оптимизации оперативной памяти и вычислительных ресурсов" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Шишленин М. А., Ключинский Д. В., Новиков Н. С. Дата регистрации: 06.12.2021.

5. Свидетельство № 2021669416. Программа для ЭВМ "Идентификация скорости звука в двумерном сечении мягкой ткани человека в акустической томографии" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Шишленин М. А., Ключинский Д. В., Новиков Н. С. Дата регистрации: 29.11.2021.

6. Свидетельство № 2021669232. Программа для ЭВМ "Определение скорости звука и плотности в двумерном сечении мягкой ткани человека по данным системы источников и приемников ультразвукового излучения" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Шишленин М. А., Новиков Н. С., Ключинский Д. В. Дата регистрации: 25.11.2021.

7. Свидетельство № 2021668984. Программа для ЭВМ "Восстановление плотности в двумерном сечении мягкой ткани человека в акустической томографии" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Шишленин М. А., Новиков Н. С., Ключинский Д. В. Дата регистрации: 23.11.2021.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Dynamics in Siberia 2021", Новосибирск, 1–6 марта, 2021 г. – 4 доклада (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Криворотько О. И., Звонарева Т. А.).

2. 13-я Международная молодежная научная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г. – 10 докладов, из них 3 пленарных (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Криворотько О. И., Новиков Н. С., Приходько А. Ю., Сосновская М. И., Звонарева Т. А., Неверов А. В., Нестерова А. В.).

3. 22-е Харитоновские тематические научные чтения "Суперкомпьютерное моделирование и искусственный интеллект", г. Саров, 24–27 мая 2021 г. – 1 доклад (Криворотько О. И.).

4. Научная конференция "Математика в медицине", Томск, 28–29 мая 2021 г. – 3 пленарных доклада (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Криворотько О. И.).

5. "Mathematical optimization theory and operations research" (MOTOR 2021), Irkutsk – Baikal, July 5–10, 2021 – 2 доклада (Криворотько О. И., Звонарева Т. А.).

6. Международная конференция "Математическое моделирование, обратные задачи и большие данные", Якутск, 18–25 июля 2021 г. – 1 доклад (Неверов А. В.).

7. Конференция международных математических центров мирового уровня, Сочи, 9–13 августа 2021 г. – 4 доклада (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Криворотько О. И., Новиков Н. С.).

8. Quasilinear equations, inverse problems and their applications (QIPA-2021), Sochi, August 23–29, 2021 – 9 докладов, из них 2 пленарных (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Криворотько О. И., Неверов А. В., Новиков Н. С., Зятков Н. Ю., Звонарева Т. А., Сосновская М. И., Анцифорова А. А.).

9. 13-я Международная школа молодых ученых "Системная биология и биоинформатика" SBB-2021 ("Systems biology and bioinformatics"), Новосибирск, 4–9 октября 2021 г. – 1 пленарный доклад (Криворотько О. И.)

10. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 8 докладов, из них 2 пленарных (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Криворотько О. И., Новиков Н. С., Приходько А. Ю., Петракова В. С., Неверов А. В., Звонарева Т. А.).

11. The international conference on smart computational methods in continuum mechanics, Moscow, October 27–29, 2021 – 1 доклад (Криворотько О. И.).

12. Евразийская конференция по прикладной математике, Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г. – 4 доклада, из них 2 пленарных (Кабанихин С. И., Криворотько О. И., Зятыков Н. Ю., Звонарева Т. А.).

13. Международная научная конференция "Численное моделирование в механике сплошных сред", посвященная памяти акад. О. М. Белоцерковского, Долгопрудный, Москва, 27–29 октября 2021 г. – 2 приглашенных доклада (Кабанихин С. И., Шишленин М. А.).

14. Конференция "Вычислительная математика и приложения", Сочи, 2–6 августа 2021 г. – 2 приглашенных доклада (Кабанихин С. И., Шишленин М. А.).

15. 4-я Всероссийская научная конференция с международным участием "Геодинамические процессы и природные катастрофы", Южно-Сахалинск, 6–10 сентября 2021 г. – 1 доклад (Шишленин М. А.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Кабанихин С. И.:

– председатель программного комитета 13-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.,

– председатель организационного комитета 13-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.,

– сопредседатель программного комитета Евразийской конференции по прикладной математике, Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г.

– сопредседатель организационного комитета Евразийской конференции по прикладной математике, Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г.

– заместитель председателя программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

2. Шишленин М. А.:

– заместитель председателя программного комитета 13-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.,

– заместитель председателя организационного комитета 13-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.,

- сопредседатель программного комитета Евразийской конференции по прикладной математике, Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г.,
 - заместитель председателя организационного комитета Евразийской конференции по прикладной математике, Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г.,
 - член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;
- З Криворотько О. И.:
- заместитель председателя организационного комитета 13-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.,
 - член программного комитета 13-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 12–22 апреля 2021 г.,
 - ученый секретарь Евразийской конференции по прикладной математике, Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г.,
 - член программного комитета Евразийской конференции по прикладной математике, Новосибирск, 16–21 декабря 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 11
Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 14
Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 26
Свидетельств о регистрации программ в Роспатенте – 7
Докладов на конференциях – 85, в том числе 14 пленарных
Участников оргкомитетов конференций – 14

Кадровый состав

1. Шишленин М. А. зав. лабораторией д.ф.-м.н.
2. Кабанихин С. И. г.н.с. д.ф.-м.н.
3. Зятков Н. Ю. н.с. к.т.н.
4. Криворотько О. И. с.н.с. к.ф.-м.н.
5. Новиков Н. С. н.с. к.ф.-м.н.
6. Приходько А. Ю. м.н.с.
7. Юдина О. А. ведущ. инженер
8. Ахметова В. Д. инженер

Зятков Н. Ю., Криворотько О. И., Новиков Н. С., Приходько А. Ю. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

- Кабанихин С. И. – профессор, заведующий кафедрой ММФ НГУ
- Шишленин М. А. – доцент кафедры ММФ НГУ
- Криворотько О. И. – доцент НГУ
- Новиков Н. С. – старший преподаватель НГУ, СУНЦ НГУ

Руководство студентами

- Неверов А. В. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И.
Анцифорова А. А. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И.
Шельгина Е. С. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И.
Шишмарева Ю. С. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И.
Безгачев М. В. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Савченко Н. А. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Воробьев М. С. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Сурнин П. С. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Федотов А. В. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Глухов А. И. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.

Руководство аспирантами

- Звонарева Т. А. – 1-й год, НГУ, руководитель к.ф.-м.н. Криворотько О. И.
Приходько А.Ю. – 1-й год, НГУ, руководитель Шишленин М. А.

Защита дипломов

- Звонарева Т. А. – магистр ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И.
Сосновская М. И. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И.
Неверов А. В. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И.
Жаркова Е. И. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И.
Корченко Г. С. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И.
Нестерова А. В. – бакалавр ММФ НГУ, руководители Денисова Н. В., Криворотько О. И.
Приходько А. Ю. – магистр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Безгачев М. В. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Савченко Н. А. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Козлов И. А. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Харченко Д. С. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Воробьев М. С. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Сурнин П. С. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Савчиц Н. М. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Уфимцева А. М. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Ахметов Д. М. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.

Награды

Криворотько О. И. – премия им. Г. И. Марчука за работу "Идентифицируемость математических моделей иммунологии и эпидемиологии" (постановление Президиума СО РАН № 376 от 25.11.2021).

ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Гусяков В. К.

Важнейшие достижения

Методика выбора оптимальной конфигурации системы наблюдения для точной характеристики источника цунами.

К.ф.-м.н. Воронина Т. А.

Ключевым вопросом оценки возможных характеристик проявления волны цунами на побережье являются начальные условия задачи, т. е. исходная форма смещения воды в области очага цунами. Инверсия мареограмм (волновых форм цунами) – широко распространенный в настоящее время подход к реконструкции источника цунами. В данном проекте задача восстановления первоначальной формы источника цунами по измеренным колебаниям уровня на серии удаленных приемников ставится как обратная задача математической физики. Эта задача является некорректной. Регуляризация оператора в этом случае осуществляется путем сужения оператора на подпространство, являющееся линейной оболочкой первых правых сингулярных векторов. Меняя величину размерности этого подпространства на основе анализа свойств оператора прямой задачи, определяемых системой наблюдения и батиметрией, можно контролировать погрешность решения.

Такой подход позволяет обсуждать проблему оптимального планирования системы донных датчиков в районе прогнозной цунамигенной активности для достоверного восстановления параметров источника цунами от ожидаемых подводных землетрясений. Показано, что использование оптимальной системы наблюдения не только повышает точность восстановления источника цунами, но и обеспечивает вычисление высот волны в любых заранее фиксированных

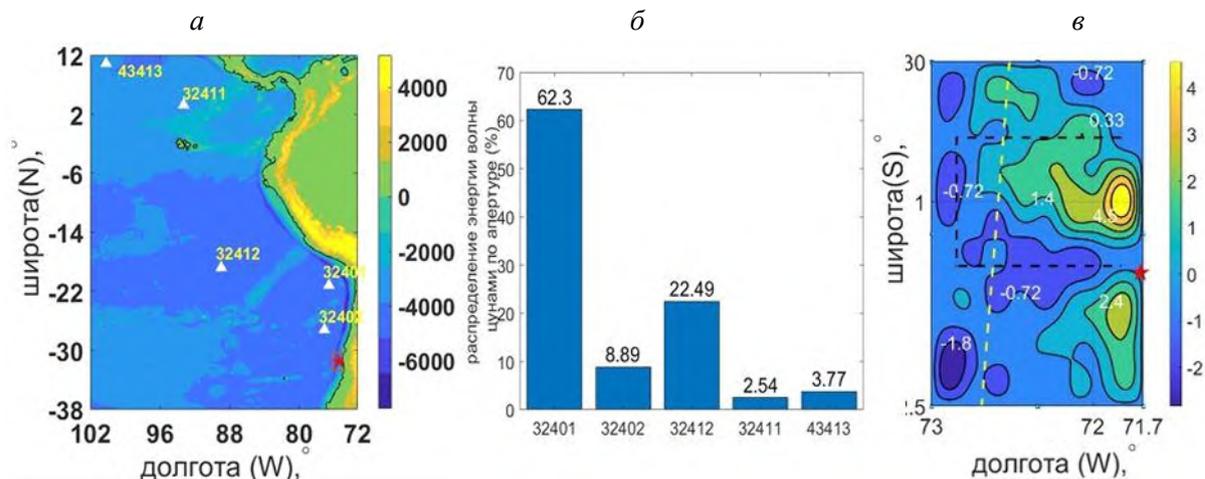


Рис. 1 – Область моделирования и система наблюдения, состоящая из пяти буев ДАРТ: 32402; 32401; 32412; 32411; 43413 (белые треугольники); красная звездочка – эпицентр землетрясения, красный прямоугольник – область поиска; шкала глубин в метрах (а); распределение энергии волны цунами в процентах между буями ДАРТ, по горизонтальной оси располагаются соответствующие номера буев (б); результат инверсии (источник цунами) в области поиска, полученный с использованием данных, зарегистрированных буями ДАРТ 32401 и 32402; красная звездочка – эпицентр землетрясения, желтый пунктир – ось Атакамского желоба, черный пунктир – область источника цунами, вычисленная методом обращения лучей; шкала высот в метрах (в)

точках акватории без дополнительных расчетов, что важно для успешного прогнозирования высот цунами на побережье. Для поиска наиболее информативной части системы наблюдения в настоящей работе предложена методика, основанная на оценке переноса энергии волной цунами. Наиболее информативные данные регистрируются на направлениях наиболее интенсивного распространения энергии цунами. Полученный вывод полезен при разработке новых систем предупреждения о цунами.

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Voronina, T. A., Voronin, V. A study of implementation features of the R-solution method for tsunami source recovery // *Pure and Appl. Geophys.* 2021. V. 178. P. 4853–4863. DOI: 10.1007/s00024-021-02843-7.

2. Voronina, T. A., Loskutov, A. V. Applying the R-solution method for designing a tsunami observational system // *J. of Phys.: Conf. Ser. (MSR-2021)*. 2021. Vol. 2099. Art. num. 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012063.

3. Воронина, Т. А., Лоскутов, А. В. Перспективы применения метода усеченного сингулярного разложения для прогноза цунами // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов : труды 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г.* С. 333–337.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершающимся в 2021 г. в соответствии с планом НИР института

С помощью серии вычислительных экспериментов изучено влияние конфигурации пролива на прохождение сквозь него волн цунами с различными длинами. Под конфигурацией модельного пролива понимается его ширина в самом узком месте, а также угол схождения прямолинейных береговых линий при входе в пролив.

В результате серии численных экспериментов, моделирующих прохождение волны цунами сквозь узкий пролив модельной формы, выявлено, что для достаточно широкого пролива шириной 40 км увеличение периода волны влечет за собой лишь изменение диаграммы направленности излучения волновой энергии. Для более узкого пролива (шириной 20 км в самом узком месте) кроме изменения диаграммы направленности наблюдается и существенное увеличение высоты волны после прохождения сквозь пролив.

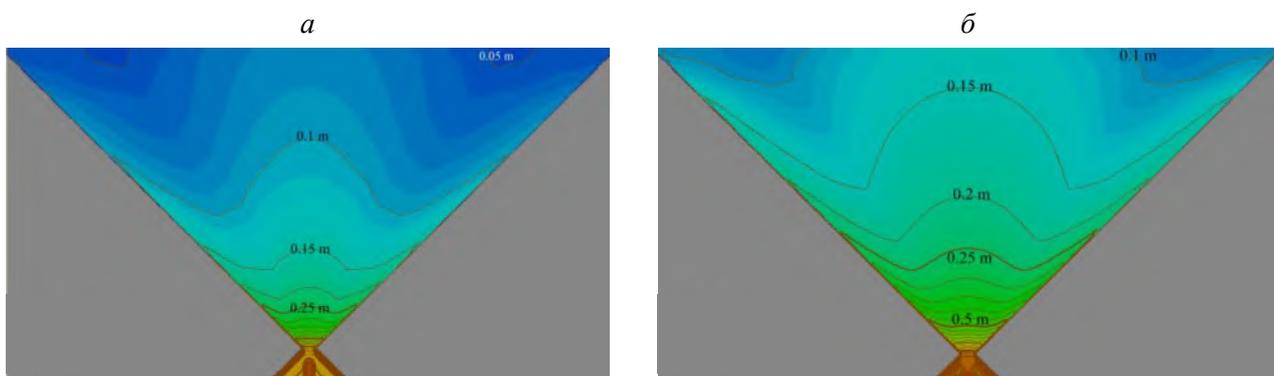


Рис. 2 – Распределение максимумов высот цунами после их прохождения сквозь пролив шириной 20 км с периодом 600 сек. (а); с периодом 900 сек. (б)

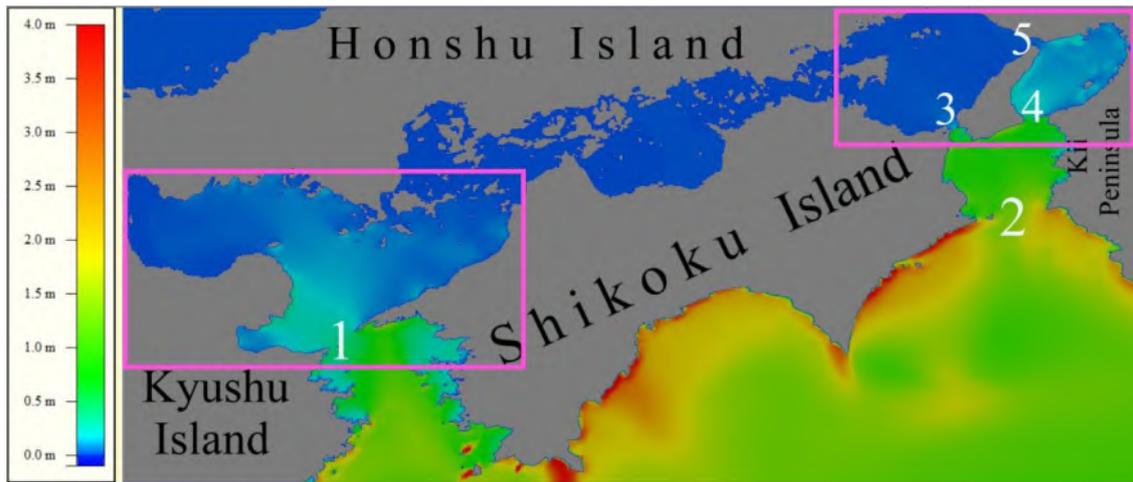


Рис. 3 – Распределение максимальных высот цунами, имевшей начальную высоту 1 м (у нижней границы области) и период 600 сек. Приблизительная ширина указанных проливов составляет: пролив 1 (Нoyo Strait) – 10 км, пролив 2 (Kii Channel) – 25 км, пролив 3 – 3 км, пролив 4 – 5 км, пролив 5 – 4 км

При моделировании распространения цунами по проливам вокруг японского острова Шикокю найдены "коэффициенты ослабления" волн разной длины для каждого из этих проливов.

Создана программа для определения моментов вступления волны цунами в узлы регулярной сетки, аппроксимирующей батиметрию реальных участков акватории океана. В основе программы лежит алгоритм, базирующийся на принципе Гюйгенса, который позволяет вычислять время вступления возмущения (в частности, волны цунами) в узловые точки расчетной сетки. В начальный момент задаются нулевые значения времени в точках контура, считающегося источником цунами. Алгоритм расчета времени прихода первого вступления цунами в точки сеточной области основан на принципе Гюйгенса и работает в комбинации с вариационным методом, существенно повышающим точность расчета движения фронта. В результате вычисляются моменты вступления волнового фронта во все точки сеточной области, аппроксимирующей батиметрию реальных участков акватории океана. Программа может быть использована в работе службы предупреждения цунами для быстрой оценки ожидаемого времени прихода фронта первых вступлений цунами в различные пункты побережья при заданном положении источника

а

б

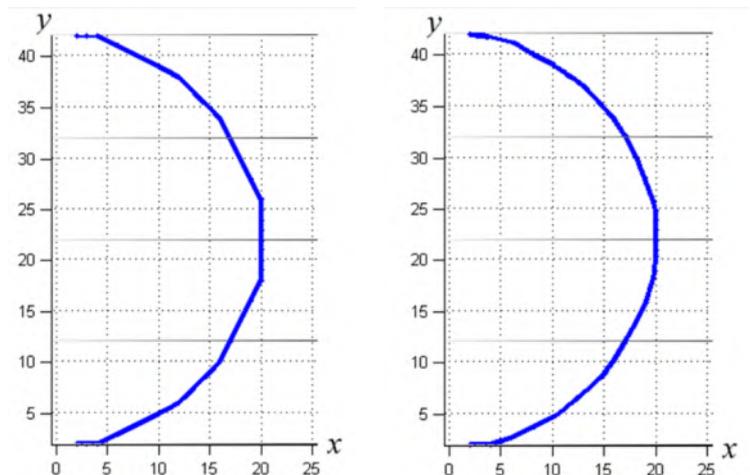


Рис. 4 – Сравнение траекторий волнового луча между двумя точками над наклонным дном, построенных сеточным методом на основе принципа Гюйгенса, без оптимизации (а) и с применением вариационной оптимизации (б); на координатных осях – расстояние (км)

цунами. Кроме того, программа может быть полезной при определении местоположений очагов цунами, для которых известны моменты прихода в различные пункты побережья.

В рамках выполнения базового задания по обратной задаче в проблеме цунами решалась задача восстановления источника цунами на основе инверсии зарегистрированных мареограмм (волновых форм цунами). Эта задача является некорректной. В предложенном подходе регуляризация оператора осуществляется путем сужения оператора на подпространство, являющееся линейной оболочкой первых правых сингулярных векторов. Меняя величину размерности этого подпространства на основе анализа свойств оператора прямой задачи, определяемых системой наблюдения и батиметрией, можно контролировать погрешность решения. Качество инверсии зависит также от основных параметров метода, которыми являются количество участвующих правых сингулярных векторов и количество пространственных гармоник, используемых в представлении источника цунами.

Изучено влияние обрезания сингулярного спектра на восстановление высокочастотных пространственных гармоник, используемых в инверсии, оптимальное количество которых сокращает время вычисления матрицы и уменьшает количество артефактов в восстановленной форме источника. Разработан новый, более точный алгоритм выбора указанных параметров инверсии, которые теперь рассматриваются в совокупности.

В рамках выполнения базового задания по созданию программ моделирования цунами продолжена работа над созданием программы расчета распространения цунами на неструктурированных сетках. Рассмотрена система нелинейных дифференциальных уравнений Сан-Венана гиперболического типа для теории мелкой воды, описывающая в двумерном приближении распространение волн цунами с учетом неравномерности рельефа дна. Для решения задачи, описываемой такой системой, использовалась пространственная аппроксимация интегральных законов сохранения на неструктурированной сетке с треугольными элементами, адаптированной к конфигурации береговой линии и рельефу дна океана. Для построения дискретной модели применялся разрывный метод Галёркина с тейлоровскими базисными функциями до второго порядка включительно, замыкание полученной системы нелинейных алгебраических уравнений (СЛАУ) осуществлялось с помощью схемы Русанова, или Лакса – Фридрихса, для приближенного решения задачи Римана на ребрах сетки для временной аппроксимации ради простоты использовалась неявная схема Кранка – Николсона второго порядка точности.

Для численного решения поставленной задачи и апробации рассмотренных алгоритмов, а также для предварительного исследования их аппроксимационных и алгебраических свойств, была выполнена программная реализация этих алгоритмов на языке C++ с использованием ООП подхода. На данный момент программа состоит из 5 модулей, выполняющих следующие функции: 1) определение треугольного сеточного элемента и сопутствующих ему классов точка, отрезок (ребро); 2) вычисление интегралов от произведений тейлоровских базисных функций; 3) реализация классов сетки, матрицы СЛАУ и вектора начальных значений; 4) определение структур для работы с системой уравнений; 5) обеспечение взаимодействия с сеточными генераторами, такими как Netgen и Cubdat. В модулях реализованы соответствующие функции, например функция поиска соседних сеточных элементов для класса "Сетка" в сеточном модуле. Выполнено тестирование корректной работы каждого модуля.

В рамках темы, связанной с исследованием процесса распространения волны цунами в океане с заданным рельефом дна, рассматривалось описывающее этот процесс двумерное уравнение эйконала. Часто встречается ситуация, когда для некоторых начальных данных его решение известно и требуется найти его решение при других начальных данных. В результате исследования этого вопроса построен алгоритм, позволяющий по известному решению уравнения (из некоторого множества) строить новое решение того же уравнения (с той же правой частью). Результаты работы опубликованы в журнале СибЖВМ.

В течение всего года продолжалась поддержка Глобальной базы данных по цунами Global Tsunami Database (GTDB). Поддержка осуществляется как путем ведения параметров новых цунамигенных событий, возникающих в Мировом океане, окраинных морях и внутренних водах (реки, озера, водохранилища), так и путем коррекции параметров уже имеющихся в базе событий на основе вновь обнаруженных данных или новой интерпретации имеющихся сведений. База начала пополняться лабораторией цунами ИМВиМГ СО РАН с начала 1990-х годов и в настоящее время содержит 2850 цунамигенных событий и свыше 23 000 наблюдений высот волн на побережье. В отчетном году сделан важный шаг по совершенствованию доступа удаленных пользователей к содержанию базы данных – запущена новая версия системы поддержки запросов, построенная на основе front-end aspx based c#, java-script с использованием сервиса Bing Maps, обеспечивающая получение листинга данных и их визуализации на картографической основе, построенной на сервисе Bing Maps. Сервис размещен на сервере лаборатории ИМВиМГ и доступен по адресу <https://tsun.sccc.ru/gtdb>. Пример работы пользовательского интерфейса представлен на рис. 5, 6.

В 2021 г. продолжалось развитие ГИС-ориентированной графической оболочки PDM/TSU, используемой для поддержки Глобальной базы данных по проблеме цунами. Оболочка позволяет

The screenshot shows a web browser window displaying the TL/ICMMG Global Historical Tsunami Database. The page title is "TL/ICMMG Global Historical Tsunami Database". Below the title, there is a search bar and a legend. The search query is "[YR] == 2010 and [YR] == 2021" and the results are sorted by "Year Asc". The table below shows the search results for the year 2010.

