

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 2022 г.**

Новосибирск-2023

СОДЕРЖАНИЕ

Научно-организационная деятельность	3
Основные результаты научных исследований в 2022 г.	13
Лаборатория методов Монте-Карло	27
Лаборатория численного анализа стохастических дифференциальных уравнений	35
Лаборатория стохастических задач	42
Лаборатория вычислительной физики.....	57
Лаборатория математических задач химии	63
Лаборатория математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере	68
Лаборатория математического моделирования гидротермодинамических процессов в природной среде	92
Лаборатория вычислительных задач геофизики	112
Лаборатория обратных задач естествознания	123
Лаборатория математического моделирования волн цунами	130
Лаборатория геофизической информатики	139
Лаборатория системного моделирования и оптимизации	152
Лаборатория синтеза параллельных программ	161
Лаборатория суперкомпьютерного моделирования	177
Справочная информация	190

НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

В 2022 г. дипломами лауреата именной премии Правительства Новосибирской обл. в номинации "Лучший молодой исследователь" награждены д.ф.-м.н. Куликов И. М. и д.ф.-м.н. Пененко А. В.

Проведено 15 заседаний Ученого совета института, на которых были рассмотрены научные, кадровые и организационные вопросы, заслушаны научные доклады сотрудников Института.

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

Продолжена или начата работа по 8 грантам Российского научного фонда, руководители: д.ф.-м.н. Куликов И. М., к.ф.-м.н. Криворотько О. И., д.ф.-м.н. Сабельфельд К. К., д.ф.-м.н. Решетова Г. В., к.ф.-м.н. Черных И. Г., д.ф.-м.н. Шишленин М. А., д.ф.-м.н. Голубева Е. Н., к.ф.-м.н. Каргаполова Н. А.

Проводились работы по 7 проектам Российского фонда фундаментальных исследований (из них 4 инициативных, 3 международных) и проекту по международной программе "Горизонт 2020".

В 2022 г. в институте работали советы 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.), специальности 25.00.29 (физика атмосферы и гидросферы (физико-математические науки)) и 01.01.07 (вычислительная математика (физико-математические науки)); Д 003.061.02 (председатель чл.-корр. РАН Кабанихин С. И.), специальности 1.2.2 (математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические, технические науки)) и 2.3.5 (математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)); объединенный диссертационный совет Д 999.082.03 ИСИ СО РАН, ИМ СО РАН, ИВМиМГ СО РАН (председатель к.ф.-м.н. Марчук А. Г.), специальности 05.13.11 (математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (физико-математические науки)) и 05.13.17 (теоретические основы информатики (физико-математические науки)).

В 2022 г. состоялись две защиты с присуждением ученой степени доктора наук: Каргаполова Н. А. (ИВМиМГ СО РАН), Аверина Т. А. (ИВМиМГ СО РАН); а также три защиты с присуждением ученой степени кандидата наук: Якшина Д. Ф. (ИВМиМГ СО РАН), Петракова В. С. (СФУ, Красноярск), Куранаков Д. С. (ИВТ СО РАН).

В рамках сотрудничества с компанией "Хуавей" в 2022 г. были заключены следующие договоры: о развитии научно-образовательной экосистемы Huawei в Сибирском регионе на базе имеющегося оборудования Taishan 200 (модель 2280), Atlas 800 (модель 9000) и программного обеспечения openEuler и MindSpore; об исследовании АМГ предобусловливателя на кластере Kunpeng и разработке чип-совместимых алгоритмов для частичных матричных вычислений в обработке канальных матриц для задач однопользовательского и многопользовательского режимов связи в многоэлементных антенных решетках.

В 2022 г. ИВМиМГ СО РАН вошел в консорциумы Центров компетенций НТИ: "Геоданные и геоинформационные технологии" и "Технологии доверенного взаимодействия". ИВМиМГ СО РАН вступил в консорциум, координируемый Росатомом, по разработке отечественного программного обеспечения. Подписано соглашение о сотрудничестве РИЭПП и ИВМиМГ СО РАН. Создан консорциум научных организаций "Комплексные цифровые двойники ЦКП "СКИФ". Выполнен Договор РФЯЦ ВНИИЭФ на разработку прикладного ПО.

Институт является базовым для восьми кафедр университетов Новосибирска:

– четырех кафедр Новосибирского государственного университета (вычислительной математики, вычислительных систем, математических методов геофизики (механико-математический факультет), параллельных вычислений (факультет информационных технологий));

– трех кафедр Новосибирского государственного технического университета: параллельных вычислительных технологий (факультет прикладной математики и информатики), сетевых информационных технологий (факультет автоматизации и вычислительной техники) и геофизических систем (физико-технический факультет);

– кафедры математического моделирования и высокопроизводительных вычислений Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

В Институте проводится обучение в аспирантуре по четырем образовательным программам (специальностям), в 2022 г. проходили обучение очно 9 аспирантов, из них 1 окончил аспирантуру; приняты на обучение 2 человека.

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

Издательская деятельность:

– С 1998 г. издается "Сибирский журнал вычислительной математики", периодичность четыре номера в год. Главный редактор д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М., заместитель главного редактора Куликов И. М. Журнал индексируется в системах цитирования Web of Science и Scopus; импакт-фактор журнала 1,3.

– 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 1,215; квартиль журнала Q1.

– С 1995 г. издается журнал "Monte Carlo Methods and Applications", периодичность четыре номера в год. Главный редактор д.ф.-м.н. К. К. Сабельфельд. Журнал индексируется в системе цитирования Scopus; импакт-фактор журнала 0,356.

– 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 2022 г. проведены три международные конференции:

1. 18-я Международная Азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем", Киргизская Республика – Российская Федерация, 20–30 июля 2022 г.

Организаторы: Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК (Алматы, Республика Казахстан); Новосибирский государственный университет; Московский государственный университет геодезии и картографии (Москва).

2. Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Организаторы: Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН при поддержке Новосибирского государственного университета и Института вычислительной математики РАН им. Г. И. Марчука.

3. Международное рабочее совещание "Численные методы в магнитной газовой динамике и в физике плазмы: модели, методы, результаты", Новосибирск, 12–14 октября 2022 г.

Международные соглашения, контракты, гранты

Выполнялись либо были заключены три меморандума о взаимопонимании, три 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 (г. 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 Некоммерческим акционерным обществом Восточно-Казахстанским техническим университетом им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан).

Координаторы: от ИВМиМГ СО РАН – директор, д.ф.-м.н., профессор РАН М. А. Марченко; от НАО Восточно-Казахстанского технического университета им. Д. Серикбаева – ректор Ж. К. Шаймарданов.

Срок договора: 08.04.2022 г. – 08.04.2027 г.

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

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

Срок меморандума: 28.10.2015 г. – 28.10.2025 г.

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

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

Срок соглашения: 02.11.2015 г. – 02.11.2025 г.

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

Координаторы: от Школы математики Шанхайского университета финансов и экономики – ректор Джин Ченг (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 (г. Улаанбаатар, Монголия).

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

Срок договора: 21.07.2017 г. – 21.07.2023 г.

7. Соглашение о сотрудничестве в сфере образования, науки, научно-технической и инновационной деятельности в области математического моделирования и параллельных вычислительных технологий между Международным университетом инновационных технологий (г. Бишкек, Республика 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. – 10.10.2027 г.

8. Соглашение о сотрудничестве в области интернационализации высшего образования в области системного моделирования и оптимизации в информационных сетях и математического и компьютерного моделирования между университетом г. 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 добыче 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., профессор РАН М. А. Марченко.

Срок договора: 16.09.2019 г. – 15.09.2023 г.

10. Соглашение о сотрудничестве по совместным исследованиям в области 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 (г. Бишкек, Республика Кыргызстан).

Координаторы: от ИВМиМГ СО РАН – директор, д.ф.-м.н., профессор 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 г. Хельсинки (Финляндия) и ИВМиМГ СО РАН.

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

Срок меморандума: с 04.03.2020 г. – 04.03.2025 г.

12. Соглашение № MAR-ОАА21092100591747А на проведение работ по адаптации версии 1.0 решателя уравнения эйконала на серверном решении Хуавэй Atlas 800 между Компанией Хуавэй Технологии, ООО (г. Шеньчжэнь, 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., профессор РАН М. А. Марченко.

Срок соглашения: с 26.10.2021 г. – 26.10.2022 г.

13. Соглашение о единовременной инженерной работе по проведению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по первому этапу разработки программного обеспечения для моделирования вычислительной мета-оптики между ООО "СЧФотоника" (Тяньцзинь, Китай) и ИВМиМГ СО РАН.

Координаторы: от ООО "СЧФотоника" – генеральный директор Лэй Сунь (Lei Sun); от ИВМиМГ СО РАН – директор, д.ф.-м.н., профессор РАН М. А. Марченко.

Срок соглашения: с 26.08.2022 г. до завершения работ.

Выполнялись либо были получены гранты:

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

Зарубежный участник – университет г. Вены (Австрия).

Координаторы: руководители проекта с австрийской стороны – профессор Мануэль Юдель и профессор Эдуард Воробьёв; 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 – профессор Иван Димов; руководитель проекта с российской стороны – д.ф.-м.н. К. К. Сабельфельд (ИВМиМГ СО РАН).

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

3. Проект плано-целевого финансирования BR10965311 "Разработка интеллектуальных информационно-телекоммуникационных систем для городской инфраструктуры: транспорт, экология, энергетика и аналитика данных в концепте Smart City".

Зарубежный участник – ТОО "Astana IT-University" (г. Нур-Султан, Республика Казахстан).

Координаторы: научный координатор с казахской стороны – д.т.н., профессор Д. Ж. Ахмед-Заки; научный координатор с российской стороны – д.т.н., профессор В. Э. Малышкин (ИВМиМГ СО РАН).

Даты начала и окончания работ по теме: 12.10.2021 г. – 12.10. 2023 г.

Командирование по странам

В 2022 г. за рубеж командировано 8 сотрудников вместо одного в 2021 г.

1. Перепёлкин В. А., н.с. Совместные работы по теме "Разработка интеллектуальных информационно-телекоммуникационных систем для городской инфраструктуры: транспорт, экология, энергетика и аналитика данных в концепте Smart City", IT университет (г. Нур-Султан, Казахстан) с 22.02.2022 г. по 01.03.2022 г.

2. Городничев М. А., н.с. Совместные работы по теме "Разработка интеллектуальных информационно-телекоммуникационных систем для городской инфраструктуры: транспорт, экология, энергетика и аналитика данных в концепте Smart City", IT университет (г. Нур-Султан, Казахстан), с 22.02.2022 г. по 01.03.2022 г.

3. Черных И. Г., в.н.с. Участие в международной выставке-конференции "Высокопроизводительные системы – 2022" ("ISC HIGH PERFORMANCE'2022") (г. Гамбург, Германия), с 28.05.2022 г. по 03.06.2022 г.

4. Сабельфельд К. К., г.н.с. Совместные работы по теме "Исследование методов визуализации дислокаций", Институт твердотельной электроники (г. Берлин, Германия), с 12.06.2022 г. по 05.07.2022 г.

5. Родионов А. С., г.н.с. Подготовка и проведение 18-й Международной Азиатской школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем", выступление с пленарным докладом (г. Чолпон-Ата, Киргизская Республика), с 17.07.2022 г. по 24.07.2022 г.

6. Черных И. Г., в.н.с. Участие в 25-й Ежегодной международной конференции по физике элементарных частиц и космологии ("The 25th annual International Conference on Particle Physics and Cosmology" (COSMO'22))" (г. Рио-де-Жанейро, Бразилия), с 20 по 28 августа 2022 г.

7. Куликов И. М., в.н.с. Участие с докладом в конференции "Перспективы низкочастотной радиоастрономии в Южной Америке" ("Prospects for Low Frequency Radio Astronomy in South America") (г. Буэнос-Айрес, Аргентина), с 08.11.2022 г. по 05.12.2022 г.

8. Черных И. Г., в.н.с. Участие с докладом в конференции "Перспективы низкочастотной радиоастрономии в Южной Америке" ("Prospects for Low Frequency Radio Astronomy in South America") (г. Буэнос-Айрес, Аргентина), с 08.11.2022 г. по 27.11.2022 г.

Приём зарубежных учёных и представителей фирм

В 2022 г. было принято 23 иностранных гостя из 3 стран: Китай – 16, Казахстан – 2, Узбекистан – 5. Из них: студентов – 12 (8 из Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай), аспирантов – 4, сотрудников новосибирского и московского представительств китайской компании ООО Техкомпания Хуавэй – 5.

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.

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

2. 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.

3. 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, д.ф.-м.н. Пригарин С. М.

4. 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, д.ф.-м.н. Пригарин С. М.

5. 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, д.ф.-м.н. Пригарин С. М.

6. 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, д.ф.-м.н. Огородников В. А.

7. ВАН Синьюй / WANG Xinyu, студентка Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай.

Срок визита: 30.11.2021 г. – 30.07.2023 г.

Цель визита: обучение по магистерской программе механико-математического факультета в области вычислительной математики Новосибирского государственного университета на базе

НГУ и ИВМиМГ СО РАН. Подготовка выпускной квалификационной работы за 2-й год магистратуры по теме "Численный анализ декомпозиции области для эллиптических краевых задач".

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

8. ХЭ Шичжэ / HE Shizhe, гражданин Китая, студент ММФ НГУ.

Срок визита: 27.12.2021 г. – 30.07.2023 г.

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

Ответственный: в.н.с. лаборатории стохастических задач, д.ф.-м.н. Пригарин С. М.

9. СУ Сюанью / SU Xuanyou, студент Северо-Китайского электроэнергетического университета, г. Баодин, Китай.

Срок визита: 01.02.2022 г. – 30.07.2024 г.

Цель визита: обучение по программе бакалавриата механико-математического факультета Новосибирского государственного университета (специализация "вычислительная математика") на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН.

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

Делегация ООО Техкомпания Хуавэй, Китай (10.03.2022 г.):

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

11. Суй ХУН / Sui HONG, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, г. Москва;

12. Сун ЮЙИН / Song YUYING, сотрудник представительства ООО Техкомпания Хуавэй, г. Москва;

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

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

Срок визита: 10.03.2022 г.

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

Ответственный – зам. директора по информационным технологиям Маринин И. В.

15. Ибраева Айгуль Аскарровна, докторант 2-го курса Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилёва, г. Нур-Султан (Казахстан).

Срок визита: 20.04.2022 г. – 01.06.2022 г.

Цель визита: прохождение научной стажировки (дистанционно) по образовательной программе 8D06105 – "Математическое и компьютерное моделирование".

Ответственный – г.н.с. лаборатории геофизической информатики, д.ф.-м.н. Фатьянов А. Г.

16. Вязигин Степан Витальевич, аспирант Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы (Казахстан).

Срок визита: 14.06.2022 г. – 09.09.2022 г.

Цель визита: получение консультаций по теме исследований "Построение, оптимизация и обоснование моделей реорганизации программ для мультимедийных систем типа SVM",

совместные исследовательские работы по теме "Разработка систем параллельного программирования".

Ответственный – зав. лаб. лаборатории синтеза параллельных программ, д.ф.-м.н. Малышкин В. Э.

17. Шлымбетов Нурлыбай Хамдулаевич, гражданин Узбекистана, аспирант первого года обучения ММФ НГУ.

Срок визита: 14.09.2022 г. – 31.12.2024 г.

Цель визита: обучение по программе аспирантуры ММФ НГУ на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН, получение консультаций по численному статистическому моделированию, посещение научного семинара "Методы Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике", прохождения курсов "Методы Монте-Карло" и "Теоретические основы и прикладные аспекты стохастического моделирования", проведение научных исследований "Выбор аппроксимационных базисов и специальных систем функций в вычислительных алгоритмах приближения вероятностных плотностей".

Ответственный – в.н.с. лаборатории стохастических задач, д.ф.-м.н. Войтишек А. В.

18. ЧЖАН Тао / CHZHAN Тао, гражданин Китая, магистрант первого года обучения ММФ НГУ.

Срок визита: 14.09.2022 г. – 31.12.2024 г.

Цель визита: обучение по магистерской программе ММФ НГУ на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН по темам "Методы Монте-Карло" и "Теоретические основы и прикладные аспекты стохастического моделирования". Научные исследования по теме "Применение принципа уравнивания вероятностей в вычислительных алгоритмах метода дискретной суперпозиции".

Ответственный – в.н.с. лаборатории стохастических задач, д.ф.-м.н. Войтишек А. В.

19. ЧАО Хуэй / CHAO Hui, гражданка Китая, магистрант первого года обучения ММФ НГУ.

Срок визита: 14.09.2022 г. – 31.12.2024 г.

Цель визита: обучение по магистерской программе ММФ НГУ на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН по темам "Методы Монте-Карло" и "Теоретические основы и прикладные аспекты стохастического моделирования". Научные исследования по теме "Сравнительный анализ зиккурат-метода и двустороннего метода исключения".

Ответственный – в.н.с. лаборатории стохастических задач, д.ф.-м.н. Войтишек А. В.

20. Маткурбанов Тулкин, гражданин Узбекистана, аспирант ММФ НГУ.

Срок визита: 29.09.2022 г. – 30.06.2023 г.

Цель визита: обучение на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН. Обсуждение и проведение совместных работ по теме "Разработка моделей и алгоритмов оптимизации сетей мониторинга больших территорий при наличии мобильных узлов", выполняемой в рамках основной тематики лаборатории СМиО.

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

21. Холияров Умирзок Алаёрович, гражданин Узбекистана, магистрант ММФ НГУ.

Срок визита: 01.11.2022 г. – 01.11.2024 г.

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

работы по теме "Имитационное моделирование", подготовка курсовой работы по теме "Моделирование течения плазмы в открытой ловушке".

Ответственный – д.ф.м.н. лаборатории компьютерного моделирования, д.ф.-м.н. Вшивков В. А.

22. Аманбаев Хушнудбек Сапабой угли, гражданин Узбекистана, магистрант НГТУ.

Срок визита: 26.12.2022 г. – 01.07.2023 г.

Цель визита: написание магистерской диссертации на базе лаборатории вычислительных задач геофизики по теме "Моделирование сейсмоакустических волн сингулярным источником, действующим на границе жидкого слоя и упругого полупространства".

Ответственный – и.о. зав. лабораторией вычислительных задач геофизики, д.ф.-м.н. Имомназаров Х. Х.

23. Палванов Шухрат Гайрат угли, гражданин Узбекистана, магистрант НГТУ.

Срок визита: 26.12.2022 г. – 01.07.2023 г.

Цель визита: написание магистерской диссертации на базе лаборатории вычислительных задач геофизики по теме "Исследование распространения нелинейных волн в двухжидкостной среде без давления".

Ответственный – и.о. зав. лабораторией вычислительных задач геофизики, д.ф.-м.н. Имомназаров Х. Х.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2022 г.

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

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

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

Для модели двойной пористости нами разработан подход, не требующий наложения дополнительных условий, приводящих к однозначности давления. В основе подхода лежит расширенная обобщенная формулировка системы законов сохранения массы и импульса, использующая специальный дополнительный функционал. При этом в виде набора теорем даны ответы на вопросы о размерности ядра оператора исходной задачи и ее однозначной разрешимости в подпространстве, о корректности расширенной формулировки, эквивалентности исходной и расширенной формулировок, однозначной разрешимости сеточной задачи, построенной смешанным методом конечных элементов. Данная методика является составной частью модели нестационарного процесса, численные результаты для которого приведены на рис. 1, 2.

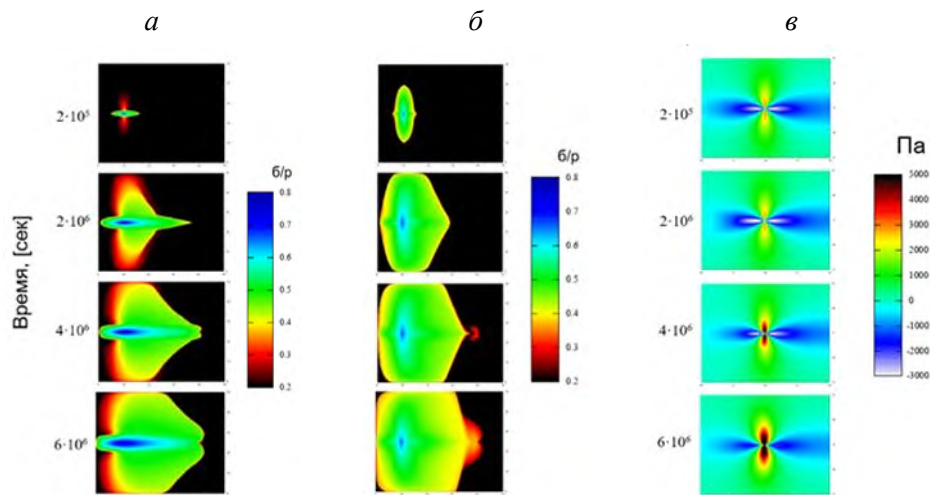


Рис. 1: Вытеснение нефти водой в анизотропной двухпористой среде с заданными дебитами скважин: *a* – водонасыщенность в порах; *б* – водонасыщенность в трещинах; *в* – разность давлений в порах и в трещинах в окрестности эксплуатационной скважины в различные моменты времени

Синтез, маршрутизация и параллельная оптимизация семейств циркулянтных сетей

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

Для сетей на кристалле с топологией оптимальных циркулянтных сетей степени четыре разработаны новые эффективные алгоритмы маршрутизации константной сложности, позволяющие сократить время работы и требуемую память по сравнению с известными алгоритмами. Проведено экспериментальное исследование новых алгоритмов маршрутизации, получены оценки

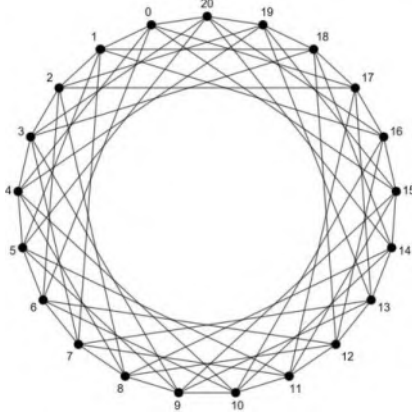


Рис. 2. Пример циркулянтной сети

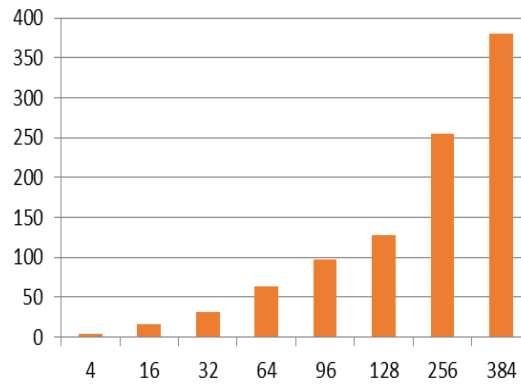


Рис. 3. Ускорение для числа ядер кластера Kunpeng

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

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

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

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

- автоматический сбор, обработку, анализ и визуализацию эпидемиологических временных данных (выявленные случаи заболевания, госпитализированные, критические, умершие, протестированные в зависимости от возраста) и основных пассажиропотоков, полученных в ходе комплексного синтаксического анализа в период с 2019 по 2022 гг.;

- идентификацию менее чувствительных эпидемиологических параметров на основе решения обратных задач для дифференциальных моделей, описываемых системами обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений "реакции-диффузии" (в случае достаточного количества данных пассажиропотоков); получение базового краткосрочного сценария распространения заболевания в регионе;

- идентификацию чувствительных параметров распространения при оцененных общих параметрах на основе решения обратной задачи для агентной модели, учитывающей штамм вируса, введенные ограничительные меры и возрастные ограничения;

- построение сценариев распространения COVID-19 в зависимости от ограничительных мер в регионе.



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

Отличительная особенность системы – ежедневное обновление эпидемиологических данных и оценка возможной вспышки заболевания на основе моделирования, а также оценка эффективности ограничительных мер по сдерживанию эпидемии в регионе. В настоящее время результаты работы системы для Новосибирской обл. и регионов Сибирского федерального округа доступна в интернете по адресу <https://covid19-modeling.ru/>.

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

Результаты исследований изложены в докладах на конференциях:

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

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

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

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

С помощью специальных теоретических и численных оценок определяется параметр k степенной зависимости детерминистического слагаемого $L_2(m)$ среднеквадратической погрешности $L(m, n)$, где m – длина отрезка проекционного разложения, n – объем статистической выборки траекторий цепи Маркова, используемой для оценки коэффициентов a_i , $i = 0, \dots, 1, m$. Особую роль при этом играет соотношение $k \approx k_i = \ln(b_i^2/b_{i+1}^2)/\ln((i+1)/i) - 1$, возможно, реализуемое при $i_1 \leq i \leq i_2$, где $b_i^2 = a_{2i}^2 + a_{2i+1}^2$. Для минимизации величины $L(m, n)$ при фиксированном n с учетом вероятностного слагаемого $L_1(m, n)$ на основе построенных в работе аналитических соотношений используется $k = \bar{k}_i$. Предлагаемая методика успешно апробирована в тестовой задаче, близкой к проблеме Милна с индикатрисой Хеньи – Гринштейна. Полученные оценки k_i представлены в таблице.

Значения k_i в тестовой задаче

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

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

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

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

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

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

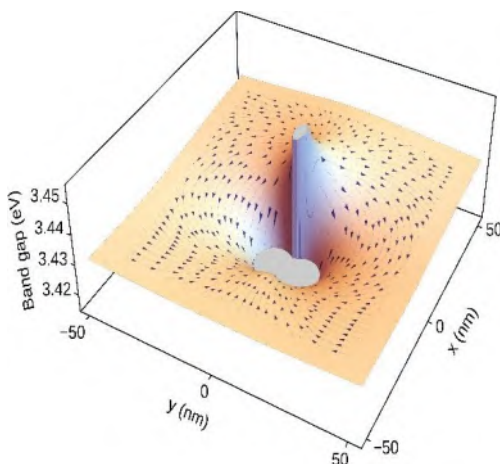


Рис. 5: Структура пьезоэлектрического поля вокруг дислокаций

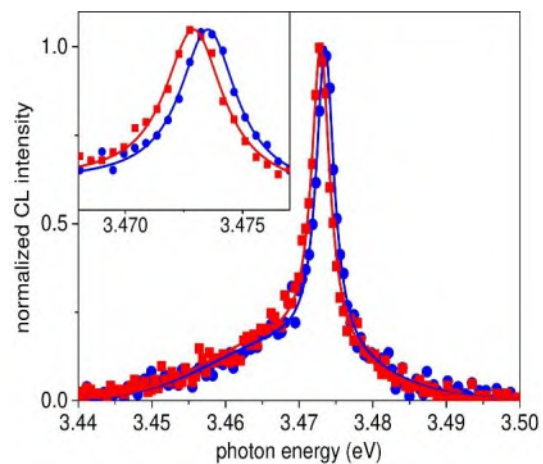


Рис. 6: Интенсивность катодоллюминесценции

катодоллюминесцентной визуализации дислокаций и других дефектов в полупроводниковых материалах.

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

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

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

Д.ф.-м.н. Гусев С. А.