Year	Date	Time	Lat	Lon	Dep	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇	M ₈	M ₉	M ₁₀	M ₁₁	M ₁₂	M ₁₃	M ₁₄	M ₁₅	M ₁₆	M ₁₇	M ₁₈	M ₁₉	M ₂₀	M ₂₁	M ₂₂	M ₂₃	M ₂₄	M ₂₅	M ₂₆	M ₂₇	M ₂₈	M ₂₉	M ₃₀	M ₃₁	M ₃₂	M ₃₃	M ₃₄	M ₃₅	M ₃₆	M ₃₇	M ₃₈	M ₃₉	M ₄₀	M ₄₁	M ₄₂	M ₄₃	M ₄₄	M ₄₅	M ₄₆	M ₄₇	M ₄₈	M ₄₉	M ₅₀	M ₅₁	M ₅₂	M ₅₃	M ₅₄	M ₅₅	M ₅₆	M ₅₇	M ₅₈	M ₅₉	M ₆₀	M ₆₁	M ₆₂	M ₆₃	M ₆₄	M ₆₅	M ₆₆	M ₆₇	M ₆₈	M ₆₉	M ₇₀	M ₇₁	M ₇₂	M ₇₃	M ₇₄	M ₇₅	M ₇₆	M ₇₇	M ₇₈	M ₇₉	M ₈₀	M ₈₁	M ₈₂	M ₈₃	M ₈₄	M ₈₅	M ₈₆	M ₈₇	M ₈₈	M ₈₉	M ₉₀	M ₉₁	M ₉₂	M ₉₃	M ₉₄	M ₉₅	M ₉₆	M ₉₇	M ₉₈	M ₉₉	M ₁₀₀	M ₁₀₁	M ₁₀₂	M ₁₀₃	M ₁₀₄	M ₁₀₅	M ₁₀₆	M ₁₀₇	M ₁₀₈	M ₁₀₉	M ₁₁₀	M ₁₁₁	M ₁₁₂	M ₁₁₃	M ₁₁₄	M ₁₁₅	M ₁₁₆	M ₁₁₇	M ₁₁₈	M ₁₁₉	M ₁₂₀	M ₁₂₁	M ₁₂₂	M ₁₂₃	M ₁₂₄	M ₁₂₅	M ₁₂₆	M ₁₂₇	M ₁₂₈	M ₁₂₉	M ₁₃₀	M ₁₃₁	M ₁₃₂	M ₁₃₃	M ₁₃₄	M ₁₃₅	M ₁₃₆	M ₁₃₇	M ₁₃₈	M ₁₃₉	M ₁₄₀	M ₁₄₁	M ₁₄₂	M ₁₄₃	M ₁₄₄	M ₁₄₅	M ₁₄₆	M ₁₄₇	M ₁₄₈	M ₁₄₉	M ₁₅₀	M ₁₅₁	M ₁₅₂	M ₁₅₃	M ₁₅₄	M ₁₅₅	M ₁₅₆	M ₁₅₇	M ₁₅₈	M ₁₅₉	M ₁₆₀	M ₁₆₁	M ₁₆₂	M ₁₆₃	M ₁₆₄	M ₁₆₅	M ₁₆₆	M ₁₆₇	M ₁₆₈	M ₁₆₉	M ₁₇₀	M ₁₇₁	M ₁₇₂	M ₁₇₃	M ₁₇₄	M ₁₇₅	M ₁₇₆	M ₁₇₇	M ₁₇₈	M ₁₇₉	M ₁₈₀	M ₁₈₁	M ₁₈₂	M ₁₈₃	M ₁₈₄	M ₁₈₅	M ₁₈₆	M ₁₈₇	M ₁₈₈	M ₁₈₉	M ₁₉₀	M ₁₉₁	M ₁₉₂	M ₁₉₃	M ₁₉₄	M ₁₉₅	M ₁₉₆	M ₁₉₇	M ₁₉₈	M ₁₉₉	M ₂₀₀	M ₂₀₁	M ₂₀₂	M ₂₀₃	M ₂₀₄	M ₂₀₅	M ₂₀₆	M ₂₀₇	M ₂₀₈	M ₂₀₉	M ₂₁₀	M ₂₁₁	M ₂₁₂	M ₂₁₃	M ₂₁₄	M ₂₁₅	M ₂₁₆	M ₂₁₇	M ₂₁₈	M ₂₁₉	M ₂₂₀	M ₂₂₁	M ₂₂₂	M ₂₂₃	M ₂₂₄	M ₂₂₅	M ₂₂₆	M ₂₂₇	M ₂₂₈	M ₂₂₉	M ₂₃₀	M ₂₃₁	M ₂₃₂	M ₂₃₃	M ₂₃₄	M ₂₃₅	M ₂₃₆	M ₂₃₇	M ₂₃₈	M ₂₃₉	M ₂₄₀	M ₂₄₁	M ₂₄₂	M ₂₄₃	M ₂₄₄	M ₂₄₅	M ₂₄₆	M ₂₄₇	M ₂₄₈	M ₂₄₉	M ₂₅₀	M ₂₅₁	M ₂₅₂	M ₂₅₃	M ₂₅₄	M ₂₅₅	M ₂₅₆	M ₂₅₇	M ₂₅₈	M ₂₅₉	M ₂₆₀	M ₂₆₁	M ₂₆₂	M ₂₆₃	M ₂₆₄	M ₂₆₅	M ₂₆₆	M ₂₆₇	M ₂₆₈	M ₂₆₉	M ₂₇₀	M ₂₇₁	M ₂₇₂	M ₂₇₃	M ₂₇₄	M ₂₇₅	M ₂₇₆	M ₂₇₇	M ₂₇₈	M ₂₇₉	M ₂₈₀	M ₂₈₁	M ₂₈₂	M ₂₈₃	M ₂₈₄	M ₂₈₅	M ₂₈₆	M ₂₈₇	M ₂₈₈	M ₂₈₉	M ₂₉₀	M ₂₉₁	M ₂₉₂	M ₂₉₃	M ₂₉₄	M ₂₉₅	M ₂₉₆	M ₂₉₇	M ₂₉₈	M ₂₉₉	M ₃₀₀	M ₃₀₁	M ₃₀₂	M ₃₀₃	M ₃₀₄	M ₃₀₅	M ₃₀₆	M ₃₀₇	M ₃₀₈	M ₃₀₉	M ₃₁₀	M ₃₁₁	M ₃₁₂	M ₃₁₃	M ₃₁₄	M ₃₁₅	M ₃₁₆	M ₃₁₇	M ₃₁₈	M ₃₁₉	M ₃₂₀	M ₃₂₁	M ₃₂₂	M ₃₂₃	M ₃₂₄	M ₃₂₅	M ₃₂₆	M ₃₂₇	M ₃₂₈	M ₃₂₉	M ₃₃₀	M ₃₃₁	M ₃₃₂	M ₃₃₃	M ₃₃₄	M ₃₃₅	M ₃₃₆	M ₃₃₇	M ₃₃₈	M ₃₃₉	M ₃₄₀	M ₃₄₁	M ₃₄₂	M ₃₄₃	M ₃₄₄	M ₃₄₅	M ₃₄₆	M ₃₄₇	M ₃₄₈	M ₃₄₉	M ₃₅₀	M ₃₅₁	M ₃₅₂	M ₃₅₃	M ₃₅₄	M ₃₅₅	M ₃₅₆	M ₃₅₇	M ₃₅₈	M ₃₅₉	M ₃₆₀	M ₃₆₁	M ₃₆₂	M ₃₆₃	M ₃₆₄	M ₃₆₅	M ₃₆₆	M ₃₆₇	M ₃₆₈	M ₃₆₉	M ₃₇₀	M ₃₇₁	M ₃₇₂	M ₃₇₃	M ₃₇₄	M ₃₇₅	M ₃₇₆	M ₃₇₇	M ₃₇₈	M ₃₇₉	M ₃₈₀	M ₃₈₁	M ₃₈₂	M ₃₈₃	M ₃₈₄	M ₃₈₅	M ₃₈₆	M ₃₈₇	M ₃₈₈	M ₃₈₉	M ₃₉₀	M ₃₉₁	M ₃₉₂	M ₃₉₃	M ₃₉₄	M ₃₉₅	M ₃₉₆	M ₃₉₇	M ₃₉₈	M ₃₉₉	M ₄₀₀	M ₄₀₁	M ₄₀₂	M ₄₀₃	M ₄₀₄	M ₄₀₅	M ₄₀₆	M ₄₀₇	M ₄₀₈	M ₄₀₉	M ₄₁₀	M ₄₁₁	M ₄₁₂	M ₄₁₃	M ₄₁₄	M ₄₁₅	M ₄₁₆	M ₄₁₇	M ₄₁₈	M ₄₁₉	M ₄₂₀	M ₄₂₁	M ₄₂₂	M ₄₂₃	M ₄₂₄	M ₄₂₅	M ₄₂₆	M ₄₂₇	M ₄₂₈	M ₄₂₉	M ₄₃₀	M ₄₃₁	M ₄₃₂	M ₄₃₃	M ₄₃₄	M ₄₃₅	M ₄₃₆	M ₄₃₇	M ₄₃₈	M ₄₃₉	M ₄₄₀	M ₄₄₁	M ₄₄₂	M ₄₄₃	M ₄₄₄	M ₄₄₅	M ₄₄₆	M ₄₄₇	M ₄₄₈	M ₄₄₉	M ₄₅₀	M ₄₅₁	M ₄₅₂	M ₄₅₃	M ₄₅₄	M ₄₅₅	M ₄₅₆	M ₄₅₇	M ₄₅₈	M ₄₅₉	M ₄₆₀	M ₄₆₁	M ₄₆₂	M ₄₆₃	M ₄₆₄	M ₄₆₅	M ₄₆₆	M ₄₆₇	M ₄₆₈	M ₄₆₉	M ₄₇₀	M ₄₇₁	M ₄₇₂	M ₄₇₃	M ₄₇₄	M ₄₇₅	M ₄₇₆	M ₄₇₇	M ₄₇₈	M ₄₇₉	M ₄₈₀	M ₄₈₁	M ₄₈₂	M ₄₈₃	M ₄₈₄	M ₄₈₅	M ₄₈₆	M ₄₈₇	M ₄₈₈	M ₄₈₉	M ₄₉₀	M ₄₉₁	M ₄₉₂	M ₄₉₃	M ₄₉₄	M ₄₉₅	M ₄₉₆	M ₄₉₇	M ₄₉₈	M ₄₉₉	M ₅₀₀	M ₅₀₁	M ₅₀₂	M ₅₀₃	M ₅₀₄	M ₅₀₅	M ₅₀₆	M ₅₀₇	M ₅₀₈	M ₅₀₉	M ₅₁₀	M ₅₁₁	M ₅₁₂	M ₅₁₃	M ₅₁₄	M ₅₁₅	M ₅₁₆	M ₅₁₇	M ₅₁₈	M ₅₁₉	M ₅₂₀	M ₅₂₁	M ₅₂₂	M ₅₂₃	M ₅₂₄	M ₅₂₅	M ₅₂₆	M ₅₂₇	M ₅₂₈	M ₅₂₉	M ₅₃₀	M ₅₃₁	M ₅₃₂	M ₅₃₃	M ₅₃₄	M ₅₃₅	M ₅₃₆	M ₅₃₇	M ₅₃₈	M ₅₃₉	M ₅₄₀	M ₅₄₁	M ₅₄₂	M ₅₄₃	M ₅₄₄	M ₅₄₅	M ₅₄₆	M ₅₄₇	M ₅₄₈	M ₅₄₉	M ₅₅₀	M ₅₅₁	M ₅₅₂	M ₅₅₃	M ₅₅₄	M ₅₅₅	M ₅₅₆	M ₅₅₇	M ₅₅₈	M ₅₅₉	M ₅₆₀	M ₅₆₁	M ₅₆₂	M ₅₆₃	M ₅₆₄	M ₅₆₅	M ₅₆₆	M ₅₆₇	M ₅₆₈	M ₅₆₉	M ₅₇₀	M ₅₇₁	M ₅₇₂	M ₅₇₃	M ₅₇₄	M ₅₇₅	M ₅₇₆	M ₅₇₇	M ₅₇₈	M ₅₇₉	M ₅₈₀	M ₅₈₁	M ₅₈₂	M ₅₈₃	M ₅₈₄	M ₅₈₅	M ₅₈₆	M ₅₈₇	M ₅₈₈	M ₅₈₉	M ₅₉₀	M ₅₉₁	M ₅₉₂	M ₅₉₃	M ₅₉₄	M ₅₉₅	M ₅₉₆	M ₅₉₇	M ₅₉₈	M ₅₉₉	M ₆₀₀	M ₆₀₁	M ₆₀₂	M ₆₀₃	M ₆₀₄	M ₆₀₅	M ₆₀₆	M ₆₀₇	M ₆₀₈	M ₆₀₉	M ₆₁₀	M ₆₁₁	M ₆₁₂	M ₆₁₃	M ₆₁₄	M ₆₁₅	M ₆₁₆	M ₆₁₇	M ₆₁₈	M ₆₁₉	M ₆₂₀	M ₆₂₁	M ₆₂₂	M ₆₂₃	M ₆₂₄	M ₆₂₅	M ₆₂₆	M ₆₂₇	M ₆₂₈	M ₆₂₉	M ₆₃₀	M ₆₃₁	M ₆₃₂	M ₆₃₃	M ₆₃₄	M ₆₃₅	M ₆₃₆	M ₆₃₇	M ₆₃₈	M ₆₃₉	M ₆₄₀	M ₆₄₁	M ₆₄₂	M ₆₄₃	M ₆₄₄	M ₆₄₅	M ₆₄₆	M ₆₄₇	M ₆₄₈	M ₆₄₉	M ₆₅₀	M ₆₅₁	M ₆₅₂	M ₆₅₃	M ₆₅₄	M ₆₅₅	M ₆₅₆	M ₆₅₇	M ₆₅₈	M ₆₅₉	M ₆₆₀	M ₆₆₁	M ₆₆₂	M ₆₆₃	M ₆₆₄	M ₆₆₅	M ₆₆₆	M ₆₆₇	M ₆₆₈	M ₆₆₉	M ₆₇₀	M ₆₇₁	M ₆₇₂	M ₆₇₃	M ₆₇₄	M ₆₇₅	M ₆₇₆	M ₆₇₇	M ₆₇₈	M ₆₇₉	M ₆₈₀	M ₆₈₁	M ₆₈₂	M ₆₈₃	M ₆₈₄	M ₆₈₅	M ₆₈₆	M ₆₈₇	M ₆₈₈	M ₆₈₉	M ₆₉₀	M ₆₉₁	M ₆₉₂	M ₆₉₃	M ₆₉₄	M ₆₉₅	M ₆₉₆	M ₆₉₇	M ₆₉₈	M ₆₉₉	M ₇₀₀	M ₇₀₁	M ₇₀₂	M ₇₀₃	M ₇₀₄	M ₇₀₅	M ₇₀₆	M ₇₀₇	M ₇₀₈	M ₇₀₉	M ₇₁₀	M ₇₁₁	M ₇₁₂	M ₇₁₃	M ₇₁₄	M ₇₁₅	M ₇₁₆	M ₇₁₇	M ₇₁₈	M ₇₁₉	M ₇₂₀	M ₇₂₁	M ₇₂₂	M ₇₂₃	M ₇₂₄	M ₇₂₅	M ₇₂₆	M ₇₂₇	M ₇₂₈	M ₇₂₉	M ₇₃₀	M ₇₃₁	M ₇₃₂	M ₇₃₃	M ₇₃₄	M ₇₃₅	M ₇₃₆	M ₇₃₇	M ₇₃₈	M ₇₃₉	M ₇₄₀	M ₇₄₁	M ₇₄₂	M ₇₄₃	M ₇₄₄	M ₇₄₅	M ₇₄₆	M ₇₄₇	M ₇₄₈	M ₇₄₉	M ₇₅₀	M ₇₅₁	M ₇₅₂	M ₇₅₃	M ₇₅₄	M ₇₅₅	M ₇₅₆	M ₇₅₇	M ₇₅₈	M ₇₅₉	M ₇₆₀	M ₇₆₁	M ₇₆₂	M ₇₆₃	M ₇₆₄	M ₇₆₅	M ₇₆₆	M ₇₆₇	M ₇₆₈	M ₇₆₉	M ₇₇₀	M ₇₇₁	M ₇₇₂	M ₇₇₃	M ₇₇₄	M ₇₇₅	M ₇₇₆	M ₇₇₇	M ₇₇₈	M ₇₇₉	M ₇₈₀	M ₇₈₁	M ₇₈₂	M ₇₈₃	M ₇₈₄	M ₇₈₅	M ₇₈₆	M ₇₈₇	M ₇₈₈	M ₇₈₉	M ₇₉₀	M ₇₉₁	M ₇₉₂	M ₇₉₃	M ₇₉₄	M ₇₉₅	M ₇₉₆	M ₇₉₇	M ₇₉₈	M ₇₉₉	M ₈₀₀	M ₈₀₁	M ₈₀₂	M ₈₀₃	M ₈₀₄	M ₈₀₅	M ₈₀₆	M ₈₀₇	M ₈₀₈	M ₈₀₉	M ₈₁₀	M ₈₁₁	M ₈₁₂	M ₈₁₃	M ₈₁₄	M ₈₁₅	M ₈₁₆	M ₈₁₇	M ₈₁₈	M ₈₁₉	M ₈₂₀	M ₈₂₁	M ₈₂₂	M ₈₂₃	M ₈₂₄	M ₈₂₅	M ₈₂₆	M ₈₂₇	M ₈₂₈	M ₈₂₉	M<
------	------	------	-----	-----	-----	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	------------------	----

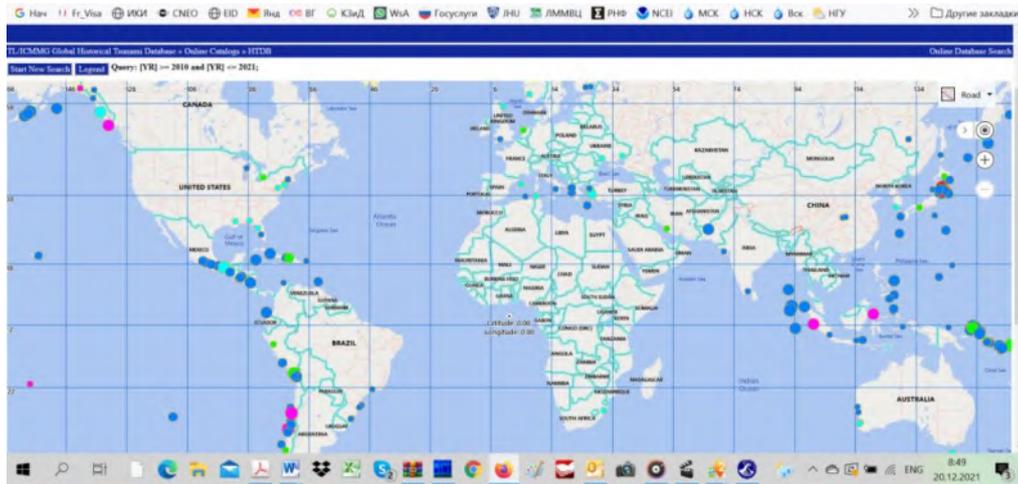


Рис. 6 – Карта очагов цунамигенных событий из выборки на рис. 4, получаемая по запросу пользователя

проводить пополнение и коррекцию содержания базы данных, а также выполнять анализ и визуализацию на конкретной картографической основе (цифровой карте региона). В состав аналитической подсистемы графической оболочки введена возможность выборки заплесков цунами по произвольной полигональной области, что в совокупности с полигональной выборкой очагов цунами позволяет проводить анализ заплесков в конкретной области побережья, вызванных цунамигенными событиями из заданного района (получать в виде списка, выводить на карту). Пример такой сложной выборки, которую нельзя получить средствами стандартной СУДБ, приведен на рис. 7. Такие задачи постоянно возникают, например, в практике работы служб предупреждения о цунами, когда нужно быстро получить и проанализировать высоты цунами по тому или иному участку защищаемого побережья от исторических очагов из района возникновения нового события, по которому необходимо дать оценку цунамиопасности.

В рамках того же задания в 2021 г. завершено создание аналитической подсистемы для оценки долгосрочной цунамиопасности на основе вероятностного анализа наблюдаемых высот цунами. В нее введены новые функции: визуализация временного ряда наблюдений высот цунами на выбранном участке побережья и построение функции повторяемости этих высот.

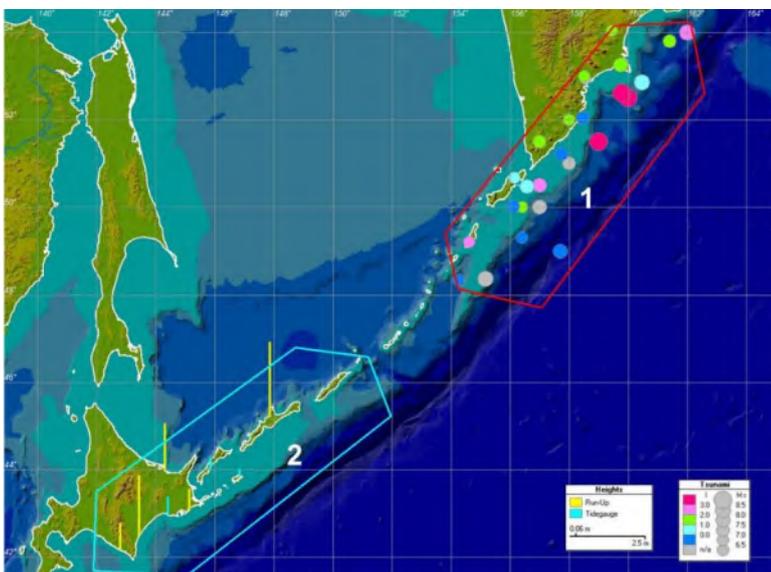


Рис. 7 – Пример сложной выборки данных по двум полигональным областям: 1 – область выборки очагов цунами (красный контур), 2 – область выборки порожденных этими очагами высот цунами (желтые вертикальные линии) на побережье РФ (голубой контур)

Продолжалась работа по дальнейшему пополнению и верификации экспертной базы данных по импактным структурам Земли Expert Database on the Earth Impact Structures (EDEIS) (<https://tsun.sssc.ru/nh/impact.php>). По состоянию на декабрь 2021 г. база содержит данные о 1207 структурах (27 – падение крупных метеоритов, метеоритные поля, 216 – достоверные, 193 – предполагаемые, 516 – возможные, 121 – сомнительные, 134 – опровергнутые), 4191 фотографий, 1032 текстовых описания, 1882 ссылки. В 2021 г. добавлены данные о 18 структурах, 106 фото, 52 текстовых описания, 57 библиографических ссылок. Общий объем базы данных 655 МБ.

В 2021 г. получила дальнейшее развитие графическая оболочка PDM/IMP, предназначенная для поддержания базы данных по импактным структурам Земли и их визуализации на цифровой карте местности. Приложение создается в среде разработки Visual studio (свободно распространяемая, C#) в части визуализации импактных структур на рельефной карте, которая строится на основе цифровой модели местности (DEM). Добавлена возможность построения карты высокого разрешения. В зависимости от требуемой детализации карты данные о рельефе берутся либо из 5-минутного файла etopo5.bin, либо из 1-минутного файла geb.bin. Процедура чтения бинарного файла оптимизирована для уменьшения времени считывания и минимизации памяти, используемой как буфер хранения. Для обеспечения лучшей производительности оптимизирована процедура получения изображения рельефа на основе использования низкоуровневого (побитового) заполнения изображения.

Для адекватного представления возраста структур (диапазон значений которого составляет от 1 до 10^9 лет) добавлена возможность градиентной раскраски изображения структуры на карте в логарифмическом масштабе по заданным диапазонам. Цвета и пределы значений для ступенчатой раскраски событий могут быть интерактивно изменены во вкладке Settings. Добавлена возможность раскраски событий по баллу по любому другому числовому параметру (например, по баллу достоверности (validity index) структуры), реализованная в выпадающем списке вкладки Settings → Events Color). Пример визуализации событий из базы данных импактных структур показан на рис. 8.



Рис. 8 – Общий вид главного экрана приложения PDM/IMP. В центральном окне показана выборка из базы данных событий с непустым полем Diam (диаметр кратера, км) – 1113 кратеров. В выбранной области карты 415 событий. Раскраска событий по параметру Age (возраст кратера) градиентная в логарифмическом масштабе от молодых (Age 0.0001 Ма и меньше) – красный цвет, до самых старых – синих; заливка серым цветом означает, что возраст кратера неизвестен

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

1. Gusiakov, V. K. Meteotsunamis at global scale: problems of event identification, parameterization and cataloguing // *Nat Hazards*. 2021. Vol. 106. P. 1105–1123. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04230-2>.
2. Gusiakov, V. K., Makhinov, A. N. December 11, 2018 landslide and 90-m icy tsunami in the Bureya water reservoir // In K. Sassa et al. (eds.), *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk, ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction*, Springer Nature Switzerland AG. 2021. P. 351–360.
3. Марчук, Ан. Г. Восстановление глубины по зарегистрированным временам вступления цунами // *СибЖВМ*. 2021, Т. 24, № 1. С. 91–99. DOI: 10.15372/SJNM20210107.
4. Lavrentiev, M. M., Marchuk, An. G. Fast modelling of tsunami wave propagation at PC by hardware computer code acceleration // *J. of Sib. Fed. Univ. Math. & Phys.* 2021. Vol. 14, iss. 4. P. 433–444. DOI: 10.17516/1997-1397-2021-14-4-1-12.
5. Lavrentiev, M. M., Lysakov, K. F., Marchuk, An. G., Oblaukhov, K. K., Shadrin, M. Yu. FPGA based tsunami wave propagation calculator // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 1789, Proc. of ICEMP 2021, IOP Publishing (2021) 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/1789/1/012011.
6. Lavrentiev, M., Lysakov, K., Marchuk, A., Oblaukhov, K., Shadrin M. Algorithmic design of an FPGA-based calculator for fast evaluation of tsunami wave danger // *Algorithms*. 2021. Vol. 14. P. 343. <https://doi.org/10.3390/a14120343>.
7. Voronina, T. A., Voronin, V. V. A study of implementation features of the R-solution method for tsunami source recovery // *Pure and Appl. Geophys.* 2021. Vol. 178. P. 4853–4863. DOI: 10.1007/s00024-021-02843-7.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Voronina, T. A., Loskutov, A. V. Applying the R-solution method for designing a tsunami observational system // *J. of Phys.: Conf. Ser. (MSR-2021)*. 2021. Vol. 2099. P. 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012063.
2. Lavrentiev, M. M., Lysakov, K. F., Marchuk, An. G., Oblaukhov, K. K., Shadrin, M. Yu. FPGA based modeling of Tohoku tsunami using nested grids // *J. of Phys.: Conf. Ser. Proc. of the Global Oceans 2020, Singapore – U. S., Gulf Coast, October 5–14, 2010*. Vol. 1789, iss. 1. 012011. (не вошла в отчет 2020 г.). DOI: 10.1088/1742-6596/1789/1/012011.
3. Lavrentiev, M., Kuzakov, D., Marchuk, An. Localization of the tsunami source area for effective warning with the given sensor position // *J. of Phys.: Conf. Ser. Proc. of the Global Oceans 2020, Singapore – U. S., Gulf Coast, October 5–14, 2020*. Vol. 1789, iss. 1. 012011. Art. num. 20569355. DOI: 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389451 (не вошла в отчет 2020 г.).

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Лаврентьев, М. М., Лысаков, К. Ф., Марчук, Ан. Г., Облаухов, К. К. Ускорение расчетов распространения волны цунами с использованием FPGA // *Успехи киберн.* 2021. Т. 2, № 1. С. 14–25. DOI: 10.51790/2712-9942-2021-2-1-2.
2. Воронина, Т. А., Лоскутов, А. В. Перспективы применения метода усеченного сингулярного разложения для прогноза цунами // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга*

сейсмоактивных регионов : труды 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г. С. 333–337.

3. Лаврентьев, М. М., Марчук, Ан. Г., Облаухов, К. К., Романенко, А. А. Быстрое численное моделирование на базе персонального компьютера // Proc. of the Geothermal Volcanology Workshop, Petropavlovsk-Kamchatsky, Sept. 6–11, 2021. P. 113–117.

4. Гусяков, В. К. От Чикскулуба до Челябинска // Наука из первых рук. 2021. № 1/2 (91). С. 6–27. <https://scfh.ru/papers/ot-chikskuluba-do-chelyabinska>.

Участие в конференциях и совещаниях

1. 10-я Международная конференция "Математические идеи П. Л. Чебышёва и их приложения к современным проблемам естествознания", г. Обнинск, 14–18 мая 2021 г. – 2 доклада (Марчук Ан. Г.).

2. The 30-th International tsunami symposium, Sendai (Japan), July 1–3, 2021 – 2 доклада (Марчук Ан. Г.).

3. Planetary resilience from hazardous near Earth objects: Dialogue through science: Space safety and security, London (UK), August 23, 2021 – 1 доклад (Гусяков В. К.).

4. Geothermal volcanology workshop, Petropavlovsk-Kamchatsky, September 6–11, 2021 – 1 доклад (Марчук Ан. Г.).

5. The 3rd AOGS-EGU Joint conference on new dimensions for natural hazards in Asia, September 20–22, 2021 – 1 доклад (Марчук Ан. Г.).

6. OCEANS 2021, San Diego – Porto, September 20–23, 2021 – 2 доклада (Марчук Ан. Г.).

7. 8-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием "Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов", Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г. – 3 доклада (Гусяков В. К., Марчук Ан. Г., Воронина Т. А.).

8. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ 2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 2 доклада (Марчук Ан. Г., Воронина Т. А.).

9. Planetary resilience from hazardous near Earth objects: Dialogue through science: Space safety and security, London (UK), October 18, 2021 – 1 доклад (Гусяков В. К.).

10. 3-я Всероссийская научная конференция с международным участием "Волны цунами: моделирование, мониторинг, прогноз", Москва, 16–17 ноября 2021 г. – 4 доклада (Гусяков В. К., Марчук Ан. Г., Воронина Т. А.).

11. 19-я Международная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли", Москва, 15–19 ноября 2021 г. – 1 доклад (Гусяков В. К.).

12. World landslide forum 5, Kyoto (Japan), November 3–6, 2021 – 1 пленарный доклад (Гусяков В. К.).

Участие в оргкомитетах конференций

Гусяков В. К.:

– член организационного комитета 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов", Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г.,

– член программного комитета 3-й Всероссийской научной конференции с международным участием "Волны цунами: моделирование, мониторинг, прогноз", Москва, МГУ, 16–17 ноября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 7
Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 8
Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 15
Докладов на конференциях 21, в том числе 2 пленарных
Участников оргкомитетов конференций – 2

Кадровый состав

1. Гусяков В. К.	зав. лабораторией	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.	
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.	

ЛАБОРАТОРИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАТИКИ

Зав. лабораторией д.т.н. Ковалевский В. В.

Важнейшие достижения

Исследования по геоэкологии техногенных шумов в интересах безопасности инфраструктуры города.

Д.т.н. Хайретдинов М. С., д.т.н. Ковалевский В. В., Копылова О. А.