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

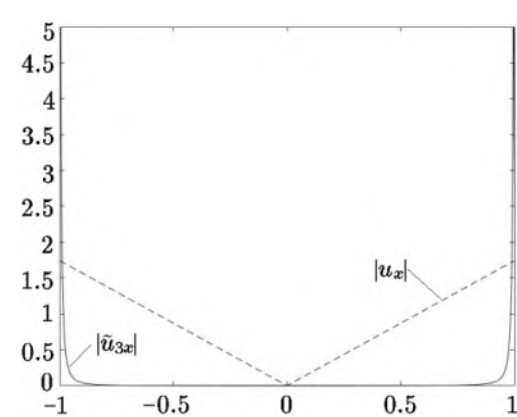


Рис. 7: Норма градиента решения исходной краевой задачи (пунктирная линия), преобразованной краевой задачи (сплошная линия)

При этом значение дисперсии зависит от матрицы диффузии и градиента решения краевой задачи. Преобразование краевой задачи приводит к уменьшению нормы градиента решения краевой задачи на большей части области ее определения, что приводит к уменьшению дисперсии оценки функционала.

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

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

Д.ф.-м.н. Крупчатников В. Н.

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

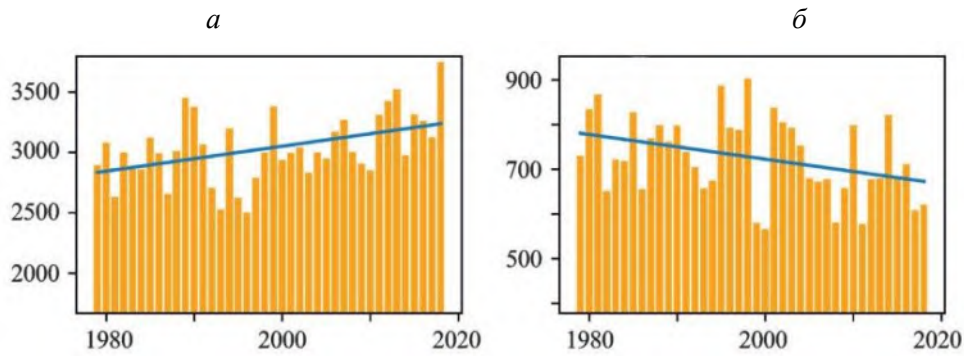


Рис. 8: АС-тип RWB (а); С-тип RWB (б)

струйных течений, фазой Арктического колебания (АО), внезапным стратосферным потеплением и блокирующими явлениями. Атмосферные блокинги представляют собой квазистационарный гребень волны Россби большой амплитуды, который блокирует движение циклонов. Они часто связаны с квазистационарными антициклонами синоптического масштаба большой амплитуды во внетропических широтах. Из полученных результатов можно сделать вывод о росте явлений блокирования, которые связаны с региональной экстремальной погодой – волнами тепла в летний сезон и холода в зимний сезон.

Результаты исследований изложены в докладах на конференциях:

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

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

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

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

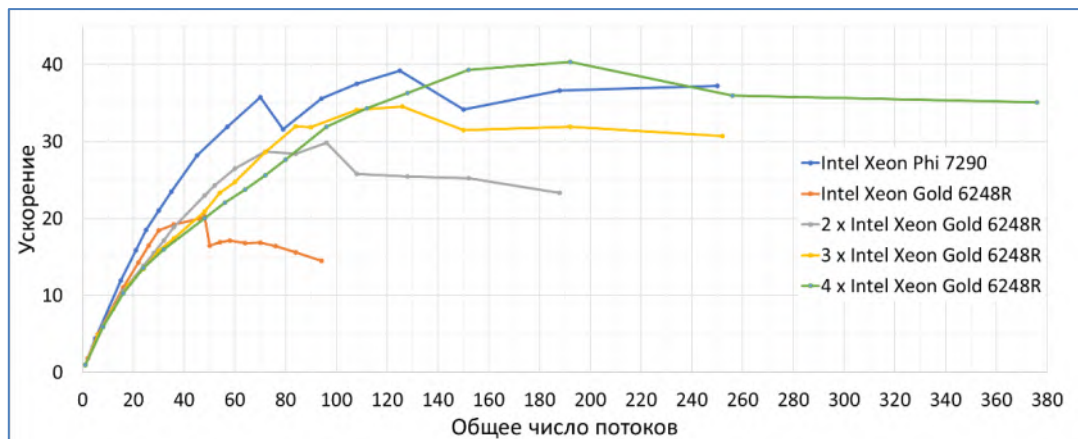


Рис. 9: Ускорение решения обратной задачи на различных конфигурациях кластера НКС-1П ССКЦ

Результаты исследований изложены в докладах на конференциях:

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

Цифровая платформа для комплексного геофизического мониторинга Байкальской природной территории

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

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

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

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



Рис. 10: Цифровая платформа для комплексного геофизического мониторинга

Результаты исследований изложены в докладах на конференциях:

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

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

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

Математическое моделирование протяженных электронно-оптических систем с интенсивными пучками приводит к решению самосогласованной нелинейной задачи, включающей расчет электрических и магнитных полей, траекторий заряженных частиц и объемного заряда. Под протяженной понимается система, размер которой в направлении движения пучка намного больше поперечного размера. Применение традиционных вычислительных подходов к моделированию таких систем не дает удовлетворительных результатов. В настоящей работе предложены новые алгоритмы и технологии, направленные на повышение точности и снижение времени расчетов. Они основаны на методе декомпозиции области, который применяется в трех предназначениях.

С помощью предлагаемых алгоритмов и технологий получены результаты моделирования сложной практической системы, дающие хорошее совпадение с результатами натуральных экспериментов. На рис. 11 приведены траектории пучков в моделируемой системе.

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

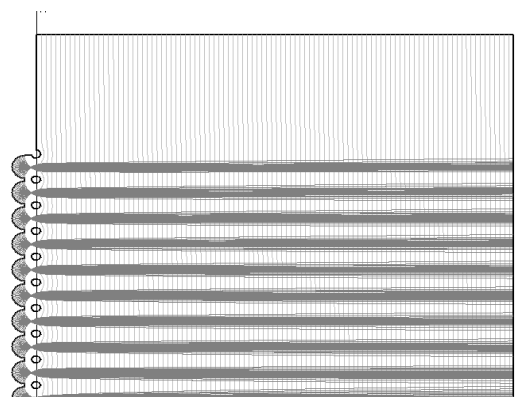


Рис. 11: Траектории пучков в моделируемой системе

Реконструкция рассеивающих объектов субсейсмического масштаба методом зеркального обращения времени

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

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

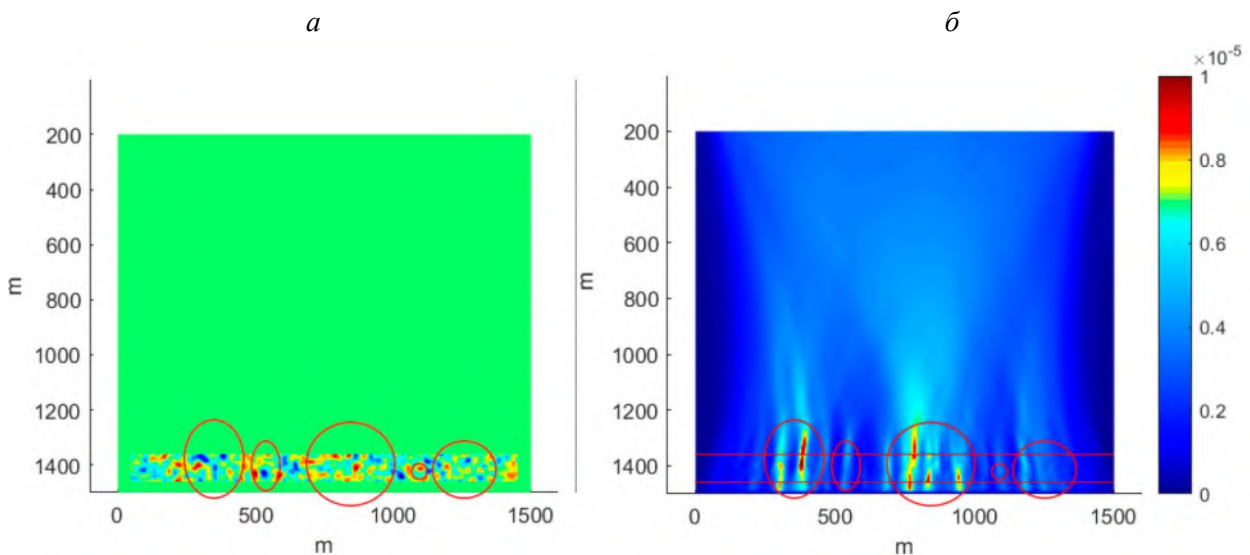


Рис. 11: Результаты моделирования: *a* – начальное распределение скорости V_p в случайно неоднородном слое; *б* – распределение полной энергии волнового поля методом TRM

Построение численной модели Камчатского цунами 4 ноября 1952 г.

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

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

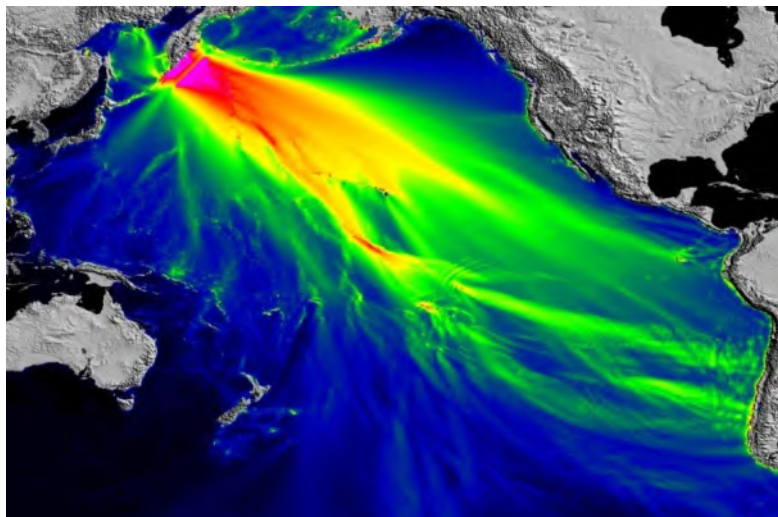


Рис. 12: Расчетная диаграмма максимальных высот Камчатского цунами 4 ноября 1952 г.

подхода заключается в использовании специализированной платы с учетом интенсивности потоков данных при расчете динамики волны по разностной схеме МакКормака. Адаптация алгоритма к FPGA осуществлена в сотрудничестве с ИАЭ СО РАН. Использование такой вычислительной архитектуры позволило достичь ускорения расчетов более чем в 200 раз по сравнению с моделированием на аналогичном компьютере без FPGA платы

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

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

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

Использование современных суперЭВМ накладывает значительные ограничения на минимизацию межпроцессных коммуникаций при реализации программных кодов на архитектурах с распределенной памятью. С использованием технологии Coarray Fortran разработан новый программный код, масштабируемость которого достигает 92 % при использовании 192 процессов, что соответствует MPI кодам. Характерное число потоков, выполняющихся над общим полем памяти в современных суперЭВМ, достигает нескольких сотен. Для повышения производительности многопоточной программы были использованы шаблоны компоновки данных Intel SDLT и средства автоматической векторизации современного стандарта OpenMP на основе технологий AVX-512. Их использование позволило на порядок повысить производительность вычислений в рамках

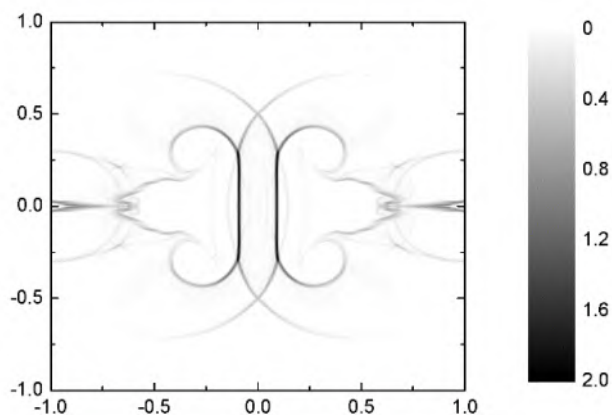


Рис 13. Шлирен безразмерной функции плотности в экваториальной плоскости при взаимодействии двух релятивистских джетов

Построение численных моделей таких экстремальных событий имеет большое значения для правильной оценки уровня цунамиопасности для протяженных участков побережья Мирового океана. В данной работе при построении такой модели и ее реализации для всего тихоокеанского бассейна использован численный метод расчета цунами в рамках нелинейной модели мелкой воды с применением вентильной матрицы, программируемой пользователем (FPGA). Суть

одного процесса. В то же время повышение производительности требует значительного увеличения энергопотребления процессора. Нами разработана пошаговая методология расчета энергопотребления с использованием аппаратных возможностей Intel и программного обеспечения Intel VTune с оценкой углеродного следа от высокопроизводительного оборудования с водяным охлаждением при его вычислительной нагрузке кодами для моделирования лабораторной и космической плазмы. Использование систем с жидкостным охлаждением позволило на 25 % снизить энергопотребление по сравнению с воздушным охлаждением. Использование методики расчета энергопотребления позволяет найти оптимальное с точки зрения значения Флопс/Ватт число ядер в каждом узле используемого суперкомпьютера для проведения вычислительных экспериментов.

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

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

Беляев Н. А.

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

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

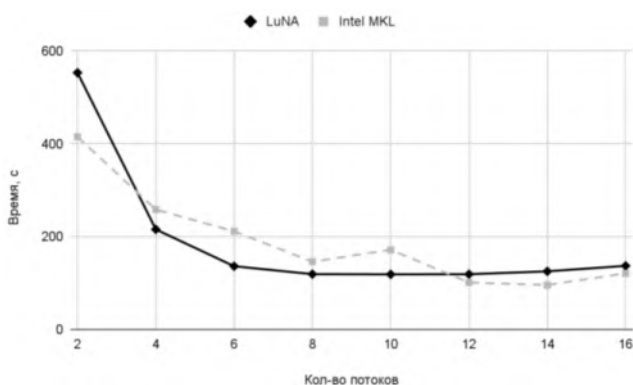


Рис. 14: Сравнение производительности параллельной программы, автоматически сконструированной системой LuNA, с библиотечной реализацией параллельного умножения разреженной матрицы на вектор в составе библиотеки Intel MKL

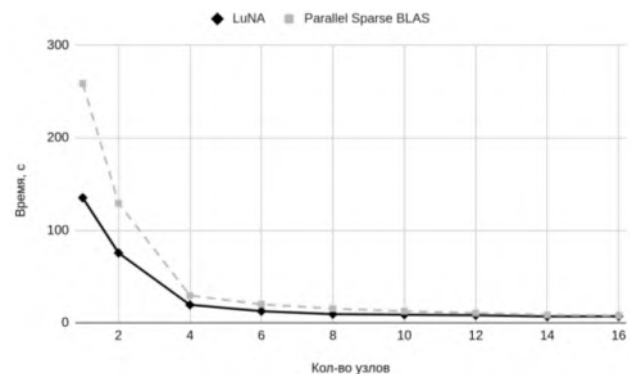


Рис. 15: Сравнение производительности параллельной программы, автоматически сконструированной системой LuNA, с библиотечной реализацией параллельного умножения разреженной матрицы на вектор в составе библиотеки Parallel Sparse BLAS

незначительно уступает реализации этого численного алгоритма в библиотеке Intel MKL и превосходит производительность реализации в библиотеке Parallel Sparse BLAS.

Публикации

1. Ivanov, M. I., Kremer, I. A., Laevsky, Yu. M. Solving the pure Neumann problem by a mixed finite element method // *Num. Analysis and Appl.* 2022. V. 15, iss. 4. P. 316–330. DOI: 10.1134/S1995423922040048. (IF 0,581).
2. Ivanov, M. I., Kremer, I. A., Laevsky Yu. M. On non-uniqueness of pressures in problems of fluid filtration in fractured-porous media // *J. Comput. and Appl. Math.* [Electron. resource]. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.115052>. (IF 2,239).
3. Monakhova, E. A., Monakhov, O. G., Romanov, A. Yu. Routing algorithms in optimal degree four circulant networks based on relative addressing: Comparative analysis for networks-on-chip // *IEEE Trans. Network Sci. and Engin.* 2022. P. 1–13. DOI: 10.1109/TNSE.2022.3211985. (IF 5.033; WoS, Q1).
4. Монахова, Э. А., Монахов, О. Г. Построение серий семейств циркулянтных сетей степени шесть // *Дискр. анализ и исслед. опер.* 2022. Т. 29, № 4. С. 59–76. DOI: 10.33048/daio.2022.29.743. (IF 0.294; WoS RSCI, Scopus Q2).
5. Монахова, Э. А., Монахов, О. Г. Эффективный алгоритм поиска кратчайших путей в плотных Гауссианских сетях // *Прикл. дискр. матем.* 2022. № 58. С. 94–104. DOI 10.17223/20710410/58/9. (IF 0.408; WoS, Scopus Q4).
6. Monakhova, E., Monakhov, O., Lezhnev, E., Romanov, A. Optimal routing algorithm in dense Gaussian networks-on-chip // *Intern. Conf. on Elect., Commun. and Mechatron. Engin. (ICECCME), Maldives, Nov. 16–18, 2022.* DOI: <https://doi.org/10.1109/ICECCME55909.2022.9988159>. (Scopus).
7. Monakhov, O., Monakhova, E. Parallel genetic algorithm for synthesis of optimal circulant networks on Kunpeng processors // *Intern. Conf. IEEE SIBIRCON 2022 (OPCS 2022), Novosibirsk, Nov. 2022.* DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017065. (Scopus).
8. Krivorotko, O., Zyatkov, N. Y. Data-driven regularization of inverse problem for SEIR-HCD model of COVID-19 propagation in Novosibirsk region // *Euras. J. Math. and Comput. Appl.* 2022. V. 10, iss. 1. P. 51–68. <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2022-10-1-51-68>.
9. Petrakova, V., Krivorotko, O. Mean field game for modeling of COVID-19 spread // *J. Math. Analysis and Appl.* 2022. V. 514, iss. 1. 126271. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2022.126271>.
10. Свидетельство № 2022664244. Программа для ЭВМ "Автоматизированная программа для прогнозирования распространения COVID-19 в регионах Российской Федерации на основе усвоения данных в модели SEIR-HCD" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Зятьков Н. Ю., Криворотько О. И., Неверов А. В. Дата регистрации 27.07.2022.
11. Свидетельство № 2022662669. Программа для ЭВМ "Моделирование распространения COVID-19 на основе модели игры среднего поля" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Петракова В. С., Криворотько О. И. Дата регистрации 21.07.2022.
12. Михайлов, Г. А., Корда, А. С., Рогазинский, С. В. Построение эффективных рандомизированных проекционных оценок решений интегральных уравнений на основе полиномов Лежандра // *Доклады РАН. Математика, информатика, процессы управления.* 2022. Т. 507, № 1. С. 81–85. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2686954322700059>. (Wos, Scopus).

13. Korda, A. S., Mikhailov, G. A., Rogasinsky, S. V. Construction and optimization of numerically-statistical projection algorithms for solving integral equations // *RJNAMM*. 2022. V. 37. No. 5. P. 213–219. <https://doi.org/10.1515/rnam-2022-0018>. (Wos, Scopus).
14. Jahn, U. V., Kaganer, M., Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E., Laehnemann, J., Pfueller, C., Cheze, C., Biermann, K., Calarco, R., Brandt O. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. I: Temperature-dependent generation volume // *Phys. Rev. Appl.* 2022. V. 17. Art. 024017.
15. Brandt, O., Kaganer, V. M., Laehnemann, J., Flissikowski, T., Pfueller, C. K., Sabelfeld, K., Kireeva, A. E., Cheze, C., Calarco, R., Grahn, H., Jahn, U. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. II: Ambipolar versus exciton diffusion // *Phys. Rev. Appl.* 2022. V. 17. Art. 024018. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.024018.
16. Laehnemann, J., Kaganer, V. M., Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E., Jahn, U., Cheze, C., Calarco, R., Brandt O. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. III: Nature of nonradiative recombination at threading dislocations // *Phys. Rev. Appl.* 2022. V. 17. Art. 024019. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.024019.
17. Гусев, С. А. О дисперсии оценки функционала от диффузионного процесса в области с отражающей границей // *СибЖВМ*. 2022. Т. 25, № 4. С. 359–369.
18. Gochakov, A. V., Antokhina, O. Yu., Krupchatnikov, V. N., Martynova, Yu. V. Long-term variability of Rossby wave breaking in the subtropical jet stream area // *Rus. Meteorol. and Hydrol.* 2022. V. 47, No. 2. P. 79–88.
19. Martynova, Yu. V., Krupchatnikov, V. N., Gochakov, A. V., Antokhina O. Yu. Relationship between anomalies of the rate of snow cover formation in Western Siberia and atmospheric dynamics in the Northern Hemisphere in the autumn-winter season // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. V. 58, No. 1, P. 95–109.
20. Penenko, A., Rusin, E. Parallel implementation of a sensitivity operator-based source identification algorithm for distributed memory computers // *Math.* 2022. V. 10, 4522. <https://doi.org/10.3390/math10234522>.
21. Григорюк, А. П., Брагинская, Л. П., Ковалевский, В. В., Семинский, И. К. Цифровая платформа для комплексного геофизического мониторинга Байкальской природной территории // *Материалы 1-й Всерос. науч. конф. "Добрецовские чтения: наука из первых рук"*, Новосибирск, 1–5 авг. 2022 г. С. 31–34.
22. Григорюк, А. П., Брагинская, Л. П., Семинский, И. К., Семинский, К. Ж., Ковалевский, В. В. Цифровая платформа для интеграции и анализа данных геофизического мониторинга Байкальской природной территории // *Электрон. библиотеки*. 2022. № 5. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2022-25-4-303-316>.
23. Козырев, А. Н., Свешников, В. М. Математическое моделирование интенсивных пучков заряженных частиц в протяженных электронно-оптических системах // *Матем. модел.* 2022. Т. 34, № 3. С. 71–84. <https://doi.org/10.20948/mm-2022-03-04>.
24. Reshetova, G., Galaktionova, A. Reconstruction of subsurface scattering objects by the time reversal mirror // *Sib. Electron. Math. Rep.* 2022. V. 19, iss. 2. P. 517–527. DOI: <https://doi.org/10.33048/semi.2022.19.043>.
25. Галактионова, А. А., Решетова, Г. В. Реконструкция рассеивающих объектов путем зеркального обращения времени // *Геофизика*. 2022. № 3. С. 76–81.

26. Галактионова, А. А., Решетова, Г. В. Метод зеркального обращения времени в применении к задаче реконструкции рассеивающих объектов // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения-2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. С. 66–67. DOI: 10.24412/c1-35065-2022-1-00-81.

27. Галактионова, А. А. Применение метода зеркального обращения времени для реконструкции рассеивающих объектов // 23-я Уральская молодежная научная школа по геофизике : Сб. науч. материалов. С. 38–42. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2022.

28. Lavrentiev, M., Lysakov, K., Marchuk, An., Oblaukhov, K., Shadrin, M. Hardware/software solution for low power evaluation of tsunami danger // J. Low Power Electron. and Appl. 2022. V. 12, iss. 1. Art. 6. <https://doi.org/10.3390/jlpea12010006>.

29. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Prigarin, V., Sapetina, A., Ulyanichev, I., Zavyalov, O. A new parallel code based on a simple piecewise parabolic method for numerical modeling of colliding flows in relativistic hydrodynamics // Math. 2022. V. 10, iss. 11. Art. 1865. DOI: 10.3390/math10111865.

30. Akimova, E., Misilov, V., Kulikov, I., Chernykh, I. OMPEGAS: optimized relativistic code for multicore architecture // Math. 2022. V. 10, iss. 11. Art. 2546. DOI: 10.3390/math10142546.

31. Chernykh, I., Kulikov, I., Vshivkov, V., Genrikh, E., Weins, D., Dudnikova, G., Chernoshtanov, I., Boronina, M. Energy efficiency of a new parallel PIC code for numerical simulation of plasma dynamics in open trap // Math. 2022. V. 10, iss. 11. Art. 3684. DOI: 10.3390/math10193684.

32. Беляев, Н. А. Автоматическое конструирование высокопроизводительных параллельных программ для задач разреженной линейной алгебры в системе LuNA // Пробл. информ. 2022, № 3. С. 46–60. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-3-46-60.

ЛАБОРАТОРИЯ МЕТОДОВ МОНТЕ-КАРЛО

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

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

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

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

С помощью специальных теоретических и численных оценок определяется параметр k степенной зависимости детерминистического слагаемого $L_2(m)$ среднеквадратической погрешности $L(m, n)$, где m – длина отрезка проекционного разложения, а n – объем статистической выборки траекторий цепи Маркова, используемой для оценки коэффициентов $a_i, i = 0, \dots, 1, m$. Особую роль при этом играет соотношение $k \approx \bar{k}_i = \ln(b_i^2 / b_{i+1}^2) / \ln((i+1)/i) - 1$, возможно реализуемое при $i_1 \leq i \leq i_2$, где $b_i^2 = a_{2i}^2 + a_{2i+1}^2$. Для минимизации величины $L(m, n)$ при фиксированном n с учетом вероятностного слагаемого $L_1(m, n)$ на основе построенных в работе аналитических соотношений используется $k = \bar{k}_i$. Предлагаемая методика успешно апробирована в тестовой задаче, близкой к проблеме Милна с индикатрисой Хеньи – Гринштейна. Полученные оценки k_i представлены в табл. 1

Таблица 1: Значения k_i в тестовой задаче

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

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

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Михайлов, Г. А., Корда, А. С., Рогазинский, С. В. Построение эффективных рандомизированных проекционных оценок решений интегральных уравнений на основе полиномов Лежандра // Докл. РАН. Матем., информ., проц. управления. 2022. Т. 506. № 6. (Wos, Scopus, РИНЦ).

2. Korda, A. S., Mikhailov, G. A., Rogasinsky, S. V. Construction and optimization of numerically-statistical projection algorithms for solving integral equations // RJNAMM. 2022. V. 37, No. 5. P. 213–219. <https://doi.org/10.1515/rnam-2022-0018> (Wos, Scopus, РИНЦ).

Результаты исследований представлены на конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 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 НИР 0251-2022-0002.

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

Этап 2022 г.

1. Однородные изотропные случайные поля $\sigma(\mathbf{r})$, $\mathbf{r} \in D$, можно рассматривать как естественные математические модели оптической плотности активной части D случайно возмущенной физической размножающей частицы системы. Для решения задач теории переноса наиболее подходящими являются мозаичные модели $\sigma(\mathbf{r})$, основанные на случайном разбиении пространства с независимым выбором значения σ в каждом из элементов разбиения.