В связи с резким нарастанием на современном этапе уровня шумового загрязнения городской инфраструктуры из-за интенсивно нарастающей автомобилизации, масштабов строительных работ и других природно-техногенных факторов актуальной является проблема оценивания и предупреждения экологических рисков от шумов здоровью человека, окружающей социальной инфраструктуре. Уровень опасности резко возрастает в области инфранизких частот, поскольку этот диапазон соответствует основным процессам жизнедеятельности организма человека и собственным частотам колебаний сооружений. Авторами разработан многофакторный методический подход к решению задач обнаружения критических уровней шумов, определяемых вибрациями в земле и акустическими колебаниями в атмосфере, оценивания степени их угрозы для человека, а также распознавания и определения местоположения источников шумов. Получены практически важные теоретические и экспериментальные результаты решения перечисленных задач в отношении различных типов тяжелого транспорта, полигонных и карьерных взрывов. Разработаны практические рекомендации по безопасности с учетом пространственно-частотно-временных факторов.

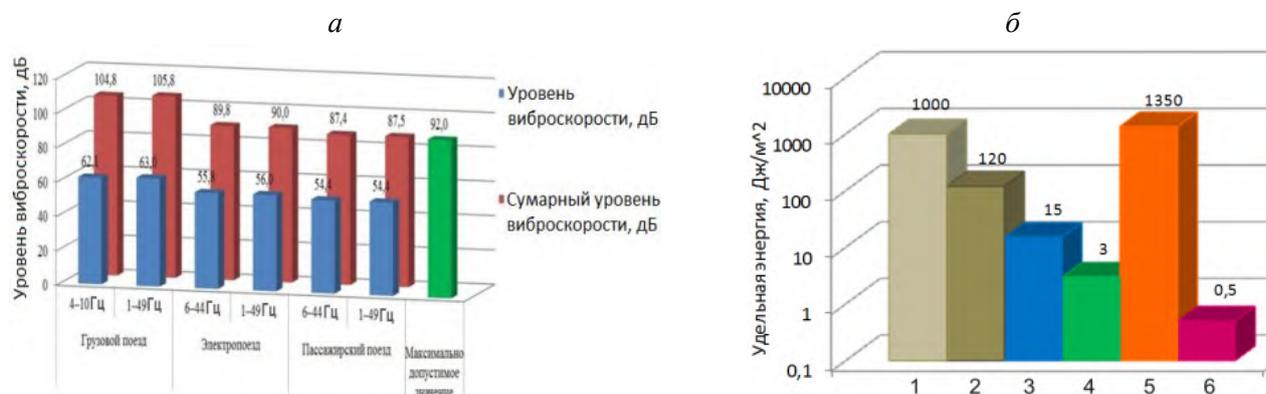


Рис. 1 – Уровни виброскорости (дБ) в диапазонах частот от различных источников: грузовой поезд, электропоезд, пассажирский поезд; синий – нормированный, красный – суммарный, зеленый – критический, максимально допустимый уровень для частот 4–80 Гц (а); критические значения удельной энергии (УЭ) от взрывов для строений: 1 – жилое здание при однократном взрыве; 2 – жилое здание при многократных взрывах; 3 – оконное стекло толщиной 2–3 мм; 4 – для человека; 5 – значения УЭ от взрыва с тнт 125 кг на удалении от взрыва 0.5 км; 6 – на удалении 10 км (б)

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Kopylova, O., Dobrorodny, V., Khairetdinov, M. Optimization of frequency parameters choice in the polarization analysis of transport noise // Optimization Problems of Complex Systems : Proc. of the 17th International Asian school-seminar (OPCS), Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 44–48. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9588728>. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588728.

2. Kopylova, O. A., Khairtudinov, M. S. Geoeological risks of technogenic noise at low frequencies. // Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific-practical conf., Prague (CZE), Apr. 26–30, 2021 / Ed. Uvaysov S. U., Ivanov I. A. P. 132–138.

Результаты исследований представлены в докладах на конференции

1. The 21th Multidisplanary Scientific Geoconference (SGEM-2021), Albena (Bulgaria), Aug. 14–22, 2021.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2021 г. в соответствии с планом НИР института

Проект НИР "Математические модели и методы решения прямых и обратных задач, численное моделирование на супер-ЭВМ для решения задач математической геофизики применительно к разведке полезных ископаемых, активному мониторингу и исследованию природных и техногенных опасных явлений".

Номер государственной регистрации 0251-2021-0004.

Руководитель – д.т.н. Ковалевский В. В.

Этап 2021 г.

Разработан новый класс численных алгоритмов для расчета интегрального преобразования Лагерра

$$a_n = \int_0^{\infty} f(x)l_n(x)dx, \quad f(x) = \sum_{i=0}^n a_i l_i(x).$$

Суть рассмотренного подхода заключается в том, что вычисление несобственных интегралов быстро осциллирующих функций заменяется решением начальной краевой задачи для транспортного уравнения с использованием спектральных алгоритмов. Такой подход позволил успешно избежать проблем, связанных с численной реализацией преобразования Лагерра. Реализация предлагаемого алгоритма была бы невозможна без разработки двух вспомогательных процедур, позволяющих исключить фиктивную периодичность (эффект Алиасинга), обусловленную использованием вспомогательного преобразования Фурье. Первый подход предполагает увеличение верхнего предела интегрирования таким образом, чтобы фиктивные периоды не влияли на коэффициенты разложения, тогда как во втором подходе используется операция сопряжения. Важно, что эти методы позволяют достичь на равномерной сетке достаточно высокой точности расчета интеграла, сравнимой с точностью квадратур Гаусса – Лагерра на неравномерной сетке (рис. 2). Тестовые расчеты подтвердили, что предлагаемые алгоритмы устойчивы и могут быть использованы как для одинарной, так и двойной точности. Несмотря на то что разработанные методы не относятся к классу быстрых алгоритмов, количество арифметических операций значительно уменьшено, так как отсутствует необходимость вычислять быстро осциллирующие несобственные интегралы с использованием подробных сеток. Таким образом, если требуется аппроксимировать большой объем сейсмических данных рядами Лагерра, то предложенные численные процедуры позволяют значительно сэкономить время вычислений. Это обстоятельство делает предлагаемый подход привлекательным как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Получено аналитическое решение задачи для распространения волн в шаре планетарных размеров. Разработан метод его устойчивого вычисления. Решение получено с использованием потенциалов продольных и поперечных волн. Хорошо известно классическое представление полного поля через потенциалы. В данной работе получено модифицированное разложение на потенциалы. Данное представление позволяет сразу свести векторные уравнения движения (в спектральной области) к классическим уравнениям Бесселя. Это существенно упрощает нахождение аналитического решения.

В области разработки численных методов математического моделирования вибросейсмических полей для сложнопостроенных сред проведен поиск и построение новой функциональной зависимости для переопределения значений параметров среды в выделенной зоне, круговой с повышенными или пониженными значениями. Такой способ обеспечивает плавное изменение значений параметров с максимальным значением в центре круговой области в процентном соотношении относительно исходной модели. Новый алгоритм внесен в программный инструментальный моделирования для суперЭВМ в части создания сеточной модели упругой среды. Проведено тестирование работы программы при построении простых 2D моделей упругих сред, при вариации размеров области и для случаев нескольких переходов для изменения значений параметров внутри зоны. На многоядерной системе проведено численное моделирование сейсмического поля при использовании разностной схемы повышенного порядка точности для созданных простых моделей сред при наличии одной области с повышенным значением параметров.

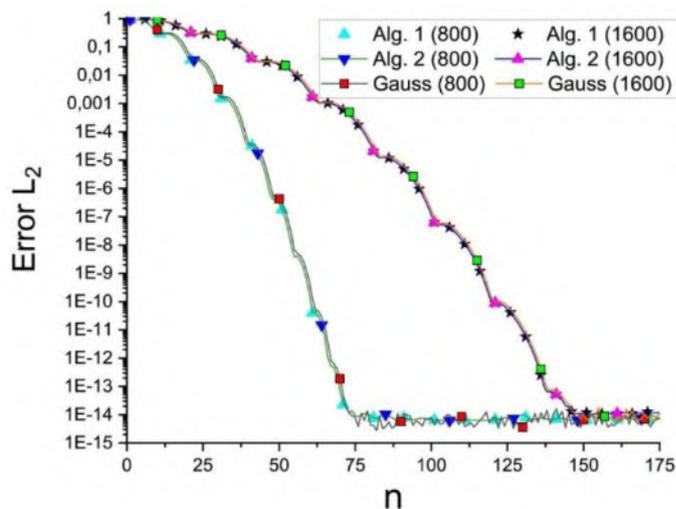


Рис. 2 – Зависимость погрешности аппроксимации от числа слагаемых для вычисления преобразования Лагерра посредством алгоритмов 1, 2 и квадратур Гаусса – Лагерра

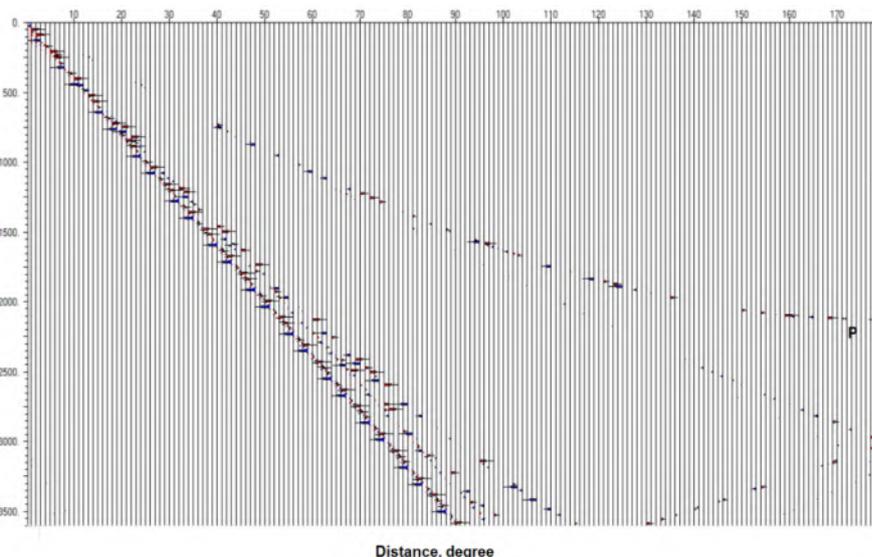


Рис. 3 – U_{θ} компонента сейсмического волнового поля для сферической Земли. Доминирующая частота в источнике 1 Гц. Часовая запись. По вертикали – время, сек. (возрастает вниз). По горизонтали – пункты регистрации, град.

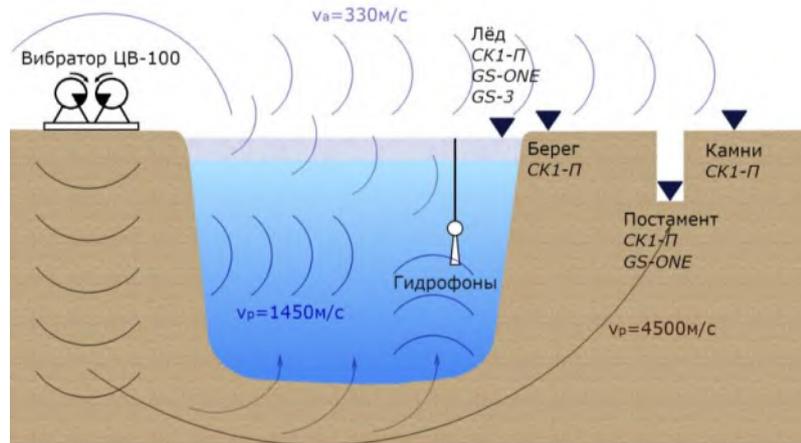


Рис. 4 – Схема проведения экспериментов на оз. Байкал по вибрационному просвечиванию сопряженных сред земля – вода – лед – атмосфера. Представлены: сейсмический вибратор ЦВ-100 с возмущающей силой 100 тс в диапазоне частот 6.25–10.05 Гц; СК-1П, GS-3, GS-ONE – сейсмические трехкомпонентные датчики; гидрофоны – датчики гидроакустических колебаний; "постамент" – сейсмическая обсерватория на глубине 3 м; "лед", "берег", "камни", "гидрофоны" – наименования мест установки датчиков

В рамках изучения проблемы взаимодействия смежных геофизических полей выполнена работа в совместных экспериментах по вибрационному зондированию сопряженных сред – земля – вода – атмосфера – лед на оз. Байкал (рис. 4). Выполнен анализ полученных геофизических данных. Выделены особенности вибрационных сейсмограмм, полученных в разных средах, определяющих процессы распространения волновых полей и характеристики взаимодействия между ними. Одним из важных результатов, имеющим фундаментальное и прикладное значение, является подтверждение теории о возможности регистрации в воде гидроакустической волны от вибратора на временах вступления сейсмической волны P как результата трансформации в направлении дно – море. Развернуто численное моделирование распространения акустосейсмических волн в рассматриваемых средах.

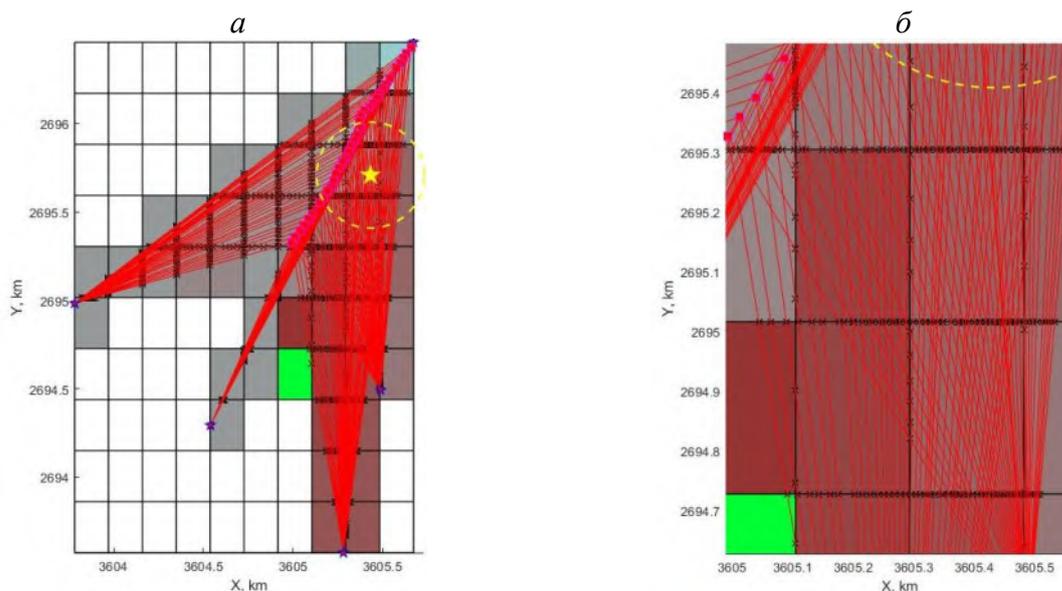


Рис. 5 – Разбиение дневной поверхности в области вулкана для определения средневзвешенной скорости сейсмической волны для каждого из участков (а); квадраты – положение регистраторов, звезды – сейсмоисточников, желтая звезда – центр вулкана; та же область в увеличенном масштабе для наглядного представления распределения фронта распространения сейсмических волн (б)

Исследована задача восстановления скоростных характеристик сложнопостроенной среды с применением вычислительного сеточного метода последовательного определения годографа сейсмических волн. Разрешенность метода по выявлению вариаций скоростей волн, вносимых неоднородностями по отношению к заданной трассе, достигается за счет выбора шага сетки. Метод использован по отношению к данным вибрационного зондирования вулкана гора Карabetова в 2008 г. Обнаруженные количественные вариации скоростей увязываются с геологическими неоднородностями в зоне вулкана, представленными на геологической схеме района вулкана.

В лаборатории геофизической информатики ИВМиМГ СО РАН разработан и активно развивается интеллектуальный научный веб-ресурс, состоящий из двух подсистем: НИС "Активная сейсмология" и портал знаний "Активная сейсмология". В 2021 г. проведена работа по реорганизации ресурса.

Создан раздел НИС по исследованию геоэкологических рисков от техногенных шумов. Архивы данных полевых и вычислительных экспериментов НИС "Активная сейсмология" пополнены структурированными каталогами данных экспериментов по оценке геоэкологических рисков от взрывов и транспортных шумов. Расширены таблицы базы данных метаданными, описывающими экспериментальные данные. В электронной библиотеке НИС созданы разделы для хранения текстовой информации, относящейся к проблемной теме: справочные таблицы, научные статьи, отчеты. Проведена доработка онтологии "Активная сейсмология" путем включения концептов и отношений, связанных с проблемой мониторинга экологических рисков от взрывов и транспортных шумов (рис. 6). На основе разработанной онтологии расширена функциональность портала знаний (рис. 7).

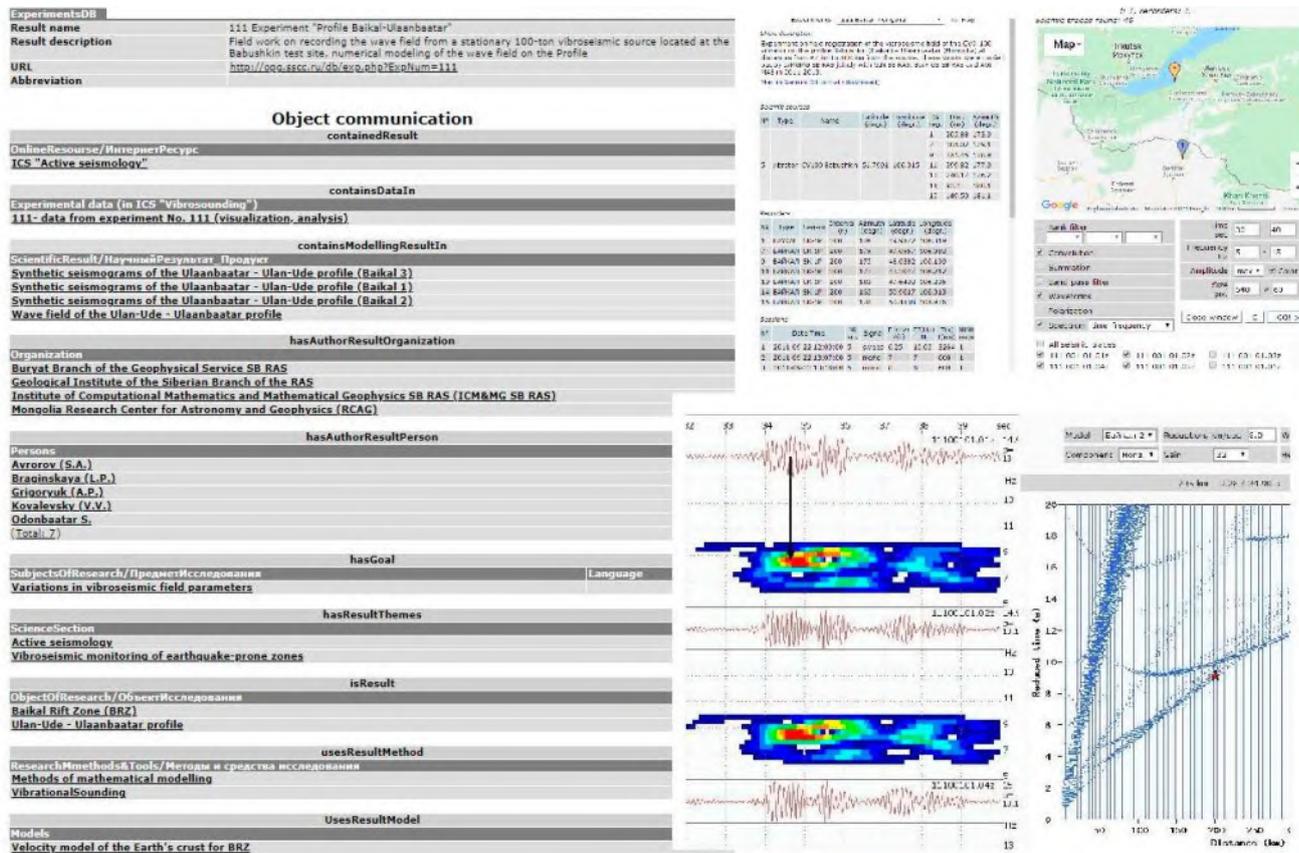


Рис. 6 – Портал знаний по геофизическому мониторингу и НИС "Активная сейсмология"

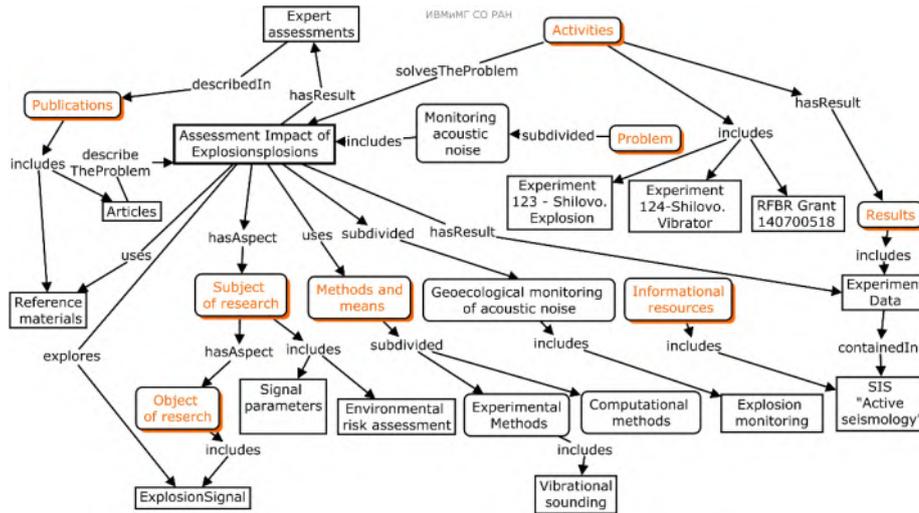


Рис. 7. Фрагмент онтологии

В результате проведенных работ организовано хранение, содержательный доступ к знаниям и данным по геоэкологическому мониторингу, а также вычислительный анализ данных экспериментов.

Проведено онтологическое моделирование предметной области "Комплексный геофизический мониторинг". На основе разработанной онтологии расширена функциональность портала знаний по активной сейсмологии.

Базы данных ИВС "Вибросейсмическое просвечивание Земли", входящей в состав "Активной сейсмологии", пополнены полевыми данными, полученными в ходе эксперимента по регистрации вибросейсмических сигналов от источника ЦВО-100, расположенного в п. Бабушкин "Байкал-2021" (рис. 8).

Рассмотрена возможность использования нейронной сети неокогнитрон для распознавания геолого-физических моделей сред (ГФМС). Для модификации нейронной сети предложены алгоритм выбора фильтра для метода поиска границ на перепаде яркости и модифицированная нейросетевая модель распознавания ГФМС различных форм. Продемонстрировано разработан-

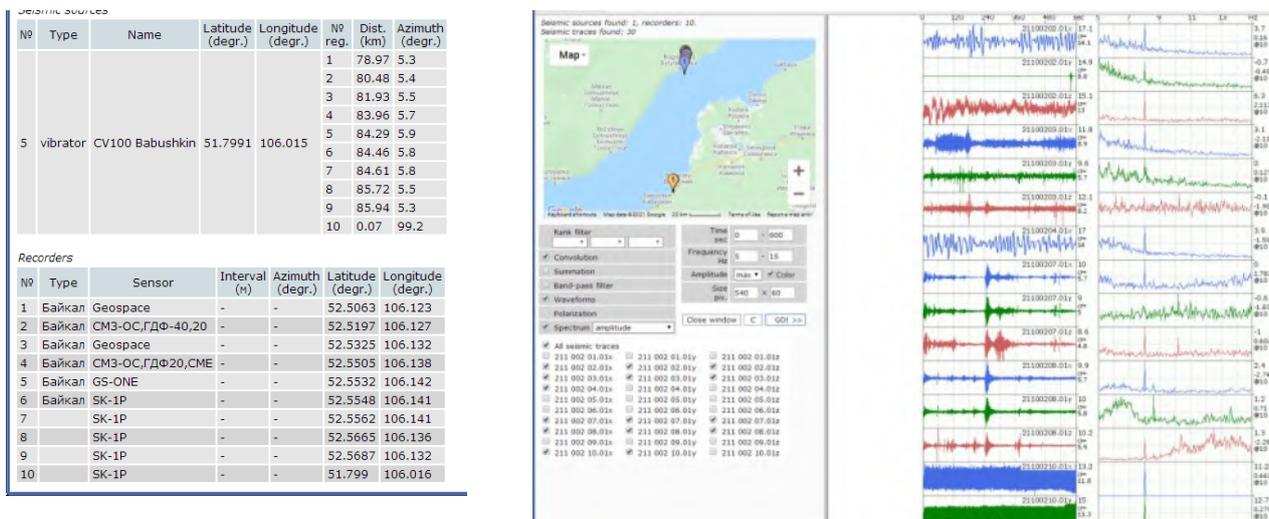


Рис. 8 – Страницы ИВС. Описание и карта эксперимента. Пользовательский запрос и результат анализа отображенных сейсмограмм

ное программное обеспечение, на котором проведена серия экспериментов по восстановлению структуры ГФМС и даны рекомендации по улучшению работы нейронной сети.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 20-41-540003 "Разработка математического и программного обеспечения для восстановления изображений земных недр для регионов Западной и Восточной Сибири на многопроцессорных вычислительных системах".

Руководитель проекта – д.ф.м.н. Терехов А. В.

С целью построения изображений земных недр для районов Западной и Восточной Сибири по регистрируемым данным сейсмических наблюдений в проекте разработаны вычислительные методы, алгоритмы и параллельный программный комплекс для решения обратной задачи восстановления коэффициентов отражений. Рассматриваемая проблема обязательно решается на этапе промышленной обработки данных полевых наблюдений для определения структурных неоднородностей в земной коре. Для решения поставленных задач исследованы новые спектрально-разностные методы высоких порядков точности для экстраполяции волновых полей с поверхности в глубину на основе одностороннего волнового уравнения с псевдодифференциальным оператором (параболическое приближение волнового уравнения). Предложены новые алгоритмы вычисления коэффициентов отражений на основе процедур свертки и деконволюции. Разработаны новые численные методы, а именно: методы аппроксимации высоких порядков точности для решения уравнений с псевдодифференциальным оператором для трехмерной геометрии, быстрые алгоритмы вычисления интегрального преобразования Лагерра, высокопроизводительные методы фильтрации неустойчивых компонент волнового поля (рис. 9), обусловленных как некорректностью математической модели экстраполяции волнового поля, так и применением разностных схем высоких порядков точности. Разработаны новые методы вычислительной линейной алгебры (метод экстра-компонент) для быстрого умножения вектора на матрицу, элементами которой являются специальные функции. Предлагаемый подход доказал свою

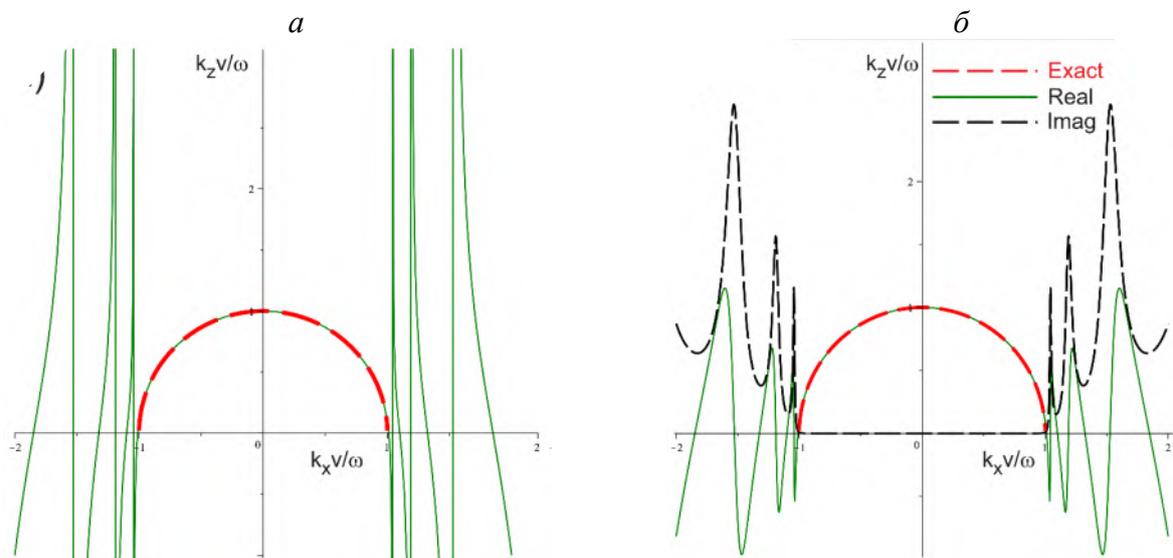


Рис. 9 – Паде-аппроксимация дисперсионного соотношения на основе вещественной (а) и комплексной Паде-аппроксимаций (б)

эффективность для вычисления быстрых преобразований Лагерра, Чебышева, Лежандра, Гегенбауера, Якоби, а также для расчета сферических гармоник и неравномерного преобразования Фурье. Показано, что метод экстра-компонент превосходит существующие быстрые алгоритмы по производительности и обладает высокой точностью. Параллельная реализация процедур выполнена на основе модификации метода декомпозиции областей. Корректность и точность алгоритмов построения глубинных изображений верифицированы специалистами из Сибирского научно-исследовательского института геофизики, геологии и минерального сырья и Всероссийского научно-исследовательского геологического нефтяного института, Новосибирский филиал. Подтверждено, что предлагаемые методы обладают достаточной точностью и позволяют получать глубинные изображения высокого качества для сложных моделей сред и реальных сейсмо-разведочных данных.