Детальные численные исследования показали, что осредненная вероятность прохождения частицы в значительной степени определяется корреляционным радиусом $L = \int_0^\infty k(l)dl$, где $k(l)$ – коэффициент корреляции значений $\sigma(\mathbf{r})$ и $\sigma(\mathbf{r}')$ при $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| = l$ и одномерным распределением среды. В связи с этим для исследования осредненного потока частиц используется имеющее простой геометрический смысл мозаичное поле Вороного. Оно строится на основе базового пуассоновского точечного потока $\{\mathbf{r}_i\}$, $i = 1, 2, \dots$ интенсивности λ_p , который определяет разбиение пространства на ячейки, каждая из которых является множеством точек, наиболее близких к одной из точек потока (мозаика или диаграмма Вороного). Геометрические свойства такого разбиения детально изучены. Элементы разбиения являются выпуклыми многогранниками и $L \approx 0.459 \lambda_p^{-1/3}$. Сказанное выше показывает, что сравнительный анализ результатов при фиксированном одномерном распределении можно проводить на основе значения L . Практически важно распространить такой анализ на задачи с неслучайной, т. е. геометрически фиксированной мозаикой, например со случайными сферическими слоями. С целью построения подходящей числовой характеристики заметим, что нормированная корреляционная функция для луча $\mathbf{r}(t, \boldsymbol{\omega}) = \mathbf{r} + \boldsymbol{\omega}t$, $t \geq 0$, с началом в элементе $S \in D$ мозаики равна $I_S(\mathbf{r}(t, \boldsymbol{\omega}))$, а корреляционная длина $l(\mathbf{r}, \boldsymbol{\omega}) = \int_0^\infty I_S(\mathbf{r}(t, \boldsymbol{\omega})) dt$. Предположим теперь, что известна приближенная плотность $g(\mathbf{r}, \boldsymbol{\omega})$ рас-

пределения квантов после рассеяний в рассматриваемой задаче. Тогда в качестве искомой числовой характеристики целесообразно рассмотреть величину

$$L_{eff}(g) = \iint_{D \Omega} g(\mathbf{r}, \boldsymbol{\omega}) l(\mathbf{r}, \boldsymbol{\omega}) d\mathbf{r} d\boldsymbol{\omega},$$

которую можно назвать эффективным корреляционным радиусом. Ясно, что для однородной мозаики с выпуклыми элементами (типа мозаики Вороного) в случае достаточно большой области D выполняется соотношение $L_{eff} \approx L$.

Для проведения тестовых расчетов рассматривался односкоростной процесс переноса частиц в шаре радиусом $R = 7.72043$ со случайной плотностью $\rho = \rho(\mathbf{r})$ и макроскопическими сечениями $\rho\sigma^{(0)}$, $\rho\sigma_s^{(0)}$, $\rho\sigma_f^{(0)}$, где $\sigma^{(0)} = 1$, $\sigma_s^{(0)} = 0.97$, $\sigma_f^{(0)} = 0.03$, $\nu = 2.5$, $\nu = 1$. Моделирование проводилось для сферически симметричной слоистой случайной мозаики с параметрами: число равнообъемных слоев $m = 6$; значения $\rho = \rho_i$ ($i = 1, \dots, 6$) в этих слоях независимы и равномерно распределены на отрезке $[1 - \varepsilon, 1 + \varepsilon]$ при $\varepsilon = 0.3$.

Ранее были получены оценки "по столкновениям" коэффициентов d^2 и a , определяющих в такой системе суперэкспоненциальную зависимость от времени

$$J_t \approx C \exp\left(\frac{d^2}{2}t^2 + at\right),$$

где J_t – линейный функционал от плотности потока частиц.

Расчеты значений функции J_t , проведенные методом столкновений и методом частиц, совпали с большой точностью. Для двух вариантов поля ρ – слоистого и Вороного – были вычислены оценки функции J'_t/J_t в точках $t = 1, \dots, 10, \dots, 20$, приведенные на рис. 1, причем доверительные интервалы имеют ширину, почти точно совпадающую с диаметрами значков узловых значений. Затем на основе линейной регрессионной аппроксимации (при $15 \leq t \leq 20$) были получены оценки коэффициентов d^2 , a .

Было показано, что при переходе от слоистой мозаики к однородному полю со значением величины $L = L_{eff}(g)$ суперэкспоненциальность ослабевает, так как, по-видимому, увеличивается средняя вероятность вылета частицы из среды.

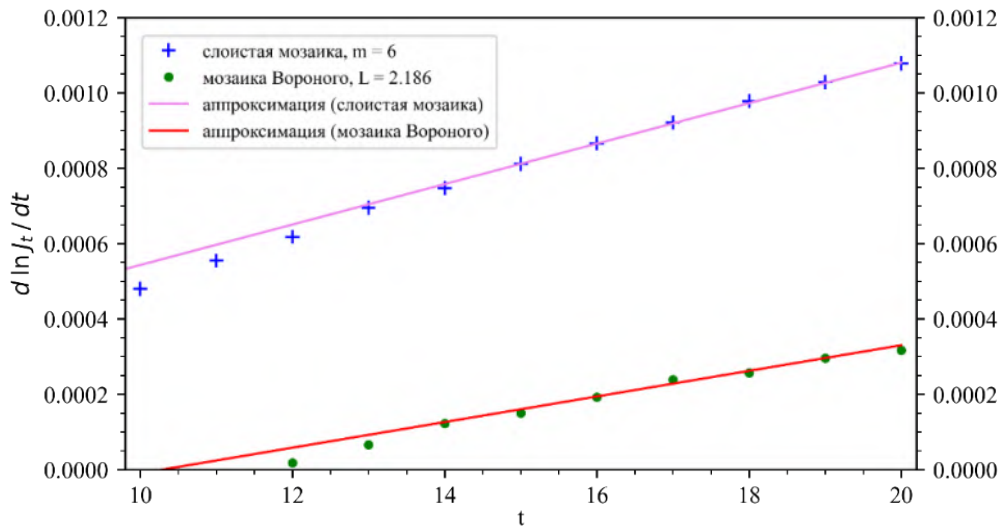


Рис. 1: Оценки логарифмической производной и регрессионная аппроксимация

2. Для решения задач радиационного баланса, оптического зондирования и томографии бывает необходимо учитывать многократное рассеяние излучения в стохастически неоднородной среде. В реальных радиационных моделях 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) стандартных мозаичных моделей случайной плотности среды. Ранее была построена рандомизация ММС, дающая асимптотически (при $L \rightarrow 0$) несмещенные оценки требуемых функционалов, в которой значение физического коэффициента ослабления случайно выбирается в конце свободного пробега l кванта при условии $l > L$, а иначе сохраняется из начальной точки пробега (КР алгоритм).

В более точном функциональном корреляционно-рандомизированном алгоритме (ФКРА) коэффициент сохраняется с вероятностью, определяемой корреляционной функцией. Эти корреляционно-рандомизированные алгоритмы были реализованы для смеси однородного вещества и

пуассоновского ансамбля "пустых" шаров. Построены корреляционно-рандомизированные алгоритмы для задач, связанных с переносом сквозь "толстый" слой, в котором содержатся однородное вещество (вода) и пуассоновский ансамбль "пустых" слоев. Представлен детальный сравнительный анализ результатов, полученных с использованием точного прямого моделирования (ММС) и приближенных алгоритмов (КРА, ФКРА) для задач переноса гамма-излучения сквозь "толстый" слой воды, содержащий пуассоновский ансамбль "пустых" слоев или шаров. Построенные приближенные алгоритмы наиболее точны и эффективны для задач, в которых размер пуассоновского ансамбля достаточно большой. В табл. 2 представлены результаты тестовых расчетов значений проходящей энергии (МэВ) гамма-излучения из точечного источника сквозь слой толщиной 200 см, заполненный водой и случайным набором "пустых" слоев по оси Oz, координаты границ которых образуют однородный пуассоновский поток с мерой λN на отрезке $[0, 200]$.

Таблица 2: Результаты тестовых расчетов

λN	20	40	100	200	1000
Е_{ММС} (L₂₀₀)	0.000102	$5.8 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$3.9 \cdot 10^{-5}$	$3.8 \cdot 10^{-5}$
Е_{ФКРА} (L₂₀₀)	0.000107	$5.6 \cdot 10^{-5}$	$4.4 \cdot 10^{-5}$	$3.9 \cdot 10^{-5}$	$3.8 \cdot 10^{-5}$
Е_{КР} (L₂₀₀)	0.000341	$8.0 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$4.1 \cdot 10^{-5}$	$3.8 \cdot 10^{-5}$

Из таблицы 2 видно, что относительная погрешность оценок, полученных с использованием ФКР алгоритма и прямого моделирования ММС, составляет менее 10 %. КР алгоритм позволяет достигнуть такого уровня ошибки (менее 10 %) лишь при λN больше 100. Отметим, что предельное значение величины **Е_{ММС} (L₂₀₀)** (при $\lambda N \rightarrow \infty$) составило в данном случае $3.71 \cdot 10^{-5}$.

3. Метод прямого статистического моделирования (ПСМ) широко применяется для решения задач динамики разреженного газа. Несмотря на активное использование метода ПСМ в течение достаточно продолжительного времени, работа по изучению влияния отдельных параметров алгоритма (шаг по времени, размер ячейки, количество шагов по времени, количество частиц в ячейке, соотношение числа реальных частиц и моделируемых частиц) на точность вычисления макропараметров течения газа в виду очевидной сложности метода далека от завершения.

В отчетном периоде проведено исследование влияния на точность вычислений методом ПСМ погрешности, вносимой регуляризацией взаимодействия двух частиц по пространственным переменным. Основанием для проведения исследования послужил теоретический анализ погрешности регуляризации. Были рассмотрены два подхода к регуляризации:

- столкновение частиц, находящихся в одной ячейке;
- выбор второго партнера для столкновения из окрестности первой частицы.

Для численного исследования реализованы три алгоритма метода ПСМ, использующие эти регуляризации.

Была построена верхняя граница погрешности метода ПСМ, учитывающая погрешность регуляризации, в метрике пространства непрерывных функций. Были получены условно-оптимальные параметры алгоритма, гарантирующие заданный уровень погрешности по вероятности. Для построения верхней границы погрешности и выбора оптимальных параметров метода ПСМ использовалась теория функциональных алгоритмов статистического моделирования.

На примере задачи Фурье (одномерной и двумерной) проведено численное исследование погрешности, вносимой регуляризацией. На рис. 2 показано изменение максимального значения погрешности при увеличении размера ячейки (окрестности) h для выбора партнеров для столкновения в одномерной задаче Фурье. Проведенное тестирование полученных условно-оптимальных параметров показало, что их использование позволяет вычислять числовую плотность с погрешностью, не превышающей заданный уровень.

4. Для распознавания многомерных множеств обычно используют алгоритмы искусственных нейронных сетей (ИНС). Новый алгоритм распознавания, алгоритм конкуренции, существенно отличается от ИНС и позволяет решать сходные задачи. Математически этот алгоритм сводится к построению функции влияния, заданной на объемлющем параллелепипеде, содержащем искомое множество. На рис. 3 показан примерный график такой функции.

Доказано, что с увеличением количества обучающих точек эта функция сходится к характеристической функции искомого множества. При этом скорость сходимости сильно уменьшается при значительном увеличении количества обучающих точек. Установлена причина падения скорости сходимости алгоритма. Найдена специальная плотность, полученная с помощью меры неопределенности, которую используют в теории информации. Обучающие точки, смоделированные согласно этой плотности, постепенно сосредоточиваются около границы искомого множества. Показано, что моделирование обучающих точек согласно этой специальной (не равномерной) плотности позволяет ускорить сходимость и существенно увеличить эффективность работы алгоритма.

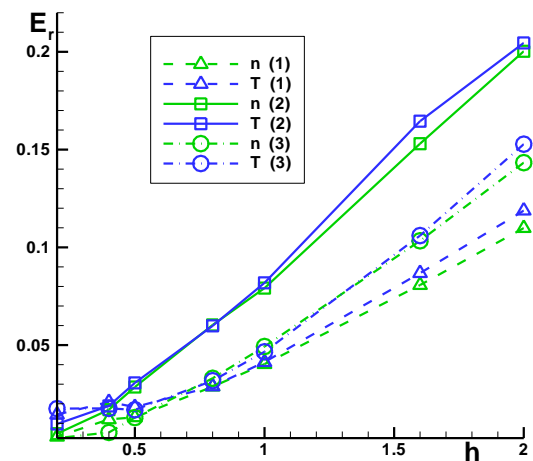


Рис. 2: Зависимость максимальной погрешности вычисления плотности n и температуры T от размера ячейки (окрестности) h , используемой для регуляризации для алгоритмов (1)–(3)

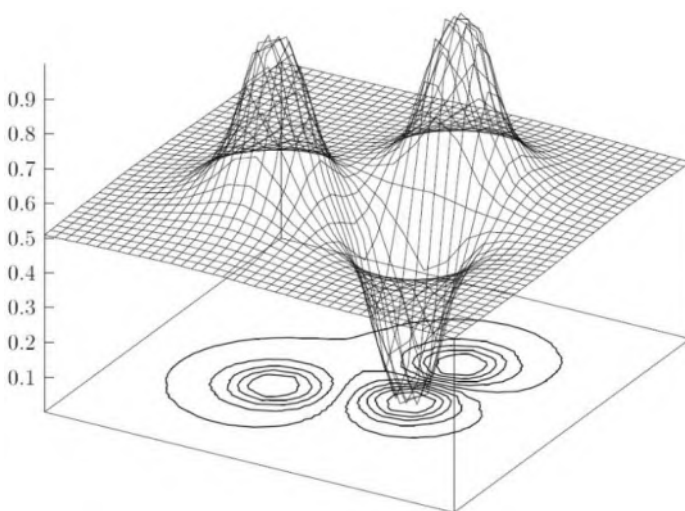


Рис. 3: Функция влияния

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Михайлов Г. А., Корда А. С., Рогазинский, С. В. Построение эффективных рандомизированных проекционных оценок решений интегральных уравнений на основе полиномов Лежандра // Докл. РАН. Матем., информ., проц. управления. 2022. Т. 507. № 1. С. 81–85. DOI: 10.31857/S2686954322700059.
2. Korda, A. S., Mikhailov, G. A., Rogasinsky, S. V. Construction and optimization of numerically-statistical projection algorithms for solving integral equations // RJNAMM. 2022. V. 37. No. 5. P. 213–219. <https://doi.org/10.1515/rnam-2022-0018>.
3. Mikhailov, G. A., Korda, A. S., Rogasinsky, S. V. Comparative analysis of numerical-statistical projection algorithms for solving transfer theory problems // Dokl. Math. 2022. No. 105. P. 35–38. <https://doi.org/10.1134/S1064562422010100>.
4. Lotova, G. Z., Mikhailov, G. A. Estimation of the average particle flux in a stochastically homogeneous medium by Monte Carlo method // RJNAMM. 2022. Vol. 37, No. 6. P. 363–371. <https://doi.org/10.1515/rnam-2022-0029>.
5. Medvedev, I. N. On the efficiency of using correlative randomized algorithms for solving problems of gamma radiation transfer in stochastic medium // RJNAMM. 2022. V. 37, No. 4. P. 231–240. <https://doi.org/10.1515/rnam-2022-0020>.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Medvedev, I. N. Universal modification of vector weighted method of dependent trials // Communications in Statistics: Simulation and Computation. 2022. V. 51, iss. 2. P. 518–526. <https://doi.org/10.1080/03610918.2019.1656248>.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Шкарупа, Е. В., Плотников, М. Ю. Оценка погрешности и оптимизация метода ПСМ с учетом регуляризации // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022". Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 64–65. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-79.
2. Антюфеев, В. С. Ускорение алгоритма конкуренции // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022". Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 49. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-49.
3. Burmistrov, A. V., Korotchenko, M. A. Numerical estimation of functionals from the solution to Smoluchowski equation by double randomization method // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022". Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 49. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-50.
4. Вотинцева, Д. И., Медведев, И. Н. Об использовании приближенного алгоритма моделирования распределения Пуассона (с использованием стандартной нормальной случайной величины) // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022". Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 50. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-51.
5. Медведев, И. Н. Об эффективности использования корреляционно-рандомизированных алгоритмов для решения задач переноса гамма-излучения в стохастических средах // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022". Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 56. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-61.

6. Михайлов, Г. А. Лотова, Г. З. Исследование среднего потока частиц в стохастически однородной размножающей среде // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022". Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 57. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-62.

7. Роженко, С. А. Моделирование и оценка корреляционной функции поля Вороного // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022". Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 58. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-64.

8. Трачева, Н. В., Ухинов, С. А. Сопряженная проекционная статистическая оценка угловых характеристик рассеянного поляризованного излучения // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022". Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 62. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-72.

9. Михайлов, Г. А., Рогазинский, С. В., Корда, А. С. Оптимизация численно-статистических проекционных оценок одномерных характеристик решений интегральных уравнений // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022". Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 14. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-63.

Участие в конференциях и совещаниях

1. "Марчуковские научные чтения" Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 9 докладов, из них 1 пленарный (Антюфеев В. С., 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.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Медведев И. Н. – член оргкомитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

2. Лотова Г. З. – секретарь программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

3. Михайлов Г. А. – председатель программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 5

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 6

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 15

Докладов на конференциях – 9, в том числе 1 пленарный

Участников оргкомитетов конференций – 3

Кадровый состав

- | | | |
|----------------------|-------------|---------------|
| 1. Рогазинский С. В. | – зав. лаб. | д.ф.-м.н. |
| 2. Антюфеев В. С. | – с.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 3. Корда А. С. | – н.с. | к.ф.-м.н. |
| 4. Коротченко М. А. | – н.с. | к.ф.-м.н. |
| 5. Лотова Г. З. | – с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 6. Медведев И. Н. | – с.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 7. Михайлов Г. А. | – г.н.с. | чл.-корр. РАН |

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. – проф. НГУ
Рогазинский С. В. – проф. НГУ
Ухинов С. А. – проф. НГУ
Антюфеев В. С. – проф. НГУ, ВКИ НГУ и СУНЦ НГУ
Медведев И. Н. – доц. НГУ
Лотова Г. З. – ст. преп. НГУ
Усов А. Г. – ст. преп. НГУ, зам. декана ММФ
Трачева Н. В. – ст. преп. НГУ.

Руководство студентами

- Семушина А. И. – 5-й курс ММФ НГУ, руководитель Лотова Г. З.
Лапина Д. С. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Лотова Г. З.
Вотинцева Д. И. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Медведев И. Н.
Гузевский В. А. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Медведев И. Н.
Омельченко Ю. М. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Медведев И. Н.
Зенин М. С. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Рогазинский С. В.

Защита дипломов

- Семушина А. И. – бакалавр ММФ НГУ, руководитель Лотова Г. З.

ЛАБОРАТОРИЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА СТОХАСТИЧЕСКИХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

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

Важнейшие достижения

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

Д.ф.-м.н. Гусев С. А.

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

На рис. 1 показан пример уменьшения градиента решения краевой задачи. В координатной плоскости представлены нормы градиентов решений исходной и преобразованной краевых задач, определенных в круге радиусом единица. Коэффициент вариации оценки решения исходной краевой задачи, равный 1.1849, уменьшился после преобразования краевой задачи до 0.01142.

Результаты исследований опубликованы в работе

Гусев, С. А. О дисперсии оценки функционала от диффузионного процесса в области с отражающей границей // СибЖВМ. 2022. Т. 25, № 4. С. 359–369. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJNM20220402>.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершнным в 2022 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 НИР 0251-2021-0002.

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

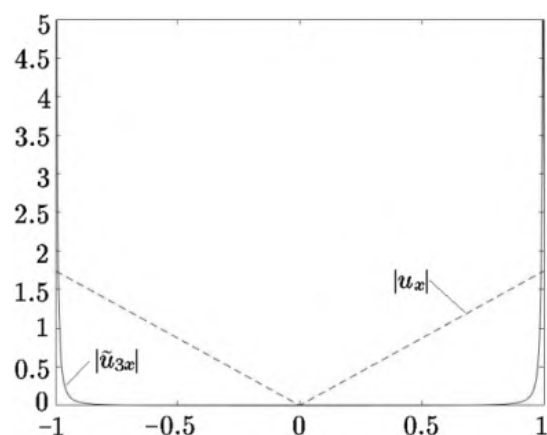


Рис. 1: Пример уменьшения градиента решения краевой задачи; пунктирная линия – норма градиента решения исходной краевой задачи, сплошная – преобразованной краевой задачи

Раздел 1.1.2. "Методы статистического моделирования и анализа данных".

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

Этап 2022 г.

В рамках рассматриваемого проекта НИР получен важнейший результат лаборатории, представленный выше, далее приведены следующие результаты.

Предложена модификация приближенного алгоритма моделирования пуассоновского точечного процесса на основе свойства ординарности и экономичного способа моделирования случайных величин. Проведенные расчеты подтвердили статистическую адекватность предложенного алгоритма. При статистическом решении задач анализа, синтеза и фильтрации для систем диффузионно-скачкообразного типа и систем со случайной структурой требуется моделирование неоднородного общего пуассоновского процесса. Для моделирования последнего иногда используется алгоритм, основанный на свойстве ординарности процесса. Построена модификация этого алгоритма, использующая экономичный способ моделирования случайных величин. Проведенные расчеты подтвердили статистическую адекватность предложенного метода. Многократное использование одного и того же псевдослучайного числа при моделировании пуассоновского точечного процесса показало, что результаты совпадают в пределах статистической погрешности. Предложенная модификация алгоритма позволяет существенно уменьшить время счета в задачах, когда затрачиваемое время моделирования псевдослучайных чисел для проверки вероятностного условия разрыва траектории сравнимо с общим временем счета. Сравнение четырех вариантов модифицированного алгоритма на таких задачах позволило сделать вывод, что для уменьшения трудоемкости вычислений достаточно использовать построение десяти случайных чисел по одному псевдослучайному числу. Сравнение проведенных расчетов с применением генераторов Rand128 и Rand показало, что при моделировании пуассоновского точечного процесса (когда используются "длинные" серии выборочных значений бернуллиевских случайных величин) более экономичным является многократное использование одного и того же псевдослучайного числа генератора Rand128 по сравнению с однократным использованием псевдослучайных чисел, полученных с помощью генератора Rand.

Разработано расширение разработанной авторским коллективом ИВМиМГ модели распространения COVID-19 с пуассоновскими потоками на основе подхода статистического моделирования пуассоновских потоков распространения эпидемии. Расширение исходной модели проведено посредством деления общей группы населения на две группы с отличающимися коэффициентами распространения эпидемии, согласованными в среднем с коэффициентами общей группы. Для построенной модели разработан алгоритм статистического моделирования в виде параллельной программы, реализованной на языке C++, и технологии OpenMP, имитирующей потоки событий переходов индивидуумов между фиксированными состояниями: восприимчивостью к заражению, инфицированию с симптомами, инфицированию без симптомов, выздоровлению и летальности с учетом взаимодействия двух групп индивидуумов. Реализована возможность учета инкубационного периода при заражении восприимчивого индивидуума, в котором у индивидуума отсутствуют симптомы заболевания, но он может заражать восприимчивых индивидуумов, выздороветь и в конце рассматриваемого инкубационного периода с определенной вероятностью приобрести симптомы или остаться без симптомов. Численно проведено исследование влияния на развитие эпидемии высокой заразности, высокого бессимптомного развития

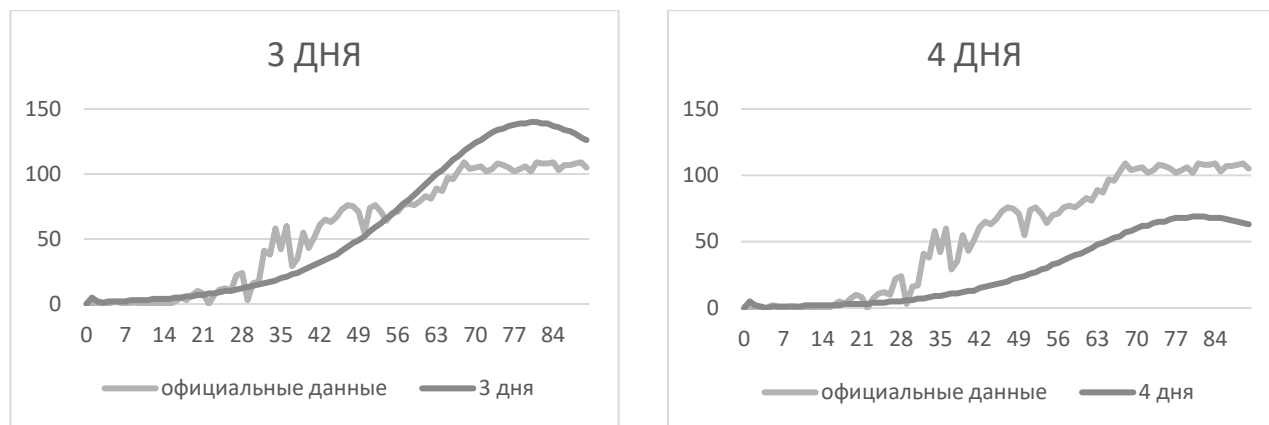


Рис. 2: Влияние длительности инкубационного периода в одногрупповой модели на данных заболеваемости COVID-19 в г. Новосибирск с 23 марта 2020 г. по 21 июня 2020 г.

болезни, высокой смертности и др. одной группы относительно другой. Для вычислений в одногрупповой модели использовались параметры дифференциальной SEIR-D модели для анализа заболеваемости COVID-19 в Новосибирске (численность $n \approx 3 \cdot 10^6$) в период с 23 марта по 15 июня 2020 г.

Завершено численное исследование влияния размера инкубационного периода в одногрупповой модели для больших значений. Оптимально согласованный размер составил 3 дня для используемых статистических данных (рис. 2). Для больших инкубационных периодов возникает отложенный эффект: количество выявленных больных на 90-й день снижается. Проверка работы параллельной программы для двухгрупповой модели и согласованности результатов с одногрупповой моделью проведена с помощью разделения общей группы на две равные группы с одинаковыми коэффициентами и начальными размерами. На рис. 3 приведены результаты успешного тестирования, нижние сливающиеся графики – совпадающие средние выявленных в группах 1 и 2,

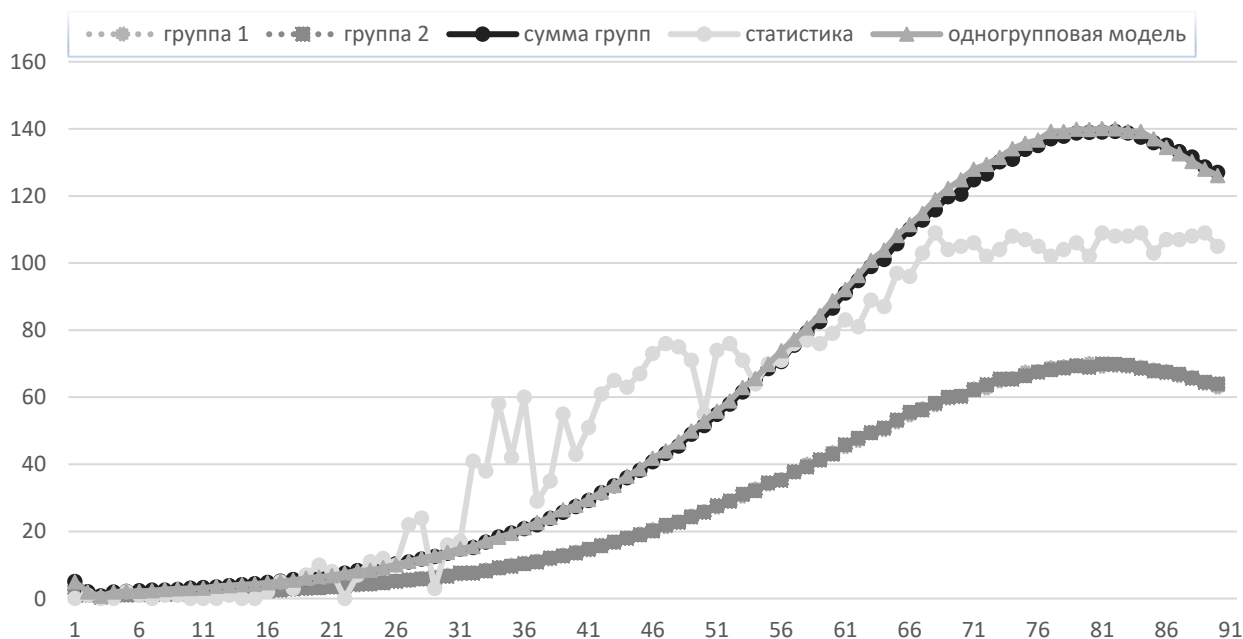


Рис. 3: Сравнение среднего количества выявленных больных в двух группах с одинаковыми характеристиками и данных заболеваемости COVID-19 в Новосибирске с 23 марта по 21 июня 2020 г.