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.

Цель теоретических и экспериментальных исследований на настоящем этапе выполнения проекта определяется как изучение закономерностей распространения и взаимосвязи геофизических волновых полей на протяженных смешанных трассах "земля – вода – атмосфера – лед". Для такой комплексной постановки задачи исследования отличаются как новизной, так и фундаментальностью и практической значимостью.

Постановка работ привязана к району оз. Байкал в силу двух основных факторов: во-первых, детальной изученности геолого-геофизического строения района озера – Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), что позволяет выполнять уточненное численное моделирование сейсмофизических процессов распространения волн; во-вторых, расположения на берегу Байкала в районе с. Бабушкин уникального инфранизкочастотного вибрационного источника сейсмических и акустических колебаний ЦВ-100. Источник развивает возмущающую силу 100 тс в диапазоне частот 6.25–10.05 Гц и генерирует колебания с высокой метрологической точностью поддержания силовых и фазочастотных характеристик. Это позволяет реализовать алгоритмы накопления сейсмических колебаний нанометрового уровня. Соединение обоих факторов способствует согласию результатов теории и эксперимента с повышенной точностью.

Экспериментальная часть работ выполнена с участием Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Новосибирск), Института физики Земли РАН (Москва), Института геологии СО РАН (Улан-Удэ.). Цель экспериментов – изучение закономерностей распространения и взаимодействия геоакустических полей от вибратора ЦВ-100 на смешанных трассах "берег – море", наземных трассах, трассе "атмосфера – земля", а также в ледяном покрове оз. Байкал. Максимальная протяженность трассы составила 86 км. Регистрация колебаний осуществлялась одновременно в четырех средах. В результате спектрально-корреляционной обработки полученных записей выделены сейсмические волны в земле, гидроакустические в воде, акустические в атмосфере.

В качестве одного из значимых результатов следует выделить наличие в воде волн первых вступлений на временах прихода продольных сейсмических волн в земле, характеризующихся

скоростью распространения примерно 5.08 км/с. Это важный вывод, подтверждающий явление трансформации волн на границе перехода дно – вода. Другой результат связан с обнаружением эффекта трансформации сейсмических волн в гидроакустические на границе берег – вода, вследствие чего образуется вторичная гидроакустическая волна, характеризующаяся в основном скоростью распространения в воде. Как следует из анализа экспериментально полученных сейсмотрасс в земле и гидротрасс в воде, картина волнового поля в воде значительно осложнена вследствие явления переотражения при распространении волн в воде с границами лед – дно. Этому способствует зимний приповерхностный подводный звуковой канал. В условиях зимней стратификации звук распространяется, рефрагируя по лучевым траекториям, описывающим дуги с разными длинами, в зависимости от угла выхода луча. Это обосновывается анализом теоретически рассчитанной лучевой картины волнового поля в воде. Выявлено, что по отношению к процессу распространения инфразвука во льду, волны, подобные выделенным в земле, атмосфере и воде, уверенно не выделяются, что вызвано сильным затуханием колебаний из-за выраженной трещиноватости льда. Оценены характеристики затухания волн в разных средах. В пределах рассматриваемой трассы длиной 86 км ослабление основной сейсмической волны оценивается как 1.4 дБ/км. Столь сильное ослабление вызвано наличием крупных разломов в Байкальской рифтовой зоне. В то же время в воде оз. Байкал ослабление низкочастотных колебаний лежит в районе 0.07 дБ/км, т. е. на порядки меньше.

Впервые для проведения теоретических исследований процессов распространения волновых полей в земле, воде, атмосфере разработана программно-аналитическая система численного моделирования, адаптированная к скоростным характеристикам БРЗ. Моделирование основано на численном решении прямой динамической задачи теории упругости. Для моделирования волнового поля использовалась постановка начально-краевой задачи в декартовой трехмерной системе координат. Предварительно построены скоростные модели сред с заданной геометрией. В результате решения прямой задачи определены модели, которые дают наиболее высокую степень приближения синтетических (теоретически построенных) сейсмотрасс к экспериментально полученным. С помощью разработанных алгоритмов и программ получены динамические картины распространения волнового поля в виде мгновенных снимков поля, позволяющих изучать механизм распространения прямых и переотраженных волн, характерных для БРЗ.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Kumari, C., Kundu, S., Maity M., Znak V. I. Comparative study of the piezo-viscous effect of SH wave propagation with irregular and irregular free interfaces in different piezo-electric stratified media // *Waves in Random and Complex Media*, 2021. DOI: 10.1080/17455030.2021.1957520.
2. Kopylova, O., Dobrorodny, V., Khairtdinov, M. Geocological monitoring and risks of technogenic noise // *Proc. of the 21th Intern. multidiscipl. sci. GeoConference "SGEM 2021"*, Albena (Bulgaria), Aug. 14–22, 2021. DOI: 10.5593/sgem2021/2.1/s08.34.
3. Pinigina, D., Kopylova O., Khairtdinov M. Numerical algorithm for identifying inhomogeneities in complex medium. // *Proc. of the 21th Intern. multidiscipl. sci. GeoConference "SGEM 2021"*, Albena (Bulgaria), Aug. 14–22, 2021. DOI: 10.5593/sgem2021/2.1/s08.37.

4. Khairtdinov, M., Kovalevsky, V., Shimanskaya, G. Seismo acoustic waves of ground vibrators in the lithosphere-atmosphere system // Proc. of the 21th Intern. multidiscipl. sci. GeoConference "SGEM 2021", Albena (Bulgaria), Aug. 14–22, 2021. DOI: 10.5593/sgem2021/2.1/s08.38.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Morozov, A. E., Yakimenko, A. A., Karavaev, D. A. Application of neural networks in problems of determining geometrical properties of objects placed in geophysical elastic media // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. Vol. 1019. Art. num. 012027. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1019/1/012027>.

2. Yakimenko, A. A., Makfuzova, A. I. Investigation of edge detection methods using the example of wave field pattern image // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. Vol. 1019. Art. num. 012008. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1019/1/012008>.

3. Terekhov, A. V. A divide-and-conquer algorithm for seismic data approximation by the Laguerre series // J. of Phys.: Conf. Ser. (International Conference "Marchuk Scientific Readings 2021"). 2099. Art. num. 012062. 2021. DOI:10.1088/1742-6596/2099/1/012062.

4. Kulikov, I., Karavaev, D. The WENO reconstruction in Godunov's method for modeling hydrodynamic flows with shock waves // J. of Phys.: Conf. Ser. (MHD-PP 2021). 2021. Vol. 2028. Art. num. 012023. DOI:10.1088/1742-6596/2028/1/012023.

5. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Tutukov, A. A study of white dwarf shock detonation and type Ia supernova explosion // J. of Phys.: Conf. Ser. (MHD-PP 2021). 2021. Vol. 2028. Art. num. 012004. DOI:10.1088/1742-6596/2028/1/012023.

6. Fatyanov A.G., Burmin V.Y. Kinematics of wave fields in a sphere // Izvestiya – Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. Vol. 57, iss. 7. P. 739–745. DOI: 10.21455/GPB2021.1-6.

7. Kopylova, O., Dobrorodny, V., Khairtdinov M. Optimization of frequency parameters choice in the polarization analysis of transport noise // Proc. of the 17th International Asian School-Seminar "Optimization Problems of Complex Systems (OPCS)", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 44–48. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9588728>.

8. Khairtdinov, M., Shimanskaya, G., Mikhailov, A., Imomnazarov, H. Optimization problem of inter-wave transformations in geophysics // Proc. of the 17th International Asian School-Seminar "Optimization Problems of Complex Systems (OPCS)", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 40–43. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9588677>.

9. Braginskaya, L., Grigoruk, A., Kovalevsky, V., Latyntseva, T. Scientific Internet resource for the geophysical research support // Proc. of the 17th International Asian School-Seminar "Optimization Problems of Complex Systems (OPCS)", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 13–17. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9588727>.

10. Khairtdinov, M., Shimanskaya, G., Kopylova, O. Geocology of technogenic infrasound // Proc. of the 15th International scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics 2021), Omsk, Nov. 9–11, 2021. DOI 10.1109/Dynamics52735.2021.9653701.

11. Braginskaya, L. P., Grigoruk, A. P., Kovalevsky V. V. An integrated information environment to support geophysical research of the Baikal rift zone // EUR Workshop Proceedings, SDM-2021: All-Russian conf., Novosibirsk, Aug. 24–27, 2021. DOI: 10.25743/sdm.2021.82.97.048.

12. Braginskaya, L., Kovalevsky, V., Grigoruk, A., Latyntseva T. Scientific Internet resource for the geophysical research support // Proc. of the 17th International Asian school-seminar "Optimization

problems of complex systems (OPCS), Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 13–17. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588727.

13. Braginskaya, L., Grigoruk, A., Latyntseva, T., Kopylova, O., Integratioh of knowledge and data in the tasks of environmental monitoring of technogenic noise // Proc. of IEEE 15th International conference of actual problems of electronic instrument engineering (APEIE), 2021. P. 494–498. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647645.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Фатьянов, А. Г., Бурмин, В. Ю. Кинематика волновых полей в шаре // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20. № 1. С. 61–67. DOI: 10.21455/GPB2021.1-6.

2. Britvin, A. V., Borisov, B. D., Poller, B. V., Poller, A. B., Khairtdinov, M. S., Khokhryakov, A. S. Highly sensitive detection of infrasonic oscillations in the atmosphere using synchronous laser lines with a frequency standard // Modern problems of laser physics (MPLP-2021) : The 9th Intern. symp. techn. digest, Novosibirsk, Aug. 22–28, 2021. P. 129–130. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46467533&pff=1>.

3. Kopylova, O. A., Khairtdinov, M. S. Geocological risks of technogenic noise at low frequencies. // Information Innovative Technologies (IIT) : Materials of the Intern. sci.-pract. conf., Prague (CZE), Apr. 26–30, 2021. P. 132–138. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46447634>.

4. Pinigina, D. L., Kopylova, O. A., Khairtdinov, M. S. Geoinformational technology for estimating the velocity characteristics of the medium // Information Innovative Technologies (IIT) : Materials of the Intern. sci.-pract. conf., Prague (CZE), Apr. 26–30, 2021. P. 168–173. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46447640>.

5. Копылова, О. А., Хайретдинов, М. С. Геоэкологические риски техногенных шумов на низких частотах // Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология: сб. материалов Междунар. науч. конф. в рамках 17-го Междунар. науч. конгр. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. : в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Т. 4, № 1. С. 137–144. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-137-144.

6. Пинигина, Д. Л., Копылова, О. А., Хайретдинов, М. С. Численный алгоритм оценивания скоростных характеристик среды в вулканической зоне // Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология: сб. материалов Междунар. науч. конф. в рамках 17-го Междунар. науч. конгр. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. : в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Т. 4, № 1. С. 185–192. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-185-192.

7. Доброродный, В. И., Копылова, О. А. Характеристики микросейсм и акустических шумов в условиях транспортного полигона // Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология: сб. материалов Междунар. науч. конф. в рамках 17-го Междунар. науч. конгр. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. : в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Т. 4, № 1. С. 118–125. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-118-125.

8. Брагинская, Л. П., Копылова, О. А. Информационная поддержка исследований транспортных шумов // Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология: сб. материалов Междунар. науч. конф. в рамках 17-го Междунар.

науч. конгр. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. : в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Т. 4, № 1. С. 95–102. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-95-102.

9. Латынцева, Т. В., Брагинская, Л. П. Интеграция знаний и данных в задачах геоэкологического мониторинга взрывов // Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология: сб. материалов Междунар. науч. конф. в рамках 17-го Междунар. науч. конгр. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 19–21 мая 2021 г. : в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2021. Т. 4, № 1. С. 152–158. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-4-1-152-158.

10. Собисевич, А. Л., Собисевич, Л. Е., Фатьянов, А. Г., Разин, А. В. Аналитический анализ длиннопериодных сейсмогравитационных процессов. Новые вызовы. // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : тез. 15-й Междунар. сейсмологической школы. Обнинск, 2021. С. 89. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46662222>.

11. Доброродный, В. И., Копылова, О. А., Хайретдинов, М. С., Костин, Д. В. Обнаружение и локация наземных подвижных объектов с использованием спектрально-поляризационного метода. // Теория и техника радиосвязи. Воронеж, 2021. № 4. С.48–57.

13. Копылова, О. А., Доброродный, В. И., Хайретдинов, М. С. Поляризационно-фильтровой анализ транспортных шумов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии" (ИНФО-2021), 1–10 окт. 2021 г., Сочи. С. 140–146.

14. Брагинская, Л. П., Григорюк, А. П., Ковалевский, В. В. Научная информационная система активного сейсмологического мониторинга // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов : труды 8-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Петропавловск-Камчатский, 26 сент. – 2 окт. 2021 г. С. 378–381.

Участие в конференциях и совещаниях

1. The 4th Virtual Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes (MHD-PP 2021), Novosibirsk, October 12–14, 2021 – 2 доклада (Караваев Д. А.).

2. The 17th International Asian school-seminar "Optimization Problems of Complex Systems (OPCS-2021), Novosibirsk, September 13–17, 2021 – 3 доклада (Копылова О. А., Хайретдинов М. С., Шиманская Г. М., Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В.).

3. The 15th International scientific and technical conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics 2021), Omsk, November 9–11, 2021 – 1 доклад (Хайретдинов М. С., Шиманская Г. М., Копылова О. А.).

4. The 21th International multidisciplinary scientific GeoConference "SGEM 2021", Albena (Bulgaria), August 14–22, 2021 – 3 доклада (Копылова О. А., Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В., Шиманская Г. М.).

5. Всероссийская конференция с международным участием "Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов" (SDM-2021), Новосибирск, 24–27 августа 2021 г. – 1 доклад (Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В.).

6. The 15th International conference of actual problems of electronic instrument engineering (APEIE), Berdsk, Nov. 19–21, 2021 – 4 доклада (Копылова О. А., Хайретдинов М. С., Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Якименко А. А.).

7. The IX International symposium "Modern problems of laser physics" (MPLP-2021), Novosibirsk, August 22–28, 2021 – 1 (Хайретдинов М. С.).

8. The International scientific-practical conference "Information Innovative Technologies" (I²T 2021), Prague (CZE), April 26–30, 2021 – 1 доклад (Копылова О. А., Хайретдинов М. С.).

9. Международная научная конференция "Дистанционные методы зондирования Земли и фотogramметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 17-го научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", 19–21 мая 2021 г. – 5 докладов (Копылова О. А., Хайретдинов М. С., Брагинская Л. П.).

10. 15-я Международная сейсмологическая школа "Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных", Новосибирск, 6–10 сентября 2021 г. – 1 доклад (Фатьянов А. Г.).

11. Международная научно-практическая конференция "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии" (ИНФО-2021), Сочи, 1–10 октября 2021 г. – 1 доклад (Копылова О. А., Хайретдинов М. С.).

12. 8-я науч.-техн. конф. "Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов", Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г. – 3 доклада (Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В., Фатьянов А. Г., Терехов А. В., Караваев Д. А.).

13. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 6 докладов (Терехов А. В., Караваев Д. А., Копылова О. А., Хайретдинов М. С., Шиманская Г. М., Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В., Фатьянов А. Г.).

14. 15-я Всероссийская научная конференция молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации (НТИ-2021)", Новосибирск, 6–10 декабря 2021 г. – 1 (Терехов А. В.).

15. Международная научно-практическая конференция "Решение Европейского союза о декарбонизации и новая парадигма развития топливно-энергетического комплекса России", Казань, 31 августа – 1 сентября 2021 г. – 1 доклад (Фатьянов А. Г.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Ковалевский В. В.:

– член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.,

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;

2. Иванова И. Н. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 5

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 13

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 14

Докладов на конференциях – 34, в том числе 3 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 3

Кадровый состав

1. Ковалевский В. В.	и.о. зав. лабораторией	д.т.н.
2. Терехов А. В.	с.н.с.	д.ф.-м.н.
3. Фатьянов А. Г.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
4. Хайретдинов М. С.	г.н.с.	д.т.н.
5. Григорюк А. П.	н.с.	
6. Ефимов С. А.	н.с.	
7. Знак В. И.	с.н.с.	к.т.н.
8. Караваев Д. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
9. Седухина Г. Ф.	н.с.	
10. Шиманская Г. М.	н.с.	к.т.н.
11. Якименко А. А.	н.с.	к.т.н.
12. Борисов В. В.	ведущ. инженер	
13. Брагинская Л. П.	ведущ. программист	
14. Иванова И. Н.	ведущ. инженер	
15. Кайсина Н. В.	ведущ. инженер	
16. Копылова О. А.	инженер	

Якименко А. А., Караваев Д. А., Копылова О. А. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

Терехов А. В.	– профессор НГТУ
Хайретдинов М.С.	– профессор НГТУ
Якименко А. А.	– доцент НГТУ, зав. кафедрой

Руководство студентами

Архипов В. А.	– 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Терехов А. В.
Голощапова Д. П.	– 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
Садковский В. С.	– 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
Панфилов Д. Д.	– 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
Ветчинникова А. Е.	– 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Плюснин П. Н.	– 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Фаренбрух О. С.	– 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Мамытов Р. Т.	– 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Неуструев С. Ю.	– 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Резниченко М. К.	– 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Скорородов Ф. А.	– 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Шалаев И. А.	– 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Шперлинг В. К.	– 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Семеско В. М.	– 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.

Руководство аспирантами

Клементьев Д. С.	– 2-й год, аспирант НГТУ, руководитель Терехов А. В.
Доброродный В. И.	– 4-й год, аспирант ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С.

- Машников Д. Я. – 4-й год, аспирант ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С.
Пинигина Д. Л. – 3-й год, аспирант НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
Копылова О. А. – 2-й год, аспирант ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С.
Латынцева Т. В. – 2-й год, аспирант ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С.
Котович Н. И. – 1-й год, аспирант НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
Симонов В. С. – 1-й год, аспирант НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
Выродов А. Ю. – 1-й год, аспирант ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С.
Хрыпченко А. В. – 1-й год, аспирант ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С.
Михайленко Д. А. – 4-й год, аспирант НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Булатов А. Д. – 2-й год, аспирант НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Стубарев И. М. – 2-й год, аспирант НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Харюткина С. А. – 2-й год, аспирант НГТУ, руководитель Якименко А. А.

Защита дипломов

- Голощапова Д. П. – магистр АВТФ НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
Садковский В. С. – магистр АВТФ НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
Выродов А. Ю. – магистр АВТФ НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Котович Н. И. – магистр АВТФ НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Хрыпченко А. В. – магистр АВТФ НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Аббасов Р. А. – бакалавр АВТФ НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Белополова О. А. – бакалавр АВТФ НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Обыденный И. В. – бакалавр АВТФ НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Рогожкин А. Е. – бакалавр АВТФ НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Черданцева К. А. – бакалавр АВТФ НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Шперлинг В. К. – бакалавр АВТФ НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Юрченков Ю. С. – бакалавр АВТФ НГТУ, руководитель Якименко А. А.

Награды

Ковалевский В. В. – медаль Минобрнауки "За содействие научно-техническому развитию".

ЛАБОРАТОРИЯ СИСТЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ

Зав. лабораторией д.т.н. Родионов А. С.

Важнейшие достижения

Анализ и структурная оптимизация линейных беспроводных сенсорных сетей с ненадежными элементами

К.ф.-м.н. Мигов Д. А., д.т.н. Родионов А. С., к.ф.-м.н. Шахов В. В.

Разработан ряд алгоритмов расчета и оценивания надежности линейных беспроводных сенсорных сетей, а также структурной оптимизации таких сетей для повышения их надежности. Линейные беспроводные сенсорные сети (ЛБСС, LWSN), предназначенные для мониторинга протяженных в пространстве объектов (например, трубопроводов), имеют протяженную структуру. Топологически граф такой сети может быть как линейным, так и нелинейным, так как возможны каналы беспроводной связи не только между ближайшими соседними узлами.

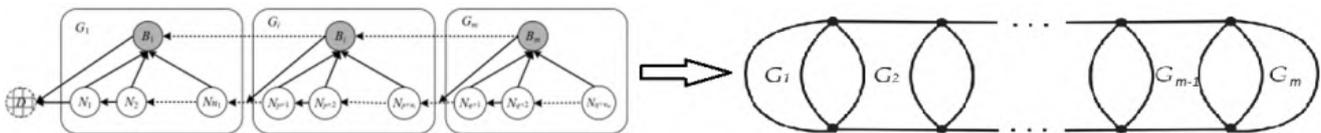


Рис. 1 – ЛБСС и схематический граф ее структуры с продольными сечениями

На основе разработанного ранее декомпозиционного подхода предложен рекурсивный алгоритм расчета надежности ЛБСС, имеющих множество поперечных двухвершинных сечений (рис. 1), позволяющий эффективно учитывать все двухвершинные сечения, что позволяет за приемлемое время делать расчет надежности ЛБСС из сотен и тысяч узлов. Для оценки надежности таких сетей также разработаны параллельные алгоритмы для графических ускорителей.

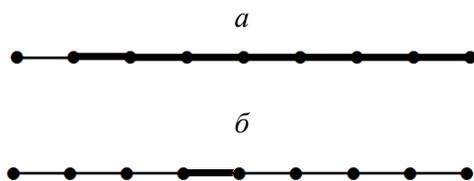


Рис. 2 – Оптимальное по вероятности установления произвольного парного соединения размещение одного слабого или "сильного" ребра

Аналитически доказан оптимальный по критерию средней вероятности связности пары узлов выбор расположения ребер, существенно отличающихся по надежности от остальных, в длинных цепях, моделирующих линейные сети с ненадежными связями.

Для оптимальной по критерию надежности расстановки стоков ЛБСС разработан ряд генетических алгоритмов. Использован подход с кумулятивным уточнением границ надежности сети и оценкой надежности по тренду, позволяющий ускорить поиск оптимальных решений. Также разработаны параллельные алгоритмы расстановки стоков.

Разработаны модели для оценки показателей надежности ребер в случайных графах, моделирующих топологию беспроводных сетей с помехоустойчивыми каналами.

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Мигов, Д. А., Волжанкина, К. А., Родионов А. С. Алгоритмы структурной оптимизации сетей различного назначения с использованием кумулятивных оценок границ надежности // Автометрия. 2021. № 3. С. 19–29.

[Migov, D. A., Volzhankina, K. A., Rodionov, A. S. Genetic algorithms for drain placement in wireless sensor networks optimal by the reliability criterion // Optoelectron. Instrum. and Data Process. 2021. Vol. 57. No 3. P. 240–249. DOI: 10.3103/S8756699021030110 (WoS, Scopus Q3).

2. Migov, D. A., Snytnikova, T. V., Rodionov, A. S., Kanevsky, V. I. Network reliability calculation with use of GPUs // LNCS, 12942. In PACT 2021. V. Malyshev (ed.). P. 210–219 (WoS, Scopus Q3).

3. Shakhov, V. V., Migov D. A. An effective method for ensuring the reliability of a critical infrastructure monitoring network // LNCS. In ICCSA (8). 2021. P. 526–535. (WoS, Scopus Q3).

4. Tarasov, A., Migov D. Parallel genetic algorithm for sink nodes placement to maximize network reliability // Proc. of the IEEE OPCS 2021, Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 126–129. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588716 (Sopus).

5. Rodionov, A. Optimal structures of random graphs // Proc. of the IEEE OPCS 2021, Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 96–99. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588692 (Scopus).

6. Shakhov, V., Yurgenson, A. Towards edge computing based monitoring for smart ports // Comput. Sci. and Its Appl. (ICCSA 2021). P. 262–271. DOI:10.1007/978-3-030-87016-4_20. (WoS, Scopus Q3).

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. The 21th International conference on computational science and its applications, Cagliari (Italy), Sept. 13–16, 2021.

2. 17-я Международная Азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск – Москва – Алматы, 14–17 сентября 2021 г.

3. The 16th International conference on parallel computing technologies, Kaliningrad, September 13–18, 2021.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2021 г. в соответствии с планом НИР института

Проект НИР "Суперкомпьютерные технологии решения больших задач естествознания, математические модели, методы анализа и оптимизации сложных информационных систем".

Номер государственной регистрации 0251-2021-0005.

Руководители: д.ф.-м.н., проф. РАН Марченко М. А., к.ф.-м.н. Черных И. Г.

Раздел "Разработка новых моделей и задач анализа и оптимизации сетей с ненадежными элементами, а также специальных сетей регулярной структуры, разработка архитектуры распределенной системы имитационной оптимизации поведения сложных систем сетевой структуры".

Этап 2021 г.

1. На основе нового алгоритма поиска кратчайших путей предложен динамический алгоритм парной маршрутизации сообщений при наличии в сети ненадежных элементов для сетей-на-кристалле и многопроцессорных систем с регулярной циркулянтной топологией произвольной размерности. Проведен анализ алгоритмов и получены оценки количества резервных кратчайших путей в системе. Предложен эффективный алгоритм использования резервных путей для адаптации к динамическим изменениям топологии и сетевым перегрузкам. Разработан новый алгоритм парной маршрутизации сложности $O(1)$ для семейства оптимальных двумерных циркулянтов с любым количеством узлов в сети, использующий относительную адресацию узлов.

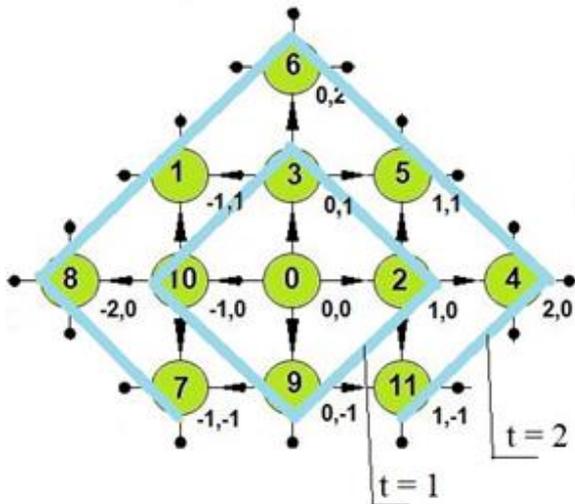


Рис. 3 – Пример работы алгоритма поиска кратчайших путей

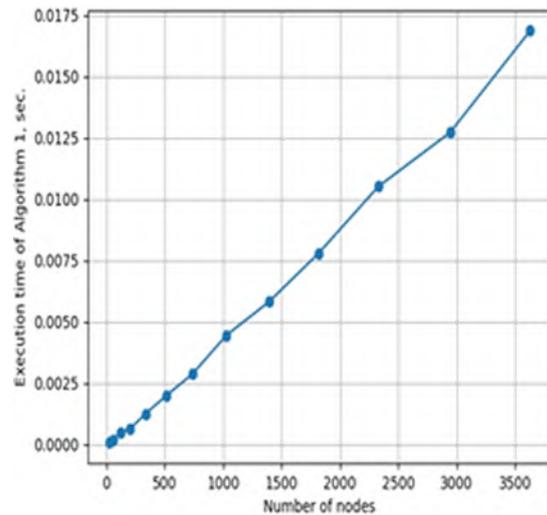


Рис. 4 – Зависимость времени выполнения алгоритма от числа узлов для 3D циркулянтов

2. Изучена потенциальная надежность двумерных циркулянтных сетей с ненадежными элементами. Для оптимальных циркулянтов степени четыре решена известная (Δ, D, D', s) -проблема при отказах любых множеств $s \leq 3$ узлов (каналов связи) в сети. Впервые найдены диапазоны изменения порядков графов, при которых сохраняется (или увеличивается) диаметр сети при отказах s элементов. Показано преимущество рассмотренного класса сетей по устойчивости диаметра при отказах среди регулярных сетей степени четыре. Предложен и исследован в сетях на кристалле универсальный метод борьбы с тупиковыми ситуациями, применимый для любых топологий.

3. Разработаны новые эффективные методы, алгоритмы и программы кодирования и декодирования математических выражений в виде векторов действительных чисел. Предложен алгоритм метаэвристического программирования с экспрессией генов для решения задачи автоматического построения нелинейных моделей (математических выражений, функций, алгоритмов и программ) на основе заданных экспериментальных данных с использованием предложенных методов кодирования и декодирования. Получены экспериментальные оценки временной сложности этого алгоритма как единого универсального подхода при использовании четырнадцати биоинспирированных алгоритмов в процессе эволюционного синтеза и показаны его преимущества по сравнению с известными методами.

4. Завершена работа над монографией "Библиометрические сети научных статей и журналов", посвященной анализу сетей, сконструированных на основе данных, извлеченных из библиографической БД.

5. Предложена модель сети соавторства и формальный механизм ее построения. Разработаны методы измерения параметров сети. Исследована структура сети соавторства N_{ca} , построенная на информации, извлеченной из реальной библиометрической БД RePEc. Число узлов 32 434, число ребер 73 969. Основные характеристики N_{ca} :

- распределение степеней узлов следует степенному закону: $p_k \sim k^{(-\gamma)}$, $k_{\min} = 4$, $\gamma = 1,3$,
- характеристическая длина пути $L(N_{ca}) \sim 6,58$,
- локальный коэффициент кластеризации $CC(N_{ca}) \sim 0,2644$,

– вывод: сеть N_{ca} является масштабно-инвариантной и относится к сетям "малого мира".

6. Исследованы взвешенные сети соавторства, узлами которых являются научные публикации, а веса ребер отражают суммарные вклады авторов. Предложена методика оценки размера вклада каждого соавтора в том случае, когда эти сведения не указаны явно, основанная на комбинации двух методов определения матрицы соавторства. Вычислены меры центральности авторов по степени, близости, посредничеству и собственному вектору. Приведены результаты ранжирования авторов на этой основе. Исследована зависимость результатов от выбора метода и меры центральности.

7. Предложены рекомендации по улучшению интеллектуальных методов анализа данных, используемых в сложных информационных системах. Обоснован выбор k-Nearest Neighbours в качестве "легкого" метода машинного обучения для развертывания на интеллектуальных сенсорных узлах. Предложен метод преодоления внутренних геометрических ограничений традиционных сверточных нейронных сетей.

8. С использованием аппарата марковских процессов разработаны модели и методы оценки надежности для ряда сценариев использования протяженных беспроводных сенсорных сетей. Выведены формулы надежности доставки сообщений с учетом архитектурных особенностей рассматриваемых сетей.

9. Получено решение ряда задач оптимизации функционирования нестационарных сетей с учетом интерференции, использования технологий когнитивного радио и кластеризации.

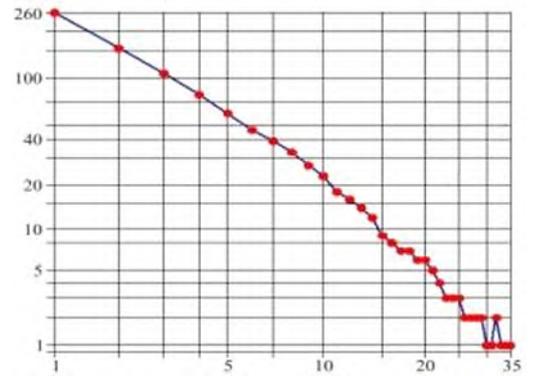


Рис. 5 – Распределение степеней узлов сети N_{ca}

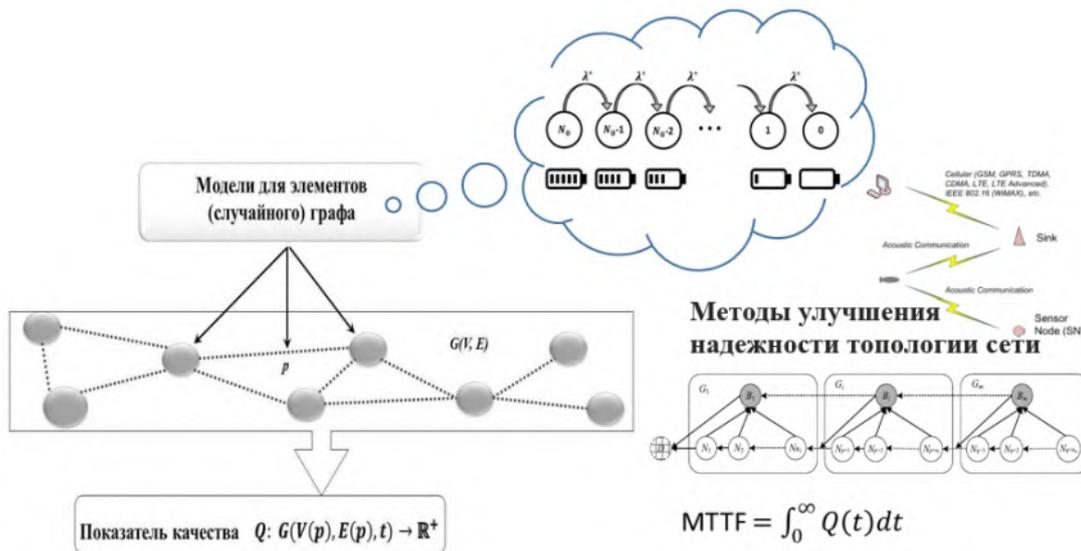


Рис. 6 – Иллюстрация подхода

10. Исследованы задачи функционирования сетей с нестационарной топологией на примере сетей с подвижными узлами, которые применяются для задач мониторинга больших территорий. Разработано средство имитационного моделирования (совместно со студентами ВКИ), в котором предусмотрены следующие возможности: генерация маршрутов; моделирование движения узлов по заданной территории с целью посещения указанных участков; отслеживание заряда узлов для

своевременного изменения маршрутов и движения к станциям подзарядки. Разработаны алгоритмы управления движением узлов (адаптировались известные алгоритмы поиска кратчайших путей, алгоритмы покрытия и др.). Для мониторинга территории строится матрица квадратов, т. е. территория делится на участки, а алгоритмы управления движением аппаратов обеспечивают покрытие всех заданных участков.

11. Исследована задача моделирования передачи данных в сети с подвижными узлами от приемопередатчиков ограниченной мощности (с ограниченным диапазоном передачи информации). С помощью системы имитационного моделирования MTSS и с использованием сервиса Open Street Map созданы различные имитационные визуально-интерактивные модели некоторых территорий, где мобильные узлы перемещаются и передают данные. В результате моделирования показано влияние помех на распространение радиосигналов в сети VANET при высокой загруженности трафика.

12. Предложен метод расстановки стоков в беспроводной сенсорной сети для повышения успешно мониторируемой сетью области. Предполагается, что сенсоры подвержены случайным отказам, а собираемая ими информация должна быть доставлена в один из стоков. Для расстановки был разработан генетический алгоритм. Использован подход с оценкой надежности по тренду, что позволило ускорить скорость расчета и/или значение целевой функции, т. е. успешно мониторируемой сетью области сети, в которой стоки располагаются в соответствии с найденной алгоритмом расстановкой.

13. Разработана новая математическая модель выбора маршрутов прокладки сетей, учитывающая трехмерность и стесненность городской застройки, тип и назначение проектируемой коммуникации, ограничения по высоте прокладки сетей, углов поворота коммуникаций вокруг заданной оси при обходе препятствий и другие ограничения.

14. Для планирования ремонтных работ в инженерных сетях разработана система моделей, позволяющая строить планы доставки бригад и проведения работ в узлах сети с учетом объемов работ и стоимости доставки бригад на объекты.

15. Исследовано влияние ошибок агрегирования на точность решения задач календарного планирования проектов. Показано, что погрешности в расчете длительности цикла достаточно велики, чтобы их игнорировать в практике планирования.

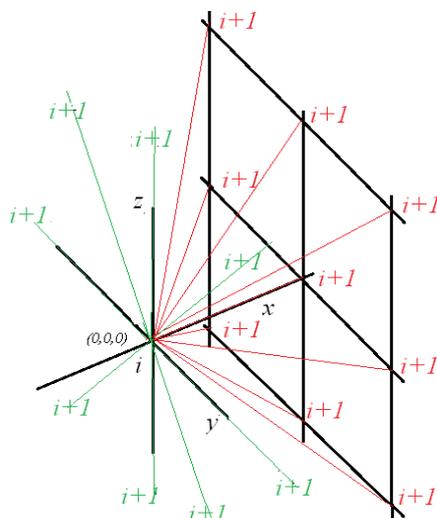


Рис. 7 – Положение i -й ветви в пространстве

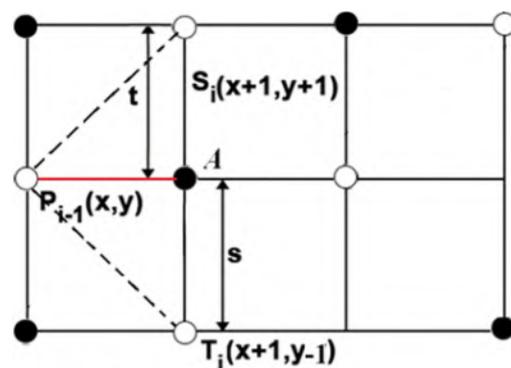
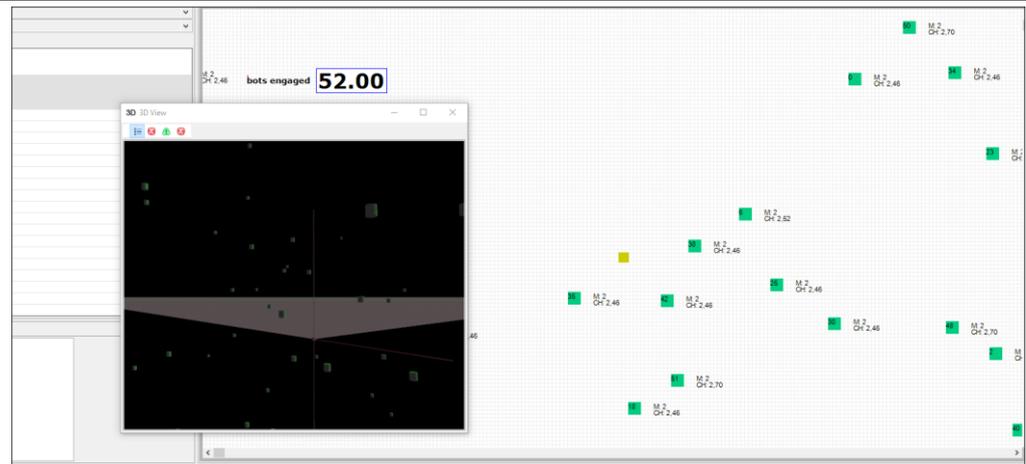


Рис. 8 – Обход препятствий

Рис. 9 – Моделирование сенсорной сети с подвижными узлами (БПЛА)



16. Модифицирована система имитационного моделирования МТСС с целью ее применения для "моделирования передачи данных в сети с подвижными узлами от передатчиков ограниченной мощности (с ограниченным диапазоном передачи информации)" (рис. 9).

Предложено развитие МТСС в направлении использования описания модели на естественном языке с последующей трансформацией такого описания в визуально-интерактивную модель в среде МТСС.

17. Получены новые доказательства оптимальности вариантов соединения и усиления некоторых кольцевых сетей по критерию вероятности связности (рис. 10).

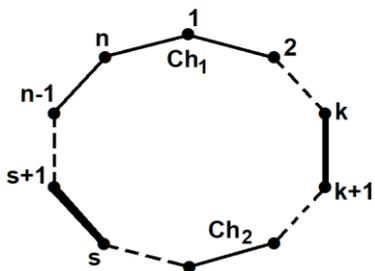


Рис. 10 – Оптимальный выбор положения усиленных связей

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 19-01-00562а "Математические модели и алгоритмы для оптимизации функционирования сетей передачи данных с подвижными узлами".

Руководитель проекта – к.т.н. Соколова О. Д.

Рассматривались методы передачи данных в сетях с нестационарной топологией (vehicle ad-hoc networks, flying ad-hoc networks). Были рассмотрены две оптимизационные задачи: рассылка сообщений в сети с узлами на транспортных средствах; сбор данных на протяженной территории с использованием беспилотных аппаратов.

Показано, что значительную часть задач оптимизации функционирования нестационарных сетей, имеющих прикладную значимость, можно свести к постановке вида $\min_{x \in \mathfrak{D}} f_C(x)$, $L_0(x) \geq \zeta_A$, где функция $f_C(x)$ отображает стоимость используемых ресурсов, множество \mathfrak{D} определяется физическими ограничениями на ресурсы, функция $L_0(x)$ описывает критерий эффективности системы, величина ζ_A характеризует уровень сервиса в соглашении об обслуживании. Получено решение задачи в ряде случаев.

Разработана имитационная модель для моделирования функционирования сетей передачи данных с узлами на беспилотных летательных аппаратах. Цель моделирования – получить оптимальное расписание маршрутов аппаратов в процессе мониторинга протяженной территории

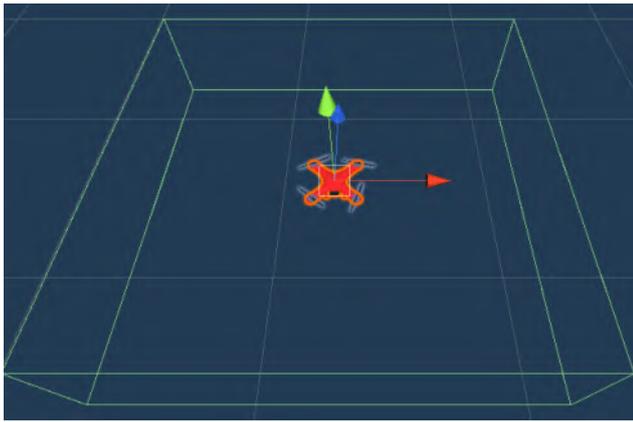


Рис. 11 – Моделирование зоны вокруг аппарата для предотвращения пересечений маршрутов (параметры модели – квадраты территории для мониторинга, количество БПЛА, уровень заряда датчиков и др.).



Рис. 12 – Сравнение методов кластеризации

Для выбора в ней активных мобильных узлов использовались методы кластеризации.

Проект РФФИ № 19-47-540007p_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 проекта – к.т.н. Соколова О. Д.

Исследовались задачи оптимизации мониторинга атмосферы в мегаполисах с применением мобильных датчиков. Рассматривалась ситуация, когда некоторое событие обнаруживается разреженными мобильными датчиками, размещенными на транспортных средствах. В новейших публикациях на эту тему используются вероятностные критерии эффективности обнаружения превышения порога загрязнения. В ходе работы по проекту получена функция распределения для скорости обнаружения. В качестве параметров функций распределения задавались: количество и стоимость сенсоров, энергопотребление, интенсивность транспортного трафика. Рассмотрены две ситуации с движением потока транспорта в зону загрязнения – постоянный и случайный интервалы времени движения. С использованием результатов предложены постановки задач оптимизации системы геомониторинга, получено их решение.

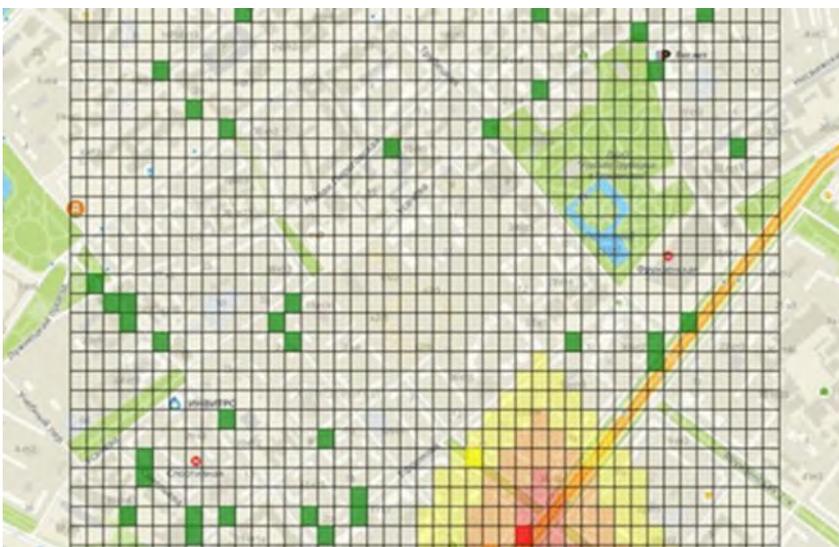


Рис. 13 – Моделирование распространения загрязнения воздуха от источника (красная точка) на карте мегаполиса

Имитационное моделирование мониторинга проводилось с помощью разработанной системы City Monitoring. Основными характеристиками системы являются: возможность установки на карте города мест расположения источников загрязнений; визуализация полей распространения загрязнения; моделирование движения объектов с датчиками по заданным маршрутам; определение зон загрязнения по данным, полученным от датчиков. При моделировании использовались оцифрованные карты дорог из открытых источников.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Бредихин С. В., Ляпунов В. М., Щербакова Н. Г. Библиометрические сети научных статей и журналов. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2021. ISBN 978-5-901548-44-8.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Feng Liang, Honglong Chen, Kai Lin, Junjian Li, Zhe Li, Huansheng Xue, Shakhov V., Hannan Bin Liaqat. Route recommendation based on temporal–spatial metric // *Comput. & Elect. Engin. Nov.* 2021, 107549. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107549.

2. Kratov, S., Podsadnikov, A. The overview of software and information support services for distance learning // *Proc. of the 2021 15th Intern. conf. on ubiquitous information management and communication IMCOM 2021.* 9377375. DOI: 10.1109/IMCOM51814.2021.9377375.

3. Migov, D. A., Snytnikova, T. V., Rodionov, A. S., Kanevsky V. I. Network reliability calculation with use of GPUs // *PaCT 2021. LNCS 12942.* 2021. P. 210–219. DOI:10.1007/978-3-030-86359-3_16.

4. Monakhov, O. G., Monakhova, E. A., Romanov, A. Yu., Sukhov, A. M., Lezhnev, E. V. Adaptive dynamic shortest path search algorithm in networks-on-chip based on circulant topologies // *IEEE Access.* 2021. Vol. 9. P. 160836–160846. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3131635 (Q1).

5. Monakhova, E. A. Series of families of degree six circulant graphs // *Прикладная дискретная математика.* 2021. № 54. С. 109–124. <https://doi.org/10.17223/20710410/54/6>.

6. Scherbakova, N. G., Bredikhin, S. V. Preferential attachment in the citation network of scientific articles // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 1715 (2021) 012055 IOP Publishing. DOI:10.1088/1742-6596/1715/1/012055.

7. Shakhov, V. V., Migov D. An effective method for ensuring the reliability of a critical infrastructure monitoring network // *LNCS.* 2021. Vol. 12956. P. 526–535. DOI: 10.1007/978-3-030-87010-2_39.

8. Shakhov, V. V., Yurgenson, A. N. Towards edge computing based monitoring for smart ports // *LNCS.* 2021. Vol. 12956. P. 262–271. DOI: 10.1007/978-3-030-87016-4_20.

9. Shakhov, V., Sokolova, O., Insoo Koo. On the suitability of intrusion detection system for wireless edge networks // *Energies.* 2021. Vol. 14, iss. 18. 5954. DOI: 10.3390/en14185954.

10. Zhe Li, Honglong Chen, Kai Lin, Shakhov Vladimir, Leyi Shi, Jiguo Yu. From edge data to recommendation: A double attention-based deformable convolutional network // *Peer-to-Peer Netw. Appl.* 2021. Vol. 14. P. 3984–3997. DOI: 10.1007/978-3-030-87016-4_20.

11. Мигов, Д. А., Волжанкина, К. А., Родионов, А. С. Алгоритмы структурной оптимизации сетей различного назначения с использованием кумулятивных оценок границ надежности // *Автоматрия.* 2021. № 3. С. 19–29.

[Migov, D. A., Volzhankina, K. A., Rodionov, A. S. Genetic algorithms for drain placement in wireless sensor networks optimal by the reliability criterion // *Optoelectron. Instrum. and Data Process.* 2021. Vol. 57, No 3. P. 240–249. DOI: 10.3103/S8756699021030110.]

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Sergeev, K., Migov, D. On parallel calculation of all-terminal network reliability // Proc. of the IEEE 17th Intern. Asian school-seminar "Optimization Problems of complex systems", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 104–107. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588720.
2. Kratov, S., Sokolova, O. About the life cycle of information systems based on open Web-technologies // CEUR Workshop Proc., 2021. P. 96–106. DOI: 10.47350/iccs-de.2021.08.
3. Lyakhov O. A. Aggregation errors in project scheduling // J. of Phys.: Conf. Ser., Conference "Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021)", Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012053.
4. Podsadnikov, A. V., Rozov, K. V., Kratov, S. V. The methods and approaches to computer networks simulation using virtual network infrastructure // J. of Phys.: Conf. Ser., 2021, 1791(1), 012082. DOI:10.1088/1742-6596/1791/1/012082.
5. Rodionov, A. Optimal structures of random graphs // Proc. of the IEEE 17th Intern. Asian school-seminar "Optimization Problems of complex systems", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 96–99. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588692.
6. Tarasov, A., Migov, D. Parallel genetic algorithm for sink nodes placement to maximize network reliability // Proc. of the IEEE 17th Intern. Asian school-seminar "Optimization Problems of complex systems", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 126–129. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588716.
7. Tkachev, K., Korsakov, S. On a problem of message transmission to sinks in transport network // Proc. of the IEEE 17th Intern. Asian school-seminar "Optimization Problems of complex systems", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 130–133. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588760.
8. Toktoshov, G. The routes choosing methodology for laying networks in three-dimensional space // Proc. of the IEEE 17th Intern. Asian school-seminar "Optimization Problems of complex systems", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 134–138. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588737.
9. Shakhov, V. V., Sokolova, O. D. On modeling air pollution detection with Internet of vehicles // The 15th Intern. confc on ubiquitous information management and communication (IMCOM), 2021. P. 1–3. DOI: 10.1109/IMCOM51814.2021.9377350.
10. Shakhov, V., Yurgenson, A. Reliability modeling for industrial edge computing systems // Proc. of the IEEE 17th Intern. Asian school-seminar "Optimization Problems of complex systems", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 108–112. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588751.
11. Sokolova, O., Rudometov, S. Simulation of data transmission among moving nodes // Proc. of the IEEE 17th Intern. Asian school-seminar "Optimization Problems of complex systems", Novosibirsk, Sept. 13–17, 2021. P. 117–120. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588773.
12. Monakhov, O. Evolutionary synthesis of nonlinear models based on metaheuristic programming and templates // J. of Phys.: Conf. Ser., Intern. conf. "Marchuk Scientific Readings 2021 (MSR-2021)", Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021. Vol. 1715, 012010, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012010.
13. Monakhov, O. G., Monakhova, E. A. Comparative evaluation of algorithms for automatic construction of nonlinear models based on metaheuristic programming with gene expression // CEUR Workshop Proc., 2021, 2965. P. 254–259.
14. Monakhova, E. A., Monakhov, O. G. The diameter vulnerability of two-dimensional optimal circulant networks // J. of Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2051. 9 p. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012054.

15. Monakhova, E. A., Monakhov, O. G. A generalized routing algorithm for a family of optimal 2D circulant networks based on relative addressing // J. of Phys.: Conf. Ser., Conference "Marchuk Scientific Readings 2021" (MSR-2021), Novosibirsk, Oct. 4–8, 2021. P. 55–59. DOI: 10.1109/OPCS53376.2021.9588737.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Monakhova, E. A., Monakhov, O. G. The diameter vulnerability of two-dimensional optimal circulant networks // Марчуковские научные чтения-2021 : тез. Междунар. конф., Новосибирск, 4–8 окт. 2021 г. / ИВМиМГ СО РАН. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2021. С. 142–143. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2099/1/012054>.

2. Бредихин, С. В., Ляпунов, В. М., Щербакова, Н. Г. Ранжирование узлов взвешенной сети соавторства: анализ данных БД REPEC // Пробл. информ. 2021. № 4. С. 67–84. DOI: 10.24411/2073-0667-2021-4-67-84.

3. Бредихин, С. В., Ляпунов, В. М., Щербакова, Н. Г. Структура и параметры невзвешенной сети соавторства на основе данных БД REPEC // Пробл. информ. 2021. № 3. С. 56–67. DOI: 10.24411/2073-0667-2021-3-56-57.

4. Ляхов, О. А. Ошибки агрегирования в сетевых моделях управления проектами // Обработка информации и математическое моделирование : материалы Рос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 22–23 апр. 2021 г. С. 172–178.

5. Ляхов, О. А. Учет ресурсов в минимизации длительности цикла выполнения проектов // Проблемы оптимизации сложных систем : тез. 17-й Междунар. Азиат. шк.-семина., Москва – Новосибирск – Алма-Ата (Казахстан), 13–17 сент. 2021 г. С. 29–35. DOI: 10.24412/cl-35066-2021-1-29-34.

6. Мигов, Д. А., Коротков, А. Н. Использование структурных разрезов в моделировании распространения каскадных отказов в электроэнергетических сетях // Пробл. информ. 2021. № 3. С. 21–33. DOI: 10.24411/2073-0667-2021-3-21-33.

7. Монахов, О. Г., Монахова, Э. А. Сравнительная оценка алгоритмов автоматического построения нелинейных моделей на основе метаэвристического программирования с экспрессией генов // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте : сб. науч. трудов 10-й Междунар. науч.-техн. конф., Коломна, 17–20 мая 2021 г. В 2-х томах. Т. 2. Смоленск: Универсум, 2021. С. 179–189.

8. Мячин, Н. М., Романов, А. Ю., Монахова, Э. А. Свободная от дедлоков маршрутизация в сетях на кристалле с циркулянтными топологиями // МЭС-2021, Москва, март–ноябрь 2021 г. ИППМ РАН, 2021. С. 99–105. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-3-99-105.

9. Подсадников, А. В., Розов, К. В., Кратов, С. В. Применение средств имитационного моделирования компьютерных сетей в учебном процессе // Информ. и образов. 2021. № 1 (320). С. 47–56. DOI: <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2021-36-1-47-56>.

10. Соколова, О. Д., Шварцкоп, Н. Применение нестационарных сетей в задачах мониторинга // Пробл. информ. 2021 г. № 4. С. 5–15. DOI: 10.24411/2073-0667-2021-4-5-15.

11. Токтошов, Г. Ы., Ляхов, О. А. Модели организации ремонтных работ для обеспечения работоспособности коммуникаций // Вестн. СибГУТИ. 2021. № 1(53). С. 94–101.

12. Токтошов, Г. Ы. Задачи размещения пунктов обслуживания сетей инженерных коммуникаций // Обработка информации и математическое моделирование : материалы Рос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 22–23 апр. 2021 г. С. 244–248.