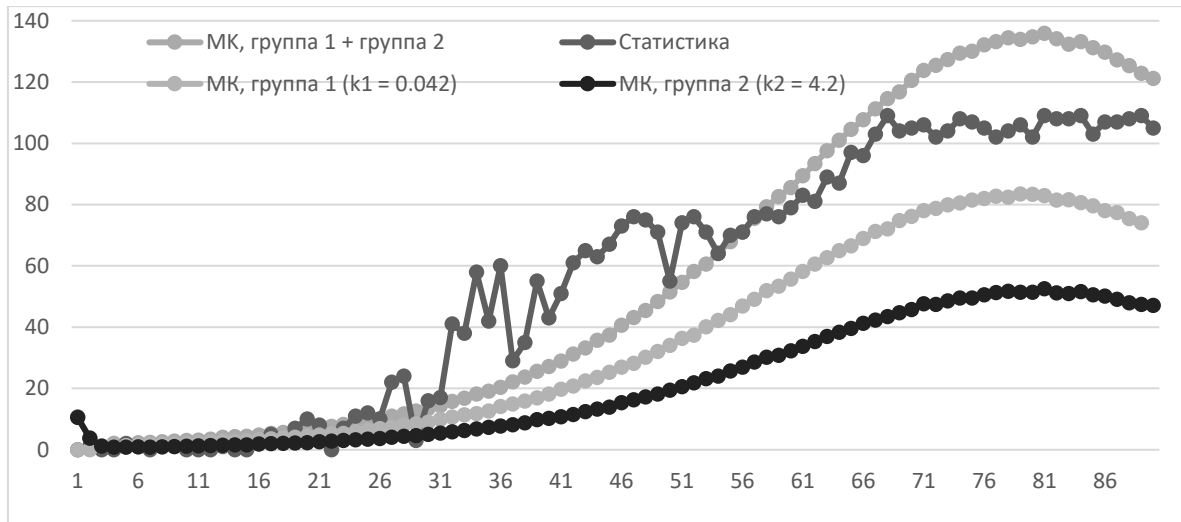


Рис. 4: Сравнение среднего количества выявленных больных в двух группах, отличающихся скоростью появления симптомов ($k_1 = k_2/100 = 0.018$) и исходными размерами восприимчивых ($N_1 = 2\,183\,770$, $N_2 = 614400$)

верхние совпадающие графики – кривые средних выявленных в одногрупповой модели и суммы выявленных больных из групп 1 и 2. Для двухгрупповой модели проведены расчеты в группах с отличающимися на порядки коэффициентами k скорости возникновения симптомов. В одногрупповой модели коэффициент k брался равным 0.042, в первой группе двухгрупповой модели коэффициент k_1 брался равным 0.0018, во второй группе коэффициент $k_2 = 100 \times k_1 = 0.18$. Рассматриваемые модели обладают свойством стационарности в смысле отсутствия зависимости от времени значений коэффициентов модели. Нетрудно заметить, что для согласования двух- и одногрупповой моделей должно быть верным тождество $k_1 \times N_1 + k_2 \times N_2 = k \times N$, из которого при известных коэффициентах k_1 , k_2 , k и известном начальном значении восприимчивой общей популяции N определяются начальные значения восприимчивых N_1 и N_2 в группах 1 и 2 соответственно. Нижние кривые на рис. 4 соответствуют динамике средних, выявленных в группах 1 и 2, а верхняя кривая, равная сумме выявленных в группах 1 и 2, совпадает с количеством выявленных в одногрупповой модели, что численно подтверждает корректность использованного правила согласования моделей.

Разработан параллельный алгоритм для моделирования динамики вихревых нитей в сверхтекучем гелии при случайном воздействии Ланжевена. Рассматриваются варианты, когда движение происходит без учета и с учетом сил трения, без вставления и удаления точек на вихревых нитях, с вставлением и удалением точек на вихревых нитях, без реконнекции и с реконнекцией.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Averina, T. A. One method for simulating inhomogeneous Poisson point process // Num. Analysis and Appl. 2022. V. 5, No. 1. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995423922010013>.
2. Gusev, S. A. On the variance of estimation of a diffusion process functional in a domain with a reflecting boundary // Num. Analysis and Appl. 2022. V. 15, No. 4. P. 293–302. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJNM20220402>.

3. Medvedchikov, A. E., Anastasieva, E. A., Korytkin, A. A., Lukinov, V. L., Kirilova, I. A. Biceps brachii distal tendon ruptures: Conservative and surgical treatment outcomes // *Travmatologiya i ortopediya Rossii Traumatology and Orthopedics of Russia*. 2022. V. 28(4). P. 114–125. DOI: <https://doi.org/10.17816/2311-2905-1997>.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Kovaleva, A. Y., Lukinov, V. L., Lifshits, G. I. Atrial fibrillation and cognitive impairment: Features of the relationship, developmental and prevention mechanisms // *Kardiologiya*. 2022. Jan. 31;62(1). P. 80–88. DOI: 10.18087/cardio.2022.1.n1904.

2. Kovaleva, A. Y., Lukinov, V. L., Lifshits, G. I. Cognitive impairment in patients with atrial fibrillation and arterial hypertension // *Patologiya Krovoobrashcheniya i Kardiokhirurgiya*. 2022. V. 26 (1). P. 66–72. DOI: 10.21688/1681-3472-2022-1-66-72.

3. Kozlov, B. N., Panfilov, D. S., Sonduev, E. L., Lukinov, V. L. Predictors of early adverse events after ascending aortic replacement // *The Sib. J. of Clinic. and Experim. Medicine*. 2022. V. 37(1). P. 108–117. DOI: <https://doi.org/10.29001/2073-8552-2022-37-1-108-117>.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Хидирова, Л. Д., Осмиева, З. М., Лукинов, В. Л. Математическая программа прогнозирования риска прогрессирования фибрилляции предсердий и ее возможных осложнений у пациентов с артериальной гипертензией и сопутствующими экстракардиальными заболеваниями // *Врач*. 2022. Т. 33. № 8. С. 32–36. DOI: 10.29296/25877305-2022-08-06.

2. Мальцева, И. В., Шереметьева, И. И., Котовщикова, Е. Ф., Строганов, А. Е., Лукинов, В. Л. Хроническая ишемия головного мозга у лиц молодого возраста с недифференцированной дисплазией соединительной ткани // *Терапия*. 2022. Т. 8. № 10 (62). С. 31–40. DOI: <https://dx.doi.org/10.18565/therapy.2022.10.31-40>.

3. Лукинов, В. Л., Юзов, Д. А. Численное исследование прогностических свойств двухгрупповой марковской SEIR модели // *Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г.* С. 56. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-02-39.

4. Аверина, Т. А. Статистическое моделирование динамических систем со случайной структурой // *Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г.* С. 48. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-46.

5. Конради, Д. В., Лукинов, В. Л. Создание программы параллельного моделирования распространения COVID-19 // *Обработка информации и математическое моделирование : Материалы Рос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 20–21 апр. 2022 г.* С. 100–104.

6. Лукинов, В. Л., Угольников, Е. А. Построение алгоритма распознавания ребер человека на снимках компьютерной томографии грудной клетки // *Обработка информации и математическое моделирование : Материалы Рос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 20–21 апр. 2022 г.* С. 120–125.

7. Соснин, Д. Н., Лукинов, В. Л. Проектирование REST API // *Современные проблемы телекоммуникаций : Материалы Рос. науч.-техн. конф. Новосибирск, 20–21 апр. 2022 г.* С. 243–248.

8. Ворошин, И. В., Лукинов, В. Л. Веб-сервис распределения пациентов в группы при проведении клинических исследований // *Обработка информации и математическое моделирование : Материалы Рос. науч.-техн. конф. Новосибирск, 20–21 апр. 2022 г.* С. 68–73.

9. Лукинов, В. Л., Самила, К. В. Создание сайта-агрегатора // Современные проблемы телекоммуникаций : Материалы Рос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 20–21 апр. 2022 г. С. 72–78.

10. Грузинов, И. С., Лукинов, В. Л. Сравнение CMS систем: WORDPRESS, JOOMLA И DRUPAL // Обработка информации и математическое моделирование : Материалы Рос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 20–21 апр. 2022 г. С. 9–14.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 4 доклада, из них 1 пленарный (Аверина Т. А., Гусев С. А., Лукинов В. Л., Юзов Д. С., Бурмистров А. В.).

2. Российская научно-техническая конференция "Обработка информации и математическое моделирование", Новосибирск, 20–21 апреля 2022 г. – 5 докладов (Лукинов В. Л.).

3. Российская научно-техническая конференция "Современные проблемы телекоммуникаций", Новосибирск, 20–21 апреля 2022 г. – 2 доклада (Лукинов В. Л.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Лукинов В. Л. – член организационного комитета международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 3

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 6

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 16

Докладов на конференциях – 15, в том числе 1 пленарный

Участников оргкомитетов конференций – 1

Кадровый состав

1. Лукинов В. Л. зав. лабораторией к.ф.-м.н.

2. Аверина Т. А. с.н.с. д.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. – ст. преподаватель НГУ

Гусев С. А. – профессор НГТУ

Лукинов В. Л. – доцент СибГУТИ, ассистент НГУ

Руководство аспирантами

Юзов Д. С. – 1-й год, ИВМиМГ, руководитель Лукинов В. Л.

Руководство студентами

Двороников А. Н. – 1-й курс магистратуры СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Быканов В. А. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Зырянов К. В. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Катенев К. А. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Кондратенко К. А. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Красножен Д. В. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Кудрявцев С. И. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Попов Н.В. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Рябых И. В. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Тарабрин И. С. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Шумихин Д. В. – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.

Защита дипломов

Ворошин И. В. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Грузинов И. С. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Дорощук Н. А. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Конради Д. В. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Сальников В. М. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Самила К. В. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Соснин Д. Н. – бакалавр СибГУТИ, руководитель Лукинов В. Л.
Угольникова Е. А. – бакалавр ВКИ НГУ, руководитель Лукинов В. Л.

ЛАБОРАТОРИЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

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

Важнейшие достижения

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

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

Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование экситонных полей в полупроводниковых материалах GaN. На основе предложенной модели рекомбинации экситонов в пьезоэлектрическом поле вокруг краевых дислокаций и стохастического моделирования траекторий экситонов впервые удалось рассчитать величину длины диффузии экситона и подтвердить ее экспериментально. На основе этих исследований разработан практический метод катодолумinesцентной визуализации дислокаций и других дефектов в полупроводниковых материалах. Исследование проведено при научном сотрудничестве с международной группой физиков (рис. 1, 2).

Работа выполняется при поддержке Российского научного фонда, проект 19-11-00019.

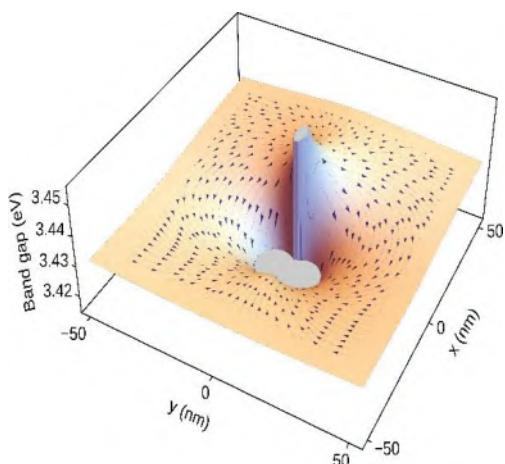


Рис. 1: Структура пьезоэлектрического поля вокруг дислокаций

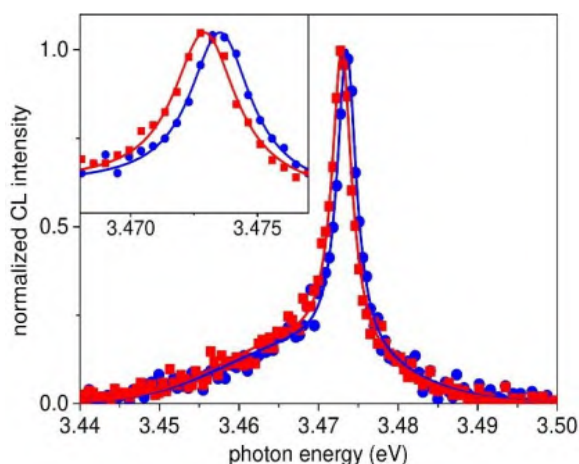


Рис. 2: Интенсивность катодолумinesценции

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Jahn, U., Kaganer, V. M., Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E., Laehnemann, J., Pfueller, C., Cheze, C., Calarco, H. R., Brandt, O. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. I: Temperature-dependent generation volume // *Phys. Rev. Appl.* 2022. V. 17. Art. 024017. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.024017.
2. Brandt, O., Kaganer, V. M., Laehnemann, J., Flissikowski, T., Pfueller, C., Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E., Cheze, C., Calarco R., Grahn, H., Jahn, U. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. II: Ambipolar versus exciton diffusion // *Phys. Rev. Appl.*, 2022. V. 17. Art. 024018. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.024018.
3. Laehnemann, J., Kaganer, V. M., Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E., Jahn, U., Cheze, C., Calarco, R., Brandt, O. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. III: Nature of nonradiative recombination at threading dislocations // *Phys Rev. Appl.* 2022. V. 17. Art. 024019. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.024019.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 г.
в соответствии с планом НИР института**

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

Номер государственной регистрации НИР 0315-2016-0002.

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

Разработана случайная спектральная негауссовская модель для имитации слоистой облачности, основанная на одном из специальных преобразований гауссовского случайного поля. А также предложен весовой алгоритм метода Монте-Карло для моделирования длины случайного пробега фотона между актами рассеяния (поглощения) для предложенной модели случайной среды, который является альтернативным известному алгоритму максимального сечения (рис. 3).

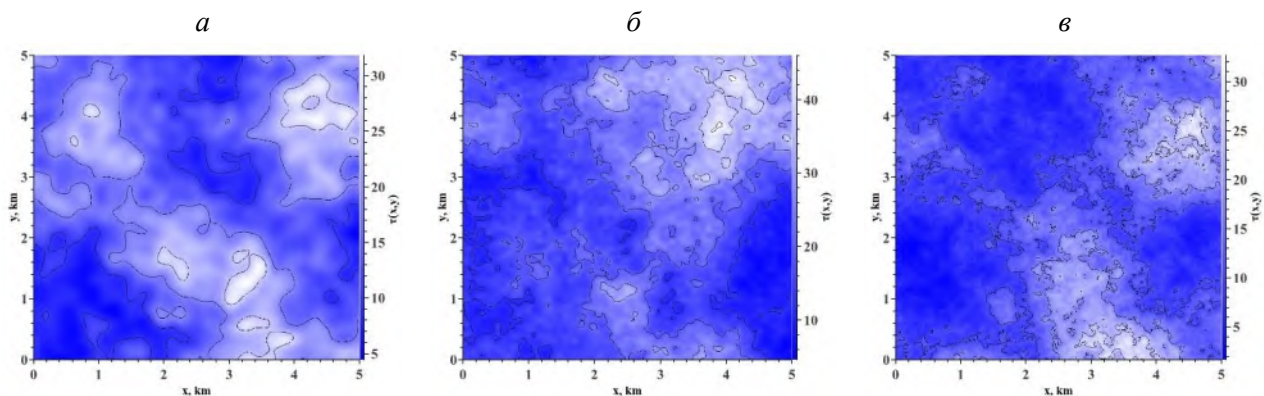


Рис. 3: Реализации спектральной модели негауссовского случайного поля оптических толщин

Для решения задач радиационного баланса Земли с учетом влияния кристаллической облачности (перистые и смешанные облака) разработаны алгоритмы и представлены программные реализации оценки углового распределения оптического излучения при его рассеянии кристаллическими ледяными частицами. При вычислении индикатрис рассеяния в программной реализации имеется возможность выбрать форму частицы, задать ее геометрические параметры или моделировать частицу случайной нерегулярной формы, что позволяет дополнить оптические модели перистой облачности новыми данными. В качестве моделей ледяных частиц нерегулярной формы предлагается использовать многогранники, являющиеся выпуклыми оболочками случайного множества точек, распределенных по некоторому закону в ограниченном объеме. Имеется возможность моделирования частиц с гладкими или шероховатыми поверхностями. Для оценки влияния случайной неоднородности поверхностей кристаллов на их рассеивающие характеристики использована фасетная модель шероховатости, а также модель, учитывающая эффекты переломления и затенения излучения. Алгоритмы моделирования углового распределения излучения основаны на законах геометрической оптики с использованием метода трассировки лучей. Показано, что свойства рассеяния излучения кристаллами в форме 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 (рис. 4).

Предложена новая модель ледяных кристаллов нерегулярной формы, представляющая собой выпуклую оболочку набора случайных точек в трехмерном пространстве. Геометрическая форма

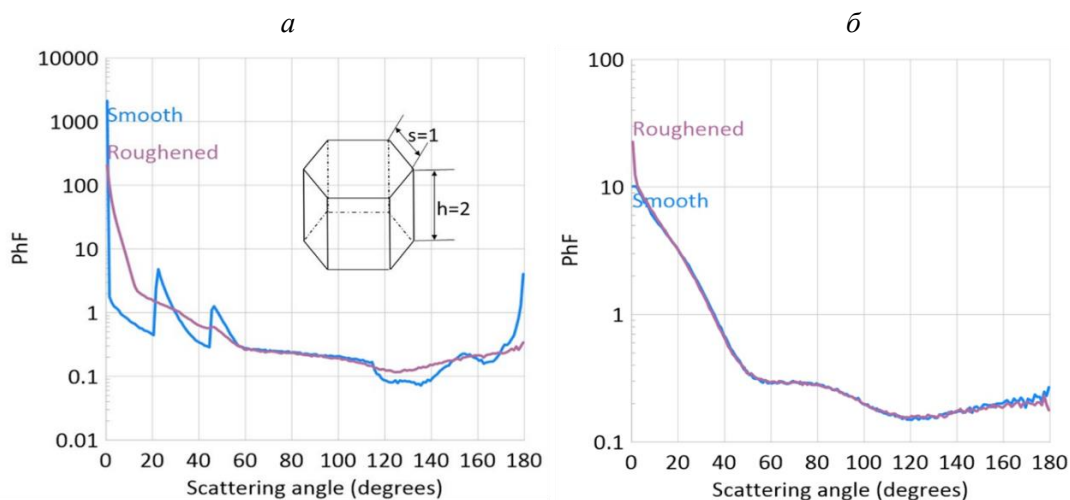


Рис. 4: Индикатрисы рассеяния для правильной гексагональной призмы (а) и для частицы случайной формы (б) с гладкими (голубая линия) и шероховатыми (сиреневая линия) гранями для случая хаотической ориентации частиц. Индикатриса рассеяния для частицы случайной формы усредняется по 10000 реализаций многогранников

таких многогранников не всегда имитирует форму ледяных облачных кристаллов, однако рассеивающие характеристики, рассчитанные по таким моделям, могут дать некоторое представление о рассеивающих свойствах частиц нерегулярных форм (рис. 5, 6).

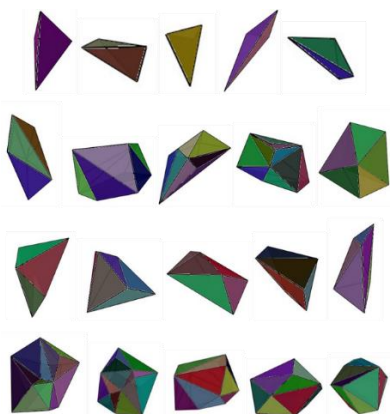


Рис. 5: Результаты построения случайных выпуклых оболочек, генерируемых программой ConvexHull: строка первая (сверху вниз): $N_V = 4$, строка вторая: $N_V = 9$, строка третья: $N_F = 8$, строка четвертая: $N_F = 24$; N_V и N_F – количество вершин и граней соответственно

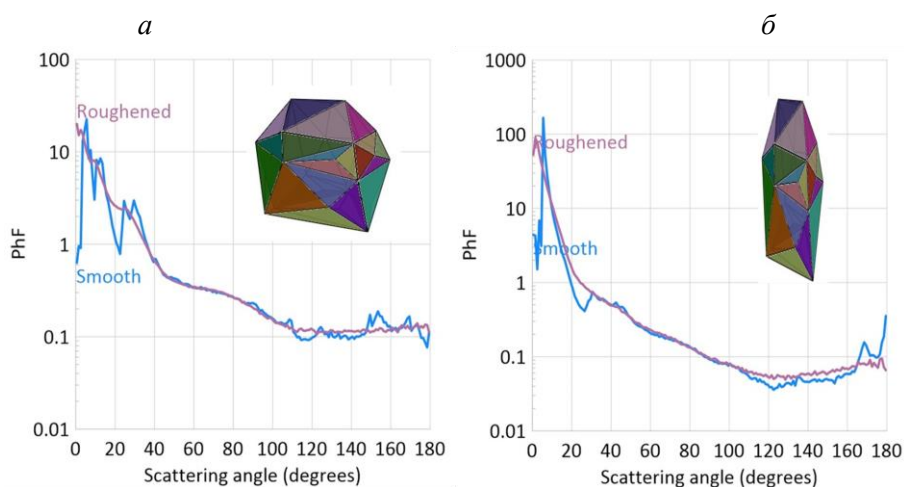


Рис. 6: Индикатрисы рассеяния (PhF) случайными выпуклыми многогранниками с гладкой (Smooth) и шероховатой (Roughened) поверхностями с числом вершин и граней $N_V=25$, $N_F=46$ и коэффициентом растяжения вдоль оси Oz , $f=1$ (а); $f=10$ (б)

Рис. 7: Средняя кратность рассеяния фотонов лазерного импульса в облачном слое толщиной 200 м в момент времени 1167 нс на участке 800 м по горизонтали

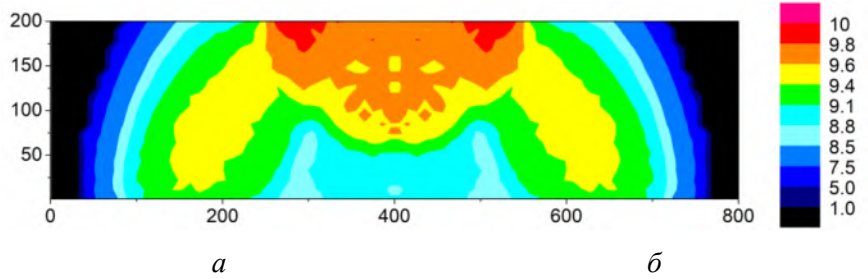


Рис. 8: Распределения фотонов, испытывающих рассеяние в облачном слое толщиной 50 м в момент времени 300 нс (*a, в*) и в облачном слое толщиной 100 м в момент времени 633 нс (*б, г*); вертикальные сечения осесимметричных трехмерных распределений для участков облачности протяженностью 400 м по горизонтали (*a, б*); горизонтальные проекции этих распределений (*в, г*)

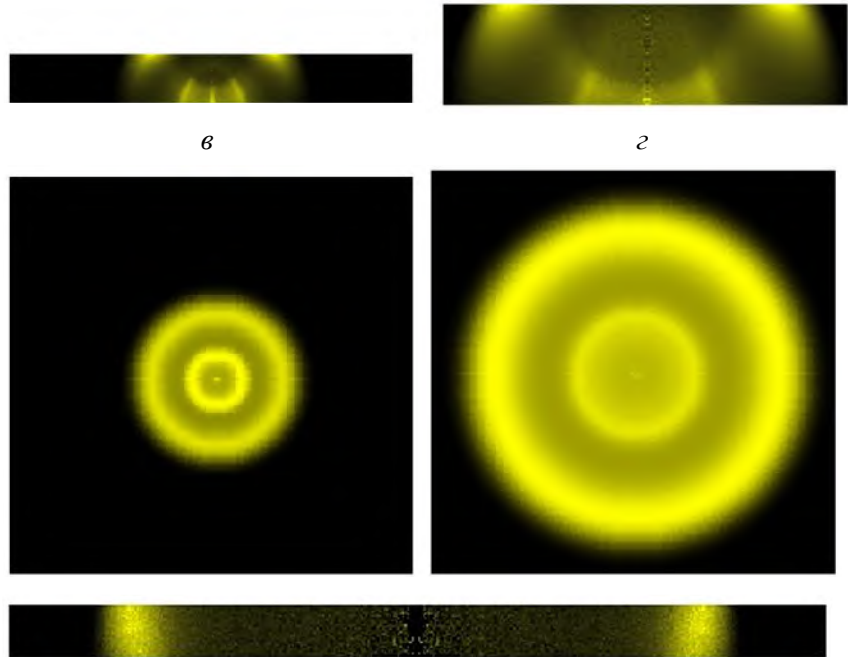
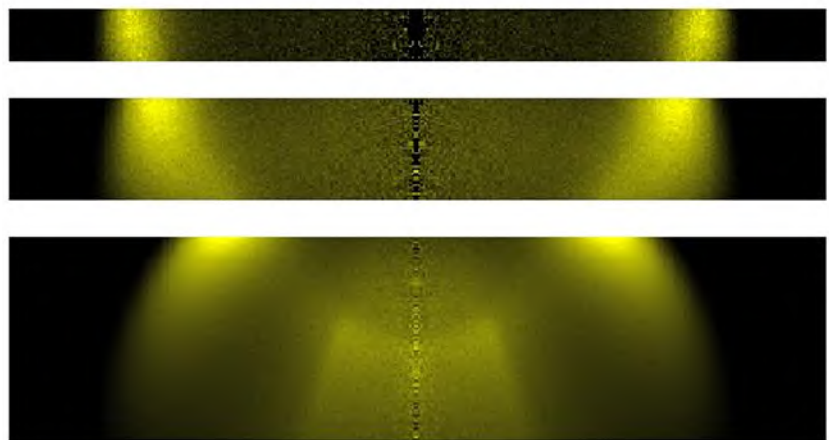


Рис. 9: Распределения фотонов, испытывающих рассеяние в облачных слоях толщиной 50 м (сверху), 100 м (посередине) и 200 м (снизу) в момент времени 1033 нс после попадания лазерного импульса в облачный слой



Разработано программное обеспечение и проведена серия численных экспериментов по статистическому моделированию оптических явлений, которые возникают при лидарном зондировании атмосферной облачности и водных сред. С помощью вычислительных экспериментов изучаются особенности распространения лазерных импульсов, когда свет образует расширяющиеся кольцевые структуры за счет многократного рассеяния. На рис. 7–9 показаны вертикальные сечения осесимметричных трехмерных распределений для участков облачности протяженностью 800 м по горизонтали.

Методом Монте-Карло построены оценки потока излучения, приходящего на фотоприемную матрицу летательного аппарата (ЛА) навигационной системы. При работе навигационной системы посадки самолетов лазерный луч системы навигации совпадает по направлению с глиссадой. Два фотоприемных блока, размещенных на ЛА на базовом расстоянии от изображений луча,

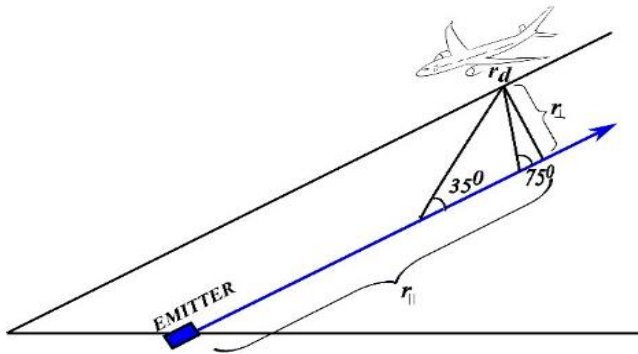


Рис. 10: Геометрическая схема задачи

определяют положение глассады в системе координат самолета, что позволяет скорректировать положение точки касания взлетно-посадочной полосы в условиях плохой видимости. В этом случае актуальной является задача оценки мощности излучения и определения вкладов различной кратности рассеяния в изображении луча лазера на фотоприемной матрице. Решение задачи проведено для граничных положений плоскостей обзора фотоприемной матрицы, имеющих углы наклона 35 и 75° относительно луча. Для вычисления потоков излучения использовано прямое статистическое моделирование с учетом симметрии положения фотоприемной матрицы относительно сигнального луча навигационной системы, а также локальные оценки метода Монте-Карло. Кроме того, вычислены угловые распределения направлений фотонов с различной кратностью рассеяния.

Методом Монте-Карло исследована освещенность подстилающей поверхности в условиях атмосферной облачности, когда заметное влияние на поле радиации оказывает переотражение солнечного излучения между облачным слоем и подстилающей поверхностью. Вычисления проводились для моделей слоистой и разорванной облачности. Показано, что при идеальных условиях (большие значения альбедо поверхности и отсутствие поглощения в облачной атмосфере) освещенность подстилающей поверхности может существенно превышать освещенность на верхней границе облачности. Обсужден эффект повышенной освещенности подстилающей поверхности около границы тени от разорванной облачности.

Разработан новый итерационный алгоритм моделирования негауссовских векторов с заданными одномерными распределениями вероятностей и корреляционными матрицами. На каждой итерации алгоритма используются два специальных преобразования выборки исходно независимых случайных векторов: первое позволяет преобразовать выборку таким образом, чтобы ее ковариационная матрица стала равна заданной, а второе – получить требуемые одномерные распределения компонент случайных векторов. При втором преобразовании использованы элементы метода обратных функций распределения. Показано, что для работы предложенного алгоритма требуется в два раза меньше памяти, чем для работы известного итерационного алгоритма моделирования негауссовских векторов, основанного на перестановке элементов выборки. Как показали численные эксперименты, во многих случаях предложенный алгоритм имеет более высокое быстродействие. Численно исследовано влияние специального выбора начальных данных на скорость сходимости предложенного метода.

Разработан подход к моделированию условных периодически коррелированных последовательностей. Сформулированы условия, при которых процесс имеет условную ковариационную матрицу блочно-теплицева вида, а также условия, когда условные процессы не являются периодически коррелированными, но асимптотически стремятся к периодически коррелированным при любых фиксированных значениях в начальных точках. Предложенный подход использован при моделировании условных периодически коррелированных рядов температуры воздуха. Описаны семейства многомерных распределений вероятностей, условные многомерные распре-

деления которых являются смесями двух условных нормальных распределений, а частные распределения – смесями нормальных распределений.

Предложена новая классификация вычислительных (компьютерных) алгоритмов приближения вероятностной плотности по заданной выборке, в которой ядерные и проекционные функциональные алгоритмы представлены в качестве обобщений многомерного аналога полигона частот. Показано, что с точки зрения теории условной оптимизации компьютерных стохастических функциональных алгоритмов и с точки зрения практической реализации алгоритмов (конкретнее, при подсчете аппроксимационных коэффициентов) многомерный аналог полигона частот имеет ряд принципиальных преимуществ по сравнению с ядерным и проекционным алгоритмами.

Описано новое применение специальной компьютерной системы моделирования вероятностных одномерных распределений NMPUD – возможность объективного сравнения трудоемкостей основных арифметических операций и вычислений значений функций.

Проведен сравнительный анализ возможностей использования вместо вероятностной плотности распределения с трудоемкой моделирующей формулой кусочно-постоянной или кусочно-линейной аппроксимаций этой плотности. Несмотря на экономичность моделирующего алгоритма для кусочно-постоянной плотности, следует рекомендовать использование более точной кусочно-линейной аппроксимации и соответствующего моделирующего алгоритма метода дискретной суперпозиции.

Для решения задачи Коши систем дифференциально-алгебраических индекса 1 построен L -устойчивый жестко-точный (m, k) -метод 4-го порядка. Параметры соответствующей $(5, 4)$ -схемы получены ранее. Дополнительная стадия позволяет минимизировать локальную погрешность схемы без существенного увеличения вычислительных затрат на шаге интегрирования.

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. Полученные численные результаты подтверждают эффективность нового алгоритма.

За счет модификации контроля точности оптимизирован построенный ранее $(5, 3)$ -метод, позволяющий осуществлять замораживание регуляризирующей матрицы схемы на нескольких шагах интегрирования.

Результаты работ по проектам РФФИ

Российско-болгарский проект 20-51-18009 Болг_а "Новые высокоэффективные методы стохастического моделирования и приложения".

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

Исследования по данному проекту проведены по нескольким направлениям, они включают разработку новых алгоритмов стохастического моделирования и их оптимальные имплементации для решения как чисто фундаментальных проблем моделирования, так прикладных задач. Публикации результатов, выполненные совместно с болгарскими учеными, посвящены созданию оптимальных алгоритмов случайного блуждания для эллиптических уравнений на основе перехода к сбалансированным матрицам и созданию новых эффективных стохастических алгоритмов для решения многомерных задач по анализу чувствительности. Впервые разработан глобальный

алгоритм случайного блуждания для решения общих эллиптических уравнений на основе оригинальной имплементации случайных блужданий в сеточной области. Предложен высокоэкономичный рандомизированный векторный алгоритм решения систем алгебраических уравнений экстремально высокой размерности, обладающий линейной зависимостью трудоемкости от размерности задачи. В части приложений выполнены работы по имплементации алгоритмов случайного блуждания по сферам для решения задач дрейфа-диффузии экситонов с учетом рекомбинации свободных и связанных экситонов. Численно исследована задача о транспорте электронов и дырок в полупроводниках на основе оригинальной имплементации гибридного стохастического и клеточно-автоматного алгоритмов, где решена нелинейная система уравнений дрейфа-диффузии и уравнения Пуассона. Рассмотрены и другие приложения разработанных методов, в частности моделирование стохастических фрактальных образований для статистического анализа геологических структур. В совместных работах с болгарскими учеными предложен оригинальный метод оценки чувствительности на основе вычисления индексов Соболя. Предложен новый стохастический алгоритм решения уравнения Навье – Стокса, реализованный в виде специального глобального итерационного процесса. Решена задача описания и имплементации процесса стохастического моделирования транспорта экситонов с учетом многократных превращений экситон – фотон – экситон.

В совместных работах с болгарскими учеными методы чувствительности в алгоритмах стохастического моделирования применены к решению ряда экологических задач, таких как оценка влияния флуктуаций в параметрах модели химических реакций в атмосфере, оценка концентраций взаимодействующих частиц, в частности реакций, приводящих к образованию положительных ионов аммония. Проведен детальный анализ чувствительности при вычислении среднемесячных изменений концентраций аммония в Милане.

Построена обобщенная рандомизированная модель оценки чувствительности в многомерной задаче транспорта частиц в турбулентных потоках с использованием метода Морриса и индексов Соболя, при этом задача высокой размерности эффективно решается с помощью метода двойной рандомизации.

Предложена параллельная реализация глобального алгоритма случайного блуждания для решения параболических и эллиптических уравнений, позволяющая вычислять решение в произвольно выбранном множестве точек. Это принципиально важно при решении задач очень высокой размерности, когда расчет всего поля решений – слишком затратная задача, тогда как необходимо знание решения лишь в заданном множестве точек.

Результаты работ по грантам РФФ

Проект РФФ 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.

Разработан общий рандомизированный алгоритм решения экстремально больших систем линейных алгебраических уравнений на основе сведения исходной матрицы к стохастической матрице с дальнейшей параллельной клеточно-автоматной реализацией. В отличие от традиционного метода Монте-Карло предложенный метод позволяет вычислять все компоненты вектора

решений. Более того, он позволяет вычислять заданные компоненты решения без вычисления всего поля решений, что существенно при решении уравнений высокой размерности. Существенным преимуществом предложенного метода является линейная зависимость трудоемкости от размерности матрицы.

Разработаны бессеточные стохастические алгоритмы, построена их параллельная реализация для решения системы уравнений дрефта-диффузии с учетом рекомбинаций. Особенно эффективным он оказался при решении системы уравнений, описывающей движение экситонов с учетом многократных рекомбинаций экситон – фотон – экситон. Разработанный метод решает систему уравнений дрефта-диффузии и интегро-дифференциальных уравнений переноса фотонов.

Глобальный алгоритм случайного блуждания удалось встроить в итерационный метод решения уравнения Навье – Стокса и уравнения Бюргерса в вихревой постановке. Здесь существенным оказалось свойство алгоритма случайного блуждания быть устойчивым с возрастанием числа Пекле. Это свойство удалось численно проверить и дать его строгое обоснование.

Построен алгоритм случайного блуждания по сферам для решения больших систем уравнений, описывающих транспорт частиц с учетом их взаимодействий. Особенность метода состоит в том, что он свободен от введения сеток и позволяет решать краевые задачи в сложных областях с возможным сингулярным характером формы границы, что особенно важно при решении практических задач транспорта реагирующих примесей.

Проведенные в 2022 г. работы по созданию стохастических алгоритмов моделирования транспорта электронов в полупроводниковых гетероструктурах на основе решения интегрального уравнения Больцмана были сосредоточены на построении корректной математической модели, описывающей перенос электронов в квантовой яме для определенных гетероструктур, разрабатываемых в институте физики полупроводников им. Ржанова, с учетом квантово-механических взаимодействий электронов с фононами, учетом квантования энергии электронов в главной и боковых долинах и учетом перехода электронов из двумерного состояния в объемное. Эту задачу удалось полностью решить. Разработан алгоритм квантово-механического моделирования, математическая модель которого включает систему уравнений Больцмана, Шредингера и Пуассона, позволяющую рассчитывать зонную структуру и базовые свойства гетеросистемы.

В разделе, посвященном исследованию процессов нуклеации и роста нановискеров (nanowires) в методе молекулярно-пучковой эпитаксии, решалась задача разработки общей модели и гибридных алгоритмов стохастического моделирования с привлечением термодинамического подхода к определению размера критического островка (формирование устойчивого зародыша) и методов случайного блуждания и свободно-молекулярного движения атомов (диффузионный рост нановискеров). Наибольшая сложность состояла в необходимости согласовать большой инкубационный период (времени, необходимого для зарождения ансамбля устойчивых островков) и быстрое возрастание числа растущих нановискеров. Эта проблема долгое время оставалась нерешенной, поскольку все известные модели процесса нуклеации и роста базировались

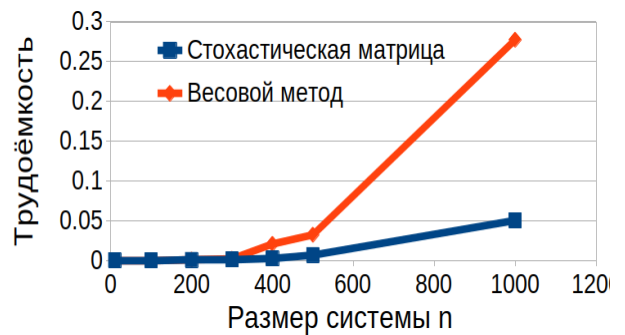


Рис. 12: Трудоемкость рандомизированных алгоритмов решения СЛАУ в зависимости от размера системы

на стандартных уравнениях коагуляции Смолуховского, которые при попытке увеличения инкубационного времени всегда вели к снижению скорости роста числа устойчивых островков. В данной работе впервые удалось решить эту задачу путем построения гибридной модели, в которой на первом этапе нуклеации применялась термодинамическая теория зарождения критических островков, а на втором этапе использовалась модель прямого стохастического моделирования, предложенная ранее.

Грант 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.

Разработаны, численно реализованы и верифицированы два типа моделей нестационарных временных рядов индекса холодового стресса и эквивалентно-эффективной температуры на метеостанциях, расположенных в Арктической зоне России. Модели первого типа основаны на применении специально разработанного стохастического генератора погоды, а модели второго типа – на определяющих формулах.

При разработке генератора погоды была учтена специфика рассмотренного региона. В частности, в генераторах в качестве одномерного распределения модуля скорости ветра обычно используют распределение Вейбулла или смеси гамма-распределений. Однако для рассмотренных метеостанций на территории АЗРФ эти распределения, как и ряд других известных распределений непрерывных случайных величин, неудовлетворительно аппроксимирует выборочное распределение рассматриваемого метеопараметра. Поскольку на метеостанциях фиксируются лишь целочисленные значения модуля скорости ветра, было принято решение рассматривать модуль скорости ветра как дискретную случайную величину. В таком случае при реализации генератора погоды моделируется вектор, часть компонент которого имеют непрерывное распределение, а одна компонента – дискретное. Стохастический подход к моделированию рядов эквивалентно-эффективной температуры применен впервые.

Прочие проекты

КНП № 075-15-2020-787 Минобрнауки "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.

Разработана и реализована на суперкомпьютере численная стохастическая модель совместно пространственно-временного поля суточных осадков в водосборе р. Слюдянка и ряда ее суточного стока на гидропосту. Разработан алгоритм моделирования условных рядов стока при различных сценариях выпадения осадков в водосборе. Проведены расчеты характеристик стока при штормовых и слабых осадках в водосборе.

Разработаны: метод верификации моделей пространственно-временных метеополей на станциях, расположенных на юге Байкальской природной территории на основе сравнения вероятностей совместного превышения метеопараметрами заданных уровней по модельным и реальным

данным; метод оценки характеристик экстремальных метеоситуаций по модельным данным; программы для моделирования и исследования полей на суперкомпьютере. Проведены эксперименты по оценке эффективности расчетов на суперкомпьютере с учетом специфики метода Монте-Карло.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Пененко А. В., Рапута В. Ф., Огородников В. А., Пененко В. В., Акентьева М. С., Амикишьева Р. А., Гочаков А. В., Каргаполова Н. А., Леженин А. А., Пьянова Э. А., Скорик В. С. Методы математического моделирования для цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки // *Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории* : коллект. моногр. / под ред. И. В. Бычкова, Д. П. Гладкочуба, Г. М. Ружникова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. С. 294–333.

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.* 2022. V. 126. Art. 107830. DOI: 10.1016/j.aml.2021.107830.

2. 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 in the Appl. Sci.* 2022. No. 45(3). P. 1420–1431. DOI: 10.1002/MMA.7861.

3. Dimov, I., Todorov, V., Sabelfeld, K. A study of highly efficient stochastic sequences for multi-dimensional sensitivity analysis // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2022. V. 28, iss. 1. P. 1–12. DOI: 10.1515/mcma-2022-2101.

4. Sabelfeld, K. Randomized Monte Carlo algorithms for matrix iterations and solving large systems of linear equations // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2022. V. 28, iss. 2. P. 125–133. <https://doi.org/10.1515/mcma-2022-2114>.

5. Jahn, U., Kaganer, V. M., Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E., Laehnemann, J., Pfueller, C., Cheze, C., Biermann, K., Calarco, R., Brandt, O. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. I: Temperature-dependent generation volume // *Phys. Rev. Appl.* 2022. V. 17. Art. 024017. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.024017.

6. Brandt, O., Kaganer, V. M., Laehnemann, J., Flissikowski, T., Pfueller, C., Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E., Cheze, C., Calarco R., Grahn, H., Jahn, U. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. II: Ambipolar versus exciton diffusion // *Phys. Rev. Appl.*, 2022. V. 17. Art. 024018. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.024018.

7. Laehnemann, J., Kaganer, V. M., Sabelfeld, K. K., Kireeva, A. E., Jahn, U., Cheze, C., Calarco, R., Brandt, O. Carrier diffusion in GaN: A cathodoluminescence study. III: Nature of nonradiative recombination at threading dislocations // *Phys Rev. Appl.* 2022. V. 17. Art. 024019. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.17.024019.

8. Sabelfeld, K. K., Sapognikov, V. A. Simulation of transient and spatial structure of the radiative flux produced by multiple recombinations of excitons // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2022. V. 28, iss. 3. P. 255–268.

9. Sabelfeld, K. K., Kablukova, E. G. Long incubation time, burst nucleation, and growth of GaN nanowires in plasma-assisted molecular beam epitaxy // *Comput. Material. Sci.* 2022. V. 213. Art. 111664.
10. Kolyukhin, D. R., Sabelfeld, K. K., Dimov I. Sensitivity analysis of the concentration transport estimation in a turbulent flow // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2022. V. 28, iss. 3. P. 211–219.
11. Sabelfeld, K., Kireeva, A. A meshless random walk on parallelepipeds algorithm for solving transient anisotropic diffusion-recombination equations and applications to cathodoluminescence imaging // *Methodol. and Comput. in Appl. Probab.* 2022. July 2022. DOI:10.1007/s11009-022-09968-9.
12. Sabelfeld, K., Bukhashev, O. Global randomwalk on grid algorithm for solving Navier –Stokes and Burgers equations // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2022. V. 28, iss. 4. P. 293–305. doi.org/10.1515/mcma-2022-2126.
13. Sabelfeld, K. K., Kireev, S., Kireeva, A. Parallel implementations of randomized vector algorithm for solving large systems of linear equations // *J. Supercomput.* 2022. [Electron. resource]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1943534/v1>.
14. Sabelfeld, K. K., Aksyuk, I. Simulation of drift-diffusion process at high Peclet numbers by the random walk on spheres method // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2022. V. 28, iss. 4. P. 349–367. doi.org/10.1515/mcma-2022-2128.
15. Shalimova I., Sabelfeld, K. Implementation of a branching random walk on spheres process for solving the 2D Lamé equation // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2022. V. 28, iss. 4. P. 79–93. doi.org/10.1515/mcma-2022-2131.
16. Mu, Q., Kargin, B. A., Kablukova, E. G. Computer-aided construction of three-dimensional convex bodies of arbitrary shapes // *J. Comput. Technol.* 2022. V. 27(2). P. 4–18. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.2.002.
17. Prigarin S. M., Mironova D. E. Monte Carlo simulation of ring-shaped structures of laser pulse radiation scattered in atmospheric clouds and water media // *Num. Analysis and Appl.* 2022. V. 15, No. 3. P. 247–255. <https://doi.org/10.1134/S1995423922030065>.
18. Akenteva, M. S., Kargapolova, N. A., Ogorodnikov, V. A. Development of a numerical stochastic model of joint spatio-temporal fields of weather parameters for the south part of the Baikal natural territory // *RJNAMM.* 2022. V. 37. No. 2. P. 73–83. DOI: 10.1515/rnam-2022-0006.
19. Bulgakova, T. E., Voytishek, A. V. On numerical stability of randomized projection functional algorithms // *Commun. in Stat.: Simul. and Comput.* 2022. V. 51, No. 4. P. 1637–1646. <https://doi.org/10.1080/03610918.2019.1677914>.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Му Ц., Каргин Б. А., Каблукова Е. Г. Численное стохастическое моделирование рассеяния оптического излучения ледяными кристаллами нерегулярных случайных форм // *Выч. технол.* 2022. Т. 27. № 2. С. 54–61. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.2.005.
2. Пригарин С. М., Миронова Д. Э. Статистическое моделирование кольцевых структур рассеяния лазерного излучения в атмосферной облачности и водных средах // *СибЖВМ.* 2022. Т. 25, № 3. С. 303–312.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Акентьева, М. С., Каргаполова, Н. А. Стохастические модели временных рядов биоклиматических индексов в Арктической зоне Российской Федерации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 62–69. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-62-69.
2. Каблукова, Е. Г., Ошлаков, В. Г., Пригарин, С. М. Статистические оценки потоков излучения на фотоприемной матрице навигационной системы посадки самолетов // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 4–8 окт. 2022 г. С. 51. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-54.
3. П. Чжэн, Б. А. Каргин, Каблукова, Е. Г. Исследование эффективности весового алгоритма и метода максимального сечения для моделирования длины свободного пробега фотона в стохастических средах // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 4–8 окт. 2022 г. С. 63. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-77.
4. Ли, Цз., Пригарин, С. М. Реконструкция изображений с пуассоновским шумом методом Метрополиса // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 4–8 окт. 2022 г. С. 54. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-58.
5. Войтишек, А. В., Гаджихмедов, М. Г., Рыжов, И. А., Трофимов, И. А. Сравнение вычислительных затрат на основные математические операции с помощью системы NMPUD // Материалы 20-й Междунар. конф. им. А. Ф. Терпугова "Информационные технологии и математической моделирование", Томск, 1–5 дек. 2021 г. Томск: ТГУ, 2022. С. 329–334.
6. Войтишек, А. В., Гаджихмедов, М. Г., Черкашин, Д. А. Компьютерное моделирование случайных величин по приближениям их плотностей распределения // Материалы 20-й Междунар. конф. им. А. Ф. Терпугова "Информационные технологии и математической моделирование", Томск, 1–5 дек. 2021 г. Томск: ТГУ, 2022. С. 335–340.
7. Левыкин, А. И., Новиков, А. Е., Новиков Е. А. Алгоритм третьего порядка точности решения неявных систем ОДУ // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 4–8 окт. 2022 г. С. 35. DOI 10.24412/cl-35065-2022-1-02-43.

Регистрация программ в Роспатенте

1. Свидетельство № 2022615130. Программа для ЭВМ "Convex hull" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Каргин Б. А., Му Ц. Дата регистрации: 29.03.2022.
2. Свидетельство № 2022613371. Программа для ЭВМ "Программный комплекс Crystall scattering matrix" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Каргин Б. А., Му Ц. Дата регистрации: 14.03.2022.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 4–8 окт. 2022 г. – 10 докладов, из них 1 пленарный и 1 приглашенный (Сабельфельд К. К., Киреева А. Е., Каблукова Е. Г., Протасов Д. Ю., Журавлев К. С., Шалимова И. А., Акентьева М. С., Огородников В. А., Каргаполова Н. А., Левыкин А. И.).
2. 14-я Международная конференция "Новые информационные технологии в исследовании сложных структур" (ISAM 2022), оз. Байкал, 19–24 сентября 2022 г. – 1 доклад (Сабельфельд К. К., Киреева А. Е.)

3. 29-я Рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 22–25 ноября 2022 г. – 3 доклада (Чжэн П., Каблукова Е. Г., Каргин Б. А., Пригарин С. М., Ли Ш., Акентьева М. С., Огородников В. А., Каргаполова Н. А.).

4. Международная конференция "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках Международной выставки и научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь", Новосибирск, 18–20 мая 2022 г. – 3 доклада (Акентьева М. С., Огородников В. А., Каргаполова Н. А.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Каргаполова Н. А. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.;

2. Каргин Б. А. – член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.;

3. Сабельфельд К. К.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

– член программного комитета 60-й Международной студенческой научной конференции "МНСК-2022", Новосибирск, 10–20 апреля 2022 г.,

4. Войтишек А. В.:

– член программного комитета 60-й Международной студенческой научной конференции "МНСК-2022", Новосибирск, 10–20 апреля 2022 г.,

– член программного комитета 21-й Международной конференции "Информационные технологии и математическое моделирование" им. А. Ф. Терпугова, Карши (Узбекистан), 25–29 октября 2022 г.;

5. Огородников В. А. – член программного комитета 60-й Международной студенческой научной конференции "МНСК-2022", Новосибирск, 10–20 апреля 2022 г.;

6. Пригарин С. М. – член программного комитета 60-й Международной студенческой научной конференции "МНСК-2022", Новосибирск, 10–20 апреля 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Монографий, глав в монографиях – 1

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 19

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 21

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 28

Свидетельств и регистрации программ в Роспатент – 2

Докладов на конференциях – 17, в том числе 2 пленарных и приглашенных

Членов организационных или программных комитетов конференций – 8

Кадровый состав

- | | | |
|----------------------|-----------|-------------------|
| 1. Каргин Б. А. | д.ф.-м.н. | зав. лабораторией |
| 2. Огородников В. А. | д.ф.-м.н. | г.н.с. |
| 3. Сабельфельд К. К. | д.ф.-м.н. | г.н.с. |

4. Пригарин С. М.	д.ф.-м.н.	в.н.с.
5. Войтишек А. В.	д.ф.-м.н.	в.н.с.
6. Левыкин А. И.	к.ф.-м.н.	с.н.с.
7. Шалимова И. А.	к.ф.-м.н.	с.н.с.
8. Каблукова Е. Г.	к.ф.-м.н.	с.н.с.
9. Каргаполова Н. А.	к.ф.-м.н.	с.н.с.
10. Киреева А. Е.	к.ф.-м.н.	снс
11. Ухинова О. С.	к.ф.-м.н.	н.с.
12. Сересева О. В.	к.ф.-м.н.	с.н.с.
13. Каргин А. Б.	ведущ. инженер	
14. Акентьева М. С.	инженер	

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

Руководство студентами

Чжан Тао	– 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Войтишек А. В.
Чао Хуэй	– 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Войтишек А. В.
Смирнов И. А.	– 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Войтишек А. В.
Сюанью Су	– 4-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.	– 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.
Бухашеев О. В.	– 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.
Глазков С. П.	– 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.
Наумов В. Т.	– 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.
Шафигулин И. А.	– 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.
Панарин А. С.	– 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.
Ли Шэннань	– 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пригарин С. М.
Исполитов М. С.	– 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Пригарин С. М.
Хэ Шичжэ	– 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Пригарин С. М.