13. Токтошов, Г. Ы. Об организации учебного процесса в условиях чрезвычайных ситуаций // Информ. и образов. 2021. № 5 (324). С. 21–27. DOI: 10.32517/0234-0453-2021-36-5-21-27.

14. Марченко, М. А., Гусяков, В. К., Маринин, И. В. и др. Интегрирующая платформа для сбора и анализа данных природоохранного мониторинга // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность : тез. докл. Междунар. науч. конф., посвящ. 150-летию Севастопольской биол. станции – Ин-та биологии южных морей им. А. О. Ковалевского и 45-летию НИС "Профессор Водяницкий", Севастополь, 13–18 сент. 2021 г. С. 632–633.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 4 доклада (Монахов О. Г., Монахова Э. А., Ляхов О. А., Бредихин С. В., Щербакова Н. Г.).

2. 10-я Международная научно-техническая конференция "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте" (ИММВ-2021), Коломна, 17–20 мая 2021 г. – 1 доклад (Монахов О. Г., Монахова Э. А.).

3. The 17th International Asian school-seminar "Optimization problems of complex systems" (OPCS), Novosibirsk – Moscow – Almaty, Sept. 13–17, 2021 – 11 докладов, из них 1 пленарный (Родионов А. С., Монахов О. Г., Монахова Э. А., Ляхов О. А., Шахов В. В., Юргенсон А. Н., Мигов Д. А., Ткачёв К. В., Соколова О. Д., Рудомётов С. В., Токтошов Г. Ы., Кальней А. М.).

4. 10-я Всероссийская научно-техническая конференция "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем" (МЭС-2021), Москва, 8–15 ноября 2021 г. – 1 доклад (Монахова Э. А.).

5. Российская научно-техническая конференция "Обработка информации и математическое моделирование", Новосибирск, 22–23 апреля 2021 г. – 2 доклада (Ляхов О. А., Токтошов Г. Ы.).

6. International conference on computational science and its applications (ICCSA), Cagliari (Italy), September 13–16, 2021 – 2 доклада (Шахов В. В., Мигов Д. А., Юргенсон А. Н.).

7. 15th International conference on ubiquitous information management and communication (IMCOM), Jan. 4–6, 2021, Seoul (Korea) – 2 доклада (Шахов В. В., Соколова О. Д., Кратов С. В.).

8. The 3rd International workshop on information, computation, and control systems for distributed environments (ICCS-DE 2021), Irkutsk (Russia), July 5–9, 2021 – 1 доклад (Кратов С. В., Соколова О. Д.).

9. International conference "Engineering technologies and informatics: Innovations and applications" (En&T-2021), Moscow, Aug. 18–19, 2021 – 1 доклад (Кратов С. В.).

10. The 16th International conference on parallel computing technologies, Sept. 13–18, 2021, Kaliningrad – 1 доклад (Мигов Д. А.).

Участие в оргкомитетах конференций

Родионов А. С.:

– сопредседатель программного комитета The 17th International Asian school-seminar "Optimization problems of complex systems" (OPCS), Novosibirsk – Moscow – Almaty, Sept. 13–17, 2021,

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2021", Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.,

– член программного комитета The 15th International conference on ubiquitous information management and communication (IMCOM), Seoul (Korea), Jan. 4–6, 2021.

Итоговые данные по лаборатории

Монографий – 1

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 11

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 25

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 37

Докладов на конференциях – 73, в том числе 2 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 3

Кадровый состав

1. Родионов А. С.	зав. лабораторией	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. Ткачѐв 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.

Ткачѐв К. В. – молодой научный сотрудник.

Педагогическая деятельность

Родионов А. С. – профессор НГУ и СибГУТИ

Бакулина М. П. – доцент НГУ

Токтошов Г. Ы. – доцент СибГУТИ

Волжанкина К. А. – старший преподаватель ВКИ НГУ

Ткачѐв К. В. – старший преподаватель ВКИ НГУ

Мигов Д. А. – старший преподаватель НГУ

Шахов В. В. – доцент НГТУ

Руководство студентами

- Тарасов А. А. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Мигов Д. А.
Перминов П. О. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Мигов Д. А.
Кротов О. В. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Мигов Д. А.
Мацегора А. А. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Мигов Д. А.
Болотина Т. А. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Родионов А. С.
Черепанов А. С. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Родионов А. С.
Ятманов Р. Д. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Родионов А. С.

Руководство аспирантами

- Кальней А. М. – 3-й год, ИВМиМГ, руководитель Родионов А. С.
Куянцев В. П. – 2-й год, ИВМиМГ, руководитель Родионов А. С.

Защита дипломов

- Тарасов А. А. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Мигов Д. А.
Сергеев К. С. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Мигов Д. А.

ЛАБОРАТОРИЯ СИНТЕЗА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Зав. лабораторией д.т.н. Малышкин В. Э.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2021 г. в соответствии с планом НИР института

Проект НИР "Суперкомпьютерные технологии решения больших задач естествознания, математические модели, методы анализа и оптимизации сложных информационных систем".

Номер государственной регистрации 0251-2021-0005.

Руководители: д.ф.-м.н. Марченко М. А., к.ф.-м.н. Черных И. Г.

Раздел 1 "Высокопроизводительные вычисления. Создание методов, алгоритмов, инструментальных средств и пакетов прикладных программ для вычислительных систем сверхвысокой производительности".

Руководитель д.т.н Малышкин В. Э.

Этап 2021 г. Блок 2 "Разработка необходимых распределенных динамических алгоритмов создания БАЗ, разработка ядра библиотеки клеточно-автоматных топологий, включающего реализации алгоритмов построения распределенных клеточных массивов для задач моделирования".

1. Разработаны алгоритмы конструирования и распределенного исполнения параллельных программ по высокоуровневой спецификации параллельной программы на языке LuNA, основанные на принципе воспроизведения трасс, суть которого состоит в том, что сначала осуществляется конструирование и исполнение параллельной программы базовыми (разработанными ранее) алгоритмами системы LuNA, и при исполнении сконструированной программы происходит трассировка – сбор информации о ключевых событиях ее исполнения (номера узлов, временные отметки и аргументы исполняемых задач – фрагментов вычислений). Собранной информации (трассы) достаточно для того, чтобы по ней осуществить повторное исполнение программы (в том числе, над другими входными данными), называемое воспроизведением трассы (рис. 1). Воспроизведение трассы характеризуется более высокой эффективностью, чем обычное исполнение программы на базе системы LuNA, в том числе по следующим основным причинам. Во-первых, практически отсутствуют накладные расходы, связанные с работой исполнительской системы. Во-вторых, существенно сокращается сетевой трафик, так как все необходимые коммуникации осуществляются не универсальным динамическим децентрализованным способом, а точно, от источника к назначению. В-третьих, сборка мусора (удаление ненужных более данных) осуществляется существенно более эффективно на основе информации, содержащейся в трассе.

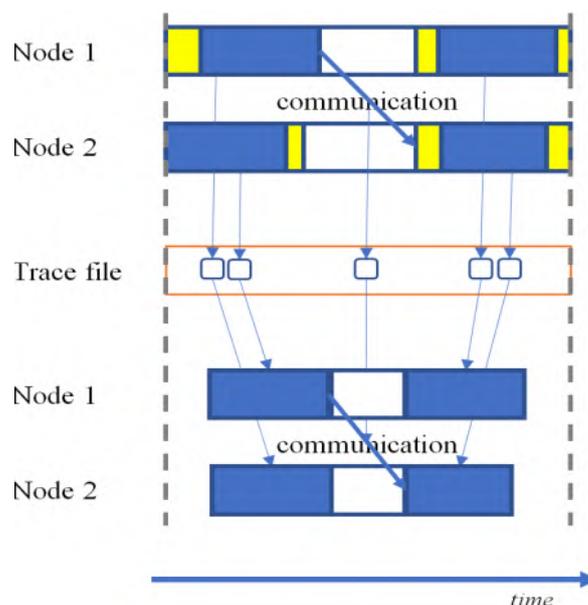


Рис. 1 – Схема воспроизведения трасс

Таблица 1 – Результаты сравнительного экспериментального исследования алгоритмов конструирования и исполнения LuNA-программ на основе воспроизведения трасс

Parameters			Execution time (sec.)		
Mesh size	Particles	Cores	MPI	LuNA-TB	LuNA
1003	106	64	5.287	13.69	355.5
1503	106	64	18.896	31.088	732.833
1503	107	64	23.594	111.194	2983
1503	107	125	23.352	118.32	3086.411
1503	106	343	33.697	39.651	1008.655

Проведено экспериментальное исследование, которое показало, что разработанные алгоритмы позволяют существенно снизить время выполнения LuNA-программы, и при этом достигается производительность, близкая к производительности разработанной вручную программы (на базе интерфейса передачи сообщений MPI), что является хорошим показателем для задачи автоматического конструирования параллельных программ по их высокоуровневым спецификациям и может быть использовано для создания баз активных знаний (табл. 1).

Также разработаны системные алгоритмы конструирования и исполнения параллельных программ, обеспечивающие высокую эффективность исполнения конструируемых программ для класса численных алгоритмов из области линейной алгебры, включающих матрично-векторные операции над плотными матрицами. Поддерживаемый класс алгоритмов включает разложения LU, LLT, LDLT. В частности, была разработана частная исполнительная система, динамически поддерживающая распределенное исполнение конструируемых программ. За счет специализации на упомянутом классе алгоритмов была достигнута высокая эффективность исполнения конструируемых программ, сравнимая с эффективностью параллельных программ, разработанных вручную в составе известной библиотеки ScaLAPACK. На рис. 2 показаны результаты сравнительного экспериментального исследования производительности двух реализаций разложения Холецкого: построенной автоматически системой LuNA на основе разработанных специализированных алгоритмов и ScaLAPACK для различных размеров факторизуемой матрицы.

а

б

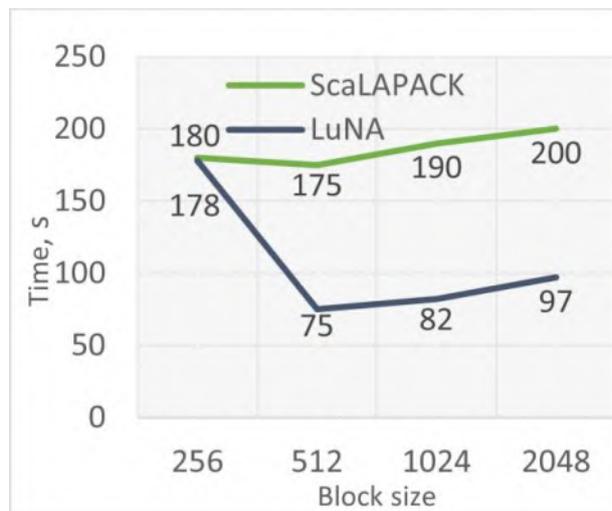
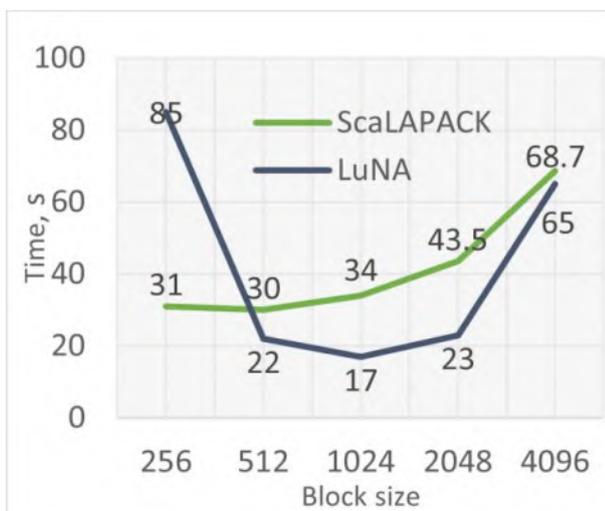


Рис. 2 – Времена выполнения разложения Холецкого для квадратных матриц размером:

а – 32768 элементов; б – 65536 элементов

Существенно, что разработанные алгоритмы (как для поддержки операций над плотными матрицами, так и алгоритмы на основе воспроизведения трасс) являются частными, т. е. обеспечивают высокую эффективность конструируемых программ лишь для ограниченного класса приложений. Это обусловлено тем, что в общей постановке задача конструирования эффективной параллельной программы является алгоритмически труднорешаемой, и на универсальное решение рассчитывать не приходится. Поэтому задача обеспечения конструирования эффективных параллельных программ ставится для ограниченного класса приложений. Достигнутые результаты обеспечивают такое конструирование для достаточно широкого класса приложений, чтобы на их основе можно было конструировать базу активных знаний в этих предметных областях, таким образом, поставленная цель является достигнутой.

Реализовано автоматизированное обнаружение факта зависания LuNA-программ, добавлено отображение истории вызовов процедур при выводе информации о зависших фрагментах вычислений, добавлена возможность отображения только "первопричинного" фрагмента вычислений, добавлен поиск ошибок генерации одного фрагмента данных несколькими фрагментами вычислений.

2. В рамках работы над разработкой распределенных алгоритмов управления распределенными ресурсами разработана библиотека работы с распределенными данными Didal (Distributed data library). В библиотеке на данный момент реализован основной функционал по управлению распределенными данными: создание и перемещение (миграция) объектов-данных в вычислительной системе с распределенной памятью, реализация асинхронного удаленного вызова процедур (функций) над объектами-данными.

На основе разработанной библиотеки Didal выполнены фрагментированные реализации таких вычислительных задач, как решение уравнения Пуассона итерационным методом Якоби и метод молекулярной динамики (рис. 3).

Проведено сравнительное тестирование фрагментированных реализаций с аналогичными реализациями с использованием MPI (рис. 4). Использованное оборудование: кластер МВС-10П МСЦ РАН, два процессора Intel Xeon E5-2690 на вычислительный узел, коммуникационная сеть Infiniband FDR, библиотека OpenMPI 4.1.0, компилятор GCC 10.2.0.

Эффективность распараллеливания Didal-реализаций оказалась близка к эффективности MPI-реализаций. Таким образом, Didal может использоваться для разработки эффективных параллельных программ, при этом ожидается, что скорость разработки будет выше, чем с использованием MPI. Включение в Didal новых алгоритмов, реализующих, например, динамическую балансировку загрузки, позволит автоматически и с минимумом усилий использовать их в разработанных Didal-программах.

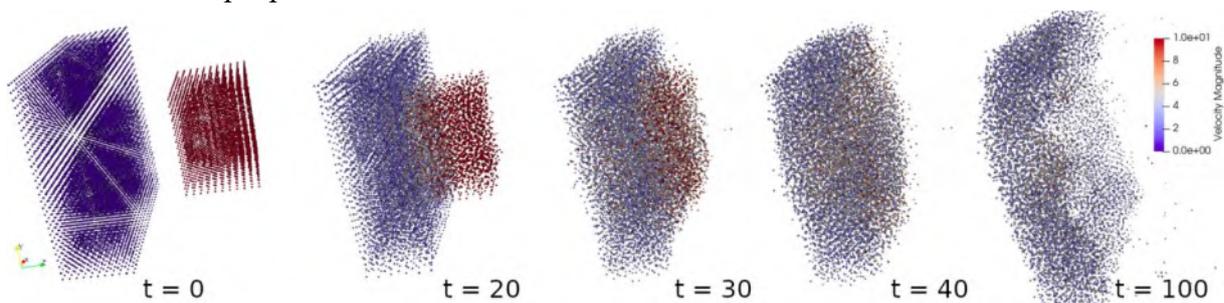


Рис. 3 – Результаты работы фрагментированной реализации метода молекулярной динамики

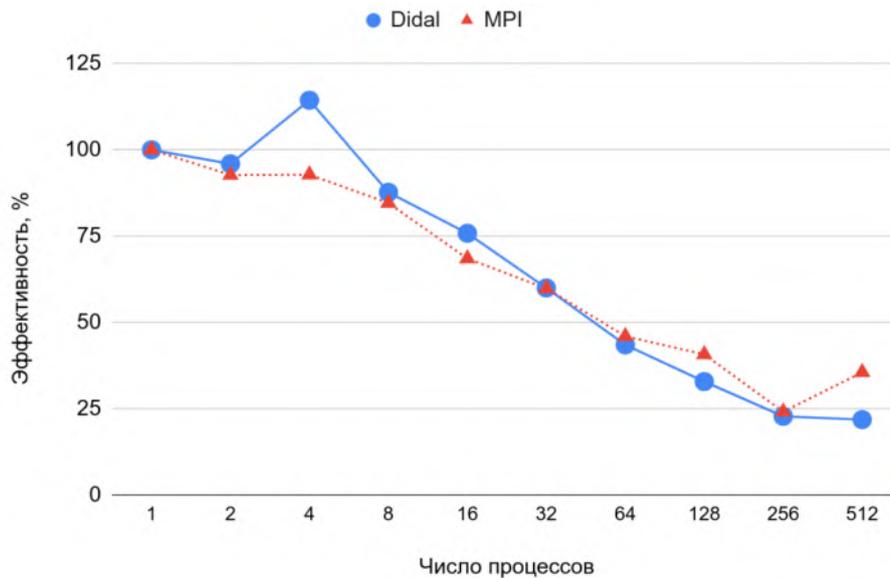


Рис. 4 – Didal и MPI, эффективность распараллеливания (метод молекулярной динамики); сетка: 323 ячейки, 83 фрагмента, $4 \cdot 10^5$ молекул, 1000 итераций

Библиотека доступна по адресу https://bitbucket.org/georgy_schukin/didal.

3. Разработан прототип ядра библиотеки клеточно-автоматных топологий (под топологией в данном случае понимается структура регулярного графа, вершинам которого соответствуют клетки массива, а ребрам – отношение соседства). С помощью библиотеки прикладной программист может реализовывать только функцию переходов клетки без реализации межклеточных взаимодействий. Разработанные библиотечные функции обеспечивают все коммуникации между клетками в соответствии с выбранной из имеющихся в библиотеке топологией клеточного массива. Работа библиотеки продемонстрирована на примере алгоритмов построения распределенных клеточных массивов для задач моделирования.

Исследована адекватность клеточно-автоматной модели потока жидкости с использованием двумерных выборок из томограммы почвы размером $500 \times 300 \times 20$ элементов. Построена модель пористой среды путем задания клеток с функцией стенки, расположение которых в клеточном массиве соответствует твердым участкам почвы, и клеток, в которых движутся модельные частицы, расположение которых соответствует порам. Произведено моделирование и измерен поток при разных напорах на границах участка. Полученная зависимость потока от градиента напора соответствует линейному закону фильтрации жидкостей Дарси (рис. 5).

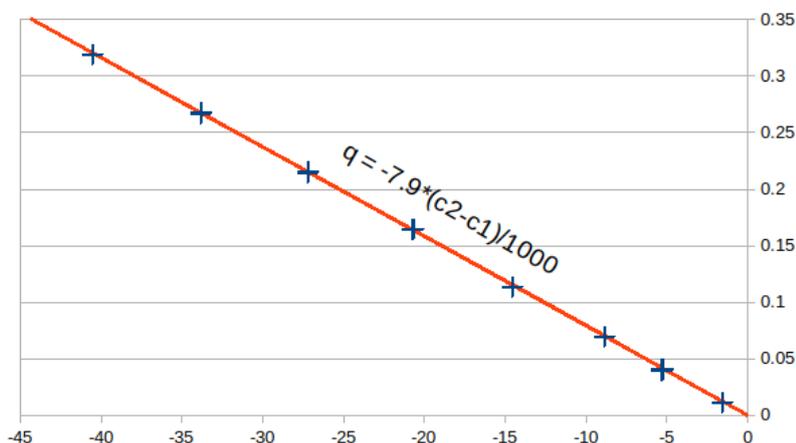


Рис. 5 – Зависимость потока q (вертикальная ось, модельные единицы) от градиента напора $(c_2 - c_1)$ на границах участка (горизонтальная ось, модельные единицы). Прямая на графике – теоретическая зависимость (закон Дарси), крестиками помечены значения, полученные в результате моделирования

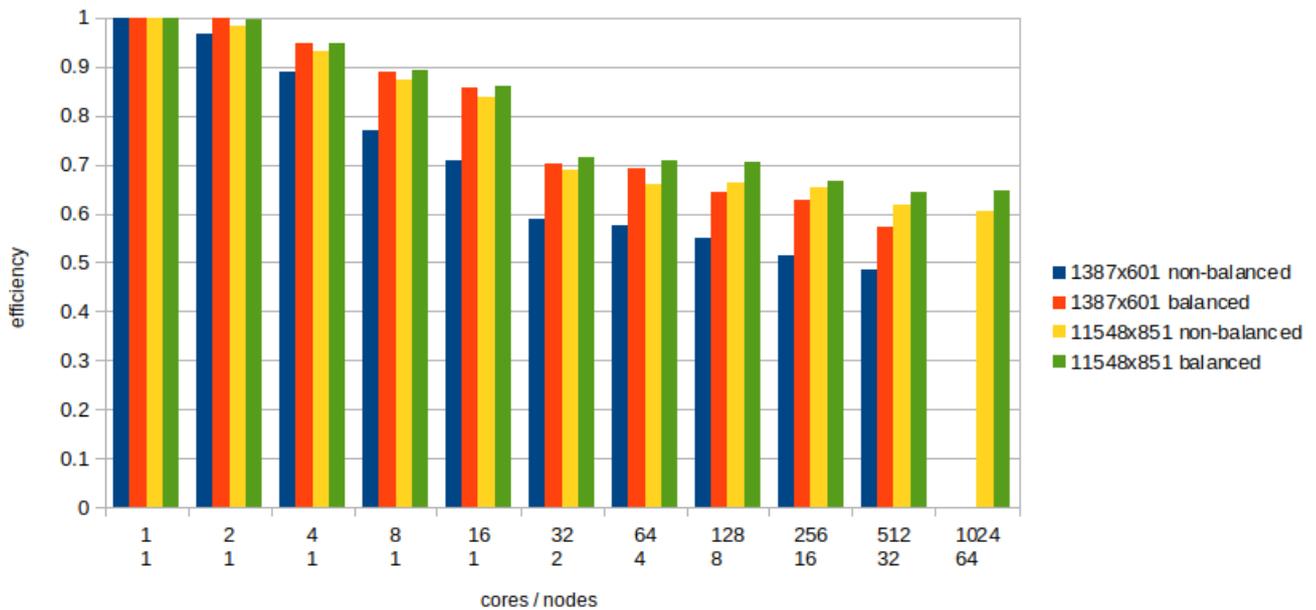


Рис. 6 – Эффективность параллельной реализации для клеточных массивов 1387×601 и 11548×851 клеток в режимах с балансировкой нагрузки и без нее. Результаты получены на кластере МВС-10П МСЦ РАН

Исследована эффективность созданной параллельной программной реализации клеточно-автоматной модели на размерах клеточных массивов 1387×601 и 11548×851 клеток, соответствующих разрешению используемой томограммы, в режимах с балансировкой нагрузки и без нее (рис. 6). Получены высокие значения эффективности: 0.7–0.99 на мультипроцессорном вычислителе и 0.5–0.7 на мультикомпьютере для различных размеров клеточного массива и вычислительных режимов.

4. Создана компьютерная программа "Система программирования Аспект. Транслятор" для трансляции программного кода, написанного на языке программирования Аспект, в программный код на языке C++. Программа, предназначенная для практической реализации фрагментированного подхода к программированию в приложении к задачам численного моделирования, позволяет пользователю записывать решение численных задач во фрагментированной форме и автоматически получать параллельную программу для такого представления. Может быть использована в учреждениях науки и университетах, тематика которых связана с разработкой параллельных программ для решения больших численных задач, а также для обучения студентов технологии фрагментированного программирования. Транслятор реализован в форме консольного приложения, управляется с помощью аргументов командной строки. На вход транслятору подается один или несколько файлов с Аспект-программой, на выходе генерируется один файл с текстом программы на языке C++. В процессе трансляции выявляются синтаксические и семантические ошибки исходной Аспект-программы.

Исследованы возможности использования геометрических представлений свойств целенаправленно развивающихся систем при их моделировании. За отчетный период удалось обосновать осуществимость и корректность представления траекторий развития как кривых в пространстве факторов. Это позволило дать формальное описание таких известных видов представления траекторий, как улитка развития, спираль, раскручивающаяся вокруг вектора тренда развития, и др. В результате предлагается технологичный подход к выявлению фазового представления

процессов, согласованного с выявляемыми группировками факторов на фазах. Выдвигается гипотеза о том, что геометрическое представление развивающихся процессов как серий аспектных моделей изучаемой системы может быть использовано для общей модели системы автономных фрагментов, реализующих наиболее подходящие вычислительные системы.

Разработана технология моделирования развития систем, обусловленного активностью их элементов. В течение 2021 г. исследовалась перспективность реализации моделей развивающихся систем на основе совместной имитации многоаспектных моделей, базирующихся на различных вычислительных принципах. Выявлены условия, при которых такое взаимодействие аспектных моделей является корректно сбалансированным и адекватно описывающим реальный объект исследования.

Выполнено построение взаимодействующих моделей на базе использования инструментальной среды поддержки разработки и проведения расчетов. Исследован подход к моделированию развивающихся систем, в основе которого лежит идея самостоятельного построения взаимодействующих аспектных моделей за счет использования инструментальной вычислительной среды. Основными чертами подхода являются отказ от постулата о детерминированности поведения систем, развитие которых обеспечивается активностью элементов и событийным управлением их поведением. Обсуждаются основные требования к инструментальному обеспечению подхода.

Предложена методология обучения параллельным вычислениям на ранней стадии изучения программирования. Предлагается методика обучения параллельному программированию до того, как студент освоил основные методы и шаблоны последовательного программирования. В результате использования этой методики достигается педагогический эффект в виде развития нешаблонного мышления обучаемых, что выгодно отличает ее от традиционных подходов к обучению.

Все поставленные в проекте задачи выполнены полностью. Полученные научные результаты соответствуют мировому уровню.

Публикации

Идания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Gorodnichev, M., Lebedev, D. Semantic tools for development of high-level interactive applications for supercomputers // *J. of Supercomp.* 2021. Vol. 77 (10). P. 11866–11880. DOI: 10.1007/s11227-021-03731-6.
2. Kireeva, A., Sabelfeld, K. K., Kireev S. Parallel simulation of drift-diffusion-recombination by cellular automata and global random walk algorithm // *J. of Supercomp.* 2021. Vol. 77 (7). P. 6889–6903. DOI: 10.1007/s11227-020-03529-y.
3. Malyshkin, V., Akhmed-Zaki, D., Perepelkin, V. Parallel programs execution optimization using behavior control in LuNA system // *J. of Supercomp.* 2021. Vol. 77 (9). P. 9771–9779. DOI: 10.1007/s11227-021-03654-2.
4. Malyshkin, V., Akhmed-Zaki, D., Perepelkin, V. Parallel programs execution optimization using behavior control in LuNA system // *J. of Supercomp.* 2021. Vol. 77 (9). P. 9771–9779.
5. Malyshkin, V. Parallel computing technologies 2020 // *J. of Supercomp.* 2021. <https://rdcu.be/cGWsd> (дата обращения 2022-02-14). DOI: 10.1007/s11227-021-04014-w.

6. Sabelfeld, K. K., Kireev, S., Kireeva, A. Parallel implementation of cellular automata model of electron-hole transport in a semiconductor // *J. of Parall. and Distrib. Comput.* 2021. Vol. 158. P. 186–195. DOI: 10.1016/j.jpdc.2021.08.006.

7. Непомнящая, А. Ш., Снытникова, Т. В. Ассоциативная версия инкрементального алгоритма Рамалингама для решения проблемы достижимости в потоковых графах с одним источником // *Вестн. ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика.* 2021. № 54. С. 86–96. DOI: 10.17223/19988605/54/11.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Belyaev, N., Perepelkin, V. High-efficiency specialized support for dense linear algebra arithmetic in LuNA system // *Lect. Notes in Comput. Sci.* 2021. Vol. 12942. P. 143–150. DOI: 10.1007/978-3-030-86359-3_11.