Руководство аспирантами

Абдразакова А. Р.	– 3-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. – 2-й курс ММФ НГУ, руководитель Огородников В. А.
Шлымбетов Н. Х. – 1-й год, НГУ, руководитель Войтишек А. В

Защита дипломов

- Гао Ди – магистр ММФ НГУ, руководитель Огородников В. А.
Дюбенкова А. С. – диплом бакалавра (ММФ НГУ)
Гаджихамедов М. Г. – диплом бакалавра (ММФ НГУ)

Руководство школьниками

Войтишек А. В. – руководитель лаборатории математического моделирования лицея № 130 г. Новосибирска (школа РАН).

Защита диссертации

Каргаполова Н. А. – диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук "Алгоритмы численного стохастического моделирования нестационарных метеорологических и биоклиматических процессов", специальность 01.01.07 – Вычислительная математика, 15 июня 2022 г.

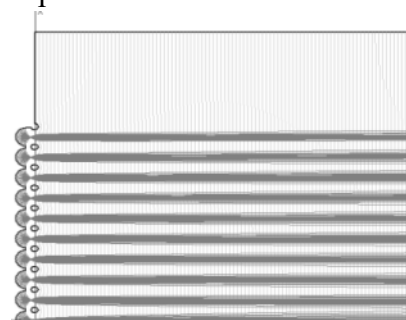
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ

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

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

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

Математическое моделирование протяженных электронно-оптических систем с интенсивными пучками приводит к решению самосогласованной нелинейной задачи, включающей расчет электрических и магнитных полей, траекторий заряженных частиц и объемного заряда. Под протяженной понимается система, размер которой в направлении движения пучка намного больше поперечного размера. Применение традиционных вычислительных подходов к моделированию таких систем не дает удовлетворительных результатов. Предложены новые алгоритмы и технологии, направленные на повышение точности и снижение времени расчетов. Они основаны на методе декомпозиции области, который применяется в трех пред-назначениях. Во-первых, протяженная расчетная область разбивается на две подобласти: в первой из них формируется интенсивный пучок, а во второй происходит его доускорение и транспортировка. Во-вторых, в каждой из данных подобластей с применением метода декомпозиции строится адаптивная квазиструктурированная локально-модифицированная сетка. В-третьих, самосогласованная задача решается с выделением особенности путем введения приэмиттерной подобласти.

Траектории пучков
в моделируемой системе

С помощью предлагаемых алгоритмов и технологий получены результаты моделирования сложной практической системы, обеспечивающие хорошее совпадение с результатами натуральных экспериментов. На рисунке приведены траектории пучков в моделируемой системе.

Результаты исследований опубликованы в работе

Козырев, А. Н., Свешников, В. М. Математическое моделирование интенсивных пучков заряженных частиц в протяженных электронно-оптических системах // Матем. моделир. 2022. Т. 34, № 3. С. 71–85.

Результаты исследований представлены на Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 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 НИР 0251-2022-0001.

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

Для задачи математического моделирования интенсивных пучков заряженных частиц в протяженных электронно-оптических системах предложены новые алгоритмы и технологии, направленные на повышение точности и снижение времени расчетов, основанные на методе декомпозиции области, который применяется в трех предназначениях: во-первых, протяженная расчетная область разбивается на две подобласти, в первой из них формируется интенсивный пучок, во второй происходит его доускорение и транспортировка; во-вторых, в каждой из данных подобластей с применением метода декомпозиции строится адаптивная квазиструктурированная локально модифицированная сетка; в-третьих, самосогласованная задача решается с выделением особенности путем введения приэмиттерной подобласти.

Проведены экспериментальные исследования методов решения сеточных систем в подобластях при декомпозиции 3D краевых задач на квазиструктурированных параллелепипедальных сетках. Даны рекомендации по выбору оптимального решателя на подсетках при условии малого числа узлов с большим числом повторов решения в подобласти.

Рассмотрены многосеточные методы решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), возникающих при аппроксимациях многомерных краевых задач для дифференциальных уравнений эллиптического типа второго порядка. Предложены алгоритмы вложенной неполной факторизации и симметричной или несимметричной последовательной верхней релаксации (соответственно для симметричной или несимметричной СЛАУ).

Для численного решения задачи продолжения для уравнения теплопроводности 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, равное по порядку числу точек сетки. Как правило, решение задачи Коши для параболических уравнений так или иначе связано с применением итерационных процедур. Известные прямые алгоритмы решения задачи Коши разработаны только для операторов с постоянными коэффициентами и основаны на существовании аналитических решений для прямых задач с такими операторами. Новизна настоящей работы состоит в том, что представленный экономичный алгоритм может быть применен для оператора с переменными коэффициентами. Принципиально, что в этом случае нельзя получать аналитические решения прямой задачи.

Проведен анализ численного решения уравнений Фредгольма 1-го рода методом Галёркина, к которому можно отнести также известные методы коллокаций и наименьших квадратов. Предложена модификация метода Галёркина, в которой количество базисных функций выбирается максимальным при условии, что обратная величина к числу обусловленности матрицы метода будет превышать некоторое малое число. Величина этого числа получена при анализе результатов проведённых численных экспериментов. На основе анализа решения тестовых задач и сравнения с результатами, полученными другими авторами, сделаны заключения о целесообразности использования многочленов Чебышева для аппроксимации искомого решения без дополнительной регуляризации и проведен качественный анализ погрешности приближенного решения.

Разработаны методы вычисления силы воздействия осесимметричного магнитного поля на сверхпроводящий шар произвольного радиуса, центр которого расположен на оси внешнего осесимметричного магнитного поля.

Разработан алгоритм расчета интерференционных картин в сценах с естественным освещением, а именно, получено простейшее решение – алгоритм, работающий по технологии спектрального рендеринга.

Разработан предобусловливатель на основе метода Вайдия для несимметричных матриц. Проведена реализация разбиения графа методом поиска в глубину.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Петухов, А. В., Савченко, А. О. Решение внешней краевой задачи для уравнения Гельмгольца декомпозицией области с пересечением // ЖВМиМФ. 2002. Т. 62, № 5. С. 809–822. DOI: 10.1134/S0965542522050116.

2. Козырев, А. Н., Свешников, В. М. Математическое моделирование интенсивных пучков заряженных частиц в протяженных электронно-оптических системах // Матем. моделир. 2022. Т. 34, № 3. С. 71–85. DOI: 10.20948/mm-2022-03-04.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Savchenko, A. Force acting on a superconducting ball in an axisymmetric magnetic field // J. Superconduct. and Novel Magnet. 2022. V. 35. P. 1445–1456. DOI: 10.1007/s10948-022-06163-2.

2. Il'in, V. P., Kozlov, D. I. Parallel methods for solving saddle type systems // The 6th Intern. Conf. Parallel Computational Technologies (PCT 2022), Dubna (Russia), March 29–31, 2022 / L. Sokolinsky, M. Zymbler (eds). CCIS. 2022. V. 1618. P. 85–98. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11623-0_7.

3. Gladkikh, V. S., Il'in, V. P., Pekhterev, M. S. Comparative analysis of parallel methods for solving SLAEs in three-dimensional initial-boundary value problems // The 6th Intern. Conf. Parallel Computational Technologies (PCT 2022), Dubna (Russia), March 29–31, 2022 / L. Sokolinsky, M. Zymbler (eds). CCIS. V. 1618. Springer, Cham. P. 59–72. DOI: 10.1007/978-3-031-11623-0_5.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Климонов, И. А., Свешников, В. М. Экспериментальное исследование некоторых решателей 3D краевых подзадач на подсетках квазиструктурированных параллелепипедальных сеток // СибЖВМ. 2022. Т. 25, № 4. С. 423–434. DOI: 10.15372/SJNM20220408.

2. Ильин, В. П. Многосеточные методы неполной факторизации // Записки научных семинаров ПОМИ РАН. 2022. Т. 514. С. 61–70.

3. Герб, А. Р., Омарова, Г. А. Применение теории графов в алгебраических многомерных методах для решения разреженных СЛАУ // Пробл. информ. 2022. № 3. С. 77–89. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-3-77-89.

4. Ильин, В. П. О концепции и архитектуре базы знаний в математическом моделировании // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. С. 13. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-18.

5. Баталов, М. А., Ильин, В. П., Петухов, А. В., Гурьева, Я. Л. Вариант многосеточного метода для решения двумерных и трехмерных краевых задач // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. С. 21. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-02.

6. Горшунов, В. С., Гусяков, В. К., Ильин, В. П., Петухов, А. В., Роменский, Е. И. О моделирование цунами с помощью разрывных методов Галеркина на неструктурированной сетке // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. С. 28. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-12.

7. Ильин, В. П., Козлов, Д. И., Петухов, А. В. О методах bidiagonalization для решения несимметричных СЛАУ // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. С. 32. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-02-24.

8. Дебелов, В. А. Подход к расчету интерференции в сценах с оптически изотропными объектами и естественным освещением // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. С. 118. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-68.

9. Козырев, А. Н., Свешников, В. М. Математическое моделирование протяженных электронно-оптических систем // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. С. 34. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-25.

10. Омарова, Г. А., Перевозкин, Д. В. Методы преобусловливания, основанные на остовных деревьях // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. С. 38. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-30.

11. Герб, А. Р., Омарова, Г. А. Применение теории графов в алгебраическом многосеточном методе для решения разреженных СЛАУ // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. С. 117. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-67.

12. Савченко А. О. Решение интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода с негладкими ядрами методом Галёркина // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. С. 40. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-02-28.

13. Сорокин С. Б. Экономичный численный алгоритм вычисления потока тепла на недоступной границе // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. С. 111. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-59.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Марчуковские научные чтения (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 11 докладов, из них 1 пленарный (Ильин В. П., Баталов М. А., Гурьева Я. Л., Петухов А. В., Горбенко Н. И., Дебелов В. А., Козлов Д. И., Перевозкин Д. В., Омарова Г. А., Пудов С. Г., Савченко А. О., Свешников В. М., Козырев А. Н., Сорокин С. Б.).

2. Национальный суперкомпьютерный форум (НСКФ-2022), Переславль-Залесский (Московской обл.), 29 ноября – 2 декабря 2022 г. – 1 доклад (Свешников В. М., Корнеев В. Д.).

3. Вычислительная математика и приложения, Сочи ("Сириус"), 1–5 августа 2022 г. – 1 доклад (Ильин В. П.).

4. Всероссийская конференция с элементами школы молодых ученых, посвященная памяти акад. А. Ф. Сидорова (АФСид-2022), п. Кабардинка (Краснодарский кр.), 1–7 сентября 2022 г. – 1 пленарный доклад (Ильин В. П.).

5. Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ-2022), Дубна (Московская обл.), 29–31 марта 2022 г. – 2 доклада (Ильин В. П., Гладких В. С., Козлов Д. И.).

6. Современные проблемы обратных задач, Новосибирск, 19–23 декабря 2022 г. – 1 доклад (Сорокин С. Б.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Ильин В. П.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.,

– член программного комитета конференции "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ-2022), Дубна (Московская обл.), 29–31 марта 2022 г.;

2. Петухов А. В. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 5

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 18

Докладов на конференциях – 17, в том числе 2 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 3

Кадровый состав

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

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

Педагогическая деятельность

Ильин В. П. – профессор НГУ

Свешников В. М. – профессор НГУ

Сорокин С. Б. – профессор НГУ

Омарова Г. А. – доцент НГУ

Руководство студентами

Козлов Д. И. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Ильин В. П.

Баталов М. А. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Ильин В. П.

Шаранов Д. А. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Ильин В. П.

Герб А. Р. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Омарова Г. А.

ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ХИМИИ

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

Важнейшие достижения

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

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

Предложен новый подход к устранению неоднозначности давления при численном решении задачи о фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости в трещиновато-пористой среде. Речь идет о моделировании процессов вытеснения нефти водой при заданных дебитах скважин. В основе подхода лежит расширение обобщенной формулировки системы законов сохранения с использованием дополнительного функционала. В виде набора теорем даны ответы на вопросы об условии однозначной разрешимости исходной задачи, о корректности расширенной формулировки, об эквивалентности исходной и расширенной формулировок, об однозначной разрешимости сеточной задачи, построенной смешанным методом конечных элементов. В отличие от традиционных подходов не требуется каких-либо дополнительных усилий по устранению неоднозначности давления. Данная методика является составной частью модели нестационарного процесса, численные результаты которого приведены на рис. 1.

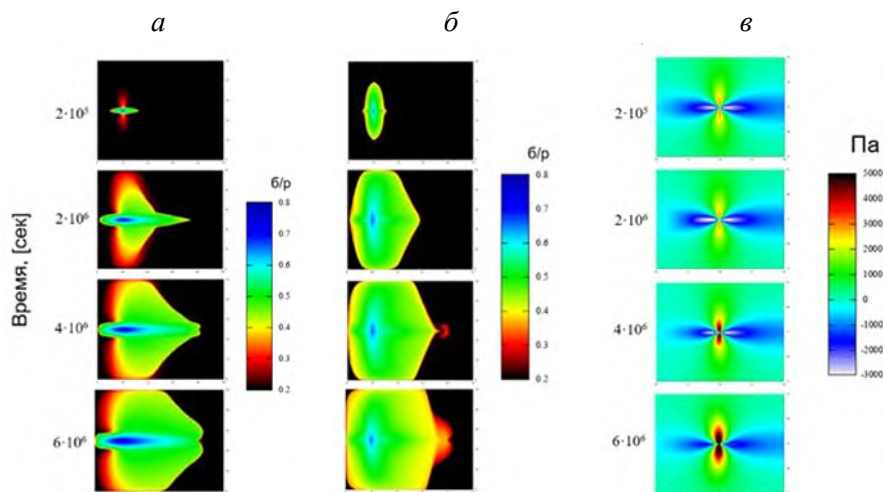


Рис. 1: Вытеснение нефти водой в анизотропной двухпористой среде с заданными дебитами скважин: *a* – водонасыщенность в порах; *б* – водонасыщенность в трещинах; *в* – разность давлений в порах и трещинах в окрестности эксплуатационной скважины в различные моменты времени

Результаты исследований изложены в работах:

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

2. Ivanov, M. I., Kremer, I. A., Laevsky Yu. M. On non-uniqueness of pressures in problems of fluid filtration in fractured-porous media // J. Comput. and Appl. Math. [Electron. resource]. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.115052>. (IF 2,239).

Результаты исследований представлены на Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2022", Новосибирск, Россия, 3–7 окт. 2022 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 г.
в соответствии с планом НИР института**

Проект НИР № 0251-2022-0001 "Методы вычислительной математики и информационно-вычислительные технологии решения прямых и обратных задач математической физики и их приложения в естествознании, включая науки о жизни".

Руководители: чл.-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.

Разработана новая методика численного решения вырожденной задачи Неймана для уравнения диффузии в смешанной постановке. Характерным примером такой задачи является вычислительная модель фильтрации несжимаемой однофазной жидкости в соответствии с законом Дарси, причем на внешней границе области заданы условия на скорость потока жидкости, а на скважинах заданы дебиты, обеспечивающие общий баланс массы. В основе предложенного подхода лежит включение условия однозначной разрешимости задачи в одно из уравнений системы с использованием множителя Лагранжа с последующим понижением ее порядка. Доказаны утверждения об однозначной разрешимости сконструированной задачи и об ее эквивалентности исходной смешанной постановке в подпространстве. Осуществлена аппроксимация задачи на основе смешанного метода конечных элементов. Исследован вопрос однозначной разрешимости полученной седловой системы линейных алгебраических уравнений. Теоретические результаты проиллюстрированы численными экспериментами. В частности, приведена зависимость относительной невязки от количества итераций решения седловой системы для двух разных положительных множителей при дополнительном функционале, обеспечивающем однозначную разрешимость задачи.

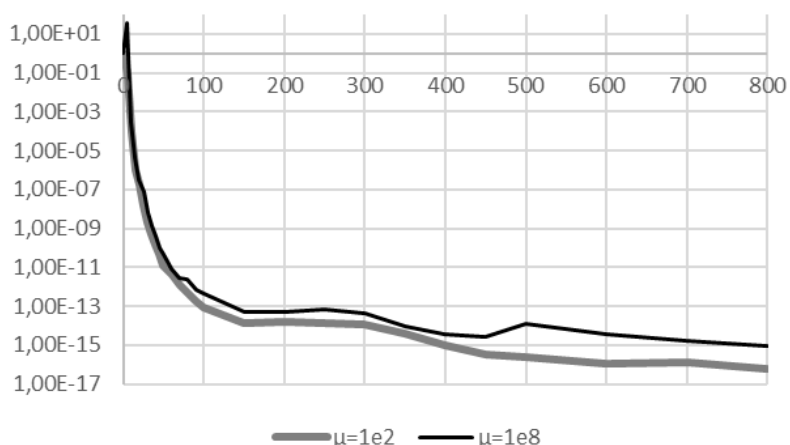


Рис. 2: Зависимость относительной невязки от числа итераций

Разработана однотемпературная модель неизотермической фильтрации двухфазной жидкости в трещиновато-пористых средах, включающая двойной набор уравнений в порах и трещинах для суммарных скоростей и давлений в смешанном виде, а также переноса фаз жидкостей. В систему уравнений добавлен закон сохранения энергии, который записывается в терминах

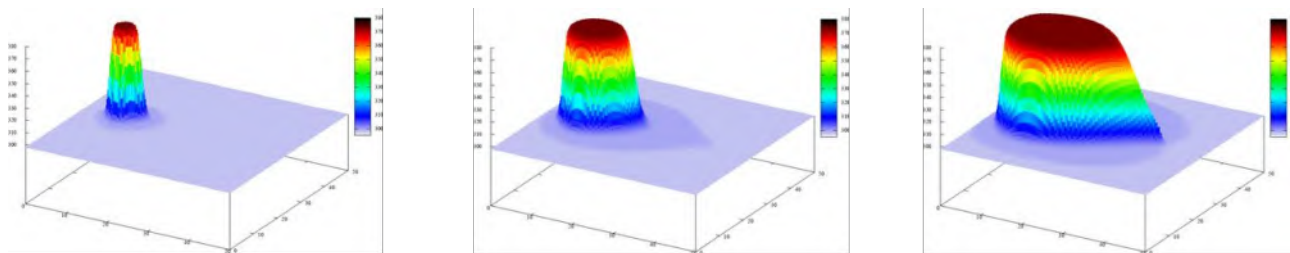


Рис. 3: Динамика температуры пласта

температуры и теплового потока, а связь динамической вязкости фаз жидкости с температурой задается формулой Вальтера. Для численного решения поставленной начально-краевой задачи используется расширение IMPES – схемы, суть которой заключается в комбинировании явно- неявных методов. На каждом шаге по времени явным образом пересчитываются нелинейные зависимости и конвективные переносы масс и энергии, а для описания диффузионных изменений давлений и температуры используются неявные методы решений. Отметим, что задача для скоростей и давлений содержит одномерное ядро, которое следует учитывать в алгоритме ее решения. Описанная схема реализована в 3D варианте.

В отчетном году разработан алгоритм поиска наилучших кубатурных формул на сфере, инвариантных относительно общей циклической группы вращений S_{kh} . Эта группа является подгруппой ранее изученных групп D_{kh} . В разработанном алгоритме сначала вводятся три базисные инвариантные формы, первая из которых представляет собой многочлен второй степени, а две другие – многочлены степени k . Затем строится пространство инвариантных относительно данной группы многочленов в виде многочленов от базисных инвариантных форм. Отличительной особенностью разработанного подхода является решение по единой схеме возникающих систем уравнений для всех исследованных групп симметрии. При этом основная цель – получить оптимальную кубатурную формулу в рамках данной группы симметрии. Получаемые в рамках этой группы системы уравнений являются более сложными по сравнению с соответствующими системами в случае групп D_{kh} . Оправданием такого усложнения является то, что в рамках данного подхода можно получить кубатурные формулы с меньшим числом узлов по сравнению со всеми другими кубатурными формулами той же точности. С помощью предложенного алгоритма были проведены обширные численные расчеты с использованием вычислительной техники Сибирского суперкомпьютерного центра. В результате получены новые кубатурные формулы 19-, 25-, 31- и 33-го порядков точности, превосходящие по своим характеристикам ранее известные кубатуры той же точности. По данной тематике подготовлена статья.

Продолжено тестирование библиотеки ODEsolver на системах уравнений различной жесткости, в том числе для систем уравнений с запаздывающим аргументом, характерных при описании динамики генных сетей.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

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

2. Ivanov, M. I., Kremer, I. A., Laevsky, Yu. M. On non-uniqueness of pressures in problems of fluid filtration in fractured-porous media // J. Comput. and Appl. Math. [Electron. resource]. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2022.115052>.

Издания, включенные в реферативную базу данных РИНЦ

1. Иванов, М. И., Кремер, И. А., Лаевский, Ю. М. Решение вырожденной задачи Неймана смешанным методом конечных элементов // СибЖВМ. 2022. Т. 25, № 4. С. 385–401. DOI: 10.15372/SJNM20220404.

2. Лаевский, Ю. М. Масштабные явные методы решения сеточных параболических уравнений // Многомасштабные методы и высокопроизводительные научные вычисления : Сб. тезисов 5-й Международной конференции, Якутск. Якутск: СВФУ им. М. К. Аммосова, 2022. С. 16.

3. Лаевский, Ю. М. Многомасштабные явные методы решения сеточных параболических задач // Суперкомпьютерные технологии математического моделирования : Сб. тезисов конференции, Якутск, 5–7 сент. 2022 г. Якутск: СВФУ им. М. К. Аммосова, 2022. С. 12а.

4. Иванов, М. И., Кремер, И. А., Лаевский Ю. М. Новый подход в проблеме неоднозначности давления в задачах фильтрации // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", 3–7 октября 2022 г. С. 12. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-03-23.

5. Иванов, М. И., Кремер, И. А., Лаевский Ю. М. Однотемпературная неизотермическая фильтрация двухфазной жидкости в трещиновато-пористых средах // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", 3–7 октября 2022 г. С. 32. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-24.

Участие в конференциях и совещаниях

1. 5-я Международная конференция "Суперкомпьютерные технологии математического моделирования", Москва, 27–30 июня 2022 г. – 1 пленарный доклад (Ю. М. Лаевский).

2. Конференция "Вычислительная математика и приложения", Сочи (Sirius), 1–5 августа 2022 г. – 1 доклад (пленарный) (Ю. М. Лаевский).

3. 5-я Всероссийская конференция "Многомасштабные методы и высокопроизводительные научные вычисления", Якутск, 5–7 сентября 2022 г. – 1 доклад (Ю. М. Лаевский).

4. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2022", 3–7 октября 2022 г. Новосибирск – 2 доклада, из них 1 пленарный (Иванов М. И., Кремер И. А., Лаевский Ю. М.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Лаевский Ю. М.:

– член программного комитета 5-й Международной научной конференции "Суперкомпьютерные технологии математического моделирования", Москва, 27–30 июня 2022 г.;

– член программного комитета 5-й Всероссийской научной конференции "Многомасштабные методы и высокопроизводительные научные вычисления", Якутск, 5–7 сентября 2022 г.;

– член программного комитета Международной научной конференции "Марчуковские научные чтения 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 5
Докладов на конференциях – 5, 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. Ермолаев П. А. техник
4. Иванов М. И. н.с.
5. Кремер И. А. с.н.с. к.ф.-м.н.
6. Литвиненко С. А. ведущ. инж. к.ф.-м.н.
7. Петров М. Д. инженер
8. Попов А. С. с.н.с. к.ф.-м.н.
9. Сандер И. А. ведущ. программист
10. Сিনিшина Е. А. инженер

Педагогическая деятельность

- Лаевский Ю. М. – профессор НГУ, зав. кафедрой вычислительной математики
Голубева Л. А. – доцент НГУ
Кремер И. А. – доцент НГУ
Литвиненко С. А. – ассистент НГУ

Руководство студентами

- Ермолаев П. А. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Кремер И. А.
Петров М. Д. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Лаевский Ю. М.
Синишина Е. А. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Лаевский Ю. М.
Ван Синьюй – 2-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

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

Д.ф.-м.н. Крупчатников В. Н.

На основе численного алгоритма идентификации обрушения волн Россби (RWB), который определяет момент и место опрокидывания контуров изоэнтропической потенциальной завихренности, исследуется динамика процессов антициклонического (АС-тип) и циклонического (С-тип) опрокидывания волн Россби в районе субтропического струйного течения Северного Полушария в исторический период 1979–2018 гг. Для идентификации явления RWB использованы данные из архива реанализа ERA-Interim. Результаты исследования показали, что интенсивность АС-типа RWB имеет положительный тренд изменчивости (рис. 1а), а С-тип RWB – отрицательный (рис. 1б).

Волны Россби оказывают сильное влияние на формирование погоды в средних широтах. RWB связано с характеристиками струйных течений, фазой Арктического колебания, внезапным стратосферным потеплением и блокирующими явлениями. Атмосферные блокинги представляют собой квазистационарный гребень волны Россби большой амплитуды, который блокирует движение циклонов. Зачастую они связаны с квазистационарными антициклонами синоптического масштаба большой амплитуды во внетропических широтах. Полученные результаты позволяют сделать вывод о росте явлений блокирования, связанных с региональной экстремальной погодой – волнами тепла в летний и холода в зимний сезон.

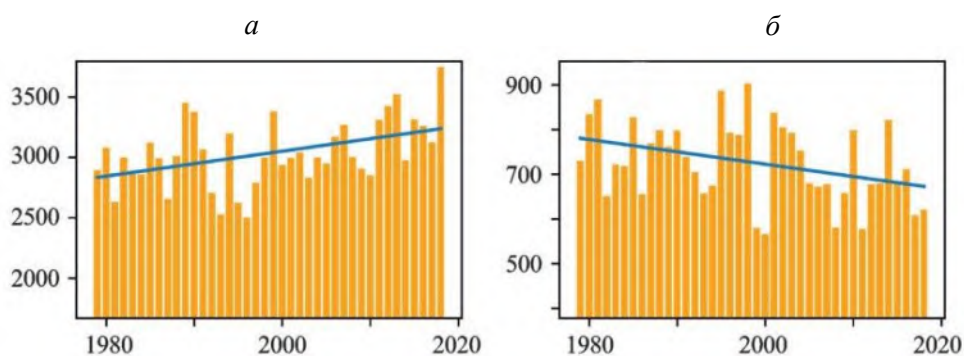


Рис. 1: Межгодовая изменчивость интенсивности RWB: АС-тип RWB (а); С-тип RWB (б)

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Gochakov, A. V., Antokhina, O. Yu., Krupchatnikov, V. N., Martynova, Yu. V. Long-term variability of Rossby wave breaking in the subtropical jet stream area // Russ. Meteorol. and Hydrol. 2022. V. 47, No. 2. P. 79–88. DOI:10.52002/0130-2906-2022-2-5-19.

2. Martynova, Yu. V., Krupchatnikov, V. N, Gochakov A. V., Antokhina, O. Yu. Relationship between anomalies of the rate of snow cover formation in Western Siberia and atmospheric dynamics in the Northern Hemisphere in the autumn–winter season // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58, No. 1. P. 95–109. DOI: 10.1134/S0001433822010078.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 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 НИР 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 2022 г.

На этапе 2022 г. работы велись по следующим направлениям:

1. Включение или модернизация биогеохимических блоков модели климатической системы Земли.

Для учета биохимических процессов в численной модели SibCIOM (Siberian Coupled Ice-Ocean Model) осуществлено подключение платформы FABM (Framework for Aquatic Biogeochemical Models), объединяющей в себе набор различных биогеохимических моделей. Она была представлена в 2014 г. в качестве промежуточного слоя между биогеохимическими и гидродинамическими моделями (от 1D до 3D). FABM использует язык Fortran, и его исходный код является открытым.

В таком варианте океаническая и биохимическая модели работают независимо друг от друга. К тому же по взаимному требованию происходит обмен данными между гидродинамической и биогеохимической составляющими.

Компоненты FABM были добавлены к совместной модели океана и морского льда SibCIOM в виде подключаемой библиотеки. Дополнительно созданы процедуры обмена данными между гидродинамической составляющей и биогеохимическим блоком. Океаническая модель предполагает механизм включения биогеохимических индикаторов, определенных FABM, в свои выходные данные вместе с любыми диагностическими переменными, определенными биогеохимическими моделями. Общая структура биогеохимической модели с переменными состояния, выраженными в виде усредненных по ансамблю концентраций, определяется системой уравнений диффузии-адвекции. Значения переменных состояния инициализируются в начале моделирования и изменяются во времени путем интегрирования их основных уравнений. По требованию океанической модели FABM предоставляет обновленные значения переменных состояния и их потоков.

К переменным состояния могут относиться концентрации мелких водных организмов и растений, щелочность воды, насыщение кислородом, концентрация взвеси, концентрация различных солей (аммония, фосфата и т. д), концентрация растворенного неорганического CO₂, pH воды и т. д. FABM также позволяет биогеохимическим моделям передавать скорости вертикального перемещения (всплывание или погружение) переменных биогеохимического состояния, которые океаническая модель должна перевести в остаточный член вертикальной адвекции и решить. Кроме того, FABM поддерживает различные типы обратных связей, включая поглощение света, приводящее к выработке тепла, и изменения в поверхностном альбедо и сопротивлении ветра.

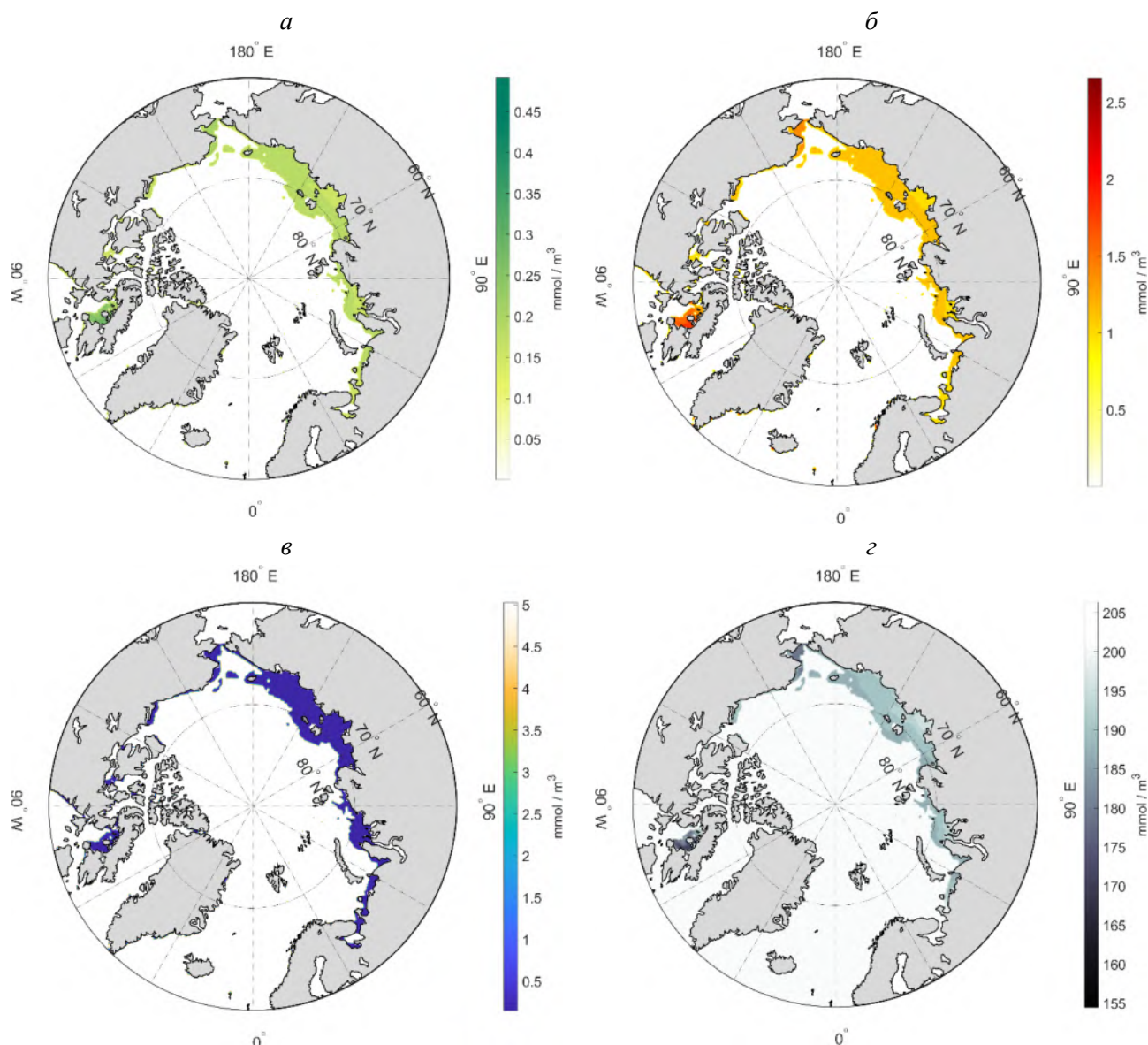


Рис. 2: Поверхностное распределение осредненных за год модельного расчета концентраций фитопланктона (а), зоопланктона (б), нутриентов (в), кислорода (z)

Структура FABM позволяет подключать любую биохимическую модель из доступного списка к океанической. На данный момент произведен тестовый запуск численной модели SibCIOM с подключенной биогеохимической моделью BioPlast, представляющую собой модель трансформации микропластика в водной среде, включая биообрастание частицами микропластика, заглатывание и выброс зоопланктоном и перенос микропластика в детрите. В данной модели за моделирование функциональных групп планктонов, растворенных и твердых органических веществ, питательных веществ, растворенного кислорода отвечает модель OxyDep, которая также отдельно доступна в FABM.

В качестве результатов тестовых расчетов на рис. 2 представлены поверхностные распределения концентрации фитопланктонов, зоопланктонов, нутриентов и кислорода в Северной Атлантике и Северном Ледовитом океане.

2. Разработка модели речного стока для регионального моделирования и прогноза развития паводков.

Поток пресной воды из рек в океаны играет важную роль в обмене водой и энергией между сушей, атмосферой и океанами. Он изменяет соленость вод океана и может влиять на термохалинную циркуляцию. Маршрутизация стока, т. е. моделирование потока пресной воды из рек, обеспечивает основу для сравнения и проверки оценок стока из моделей общей циркуляции (МОЦ) с данными наблюдаемых гидрографов. При условии, что осадки и другие атмосферные переменные из реанализов и МОЦ реалистичны, оценки речного стока могут быть использованы для оценки адекватности схемы параметризации поверхности суши, а также для оценки влияния изменений климата на гидрологию крупных речных бассейнов и водные ресурсы.

Для моделирования гидрографа стока в замыкающем створе речного русла составляющие поверхностного Q_S и подземного Q_G стоков, представляющие мгновенный сток в центре расчетной ячейки, необходимо трансформировать в пределах расчетной ячейки или малого водосбора. Такая трансформация проводится на основе линейной резервуарной модели (вариант модели Калинина – Милюкова) до выхода из расчетной ячейки и для попадания в те или иные участки модельной гидрографической сети с учетом времени добегания. Значения стока с поверхностных расчетных ячеек служат входной информацией для модели маршрутизации стока в речной сети. Для последующего моделирования стока применяется линейная модель формирования водного баланса в русловой сети.

В предыдущем варианте схемы маршрутизации поверхностного стока использовалась постоянная скорость речного потока. Такой подход оказался приемлемым для моделирования средних долгосрочных расходов воды, т. е. в месячном и более длительном временном масштабе. Однако для моделирования краткосрочных, суточных колебаний речного стока, паводков, для определения количества стока вдоль реки в различные моменты времени требуется скорость, изменяющаяся во времени, которая зависит от количества стока, генерируемого в ячейке сетки суши. Поскольку скорость речного потока имеет важное значение для моделирования гидрографов стока и времени пребывания воды в гидрологической системе, то с целью улучшения маршрутизации потока в работе реализован метод переменной скорости потока на сетке $(1/3 \times 1/3)^\circ$.

Для моделирования речного стока применяется линейная модель формирования водного баланса в русловой сети. В соответствии со схематизированной в виде графа модельной гидрографической сетью рассчитывается динамика запасов и расходов воды в каждой ячейке на основе уравнения неразрывности.

Для случая переменной скорости потока предполагается аппроксимация поперечного сечения русла реки в виде прямоугольника с площадью сечения $A = Dh$, где D – ширина реки, h – глубина. Если воспользоваться аппроксимацией для расхода воды в прямоугольном русле, то нетрудно получить формулу для переменной по времени скорости потока.

Для оценки ширины реки D используется известная геоморфологическая зависимость. Тогда решение уравнения неразрывности для поверхностного запаса воды W содержит переменную по времени русловую скорость потока.

Анализ численных экспериментов показал (рис. 3а), что скорость потока может достигать в сезон высокого стока (половодье) $\sim 4,5$ м/с, в то время как в сезон низкой воды ее значение не превышает 2,1 м/с. Эти величины сопоставимы с реальными значениями скорости. Сравнение суточных наблюдаемого и модельного гидрографов (рис. 3б) позволяет заключить, что климатическая модель воспроизводит суточные колебания речного стока в р. Лене.

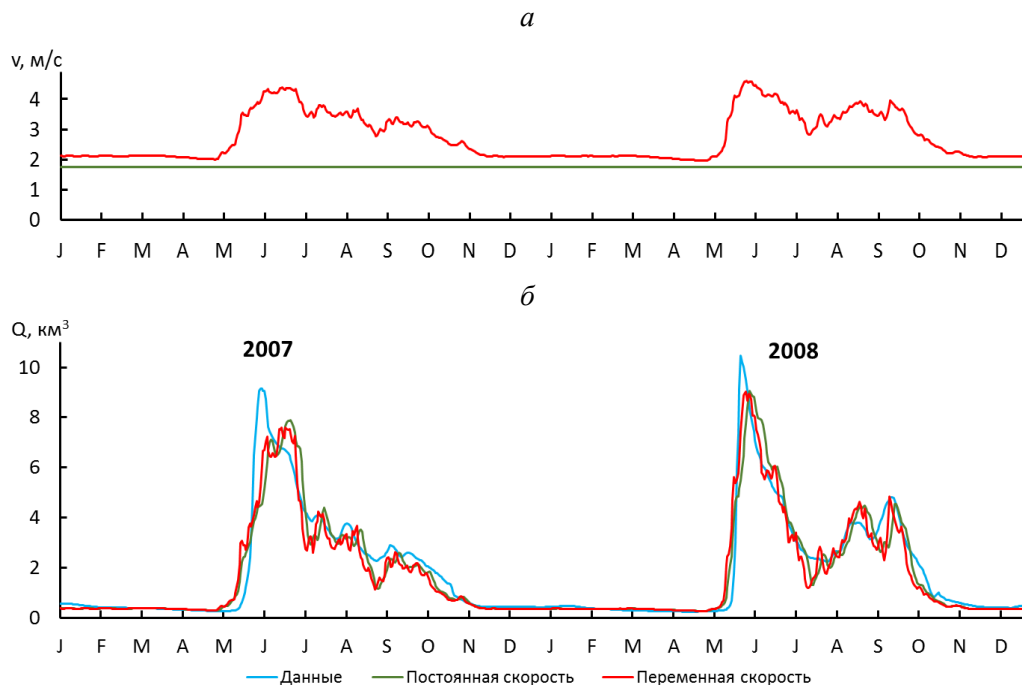


Рис. 3: Гидрографы на г/п Кюсюр за 2007–2008 гг.: постоянная и переменная скорости, соответствующие модельным расчетам (а); суточные наблюдаемый и модельные гидрографы с постоянной и переменной скоростями (б)

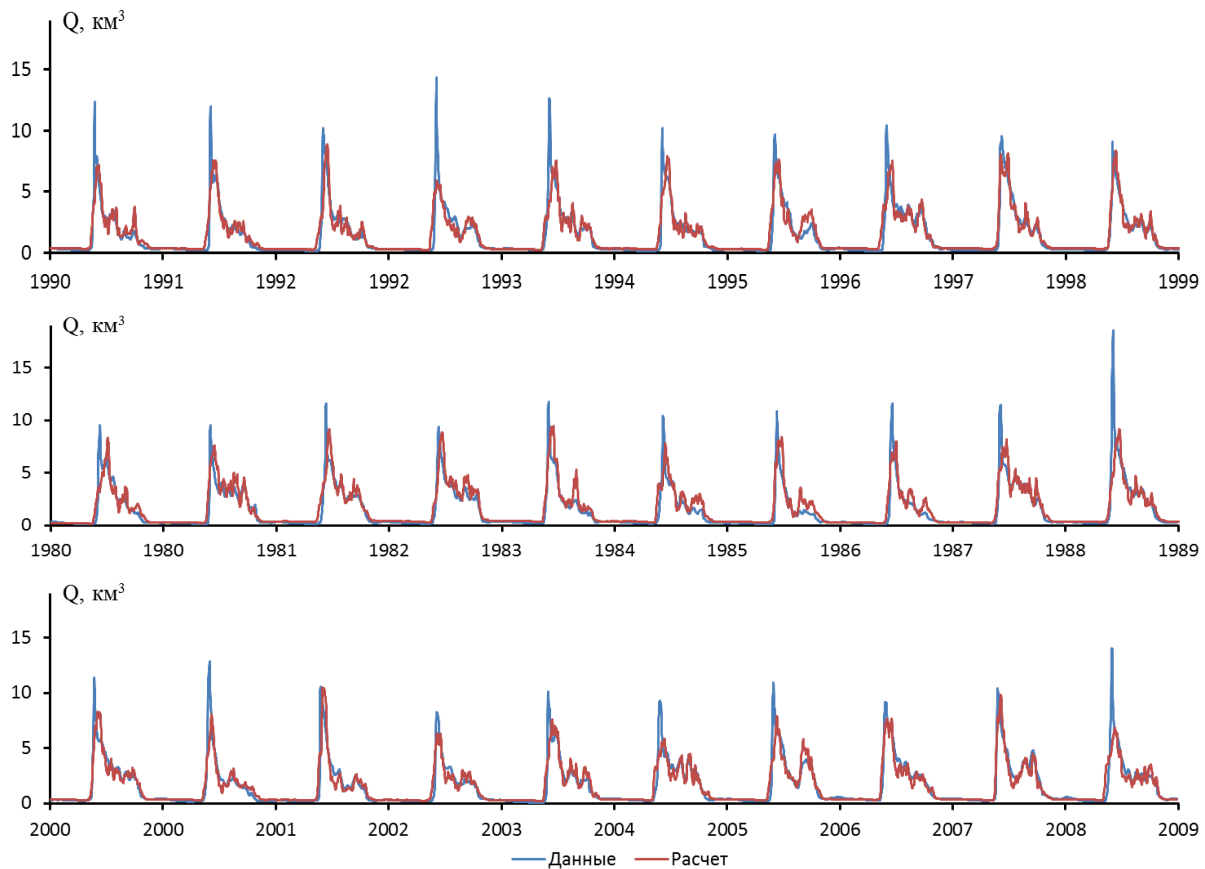


Рис. 4: Суточные наблюдаемый и модельные гидрографы с переменной скоростью потока на г/п Кюсюр за 1980–2009 гг.

Отметим, что смоделированный речной сток на г/п Кюсюр (рис. 4) отличается от наблюдаемых расходов как по величине, так и по фазе максимального стока за некоторые годы исследова-

дуемого периода. Ошибки могут быть связаны с входными данными формирования стока, т. е. в основном с осадками и использованием параметризаций в модели маршрутизации реки. Работа выполнялась с использованием данных реанализа MERRA, известно, что осадки из данного реанализа для бассейна р. Лены недооценены, а это влечет систематические ошибки в моделируемых речных стоках.

3. Расширение модели процессов в грунте блоком по расчету гидратонасыщенности донных отложений с учетом фазовых переходов.

Вечная мерзлота занимает большую площадь в Арктическом регионе как в континентальной области, так и на обширных территориях шельфа арктических морей. Многолетняя мерзлота содержит большое количество газа в гидратной форме. Метангидраты могут образовываться и существовать внутри зоны стабильности гидратов метана (ЗСГМ) в течение длительного времени. Существование метангидратов в верхних слоях мерзлых толщ в неравновесных условиях считается одной из возможных причин постоянных газопроявлений при эксплуатации скважин на газовых месторождениях Ямала, а также представляет опасность при освоении недр арктического шельфа.

Рассматривается одномерный процесс разложения газогидратов в пористой среде. На каждом шаге по времени проверяется стабильность гидратов путем сравнения вновь рассчитанной температуры T на каждой глубине с температурой диссоциации гидратов на этой глубине T_{diss} . Гидраты начинают диссоциировать, когда T превышает T_{diss} . Диссоциация газовых гидратов, как и таяние льда, включает фазовый переход и идет с поглощением тепла. В этом исследовании принят упрощенный подход для учета потребления скрытой теплоты, известный как метод интеграции тепла. Предполагается, что в процессе нарушения условий стабильного существования гидрата формируется фронт диссоциации. На фронте температура принимается равной температуре диссоциации гидрата T_{diss} . Учет потери тепла выражен путем добавления слагаемого $s(z,t)$ в уравнение теплопроводности:

$$\rho C \partial T(z,t) / \partial t = \partial / \partial z (\lambda \partial T(z,t) / \partial z) + s(z,t)$$

Тепло, необходимое для полного разложения газогидрата, находящегося в единице объема пород, составляет величину $(m \cdot h \cdot \rho_h \cdot L_h)$, где m , h , ρ_h , L_h – соответственно пористость, гидратонасыщенность, плотность, удельная теплота разложения газогидрата ($L_h = 430$ кДж/кг), λ – теплопроводность грунта на соответствующей глубине.

На глубине диссоциации гидрата грунт отдает тепло в количестве $\rho C \Delta T = \rho C (T - T_{diss})$, где ρC – объемная теплоемкость грунта (Дж/м³К). Полагая, что тепло расходуется на разложение газогидрата, можем записать условие баланса тепла: $\rho C \Delta T = m \rho_h L_h (h(t) - h(t+1))$.

Следовательно, чтобы температурного запаса ΔT слоя грунта хватило на полное разложение газогидрата, $h(t) = 0$, должно выполняться условие $\rho C \Delta T / m \rho_h L_h \geq h(t)$. Таким образом, если исходная гидратонасыщенность меньше этого значения, то теплового запаса грунта достаточно для полного разложения гидрата, находящегося в поровом пространстве за один шаг по времени. Если же условие не выполняется, то температурный запас ΔT расходуется лишь на снижение гидратонасыщенности. Изменение гидратонасыщенности во время этого процесса аппроксимируется следующим образом: $h(t+1) = h(t) - \rho C \Delta T / m \rho_h L_h$.

Слагаемое, описывающее потери тепла, зависит от теплоты диссоциации газогидрата и интенсивности его разложения: $s(z,t) = -m \rho_h L_h \partial h(t) / \partial t$.

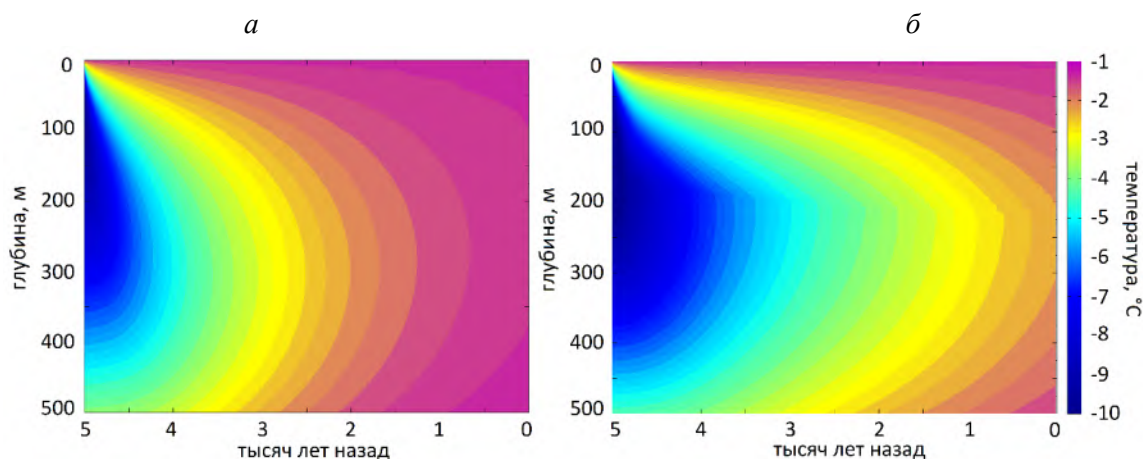


Рис. 5: Изменение поля температур за последние 5 тыс. лет, полученное по результатам численных экспериментов SH0 (а) и SH20 (б)

С использованием описанного метода проведено исследование разложение гидратонасыщенной залежи, образовавшейся в условиях ЗСГМ. Формирование гидратов может происходить при достижении термобарических условий в водонасыщенных породах с высоким газосодержанием либо в результате миграции газа из нижележащих газоносных слоев в зону стабильности гидрата. Численные эксперименты проводились для шельфа моря Лаптевых с глубиной воды 10 м. Были проведены два численных эксперимента: SH0 – моделирование стабильности гидрата метана выполнено без гидратов в осадке, гидратонасыщенность $h = 0\%$; SH20 – предполагается формирование газогидратной залежи в верхней части ЗСГМ в период максимального промерзания отложений (20 тыс. лет назад), гидратонасыщенность $h = 20\%$. Разложение гидрата происходит с затратой тепла.

Анализ проведенных экспериментов с учетом гидратонасыщенности пород показал, что эндотермическая реакция является важным механизмом замедления диссоциации гидратов в мерзлых отложениях. Дегградация гидратов происходит за счет аккумулированного в них тепла, поскольку тепловой поток от окружающих пород незначителен. Вследствие процесса диссоциации гидрата замедляется распространение температурного импульса по осадочной толще и снижается скорость дегградации как многолетнемерзлого слоя, так и залежей метангидратов (рис. 5). Процесс дегградации газовых гидратов приводит к поглощению тепла, способствуя снижению температуры близлежащих пород (рис. 5б). Существуют различия между SH0 и SH20 как по скорости диссоциации, так и по температуре пород. Породы вблизи фронта дегградации гидрата охлаждаются. В области разложения гидратов сохраняются более низкие температуры $-2...-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4. Создание моделей оценивания полей концентраций от площадных источников примесей.

Крупными источниками атмосферного загрязнения являются предприятия по производству цемента. Их выбросы представляют значительный риск для здоровья населения и окружающей среды.

На основе экспериментальных исследований и спутниковых наблюдений загрязнения снежного покрова в окрестностях Искитимского цементного завода установлены количественные связи между снеговым индексом NDSI и выпадениями взвешенных веществ, ионных компонентов. Расположение источников и схема отбора снеговых проб приведены на рис. 6.

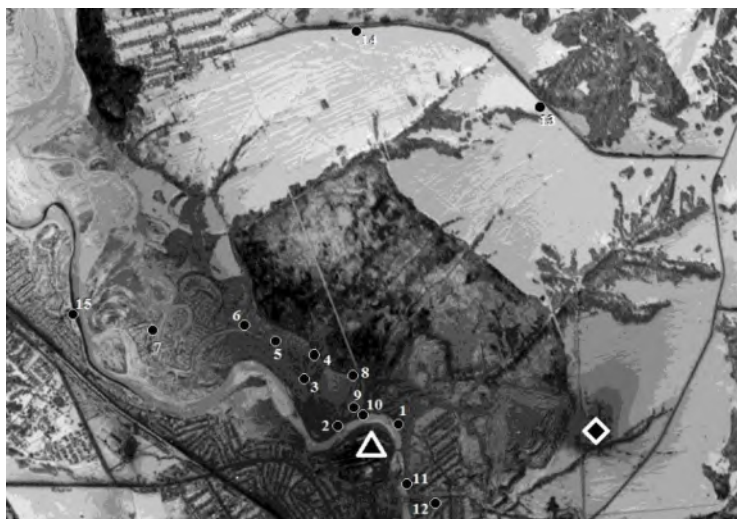


Рис. 6: Схема точек отбора проб на спутниковом снимке окрестностей ОАО "Искитимцемент" от 25 марта 2019 г. с КА Landsat-8. Обозначения: ● – окрестности цементного завода; ▲ – положение высотных труб; ◆ – расположение цеха производства цемента сухим способом

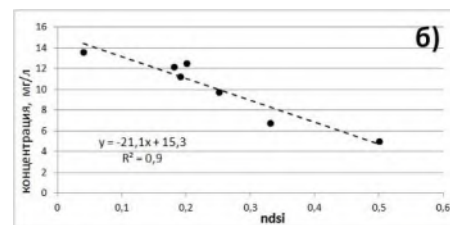
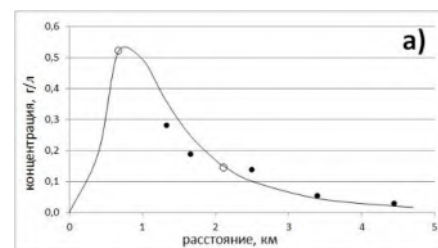


Рис. 7: Измеренные и численно восстановленные концентрации осадка (а); корреляционная зависимость между индексом NDSI и концентрацией водорастворенного кальция (б) в северо-западном направлении от цементного завода

С привлечением моделей реконструкции в приближении легкой и монодисперсной примеси численно восстановлены поля выпадений рассматриваемых примесей от высотных труб завода (рис. 7).

Результаты исследований подтвердили эффект значительного защелачивания окружающих территорий, позволяют проводить взаимный контроль результатов, получаемых с этих систем наблюдений в пределах обследованной территории. Наибольшее воздействие поверхностного загрязнения будет проявляться в период активного снеготаяния. Контактными и дистанционными наблюдениями установлено, что в зимний период основные выпадения загрязняющих примесей происходят вдоль долины р. Бердь, что приводит к снижению качества воды в реке и прилегающих к ней сельхозугодьях.