2. Malyshkin, V., Perepelkin, V. Trace-based optimization of fragmented programs execution in LuNA system // *Lect. Notes in Comput. Sci.* 2021. Vol. 12942. P. 3–10. DOI: 10.1007/978-3-030-86359-3_1.

3. Malyshkin, V. Preface // *Lect. Notes in Comput. Sci.* 2021. Vol. 12942. P. v. DOI: 10.1007/978-3-030-86359-3.

4. Migov, D. A., Snytnikova, T. V., Rodionov, A. S., Kanevsky, V. I. Network reliability calculation with Use of GPUs // *Lect. Notes in Comput. Sci.* 2021. Vol. 12942. P. 210–219. DOI: 10.1007/978-3-030-86359-3_16.

5. Svit, K., Zhuravlev, K., Kireev, S., Sabelfeld, K. K. A stochastic model, simulation, and application to aggregation of cadmium sulfide nanocrystals upon evaporation of the Langmuir – Blodgett matrix // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2021. Vol. 27, iss. 4. P. 289–299. DOI: 10.1515/mcma-2021-2100.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Medvedev Yu. Simulation of laminar flow in a local constriction of a pipe by a cellular automaton // *Bull. NCC. Ser.: Comp. Science.* 2020. Iss. 44. P. 9–16. (Не вошла в отчет 2020 г.)

2. Migov D., Snytnikova T. Using GPU for the network reliability evaluation by Monte Carlo method // *Bull. NCC. Ser.: Computer Science – 2020. – Issue 44.* P. 17–22. (Не вошла в отчет 2020 г.)

3. Skopin, I. Modelling purposeful processes based on the geometric representation of their trajectories // *CEUR Workshop Proc.* 2021. Vol. 2913. P. 164–181. DOI: 10.47350/ICCS-DE.2021.13.

4. Боронина, М. А., Вшивков В. А., Киреев С. Е. Модификация параллельного алгоритма для численного моделирования открытой магнитной ловушки // *Вестн. НГУ. Сер: Информационные технологии.* 2021. Т. 19, № 1. С. 15–25. DOI: 10.25205/1818-7900-2021-19-1-15-25.

5. Скопин И. Н. Обучение параллельным вычислениям на ранней стадии изучения программирования // *Преподавание информационных технологий в Российской Федерации: материалы 19-й открытой Всерос. конф.* 2021. С. 215–217.

6. Ткачев А. В., Калгин К. В. DPLL-подобный решатель задачи выполнимости над системой уравнений в АНФ // *Прикл. дискр. матем. Прил.* 2021. № 14. С. 187–190. DOI: 10.17223/2226308X/14/44.

Свидетельства о регистрации в Роспатенте

1. Свидетельство № 2021669209 РФ. Система программирования Аспект. Транслятор : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / С. Б. Арыков ; зарегистр. 25.11.2021.

2. Свидетельство № 2021669351 РФ. Программный комплекс моделирования газопорошкового потока FHP-GP : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Ю. Г. Медведев ; зарегистр. 29.11.2021.

2. Свидетельство № 2021665653 РФ. Программа cuSTAR : свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Т. В. Снытникова ; зарегистр. 30.09.2021.

Участие в конференциях и совещаниях

1. 10-я Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям, Томск, 5–7 октября 2021 г. – 3 доклада (Власенко А. Ю., Городничев М. А.).

2. The 2nd International workshop on advanced information and computation technologies and systems, Irkutsk, December 6–10, 2021 – 1 доклад (Скопин И. Н.).

3. The 3rd International workshop on information, computation, and control systems for distributed environments, Irkutsk, July 5–9, 2021 – 1 доклад (Скопин И. Н.).

4. 17-я Международная Азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем", Москва; Новосибирск; Казахстан; Кыргызская Республика, 13–17 сентября 2021 г. – 1 доклад (Скопин И. Н.).

5. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 1 доклад (Щукин Г. А.).

6. Национальный Суперкомпьютерный Форум (НСКФ-2021), Переславль-Залесский, ИПС им. А. К. Айламазяна РАН, 30 ноября – 3 декабря 2021 г. – 2 доклада, из них 1 пленарный (Скопин И. Н.).

Участие в организации конференций

1. Малышкин В. Э.:

– член программного комитета, сопредседатель оргкомитета The 16th International conference on parallel computing technologies, Калининград, 13–18 сентября 2021 г.,

– член программного комитета, председатель оргкомитета 36-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 25–29 января 2021 г.,

– член программного комитета, председатель оргкомитета 37-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию с международным участием, Новосибирск, 5–16 июля 2021 г.;

2. Арыков С. Б.:

– член оргкомитета 37-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию с международным участием, Новосибирск, 5–16 июля 2021 г.;

– член оргкомитета The 16th International conference on parallel computing technologies, Калининград, 13–18 сентября 2021 г.,

– член оргкомитета Международной конференции "Моделирование в инженерном деле", Москва, 26–27 октября 2021 г.;

3. Ачасова С. М. – член оргкомитета The 16th international conference on parallel computing technologies, Калининград, 13–18 сентября 2021 г.;

4. Власенко А. Ю.:

– член оргкомитета 36-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 25–29 января 2021 г.,

- член оргкомитета 37-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию с международным участием, Новосибирск, 5–16 июля 2021 г.;
 - член оргкомитета The 16th International conference on parallel computing technologies, Калининград, 13–18 сентября 2021 г.;
5. Городничев М. А.:
- член оргкомитета 36-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 25–29 января 2021 г.,
 - член оргкомитета 37-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию с международным участием, Новосибирск, 5–16 июля 2021 г.;
 - член оргкомитета The 16th International conference on parallel computing technologies, Калининград, 13–18 сентября 2021 г.,
 - член оргкомитета, ученый секретарь конференции «Установки мегасайнс: большие данные, цифровая инфраструктура, цифровые сервисы. Технологии цифровых двойников для ЦКП "СКИФ"», Новосибирск, 23–24 декабря 2021 г.;
6. Калгин К. В. – член оргкомитета 37-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию с международным участием, Новосибирск, 5–16 июля 2021 г.;
7. Киреев С. Е.:
- член оргкомитета 36-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 25–29 января 2021 г.,
 - член оргкомитета 37-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию с международным участием, Новосибирск, 5–16 июля 2021 г.,
 - член оргкомитета The 16th International conference on parallel computing technologies, Калининград, 13–18 сентября 2021 г.;
8. Маркова В. П.:
- член программного комитета, член оргкомитета 36-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 25–29 января 2021 г.,
 - член программного комитета, член оргкомитета 37-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию с международным участием, Новосибирск, 5–16 июля 2021 г.;
 - член оргкомитета The 16th International conference on parallel computing technologies, Калининград, 13–18 сентября 2021 г.;
9. Медведев Ю. Г. – член оргкомитета The 16th International conference on parallel computing technologies, Калининград, 13–18 сентября 2021 г.;
10. Перепёлкин В. А.:
- член оргкомитета 36-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 25–29 января 2021 г.,
 - член оргкомитета 37-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию с международным участием, Новосибирск, 5–16 июля 2021 г.;
 - член оргкомитета The 16th International conference on parallel computing technologies, Калининград, 13–18 сентября 2021 г.;
11. Щукин Г. А.:

- член оргкомитета 36-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 25–29 января 2021 г.,
- член оргкомитета 37-й Всероссийской летней молодежной школы-конференция по параллельному программированию с международным участием, Новосибирск, 5–16 июля 2021 г.;
- член оргкомитета The 16th International conference on parallel computing technologies, Калининград, 13–18 сентября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 7
 Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 10
 Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 18
 Свидетельств о регистрации программ в Роспатенте – 3
 Докладов на конференциях – 9, в том числе 1 пленарный
 Участников оргкомитетов конференций – 28

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. Перепёлкин В. А.	н.с.	
12. Савукова В. А.	ст. техник	
13. Скопин И. Н.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
14. Снытникова Т. В.	м.н.с.	
15. Щукин Г. А.	н.с.	

Власенко А. Ю. – молодой научный сотрудник.

Педагогическая деятельность

Малышкин В. Э.	– зав. кафедрой НГУ, профессор, зав. кафедрой НГТУ
Арыков С. Б.	– доцент НГТУ
Власенко А. Ю.	– доцент НГУ
Городничев М. А.	– старший преподаватель НГУ, ассистент НГТУ
Калгин К. В.	– старший преподаватель НГУ
Киреев С. Е.	– старший преподаватель НГУ
Маркова В. П.	– доцент НГУ, НГТУ
Перепёлкин В. А.	– старший преподаватель НГУ

- Скопин И. Н. – доцент НГУ
Щукин Г. А. – ассистент НГТУ

Руководство студентами

- Абрамушкина Е. С. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Александров Е. А. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Баранов И. Н. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Борзов А. С. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Бречка А. В. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Брусникин М. А. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Галишева К. А. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Голиков М. О. – 1-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Грушев А. П. – 4-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Городничев М. А.
Долгов Н. Ю. – 1-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Дорн А. А. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Ефимцев Ф. – 4-й курс, ФПМИ НГТУ, руководитель Городничев М. А.
Закиров В. К. – 1-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Иванченко Д. В. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Ижицкий Р. Л. – 2-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Изотов А. С. – 4-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Капралова Р. Е. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Кошкарев А. В. – 4-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Крупская В. А. – 4-й курс, ФПМИ НГТУ, руководитель Городничев М. А.
Кудинов А. Ю. – 2-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Кудрявцев А. А. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Левченко К. К. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Лямин А. С. – 1-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Макаренко Д. Е. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Малханов В. В. – 1-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Масыч М. А. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Матушкин Д. Б. – 1-й курс магистратуры ФПМИ НГТУ, руководитель Городничев М. А.
Мичуров М. А. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Власенко А. Ю.
Мустафин Д. Э. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Власенко А. Ю.
Налепова Е. Д. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Нуштаев Ю. Ю. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Парфёнов Д. Р. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Пирожков А. К. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Плешков А. В. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Попов Р. Д. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Саяпин М. П. – 4-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Скрипникова В. С. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Медведев Ю. Г.
Спирин В. А. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Тишин А. – 2-й курс магистратуры ФПМИ НГТУ, руководитель Городничев М. А.
Трубицина Ю. С. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.

- Трынкин М. А. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Чемагин А. С. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Чмиль А. В. – 2-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Шевяков И. Г. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.

Руководство аспирантами

- Артюхов А. А. – 1-й год, ФИТ НГУ, руководитель Малышкин В. Э.
Беляев Н. А. – 4-й год, ИВМиМГ, руководитель Малышкин В. Э.
Кондратов А. С. – 2-й год, ФИТ НГУ, руководитель Малышкин В. Э.

Защита дипломов

- Александров Е. А. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Артюхов А. А. – магистр ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Борзов А. С. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Голиков М. О. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Корнеев Д. А. – бакалавр ФПМИ НГТУ, руководитель Городничев М. А.
Лямин А. С. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Макаренко Д. Е. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Масыч М. А. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Матушкин Д. Б. – бакалавр ФПМИ НГТУ, руководитель Городничев М. А.
Парфёнов Д. Р. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Плешков А. В. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Половников А. С. – бакалавр ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.

Награды

Ю. Г. Медведеву присуждено звание "Заслуженный ветеран Сибирского отделения РАН".

ЛАБОРАТОРИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Зав. лабораторией к.ф.-м.н. Черных И. Г.

Важнейшие достижения

Высокопроизводительная вычислительная модель плазменных течений в открытых ловушках в режиме диамагнитного удержания

Д.ф.-м.н. Вшивков В. А., д.ф.-м.н. Дудникова Г. И., к.ф.-м.н. Боронина М. А., к.ф.-м.н. Генрих Е. А.

Создана численная модель удержания и нагрева плазмы в осесимметричной открытой магнитной ловушке для установок УТС. Гибридная модель с использованием метода частиц-в-ячейках основана на кинетическом приближении для ионных компонент фоновой плазмы и инжектируемого пучка и МГД приближении для электронной компоненты. Создан комплекс программ для проведения численного моделирования диамагнитного режима ловушки, эксперименты по исследованию которого планируются на установке КОТ (ИЯФ СО РАН). Проведены вычислительные эксперименты по исследованию эволюции структуры магнитного поля и плазмы, получены временные и пространственные характеристики фоновой и удерживаемой плазмы в зависимости от энергии, тока и ионного состава инжектируемого пучка и других параметров.

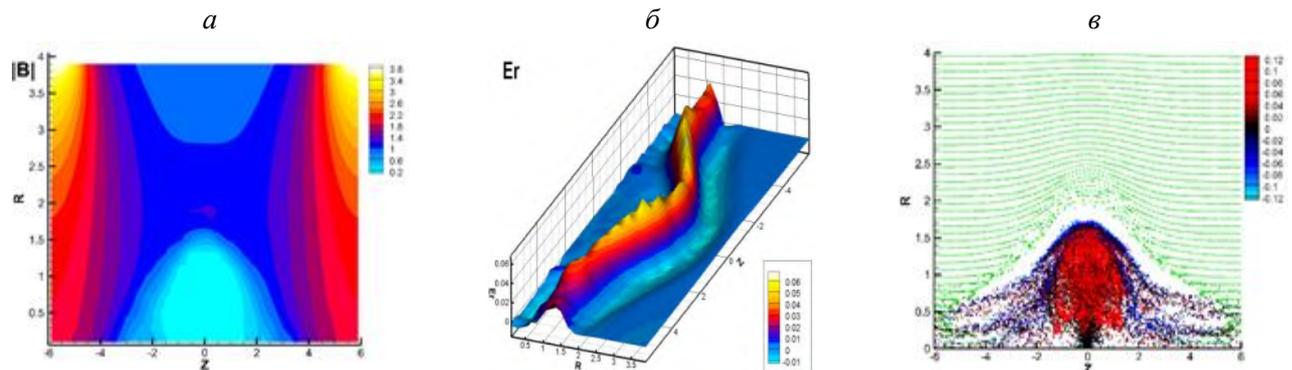


Рис. 1– Значения модуля магнитного поля: формирование магнитной каверны (а); образование барьера электрического поля (б); распределение ионов в области решения: зеленый цвет – частицы фона, другие цвета – частицы инжектируемой и удерживаемой плазмы в зависимости от азимутальной скорости (в)

Результаты исследований опубликованы в работе

Boronina, M. A., Chernykh, I. G., Dudnikova, G. I., Genrikh, E. A., Vshivkov, V. A. Mathematical modelling of beam dynamics in diamagnetic confinement regime of open trap // J. of Phys.: Conf. Ser. 2028, 012020, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012020.

Создана программа MTRAP-21 для моделирования истечения плазмы в осесимметричной линейной магнитной системе в режиме диамагнитного удержания, когда давление удерживаемой плазмы равно давлению магнитного поля ловушки. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665047. Созданная программа позволяет проводить расчеты по исследованию режима диамагнитного удержания и равновесия плазмы, потери энергии и частиц из-за кулоновских столкновений при инжекции мощных атомарных пучков в открытую магнитную систему.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, заверенным в 2021 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР "Суперкомпьютерные технологии решения больших задач естествознания, математические модели, методы анализа и оптимизации сложных информационных систем".

Номер государственной регистрации 0251-2021-0005.

Руководители: д.ф.-м.н., проф. РАН Марченко М. А., к.ф.-м.н. Черных И. Г.

Протестирована эффективность расчета динамики заряженных частиц в самосогласованном электромагнитном поле на методе частиц-в-ячейках.

Для тестирования производительности кода использован кластер НКС-1П Сибирского суперкомпьютерного центра и кластер НГУ. Тестирование проводилось в двух направлениях – определение производительности на одном узле в зависимости от архитектуры используемых процессоров, а также тестирование масштабируемости с использованием всех ресурсов суперкомпьютера.

Для тестирования кода на одном узле использовали следующие узлы

- 1) НКС-1П 2 × CPU Intel Xeon E5-2697A v4 (2.6 GHz, 16 cores),
- 2) НКС-1П 1 × Intel Xeon Phi 7290 KNL (1.5 GHz, 72 cores, avx-512),
- 3) НКС-1П 2 × Intel Xeon Platinum 8268 (2.9 GHz, 24 cores, avx512),
- 4) НГУ 4 × Intel Xeon Gold 6248 (2,5 Ghz, 20 cores, avx-512),

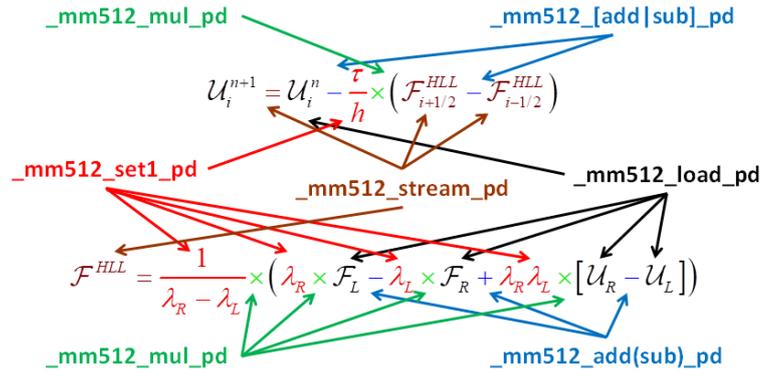
Было показано, что современные процессоры с поддержкой avx-512 являются наиболее подходящими для расчета движений частиц, поскольку в 3D геометрии для интерполяции полей и расчета плотности тока нужно не менее 8 узлов сетки, а хранение этих данных в локальных массивах позволяет добиться высокой производительности. В частности, узел 1 позволил обрабатывать $1,5 \times 10^8$ частиц в секунду, узел 2 – $2,3 \times 10^8$ ч/сек., узел 3 – $3,7 \times 10^8$ ч/сек., узел 4 – $7,2 \times 10^8$ ч/сек. Эти данные хорошо коррелируют с показателями пиковой производительности узла (кроме разве что KNL).

На кластере нкс-1П также были протестирована масштабируемость параллельного алгоритма и время коммуникаций. В качестве параллельного алгоритма была выбрана двухуровневая декомпозиция по пространству и по частицам внутри подобластей с топологией тора. Было использовано 18 узлов CPU Intel Xeon E5-2697A v4. Параметры расчета 10^8 узлов сетки и 10^9 частиц.

Эффективность распараллеливания на 18 узлах составила более 95 %. Частично это результат того, что на пересылки тратится существенно меньше времени, чем на обработку частиц. Однако само время коммуникаций при переходе от 4 до 18 узлов увеличилось лишь в 3 раза для коммуникаций внутри группы (пересылка плотности тока в режиме "все со всеми") и на несколько процентов для коммуникаций между группами.

Построена вычислительная гидродинамическая модель взаимодействующих галактик. Для описания межзвездной среды используется модель гравитационной многокомпонентной односкоростной гидродинамики. Для описания звездной компоненты и темной материи используется модель на базе первых моментов бесстолкновительного уравнения Больцмана. Кроме процессов звездообразования и эффекта от взрыва сверхновых в подсеточную модель добавлены 28 химических и ядерных реакций основных форм водорода и гелия до образования простейшего соединения гидрида гелия. Векторная форма записи уравнений и использование HLL метода позволяет

Рис. – 2 Схема векторизации вычислений



использовать векторные расширения AVX-512 для ускорения вычислений (рис. 2). Достигнута 97-процентная масштабируемость при использовании 16 узлов. В рамках одного ускорителя Intel Xeon Phi 7290 достигнуто 41-кратное ускорение и 302 GFLOPS производительности. С помощью вычислительной модели проведены вычислительные эксперименты по моделированию химодинамики взаимодействующих галактик.

В ходе вычислительных экспериментов взаимодействующих галактик показано, что в центральной области образуется пик барионной материи и газовой компоненты (атомарного водорода). В то же время бесстолкновительные компоненты немного диссипируют в результате свободного прохождения сквозь друг друга. Это связано с работой приливных сил обеих галактик. В наиболее горячей области образуется молекулярный водород в характерных пропорциях относительно атомарного водорода. На фронте ударной волны имеет место рост скорости процесса звездообразования. Следует отметить, что область образования иона гидрида гелия сильно коррелирует с областью звездообразования и накладывается на область молекулярного водорода. Это связано с тем, что эта область наиболее горячая и складывается из влияния сверхновых молодых звезд и разогретой ударными волнами областями. Таким образом, экспериментальным путем подтверждена гипотеза местонахождения областей с активным образованием гидрида гелия.

Разработан новый метод решения уравнений движения заряженных частиц в электромагнитных полях и проведено его сравнение с различными известными модификациями метода Бориса. Созданные двумерный и трехмерный алгоритмы основаны на использовании точного решения дифференциального уравнения для скорости заряженной частицы на шаге по времени при постоянных значениях электрического и магнитного полей. Проведен сравнительный анализ метода Бориса, его модификаций и нового метода по точности и времени их работы. Показано, что новый метод позволяет точнее вычислять траекторию и скорость заряженной частицы без значительного увеличения времени и сложности расчетов. Установлено, что при выборе модификации метода Бориса для решения задачи в первую очередь следует обращать внимание на точность получаемого решения, поскольку более простой и быстрый алгоритм решения может не дать выигрыша по времени его реализации.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы MTRAP-21 для ЭВМ № 2021665047, предназначенной для численного моделирования течения плазмы в осесимметричной линейной магнитной системе в режиме диамагнитного удержания, когда давление удерживаемой плазмы равно давлению магнитного поля ловушки. Программа реализована на языке Fortran-90. В основу программы положена гибридная численная модель, основанная на МГД

приближении для описания электронной компоненты плазмы и кинетическом приближении для ионов, учтены возможность различных методов инжекции частиц в ловушку и механизмы диссипации, обусловленные конечной проводимостью и электронной теплопроводностью. Проведенные расчеты продемонстрировали возможность формирования стационарной конфигурации диамангнитной ловушки в режиме с непрерывной инжекцией ионного пучка в приосевую область ловушки. Показано, что время формирования и размер образующейся магнитной каверны согласуются с полученными аналитическими оценками баланса частиц и энергии в системе. Созданная программа позволяет проводить расчеты по исследованию режима диамангнитного удержания и равновесия плазмы, потери энергии и частиц из-за кулоновских столкновений при инжекции мощных атомарных пучков в открытую магнитную систему.

Разработана модификация параллельной программы для двумерного моделирования динамики плазмы в диамангнитном режиме открытой магнитной системы с целью ускорения вычислений. Так как наибольшую долю времени расчета занимает процедура вычисления координат и скоростей частиц, то автоматическая векторизация цикла по частицам компилятором (применение одной операции к нескольким данным одновременно) позволила использовать процессоры в интенсивном режиме и улучшить производительность кода. Для этого частицы приписываются ячейкам, для каждой ячейки организовываются массивы лежащих в ней частиц, для каждой ячейки цикл по частицам векторизуется. При этом требуемая сортировка частиц по ячейкам обеспечивается сортировкой в начальный момент и алгоритмом пересылки частиц из ячейки в ячейку на каждом шаге по времени. При таком подходе для межпроцессорных пересылок и обработки граничных условий на частицы требуется перебор лишь частиц крайних ячеек процессоров, а не всех частиц. Получено ускорение расчетов в 1.5–2 раза.

Предложена модель взаимодействия лазерного поля с полностью ионизованной плазмой сверхкритической плотности в режиме "hole-boring", учитывающая как квантовую отдачу, так и спектральную отсечку на высоких энергиях. Результаты аналитических расчетов и трехмерного моделирования методом частиц-в-ячейках показали, что в прогнозируемых сценариях квантовые эффекты могут приводить к снижению эффективности преобразования лазерного излучения в высокоэнергетические фотоны в 2–3 раза. Аналитические расчеты показали, что такое квантовое подавление достигает максимума при определенном значении интенсивности и не растет с дальнейшим увеличением интенсивности. Немонотонное поведение коэффициента квантового подавления является результатом совместного влияния ускорения плазмы в продольном направлении и силы радиационного трения. Результаты численного моделирования подтверждают теоретические выводы. Прогнозируемые особенности могут служить подходящей диагностикой для тестирования различных теорий радиационного трения.

Для трехмерной гибридной модели диамангнитного режима открытой магнитной системы разработан новый алгоритм внеосевого ввода пучка в расчетную область, который позволяет точнее описать условия лабораторных экспериментов на установке КОТ (ИЯФ СО РАН).

Создана трехмерная численная модель взаимодействия тестирующего низкоэнергетического ленточного электронного пучка с релятивистским протонным сгустком, имеющая отношение к неразрушающей диагностике в физике высоких энергий. Электронный пучок моделируется путем расчета его траекторий в электромагнитном поле, генерируемом ионным сгустком. На основе серии вычислительных экспериментов получены зависимости отклонения электронного пучка от

его энергии и угла наклона к оси протонного сгустка, а также величины объемного заряда и скорости протонного сгустка. Показано, что амплитуда отклонения электронного пучка обратно пропорциональна его энергии и пропорциональна заряду и гамма-фактору протонного сгустка.

Предложен и обоснован метод мониторинга грязевых и магматических вулканов с применением мощных вибросейсмических источников, разработанных в СО РАН. Проведенные ранее экспериментальные работы на грязевых вулканах Таманской грязевулканической провинции и численные эксперименты показывают принципиальную возможность активного мониторинга вулканов. Основным достоинством таких источников является высокая повторяемость амплитудно-фазовых характеристик излучаемого сигнала. Следует отметить, что вибраторы являются экологически чистыми и, в отличие от взрывоопасных источников, не наносят вреда природе.

Разработаны и протестированы алгоритмы математического моделирования и программное обеспечение для высокопроизводительных вычислительных систем с различными архитектурами для грязевых и магматических вулканов. Рассмотрены модели для двух конфигураций магматических очагов.

На основе проведенного анализа выбраны перспективные подходы к построению более реалистичных моделей, учитывающие вязко-упругую природу вулканических магм и диффузную границу перехода между магмой и твердыми породами, и добавлены в разработанную в ходе проекта модель. Как показал проведенный анализ современного состояния науки в области изучения внутреннего строения вулканов и природы их извержений, достоверного описания геометрии магматических камер и происходящих в них процессов на сегодняшний день не существует, наиболее вероятно, что основные процессы, приводящие к извержениям, связаны с кипением расплавов и возникновением трещин (даек) в кровле магматического очага, которые заполняются жидкой магмой или газом. Поэтому для моделирования распространения упругих волн в таких средах рассмотрены основные подходы к созданию моделей с учетом термоупругих и вязких свойств вулканических сред. В частности, проведены численные эксперименты с целью фиксации влияния изменений сейсмических волн в случае трансформирования границ магматической камеры. Известно, что плотность жидких магм равна $2,2-3,0 \text{ г/см}^3$, что примерно на 10 % ниже, чем плотность твердых пород соответствующего состава. Проведенные численные эксперименты выполнены для моделей с резкими границами что, вероятно, нехарактерно для магматических камер. Важное значение имеет вязкость магм (свойство, определяющее их текучесть), которая зависит от состава и температуры и варьируется в широких пределах. На основе новых подобранных подходов продолжится дальнейшая разработка численных методов, алгоритмов и программ для моделирования активного вибропросвечивания вулканов перед извержением.

Полученные экспериментальные и теоретические результаты в области построения геофизических схем для вибросейсмических экспериментов, разработки геофизических моделей, проведения натурного численного моделирования и исследования глубинного строения вулканов не имеют аналогов.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 19-51-14002_анф_а "Моделирование образования звезд на массивно параллельных суперкомпьютерах".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Куликов И. М.

Во втором году выполнения проекта российской стороной разработана новая вычислительная модель гравитационной гидродинамики с учетом переноса излучения в диффузионном приближении. Построенная вычислительная модель является качественным расширением модели гравитационной гидродинамики, адаптированной для воспроизведения процесса звездообразования и эволюции протопланетных дисков. Расширение состоит в рассмотрении уравнения состояния для идеального газа с учетом переменного отношения теплоемкостей газа и параболического термина в законе сохранения полной механической энергии газа. Терм сформулирован в виде теплопроводного члена с зависимостью от температуры в четвертой степени. Для вычислительной модели на основе метода разделения операторов разработан численный метод решения гиперболических, эллиптических и параболических уравнений. Вычислительная модель реализована с использованием неструктурированных тетраэдральных сеток и подвижных геодезических сеток. Для детальной верификации и сравнительных вычислительных экспериментов по изучению образования и эволюции протозвезд и газопылевых протозвездных дисков математическая модель также реализована с использованием многоуровневых вложенных сеток. Проведены вычислительные эксперименты по исследованию коллапса облака солнечной массы в модели гравитационной гидродинамики с учетом переноса излучения в диффузионном приближении. Проведен анализ образования и эволюции протозвезд и протозвездных дисков в газовой и газопылевой моделях. В основе параллельной реализации вычислительной модели лежит технология AVX-2 для реализации уравнений гидродинамики и автоматическая векторизация AVX-512 для решения уравнения Пуассона. Для многоядерной реализации используется технология OpenMP.

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.

В ходе выполнения проекта разработаны численные коды на основе метода частиц-в-ячейках, позволяющие моделировать лабораторные эксперименты по генерации мощного терагерцового излучения при столкновении в газовой струе двух фемтосекундных лазерных импульсов. Для случая, когда угол между лазерными импульсами очень мал, создана аксиально симметричная 2D3V численная PIC модель. Разработана модель ионизации атомов электрическими полями лазерных импульсов. При малых значениях полей скорость ионизации в этой модели определяется туннельным эффектом, в сильных полях происходит переход в надбарьерный режим, а для промежуточных полей используется аппроксимация Бауэра – Малсера. Разработан параллельный алгоритм движения частиц в аксиально-симметричной геометрии с учетом процессов ионизации и адаптивной концентрации. Чтобы понять, насколько сильно эффективность схемы и угловое распределение генерируемого излучения чувствительны к конечному углу между лазерными осями, создана полная 3D модель. Расчеты по этой модели полностью подтвердили предсказания теории, основанной на вычислении интенсивности излучения в дальней зоне источника, что позволило дать рекомендации по правильному размещению диагностик терагерцового излучения в эксперименте.

Проект РФФИ № 19-07-00085 А "Интеллектуальная поддержка решения задач на пета- и эксафлопсных суперЭВМ".

Руководитель проекта д.т.н. – Глинский Б. М.

Разработана концепция интеллектуальной поддержки решения вычислительно сложных задач математической физики на суперкомпьютерах, основанная на онтологическом представлении информации. Онтология математических методов и параллельных алгоритмов и онтология параллельных архитектур и технологий совместно с правилами вывода, сформулированными экспертами в заданной предметной области, позволяют подобрать эффективный численный метод, параллельный алгоритм и вычислительную архитектуру для решения задачи пользователя. Разработаны паттерны онтологического проектирования, описывающие основные классы онтологий. Реализован информационно-аналитический интернет-ресурс для поддержки решения вычислительно сложных задач на суперкомпьютерах. Выполнено наполнение контента информационно-аналитического интернет-ресурса, которое состояло в добавлении экземпляров описанных в онтологии классов, представляющих конкретные объекты рассматриваемой области знаний. Разработана база знаний, включающая онтологические описания задач гидродинамики космической плазмы, физики плазмы, геофизики, а также численных методов их решения на архитектурах суперкомпьютеров. Предложенная система интеллектуальной поддержки решения задач математической физики прошла успешную апробацию на задачах астрофизики, физике плазмы и геофизики.

Проект РФФИ № 18-29-21025_мк "Суперкомпьютерное моделирование плазменных течений в режимах диамагнитного удержания открытых ловушек".

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

На основе серии вычислительных экспериментов исследованы характеристики горячей плазмы в диамагнитном режиме пробкотрона в зависимости от параметров фоновой плазмы и инжектируемого ионного пучка, механизмов диссипации, начальной конфигурации магнитного поля. Используется двумерная аксиально-симметричная численная модель, основанная на решении уравнений Власова для ионных компонент фоновой плазмы и инжектируемого ионного пучка методом частиц в ячейках (PIC). Для электронов используется приближение магнитной гидродинамики без учета их массы. Учтены наиболее существенные в лабораторных экспериментах механизмы диссипации, обусловленные электрон-ионными и ион-ионными столкновениями. Исследована структура и время формирования магнитной каверны для различных значений аномальной частоты электрон-ионных столкновений, наличие которой обеспечивает радиальный дрейф горячей плазмы в переходной области на границе каверны. Показано, что токовый слой, формирующийся на границе плазмы, зависит от величины ларморовского радиуса горячих ионов. Для учета диссипации за счет ион-ионных столкновений используется метод Монте-Карло. Созданный алгоритм учитывает взаимодействие выбранной частицы с осредненной по ячейке частицей, что позволяет существенно уменьшить время расчета ион-ионных столкновений. Рассмотрены различные методы инжекции ионного пучка, включающие возможности внеосевой инжекции. Это позволяет, в отличие от осевой инжекции, задать как азимутальную компоненту скорости пучка, так и направление инжекции относительно магнитного поля ловушки и важно для соответствия условиям лабораторных экспериментов. Проведено исследование устойчивости гибридной численной модели. Показано, что для гидродинамического подхода гибридная модель некорректна, если не учитывать силу трения между ионной и электронной компонентами плазмы, поскольку фазовая скорость распространяющихся волн может быть

бесконечной. Проведены численные эксперименты для программ с векторизованными циклами расчета динамики частиц на процессорах Intel Xeon Phi 7290 (архитектура KNL, тактовая частота 1.5 ГГц) и Intel Xeon E5-2697 (архитектура BDW, тактовая частота 2.6 ГГц) с не векторизованной версией программы. Векторизованные циклы демонстрируют более высокую скорость работы: в 1.8 раз для процессоров KNL и в 2.5 раз для процессоров Broadwell. Для полного времени работы программы достигнуто его уменьшение до 2 раз на процессорах KNL и до 1.5 раз на Broadwell.

Проект РФФИ № 20-47-540002_р_а_Новосибирск "Разработка эффективных параллельных вычислительных методов для глобального моделирования взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Черных И. Г.

Численный метод был верифицирован на тесте Кеппенса. Показано, что численный метод корректно и с малой диссипацией воспроизводит все МГД волны, а также без особенностей контактный разрыв во всех компонентах решения. Помимо отсутствия "карбункул"-эффектов в построенном численном методе имеет место также галилеева инвариантность построенного метода, что особенно важно в задачах развития турбулентности солнечного ветра и межзвездной среды. Была рассмотрена модельная задача высокоскоростного облака, моделирующего атмосферу планеты, с разреженной замагниченной средой. В начальный момент времени происходит набегание потока и образование ударной волны перед атмосферой облака. Само облако слабо деформируется за фронтом ударной волны. Также была рассмотрена задача развития сверхзвуковой турбулентности солнечного ветра. Было показано, что имеет место теплопередача подвижного фронта газа, как и при использовании модели частиц на основе кинетического подхода. Главным результатом выполнения проекта стал новый эффективный численный метод решения уравнений магнитной гидродинамики, реализованный в виде программного комплекса.

Результаты работ по научно-исследовательским программам, проектам Президиума РАН, ОМН РАН

Проект РФФИ № 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 работ по проекту в 2021 г. разработан новый численный метод решения уравнений гидродинамики на основе комбинации метода Годунова для определения лагранжевых значений давления и скорости, схемы Рунге для осреднения схемной скорости адвективного переноса и схемы типа Русанова для учета адвективного члена. Для повышения порядка точности метода на гладких решениях и для уменьшения диссипации на разрывах использованы кусочно-линейное, параболическое и кубическое представления физических переменных. Численный метод был верифицирован на классических задачах о распаде разрыва из книги Торо, трех задачах о взаимодействии сильных ударных волн, задаче Седова о точечном взрыве и задачах развития неустойчивостей типа Кельвина – Гельмгольца, Релея – Тейлора и Тейлора – Грина. На задаче Аксёнова экспериментально доказан второй порядок построенного численного метода. Численный метод был реализован в инфраструктуре разработанного ранее программного инструментария с

использованием многоуровневых вложенных сеток. На узлах кластера НКС-1П Сибирского суперкомпьютерного центра, оснащенных процессорами Intel Xeon Platinum 8268, были достигнуты 46-кратное ускорение и 94 % эффективность при использовании 48 MPI процессов. Экспериментально установлено, что оптимальная энергоэффективность программного инструментария достигается при использовании 8 ядер и составляет 650 MFLOPS/Ватт, а при использовании всех 48 ядер процессора энергоэффективность асимптотически выходит на значение 230 MFLOPS/Ватт. В ходе вычислительных экспериментов по исследованию подрыва белого карлика за счет приливного нагрева от близкого прохождения черной дыры было установлено, что эволюция взрыва сверхновой не зависит от динамики точки подрыва. При исследовании множественного подрыва белого карлика экспериментально подтверждена гипотеза о том, что воспламенение и переход к детонационному горению не требуется для получения достаточно мощных взрывов сверхновых типа Ia. Для задач столкновения белых карликов экспериментально построена зависимость прохождения сценариев взрыва сверхновых типа Ia или Iaх в зависимости от температуры карликов и скорости их столкновения. Также в ходе вычислительных экспериментов установлено, что столкновение такого горячего объекта как белый карлик и относительно холодной планеты земного типа или газового гиганта ведет только к остыванию белого карлика и не приводит к взрыву сверхновой.

Проект РФФ № 19-71-00054 "Суперкомпьютерное моделирование генерации терагерцового излучения при фокусировке мультигигаваттных электронных пучков в плазме".

Руководитель проекта к.ф.-м.н. Берендеев Е. А.

Разработан параллельный 3D3V PIC код Luthien, имитирующий открытые граничные условия, допускающие непрерывную инжекцию электронного пучка в плазму, и позволяющий учесть существенно трехмерные эффекты.

Проведено сравнение 3D3V кода с разработанным ранее 2D3V кодом. Для этого выбрана задача определения инкремента неустойчивости одинарного пучка, инжектируемого в плазму. В рамках пространственно неоднородной задачи об инжекции пучка через границу плазмы инкременты нарастания неустойчивости в 2D и 3D геометриях хорошо совпадают. Трехмерная модель будет в дальнейшем использоваться для моделирования реального лабораторного эксперимента, в котором схема столкновения обязательно будет содержать либо конечный угол, либо конечный прицельный параметр, что нарушит аксиальную симметрию пучково-плазменной системы и потребует учета трехмерных эффектов.

Выполнен поиск режимов эффективной генерации терагерцового излучения в плазме со встречными электронными пучками. Показано, что максимальная эффективность достигается в случае, когда пучки первоначально фокусируются в пятна одинакового размера. Однако за счет последующей перефокусировки каждого из пучков поперечные профили возбуждаемых ими ленгмюровских колебаний начинают локально не совпадать друг с другом, что включает механизм лобового столкновения потенциальных плазменных волн с разными поперечными структурами и приводит к эффективной генерации излучения на второй гармонике плазменной частоты. Эффективность преобразования мощности пучков в мощность такого излучения достигает 1.4 %.

Проект РФФ № 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.

Создан новый алгоритм решения уравнений движения заряженных частиц в электромагнитных полях в нерелятивистском приближении. Рассмотрены варианты аналитически и дискретно заданных электрического и магнитного полей для расчета траекторий движения заряженных частиц на основе использования аналитических решений уравнения движения. Для дискретно заданных полей использовались 2D- или 3D-линейная интерполяции на сдвинутых сетках. Показано, что точность и устойчивость нового алгоритма зависит только от точности и устойчивости алгоритма вычисления электромагнитных полей.

Разработан высокопроизводительный метод нулевых столкновений для моделирования процессов ион-ионных столкновений в высокотемпературной плазме. Отличительная особенность предлагаемого метода по сравнению с классическим обусловлена отсутствием тригонометрических функций, что позволяет существенно сократить время работы программы на современных процессорах. Предложенный метод сохраняет энергию и импульс всей системы при изменении траекторий и скоростей частиц. Проведенная серия численных экспериментов показала эффективность предложенного подхода.

Исследована динамика быстрых ионов в режимах с сильными ион-электронными и слабыми ион-ионными столкновениями. Показано, что проникновение ионов за переходной слой связано с несохранением азимутального момента, вызванным ион-электронными столкновениями в переходном слое. Увеличение силы трения обусловлено большой разницей средних скоростей ионов и электронов в переходном слое, что объясняет наблюдающееся в режимах со слабыми ион-ионными столкновениями выталкивание фоновых ионов из переходного слоя.

Детально исследован наблюдаемый ранее эффект вытеснения ионов фона из переходного слоя на границе диамагнитной каверны. Показано, что при формировании диамагнитного пузыря кроме дрейфа в скрещенных магнитном и азимутальном электрическом оказавшиеся в переходном слое фоновые ионы испытывают дополнительный дрейф, выталкивающий их из переходного слоя. Скорость этого дрейфа прямо пропорциональна частоте ион-электронных столкновений. Исследована возможность формирования конфигурации с обращенным полем в открытой ловушке с внеосевой атомарной инжекцией. Проведена серия расчетов, в которой инжектированные ионы обладали азимутальной компонентой скорости, значительно превышающей продольную и радиальную. Показано, что в режимах с малым током инжектируемых ионов происходило формирование токового кольца с радиусом, равным ларморовскому радиусу ионов с центром на оси ловушки. Наблюдаемое выравнивание азимутальных скоростей электронной и ионной компонент плазмы в области с малым магнитным полем послужило препятствием к ожидаемому обращению поля и пересоединению силовых линий. Проведено детальное исследование динамики частиц, инжектированных в магнитную ловушку в разные моменты времени. Показано, что в случае образования каверны магнитного поля частицы, инжектированные в ранние моменты времени, захватываются магнитным полем, если они обладают большим отношением радиальной компоненты скорости к продольной, и покидают область каверны при малом отношении. Несмотря на отражение от магнитного барьера, часть ионов проникают в область вакуумного

магнитного поля, что связано с радиальным дрейфом из-за силы трения, действующей на ионы в переходном слое.

Создана трехмерная численная модель взаимодействия высокоскоростного ионного пучка с однородной холодной плазмой в магнитной системе открытой ловушки. Для решения кинетического уравнения применяется метод частиц-в-ячейках с использованием новых алгоритмов, созданных в рамках проекта. На основе проведенных вычислительных экспериментов показано, что распространение инжектируемого ионного пучка сопровождается генерацией возмущений на границе вытесненного магнитного поля. При малых числах Маха инжектируемого пучка возбуждается желобковая неустойчивость с большими азимутальными числами. Повышение скорости инжектируемых ионов приводит к подавлению желобковой неустойчивости из-за эффектов конечного ларморовского радиуса. Полученные результаты согласуются с имеющимися теоретическими моделями развития желобковой неустойчивости.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Chernykh I., Kulikov I., Tutukov A. Hydrogen–helium chemical and nuclear galaxy collision: Hydrodynamic simulations on AVX-512 supercomputers // *J. of Comput. and Appl. Math.* 2021. V. 3911. Art. Num. 113395. DOI: 10.1016/j.cam.2021.113395.
2. Kulikov, I., Chernykh, I., Vorobyov E., Elbakyan V., Vshivkova L. M2H3D code: Moving mesh hydrodynamics by means AVX-2 technology // *Commun. in Comput. and Inform. Sci.* 2021. V. 1413. P. 307–319. DOI: 10.1007/978-3-030-78759-2_26.
3. Annenkov, V., Berendeev, E., Volchok, E., Timofeev, I. Particle-in-cell simulations of high-power THz generator based on the collision of strongly focused relativistic electron beams in plasma // *Photonics* 2021. Vol. 8, 172. DOI: 10.3390/photonics8060172.
4. 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 Plasm.* 2021. Vol. 28, 013103. DOI: 10.1063/5.0029848.
5. Liseykina, T. V., Macchi, A., Popruzhenko, S. V. Quantum effects on radiation friction driven magnetic field generation // *Eur. Phys. J. Plus.* 2021. Vol. 136, 170. DOI: 10.1140/epjp/s13360-020-01030-2.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Kulikov, I. M. Mathematical simulation of turbulent combustion of carbon in the problems of white dwarf mergers and explosions of the type Ia supernovae // *J. of Appl. and Indust. Math.* 2021. V. 15, iss. 3. P. 1–8. DOI: 10.1134/S1990478921030017.
2. Kulikov, I. M. On a computational model of gravitational hydrodynamics with consideration of radiation transfer in the diffusion approximation using tetrahedral meshes // *J. of Appl. and Indust. Math.* 2021. Vol. 15, iss. 2. P. 277–284. DOI: 10.1134/S1990478921020083.
3. Volchok, E. P., Timofeev, I. V., Annenkov, V. V., Berendeev, E. A. Coherent THz emission produced in plasma by transversely modulated colliding laser beams // *2021 IEEE Intern. Conf. on Plasma Sci. (ICOPS)*. P. 1–1. DOI: 10.1109/ICOPS36761.2021.9588655.

4. Berendeev, E. A., Timofeev, I. V., Volchok, E. P., Annenkov, V. V. PIC simulations of high-power THz radiation produced by the collision of profiled plasma wakefields // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 2028 012008. DOI:10.1088/1742-6596/2028/1/012008.
5. Berendeev, E., Volchok, E. Luthien: A parallel PIC code for modeling the interaction of focused electron beams with plasma // Sokolinsky L., Zymbler M., (eds.) *Parallel Computational Technologies. PCT 2021. Commun. in Comput. and Inform. Sci.* 2021. Vol. 1437. Springer, Cham. DOI 10.1007/978-3-030-81691-9_16.
6. Boronina, M. A., Chernykh, I. G., Dudnikova, G. I., Genrikh, E. A., Vshivkov, V. A. Mathematical modelling of beam dynamics in diamagnetic confinement regime of open trap // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2028, 012020, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012020.
7. 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 // MSR-2020. *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1715. Art. Num. 012071. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012071.
8. 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 // MSR-2020. *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 1715. Art. Num. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012057.
9. Zagorulko Y., Zagorulko G., Snytnikov A., Glinskiy B., Shestakov V. Information-analytical system to support the solution of compute-intensive problems of mathematical physics on supercomputers // Malyshkin V. (eds) *Parallel Computing Technologies. PaCT 2021. Lect. Notes in Comput. Sci.* 2021. Vol. 12942. Springer, Cham. DOI 10.1007/978-3-030-86359-3_33.
10. Glinskiy, B., Sapetina, A., Snytnikov, A., Zagorulko, Y., Zagorulko, G. The automated construction of a scheme for solving compute-intensive problems based on the ontological approach and Semantic Web technologies // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2099 012022. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012022.
11. Vshivkov, V. A., Soloviev, A. A., Chernoshtanov, I. S., Efimova, A. A. Null collision Monte Carlo simulation model for particle-in-cell method // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, 2028(1), 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012005.
12. Voropaeva, E., Vshivkov, K., Vshivkova, L., Dudnikova, G., Efimova, A. New motion algorithm in the particle-in-cell method // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, 2028(1), 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012011.
13. Dudnikova G., Chernykh, I., Vshivkov, V. 3D numerical simulation of ribbon electron beam bending by relativistic proton bunch // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2028 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012016.
14. Grigoryev, V., Stoyanovskaya, O., Snytnikov, N. Supercomputer model of dynamical dusty gas with intense momentum transfer between phases based on OpenFPM library // *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2099, 012056. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2099/1/012056.
15. Kulikov, I., Chernykh, I., Boronina, M. On a simple verification test of codes for modelling of magnetohydrodynamic turbulence // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 2028. Art. Num. 012003. DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012003.
16. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Tutukov, A. A study of white dwarf shock detonation and type Ia supernova explosion // *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 2028. Art. Num. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012004.

17. Tchernykh, A., Facio-Medina, A., Pulido-Gaytan, B., Rivera-Rodriguez, R., Cortes-Mendoza, J. M., Radchenko, G., Babenko, M., Chernykh, I., Kulikov, I., Nesmachnow, S. Toward digital twins' workload allocation on clouds with low-cost microservices streaming interaction // Proc. 2020 Ivannikov Ispras Open Conf. (ISPRAS 2020). 2020. P. 115–121. DOI: 10.1109/ISPRAS51486.2020.00024.

18. Kulikov, I. M., Vorobyov, E. I., Chernykh, I. G., Elbakyan, V. G. Application of geodesic grids for modeling the hydrodynamic processes in spherical objects // J. of Appl. and Indust. Math. 2020. Vol. 14, iss. 4. P. 672–680. DOI: 10.1134/S1990478920040067.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Воропаева, Е. С., Вшивков, К. В., Вшивкова, Л. В., Дудникова, Г. И., Ефимова, А. А. Алгоритмы движения в методе частиц в ячейках // Выч. мет. и програм. 2021. № 22. С. 1–13. DOI: 10.26089/NumMet.v22r418.

2. Боронина, М. А., Вшивков, В. А., Киреев, С. Е. Модификация параллельного алгоритма для численного моделирования открытой магнитной ловушки // Вестн. НГУ. Сер.: Информ. технol. 2021. Т. 19, № 1. С. 15–25. DOI: 10.25205/1818-7900-2021-19-1-15-25.

3. Boronina, M. A., Chernykh, I., G., Dudnikova, G., I., Vshivkov, V. A. Numerical modelling of open magnetic trap using parallel computers // MSR-2021: thes. of the Intern. conf., Oct. 4–8, 2021. DOI: 10.24412/cl-35065-2021-1-01-66.

4. Glinskiy, B. M., Zhernyak, G. F., Zagorulko, G. B., Titov, P. A. Using ontologies for solving scientific problems (by example of geophysics) // Num. Meth. and Program. 2021. № 22(4). P. 333–343. DOI: 10.26089/NumMet.v22r422.

5. Глинский, Б. М., Сапетина, А. Ф., Снытников, А. В., Загорулько, Г. Б., Загорулько, Ю. А., Шестаков, В. К. Автоматизация построения схемы решения вычислительно сложных задач математической физики на суперкомпьютерах // Информ. и матем. технol. в науке и управлении. 2021. № 4 (24). С. 50–59. DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.005.

6. Сапетина, А. Ф., Глинский, Б. М., Мартынов, В. Н. Моделирование активного вибропросвечивания вулканической постройки для оценки возможности проведения мониторинга // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов: Труды 8-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Петропавловск-Камчатский, 26 сент. – 2 окт. 2021 г. / Отв. ред. Д. В. Чебров. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 293–297. ISBN 978-5-903258-45-1.

Свидетельства о регистрации в Роспатенте

1. Свидетельство № 2021665047. Программа для ЭВМ "MTRAP-21" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Ефимова А. А., Вшивков В. А., Боронина М. А., Дудникова Г. И., Генрих Е. А.

Участие в конференциях и совещаниях

1. The 4th Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes virtual, Новосибирск, 12–14 октября 2021 г. – 9 докладов, из них 4 пленарных

(Берендеев Е. А., Боронина М. А., Вшивков В. А., Вшивков К. В., Вшивкова Л. В., Генрих Е. А., Дудникова Г. И., Ефимова А. А., Куликов И. М., Черных И. Г.).

2. Конференция международных математических центров мирового уровня, Сочи, 9–13 августа 2021 г. – 2 доклада (Куликов И. М.).

3. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г. – 8 докладов, из них 1 пленарный (Берендеев Е. А., Боронина М. А., Винс Д. В., Вшивков В. А., Глинский Б. М., Дудникова Г. И., Ефимова А. А., Сапетина А. Ф., Соловьев А. А., Титов П. А., Черных И. Г.).

4. Parallel Computing Technologies (PaCT 2021), 13–18 сентября 2021 г., Калининград – 1 доклад (Глинский Б. М.).

5. 8-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием "Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов", Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021 г. – 1 доклад (Глинский Б. М., Сапетина А. Ф.).

6. Международная конференция "Иванниковские чтения", Нижний Новгород, 24–25 сентября 2021 г. – 2 доклада (Куликов И. М., Ломакин С. В., Сапетина А. Ф., Черных И. Г.).

7. International conference of numerical analysis and applied mathematics 2021, Родос (Греция), 20–26 сентября 2021 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

8. Национальный суперкомпьютерный форум 2021, Переславль-Залесский, 30 ноября – 3 декабря 2021 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

9. Научная конференция "Суперкомпьютерные дни в России", Москва, 27–28 сентября 2021 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

Участие в оргкомитетах конференций

1. Дудникова Г. И. – член программного комитета The 4th Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, Новосибирск, 12–14 октября 2021 г.;

2. Вшивков В. А. – председатель программного комитета The 4th Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, Новосибирск, 12–14 октября 2021 г.;

3. Боронина М. А.:

– член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.,

– член организационного комитета The 4th Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, Новосибирск, 12–14 октября 2021 г.,

– член программного комитета The 4th Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, Новосибирск, 12–14 октября 2021 г.;

4. Куликов И. М. – заместитель председателя программного комитета The 4th Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, Новосибирск, 12–14 октября 2021 г.

5. Глинский Б. М.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.,

- член программного комитета The 4th Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, Новосибирск, 12–14 октября 2021 г.,
- член программного комитета ПаВТ-2021, Волгоград, 30 марта – 1 апреля 2021 г.,
- член программного комитета "Суперкомпьютерные дни в России", Москва, 27–28 сентября 2021 г.;

6. Черных И. Г.:

- член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2021" (МНЧ-2021), Новосибирск, 4–8 октября 2021 г.;
- член программного комитета The 4th Virtual workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, Новосибирск, 12–14 октября 2021 г.,
- член программного комитета "Суперкомпьютерные дни в России", Москва, 27–28 сентября 2021 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 5
 Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 23
 Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 22
 Свидетельств о регистрации программ в Роспатенте – 1
 Докладов на конференциях – 26, в том числе 5 пленарных
 Участников оргкомитетов конференций – 13

Кадровый состав

1. Черных И. Г.	зав. лабораторией	к.ф.-м.н.
2. Берендеев Е. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
3. Боронина М. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
4. Винс Д. В.	н.с.	к.т.н.
5. Вшивков В. А.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
6. Вшивков К. В.	н.с.	Ph.D.
7. Генрих Е. А.	н.с.,	к.ф.-м.н.
8. Глинский Б. М.	г.н.с.	д.т.н.
9. Дудникова Г. И.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
10. Ефимова А. А.	м.н.с.	
11. Зернова Л. В.	ведущ. программист	
12. Кононов А. А.	электроник 1-й кат.	
13. Куликов И. М.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
14. Кучин Н. В.	гл. специалист по СПО	
15. Лисейкина Т. В.	с.н.с.	д.ф.-м.н.
16. Ломакин С. В.	гл. специалист по ИС	
17. Макаров И. Н.	ведущ. программист	
18. Сапетина А. Ф.	м.н.с.	
19. Снытников Н. В.	н.с.	к.ф.-м.н.
20. Соловьев А. А.	н.с.	к.т.н.

21. Судаков А. С. инженер

22. Титов П. А. м.н.с.

Берендеев Е. А., Винс Д. В., Сапетина А. Ф., Судаков А. С., Титов П. А. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

Берендеев Е. А. – доцент аспирантуры ИВМиМГ СО РАН, ст. преп. ММФ НГУ

Глинский Б. М. – профессор НГУ

Куликов И. М. – профессор НГТУ, доцент ММФ НГУ

Лисейкина Т. В. – доцент Института математики им. Никольского РУДН

Сапетина А. Ф. – ст. преп. ММФ НГУ

Руководство студентами

Воропаева Е. С. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Вшивков В. А.

Завьялов О. Р. – 5-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Куликов И. М.

Переладова А. Е. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Куликов И. М.

Руководство аспирантами

Пригарин В. Г. – 4-й год аспирантуры, НГТУ, руководитель Куликов И. М.

Судаков А. С. – 1-й год аспирантуры, ИВМиМГ, руководитель Вшивков В. А.

Ульяничев И. С. – 4-й год аспирантуры, НГТУ, руководитель Куликов И. М.

Защита дипломов

Завьялов О. Р. – бакалавр ФПМИ НГТУ, руководитель Куликов И. М.

Переладова А. Е. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Куликов И. М.