Для расчета высоты подъема дымового шлейфа использованы соотношения, основанные на "законе 2/3". В условиях нейтральной температурной стратификации атмосферы подъем вычисляется по формуле:

$$h = 1.6 F^{1/3} (3.5 x)^{2/3} u^{-1}, \quad F = g w_s r^2 (1 - T_a / T_c),$$

где $x = 14 F^{5/8}$ для F меньше $55 \text{ м}^4 \text{ с}^{-3}$; $x = 34 F^{2/5}$ для F больше или равно $55 \text{ м}^4 \text{ с}^{-3}$, h – высота подъем выбросов от устья трубы (м); u – средняя скорость ветра в слое распространения примеси (м с^{-1}); F – параметр силы плавучести ($\text{м}^4 \text{ с}^{-3}$); g – ускорение свободного падения (м с^{-2}); w_s – скорость газовой смеси на выходе из трубы (м с^{-1}); r – радиус трубы (м); T_c – температура смеси ($^{\circ}\text{К}$); T_a – температура окружающего воздуха ($^{\circ}\text{К}$).

Проведено оценивание дополнительных высот подъема дымовых смесей от высотных труб Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-3 г. Барнаула. Расчеты выполнены как с использованием представленных формул, выведенных на основе теории размерности, так и на основе спутниковых снимков дымовых шлейфов. В табл. 1 представлены результаты оценивания параметров дымовых выбросов от ТЭЦ-3 г. Барнаула.

Таблица 1: Оценки параметров дымовых шлейфов от высотной трубы ТЭЦ-3 г. Барнаула для 19 ноября и 2 декабря 2018 г.

Дата	Параметр плавучести, м ⁴ /с ³	Расстояние x , м	Расчетное значение h , м	Оценка h по спутниковым снимкам, м
19.11.2018 г.	406	376	405	470
02.12.2018 г.	427	383	300	350

Расчеты, проведенные обоими способами, показали вполне удовлетворительное согласие между оценками высот подъема. Это указывает на возможность эффективного использования спутниковой информации в решении обратных задачах оценивания параметров плавучести, динамических и тепловых характеристик дымовых смесей.

Рассмотрена актуальная задача оценивания длительного загрязнения атмосферы города по данным сетевых наблюдений на примере Новосибирска. Для анализа процессов загрязнения были использованы результаты среднемесячных измерений концентраций бенз(а)пирена (БП) на стационарных постах Росгидромета в 2018 г. Проведено исследование оценки влияния ветрового режима на уровни содержания БП в атмосферном воздухе города. Для определения ветровых характеристик привлекались данные наблюдений на метеорологической станции Огурцово (индекс ВМО 29638), расположенной вблизи Новосибирска. С учетом расположения доминирующих источников проведен анализ связей повторяемостей направлений ветра с измеренными уровнями концентраций БП на постах контроля качества воздуха в городе. Установлены закономерности формирования атмосферных загрязнений от повторяемости штилевых условий в холодный период года. Показано, что в зимние месяцы 2018 г. высоким концентрациям БП, достигавшим 15–20 ПДК, сопутствовало большое количество штилей.

Проведенные исследования показали значимое влияние фактора повторяемости штилей на повышенные концентрации БП в атмосферном воздухе Новосибирска в 2018 г. Особенно явно этот эффект проявился в зимние месяцы. Взаимное расположение пунктов контроля состояния атмосферного воздуха и проходящих вблизи крупных автомагистралей не оказывают решающего влияния на формирование высоких концентраций БП даже при доминирующих ветрах в направлении постов.

Для детального описания полей атмосферного загрязнения территорий города необходимо существенное расширение сети наблюдений. В качестве дополнительных источников информации могут служить мониторинговые исследования многокомпонентного загрязнения природных планшето.

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.

Трехмерная численная модель океана и морского льда SibCIOM использовалась для исследования физических механизмов, обеспечивающих взаимодействие шельфовых районов и глубоководных частей Северного Ледовитого океана (СЛО) в условиях изменения климата.

Проведена серия численных экспериментов для анализа пространственно-временной изменчивости процессов, протекающих в водах Северного Ледовитого океана и его шельфовых морях, анализируется их чувствительность к вариациям внешнего воздействия.

Результаты контрольного численного эксперимента, проведенного с использованием данных атмосферного реанализа NCEP/NCAR для формирования потоков на границе атмосфера – океан и атмосфера – лед, отражают реакцию океана на происходящие изменения в атмосфере полярных широт и прилегающих акваторий в период с середины прошлого столетия до 2020 г. Один из наиболее ярких признаков изменчивости состояния Северного Ледовитого океана – сокращение объема морского льда. Раннее освобождение арктических морей ото льда повышает роль ветра в формировании течений в шельфовой области, что способствует переносу пресных вод арктических рек в глубоководную часть бассейна. Проведенное исследование позволяет проследить изменчивость траектории распространения речных вод на основе моделирования переноса трассеров, поступающих в шельфовую зону в районах, соответствующих устьям арктических рек. По результатам численного моделирования прослежены траектории распространения трассеров арктических рек в различные периоды атмосферной циркуляции, определяемые на основе индексов Северо-Атлантического и Арктического колебаний, определено время нахождения речных вод в шельфовой области. По модельным оценкам среднее время нахождения трассеров сибирских рек в акватории моря в современный период (после 2000 г.) сократился примерно в 2 раза по сравнению со второй половиной 20 в. и составляет 3,2 г. для рр. Обь и Енисей и 7 лет для р. Лена.

На основе результатов численного моделирования проанализирована временная изменчивость слоя холодного халоклина – одной из основных характеристик вертикальной структуры вод арктического бассейна. Определена связь с атмосферной циркуляцией и траекторией распространения сибирских рек.

В качестве основного метода выявления наиболее значимых физических механизмов, определяющих изменчивость модельных полей, рассматривалась постановка сценарных численных экспериментов, направленных на исследование чувствительности моделируемых переменных к вариациям внешнего воздействия. Контрольный эксперимент рассматривался в качестве базового, с результатами которого проводилось сравнение при анализе последствий вариаций внешнего воздействия. Анализ опирался на оценку среднемесячных значений рассчитанных характеристик.

Исследовано влияние теплового стока сибирских рек на изменение гидрологических и ледовых полей СЛО в период 2000–2020 гг. Очевидным результатом стал вывод о том, что это влияние наиболее выражено в шельфовых районах, особенно вблизи устьев рек. В глубоководной части Северного Ледовитого океана значение речного тепла в среднем за весь период не превышает 1.5 %. Вместе с тем результаты численных экспериментов демонстрируют увеличение вклада речного тепла в процесс сокращения морского льда в арктическом бассейне в конце второго десятилетия текущего столетия. Наиболее выражен этот процесс в глубоководной части СЛО восточного полушария. В отличие от шельфовых районов, где влияние теплового стока рек на ледяной покров проявляется в весенне-летний период, в глубоководной части бассейна аномалии в толщине льда, обусловленные учетом речного тепла, возникают в осенне-зимний период.

Проанализировано влияние изменчивости расхода и температуры поступающих через Берингов пролив тихоокеанских вод на состояние вод морей Чукотского и Бофорта. Вариации

граничных условий на проливе определялись в соответствии с работами, основанными на анализе данных наблюдений. Модельные расчеты показывают, что повышение в 2003–2015 гг. температуры и расхода тихоокеанских вод, поступающих в Северный Ледовитый океан через Берингов пролив, способствовало увеличению теплосодержания верхнего слоя, а также сокращению площади льда в море Бофорта и Чукотском море.

Проведены численные эксперименты по чувствительности гидрологических и ледовых полей к формированию блокирующих атмосферных процессов в арктических шельфовых морях и прилегающей акватории в течение 5-летнего периода 2016–2020 гг. Показано, что вариации ветрового и термического воздействий над шельфовой областью приводят к изменениям характеристик прилегающей глубоководной части СЛО. Наибольший отклик в модели получен при включении вариаций атмосферного воздействия, приводящих к дополнительному формированию ледяного покрова.

По результатам численного моделирования оценен вклад заприпайной полыньи в процесс формирования ледяного покрова СЛО. Выявлен тренд на повышение доли образованного льда в полынье за период 2000–2020 гг., а также то, что наиболее выраженное влияние на объем образованного льда в полынье оказывает не изменение температуры атмосферы (как понижение, так и повышение), а ее динамическое состояние.

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 невелики по сравнению с наземными, такими как заболоченные территории. Однако источники CH_4 в Арктике могут играть значимую роль из-за больших объемов метана, которые находятся под морским дном в зоне стабильности газовых гидратов. Особый интерес вызывает существование субаквальной мерзлоты в донных отложениях мелководного арктического шельфа и наблюдаемая в этом регионе интенсивная эмиссия метана. Количественная оценка выхода метана из морского дна и его дальнейшего потока в атмосферу – основные нерешенные вопросы, касающиеся морского цикла метана.

На основе численного моделирования проанализирована эмиссия метана из донных отложений арктических шельфовых морей в воду и атмосферу, вызванная деградацией подводной мерзлоты и метангидратных залежей. При этом использовался комплекс моделей, описывающий пространственно-временную изменчивость процессов, происходящих в атмосфере, ледовом покрове, океане, донных отложениях океана, зоне стабильности поддонных метангидратов и субаквальных мерзлых породах.

Процессы засоления гидратонасыщенных донных отложений способствуют ускорению деградации гидратов и оттаиванию мерзлоты. Используя соотношения для определения зоны стабильности гидрата метана (ЗСМГ) с учетом солености, получены оценки влияния диффузии соли на состояние этой зоны. Учет солености при расчете термобарических условий устойчивости гидрата метана приводит к сокращению ЗСМГ. Однако глубина залегания ее под морским дном более 100 м, что делает это влияние незначительным (менее 5 %).

Проведено исследование процесса диссоциации гидрата метана в донных отложениях шельфа с учетом затрат тепла и гидратонасыщенности пород. Анализ проведенных

экспериментов показал, что эндотермическая реакция является существенным механизмом замедления диссоциации гидратов в мерзлых отложениях. Для мелкого шельфа, затопленного 5000 лет назад, дополнительная задержка отклика может составить 2100–2900 лет в зависимости от гидратонасыщенности залежи. Это подтверждает мнение о том, что текущие изменения теплового состояния подводной мерзлоты связаны с окончанием последнего ледникового цикла, а не с современным потеплением климата в масштабе столетия.

Получены модельные оценки объемов метана в газогидратах донных отложений Северного Ледовитого океана в условиях субаквальной мерзлоты. Примерно 164 Гт С могут быть изолированы в газовых гидратах мелководных шельфов, что составляет около 10 % от современных глобальных оценок (соответствующих от 1600 до 1800 Гт С).

Получена оценка выделения метана из донных отложений арктического шельфа в воду в экспериментах с моделью термодинамических процессов в донных отложениях при учете гидратонасыщенности пород. В последнем тысячелетии как для мелководной, так и для средней части шельфа средняя эмиссия метана составила 2–5 г/м² в год. Полученная оценка находится в диапазоне имеющихся оценок, основанных на данных измерения. Дальнейшее сокращение ЗСМГ в моделировании с учетом внешних выбросов СО₂ привело к увеличению эмиссии метана в течение последующих 2 тыс. лет до 4–16 г/м² в год.

Совместное моделирование состояния водных масс, ледяного покрова и переноса растворенного метана позволило получить пространственную и временную изменчивость эмиссии метана с акватории арктических морей. 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 гг. Оценки эмиссий метана в атмосферу выполнены на основе различных параметризаций процесса газообмена в системе "вода – атмосфера" и "вода – лед – атмосфера". Получены оценки эмиссии метана в зимний период. Выбросы в этот период связаны с участками открытой воды в ледяном покрове – трещинами и полыньями. Полученная пространственная изменчивость потоков метана в атмосферу в первую очередь связана с особенностями циркуляции и ледовой обстановки. Самые высокие потоки СН₄ получены в осенние месяцы. Это указывает на роль конвективного перемешивания водного столба и увеличения скорости ветра в этот период. Расчетный суммарный поток метана из морей арктического шельфа в атмосферу составил 0,7–2 Тг СН₄/год. Показано, что моря Восточно-Сибирского шельфа вносят наибольший вклад в общую эмиссию метана в регионе. Впервые получена оценка количества метана, который, поступив из донных отложений, достигает атмосферы. В зависимости от рассматриваемого периода эта доля составляет 4–10 %. Более продолжительные периоды открытой воды и снижение сплоченности льда способствуют увеличению количества метана, который может выйти в атмосферу в осенние и зимние месяцы. Это в свою очередь приводит к росту суммарного годового потока.

В условиях продолжающегося и прогнозируемого потепления климата в ближайшие годы рост выбросов метана из арктических морей будет определяться не только потоками газа из дна, но и процессом изменения ледового покрова Арктики. Для исследования влияния будущих изменений климата на термохалинную структуру, состояние льда и эмиссию метана в атмосферу были проведены сценарные расчеты на основе модели океана и морского льда SibCIOM до 2100 г. Атмосферное воздействие было задано по результатам расчетов с моделями ансамбля CMIP5 при

сценарии антропогенного воздействия rcp 8.5 для периода 2006–2100 гг. Были отобраны модели CNRM-CM5, IPSL-CM5B-LR, MPI-ESM-LR, GFDL-CM3, BCC-CSM-1.1, MIROC-ESM-CHEM. В результате получено увеличение суммарного годового потока метана в 2–4 раза к 2100 г. по сравнению с современным периодом в зависимости от сценария. Интенсивность потока при этом не превысила 8 Тг/год. По результатам моделирования будущей рост эмиссии метана может быть напрямую связан с сокращением морского ледяного покрова.

Проекты Министерства образования и науки РФ

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.

Разработаны модели оценивания загрязнения атмосферного воздуха на территориях города. В их основе – асимптотические приближения решений уравнения турбулентной диффузии для невесомой примеси в приземном слое атмосферы, поступающей от большого числа мелких источников. С использованием полученных соотношений выполнена интерполяция результатов измерений среднегодовых концентраций бенза(а)пирена в атмосфере Ангарска со стационарных постов Росгидромета и содержания ртути в листьях тополя на территории Иркутска по данным биомониторинговых исследований. Предложены оптимизационные модели оценивания допустимых верхних и нижних значений уровней загрязнения и суммарной эмиссии атмосферных примесей с городских территорий по данным наблюдений. Алгоритмы оценивания мажорантных и минорантных полей концентраций состоят в численной реализации наборов задач линейного программирования, достигающих большой размерности, которая зависит от плотности сети наблюдений и степени детализации описания полей загрязнения городских территорий. Выполнен ряд тестовых расчетов по определению допустимых границ значений концентраций примеси. Полученные результаты ориентированы на развитие эффективных методов и технологий цифрового мониторинга загрязнения окружающей среды с использованием как инструментальных методов контроля состояния атмосферного воздуха, так и методов биомониторинга территорий городов.

Предложены методические подходы к совместному использованию моделей реконструкции, данных наземного и спутникового мониторинга загрязнения снежного покрова в окрестностях промышленных предприятий. Апробация предложенного метода проведена на спутниковых снимках окрестностей Гусиноозерской ГРЭС, Ангарского цементного завода с индексацией полей аэрозольных выпадений взвешенных веществ в значениях NDSI. Полученные результаты относятся к прорывным технологиям наземного и спутникового мониторинга загрязнения окружающей среды, внешнего контроля атмосферных выбросов промпредприятий и могут быть использованы организациями реального сектора экономики при разработке и реализации природоохранных мероприятий.

Выявлены линейные корреляционные связи между результатами измерений концентраций бенз(а)пирена в городах БПТ в 2017–2019 гг. на постах Росгидромета. В целом установлен

высокий уровень согласия как между измерениями на постах в каждом из городов, так и между постами из разных городов. Проведены исследования связей между концентрациями бенз(а)пирена на постах городов БПТ и повторяемостями штилей на метеостанции Хомутово в 2018, 2019 гг. Полученные результаты позволяют выполнять дополнительный контроль достоверности получаемой экспериментальной информации на постах, фиксировать появление новых источников эмиссии.

В зимние месяцы наблюдается чрезвычайно высокий уровень загрязнения атмосферы бенз(а)пиреном в городах БПТ, что обусловлено как большими объемами сжигания органического топлива, так и особенностями климатических условий. В связи с этим актуальной задачей является развитие различных взаимосвязанных систем мониторинга окружающей среды. Для получения более полной картины загрязнения городских территорий предложены методы совместного использования данных наземного и спутникового мониторинга снежного покрова. Оценка состояния загрязнения заснеженных территорий проводится с привлечением моделей реконструкции и различных снеговых индексов, установлением статистических связей межсредового загрязнения атмосферный воздух – снежный покров.

Проведен численный анализ ингаляционных рисков для здоровья населения в городах Прибайкалья. В качестве основы были использованы данные среднемесячных измерений концентраций бенз(а)пирена на постах Росгидромета в городах Ангарске, Усолье-Сибирском, Иркутске и Шелехове, информация с метеостанции Хомутово, статистические зависимости между измеряемыми концентрациями и повторяемостями штилевых условий. Установлено, что величина канцерогенных рисков в зимние и летние периоды значительно различается и может варьироваться в пределах порядка. Наибольшие канцерогенные риски для здоровья населения от загрязнения атмосферного воздуха бенз(а)пиреном имеют место в городах Усолье-Сибирское и Шелехово. В 2018 г. риски для здоровья в городах БПТ были существенно выше, чем в 2017 и 2019 гг., и оказались на грани приемлемых. Причиной явились высокие концентрации бенз(а)пирена, зафиксированные на городских постах и возникшие вследствие аномальных штилевых условий. Результаты проведенных исследований имеют важное значение для решения социально-экономических и экологических проблем страны и, в частности, могут быть использованы для анализа данных мониторинга загрязнения городских территорий и последующего планирования комплекса мероприятий по профилактике заболеваний, обусловленных негативным воздействием техногенных выбросов.

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

Проект нацелен на улучшение понимания того, как быстрое сокращение морского льда взаимосвязано с физическими и химическими изменениями в полярных океанах и атмосфере, на получение количественных оценок природных процессов, контролируемых химические, биогеохимические и физические явления, процессов взаимодействия в связанной системе "океан –

лед/снег – атмосфера" посредством всестороннего анализа новых и появляющихся контактных и удаленных наблюдений. Проект способствует развитию технологических, региональных и климатических моделей ESM, следуя путем улучшения описания: динамики морского льда и энергетических обменов; аэрозолей, облаков и радиации; биогеохимических циклов, обменов парниковыми газами; всей совокупности взаимосвязей внутри системы.

В 2022 г. получены следующие результаты:

1. Проведен анализ климатических изменений последнего столетия, исходя из подготовленных данных и других исследований, применительно к полярным регионам.
2. Проведены численные эксперименты с моделью SibCIOM и анализ их результатов для "исторического" периода, проведен анализ чувствительности климатической системы по отношению к индивидуальным возмущениям циркуляционных мод.
3. Проведен анализ циркуляции арктических морей России и ее изменчивости.
4. Подготовлена модель климатической системы PlaSim-ICMMG для проведения численных экспериментов.
5. Подготовлена и верифицирована на основе данных серия региональных моделей арктических морей SibPOM для проведения численных экспериментов в рамках проекта. Разработана параметризация вихревого переноса массы в океане с использованием результатов SibPOM.
6. Проведен анализ основных тенденций изменения климата Арктики в прошлом столетии и в будущем с использованием результатов имеющихся сценарных расчетов МГЭИК и на основе полученного разложения состояния по модам.
7. Проведена верификация модели климатической системы Земли INM-SibCIOM, построенной на основе модели INMCM и модели океана и льда SibCIOM.
8. Разработаны и реализованы численные методы решения обратных задач для интегрированных оценочных математических моделей экономики и климата на основе систем ОДУ (лаборатория обратных задач естествознания).

Проекты РНФ

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

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

Трехмерное численное моделирование использовано для анализа последствий возможных климатических изменений для морей Сибирского шельфа до конца XXI в. Исследование проводится на основе разработанной в ИВМиМГ СО РАН трехмерной региональной численной модели океана и морского льда SibCIOM (пространственное разрешение в среднем 15 км в Арктике). Для расчета прогностических потоков на поверхности океана и морского льда использовались результаты численных расчетов по моделям климатической системы IPSL-CM6A-LR, ACCESS-ESM 1.5, MPI-ESM1-2HR, GFDL-CM4 и BCC-CSM2-MR. Расчетные поля климатических моделей получены по социально-экономическому сценарию SSP585, считающемуся экстремальным и предполагающему интенсивную эксплуатацию ресурсов ископаемого топлива с высоким процентным содержанием угля и энергоемких технологий.

Анализ используемых полей температуры приземного слоя атмосферы выявил положительный среднегодовой тренд, значения которого для морей Сибирского шельфа варьируются от 0.09 до 0.2 градуса/год в зависимости от региона и выбора климатической модели. В соответствии с проведенным анализом климатические модели можно упорядочить следующим образом: модель IPSL-CM6A-LR, прогнозирующая наибольший тренд, затем ACCESS-ESM 1.5 и три модели GFDL-CM4, BCC-CSM2-MR и MPI-ESM1-2HR, которые показывают наиболее близкие результаты.

Проведена серия прогностических расчетов развития гидрологической и ледовой ситуации на шельфе сибирских морей до конца XXI в. с использованием численной модели океана и морского льда SibCIOM и результатов расчетов состояния атмосферы по моделям климатической системы (2015–2100 гг.).

Анализ изменения среднемесячного объема льда, просуммированного по акватории морей Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского, показывает сокращение льда в Карском море и море Лаптевых начиная с 1930–1940-х гг. Наиболее интенсивно процесс сокращения объема льда происходит с атмосферным форсингом модели IPSL-CM6A-LR. В остальных экспериментах проведенной серии сокращение объема в летний период является менее равномерным. Сравнение с аналогичными значениями, полученными с применением моделей климатической системы, показывает значительные различия в моделируемом объеме льда. Численные результаты показали, что одним из основных механизмов, влияющих на толщину льда в моделях, является поток нисходящей длинноволновой радиации. Его коррекция (изменение в пределах 5–10 %) приводит к существенному изменению объема ледяного покрова арктических морей и темпов его сокращения.

Важным физическим процессом, определяющим состояние ледяного покрова и гидрологических полей морей Сибирского шельфа, является динамическое состояние атмосферы. Результаты численного моделирования показывают, что при выборе атмосферного форсинга с близким положительным трендом повышения температуры атмосферы темпы сокращения прогнозируемого ледяного покрова значительно различаются.

Для анализа тенденций накопления тепла в шельфовых морях до 2100 г. в прогностических экспериментах (SibCIOM) построены аномалии температуры придонного слоя вод для восьми десятилетних периодов относительно периода 2015–2020 гг. Заметное потепление в придонном слое сибирских шельфовых морей начинает происходить после 2030-х гг. для экспериментов с данными IPSL-CM6A-LR и ACCESS-ESM 1.5 и после 2040-х гг. для экспериментов с данными трех других моделей. Область устойчивой положительной аномалии – Карское море и континентальный склон моря Лаптевых, что обусловлено повышением влияния атлантических вод и, предположительно, усилением обмена между Карским морем и морем Лаптевых. Следует отметить, что эти области совпадают с областями наибольшего повышения придонной температуры по результатам климатических моделей. По результатам прогностических экспериментов SibCIOM изменения в придонном слое происходят наиболее медленно в Восточно-Сибирском море.

В результате проведенного исследования установлены закономерности распространения и эволюции подводной мерзлоты на шельфе арктических морей для современного периода. Получено пространственное распределение подводной мерзлоты в донных отложениях Сибирских шельфовых морей для 2014 г. с учетом придонной температуры воды из расчетов с климатическими моделями CanESM5, IPSL-CM6A-LR и ACCESS-ESM1-5. Глубина залегания нижней границы мерзлых пород по результатам расчета для 2014 г. составила порядка 10–700 м. Верхняя

граница мерзлого слоя расположена на глубине 12–50 м ниже морского дна в зависимости от области шельфа.

Получены оценки тенденций состояния подводной мерзлоты в донных отложениях Сибирских шельфовых морей до 2100 г. с учетом климатических изменений в регионе. Изменения температуры придонной воды в период с 2015 по 2100 г. по результатам сценария SSP5-8.5 с климатическими моделями CanESM5, IPSL-CM6A-LR и ACCESS-ESM1-5 приводят к ускорению деградации подводной мерзлоты до 2100 г. Так, средняя скорость сокращения мерзлого слоя для периода 2014–2100 г. увеличилась до 63, 78 и 105 км³/год в расчетах с ACCESS-ESM1-5, IPSL-CM6A-LR и CanESM5 соответственно, что в 2.5 раза больше, чем скорость деградации подводной мерзлоты при историческом сценарии для 1850–2014 гг.

Получены оценки толщины ЗСГМ, связанной с существованием многолетнемерзлых пород. Для мелководного шельфа (глубина воды 10–20 м) модельная толщина ЗСГМ составила около 1000 м. Мощность ЗСГМ на среднем шельфе (глубина воды 30–50 м) достигает 550–700 м. Сокращение ЗСГМ происходит в основном со стороны нижней границы. Этот процесс является прежде всего следствием голоценовой трансгрессии моря, в результате которой и многолетнемерзлые породы, и метангидраты оказались в неравновесных условиях существования. При потеплении в придонном слое воды (до 2100 г.) ЗСГМ начинает сокращаться со стороны верхней границы более быстрыми темпами. Скорость сокращения ЗСГМ составляет от 1 до 4 м в тысячу лет.

Разработаны численные методы решения обратной динамической задачи сеймики для локализации газогидратов и оценки их физических свойств в целях прогнозирования их состояния. Построены две модели: модель для исходного состояния газогидратов; модель для начала их растепления, т. е. уменьшения добротности среды. Выполнена серия численных экспериментов, показавшая приемлемую точность реконструкции скоростей и добротностей и, что представляется чрезвычайно важным, отсутствие связанности этих параметров.

Публикации

Монографии

1. Пененко А. В., Рапута В. Ф., Огородников В. А., Пененко В. В., Акентьева М. С., Амикишиева Р. А., Гочаков А. В., Каргаполова Н. А., Леженин А. А., Пьянова Э. А., Скорик В. С. Методы математического моделирования для цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки // Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории. Сер.: Интеграционные проекты СО РАН. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. С. 294–333. ISBN: 978-5-6047889-4-3. DOI: 10.53954/9785604788943.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Cheverda, V., Bratchikov, D., Gadylshin, K., Golubeva, E., Malakhova, V., Reshetova, G. Subsea methane hydrates: Origin and monitoring the impacts of global warming // Appl. Sci. 2022. V. 12. P. 11929. DOI: 10.3390/app122311929.

2. Gochakov, A. V., Antokhina, O. Yu., Krupchatnikov, V. N., Martynova, Yu. V. Long-term variability of Rossby wave breaking in the subtropical jet stream area // Russ. Meteorol. and Hydrol. 2022. V. 47. No. 2. P. 79–88. DOI: 10.3103/S1068373922020017.

3. Kovadlo, P. G., Lezhenin, A. A. Generation of kinetic energy of the pulsating component of the wind speed in the atmospheric boundary layer // Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmosph. and Ocean Optics: Atmosph. Phys. 123415Q (7 December 2022); <https://doi.org/10.1117/12.2644558>.

4. Malakhova, V., Golubeva, E. Model study of the effects of climate change on the methane emissions on the Arctic shelves // Atmosph. 2022. V. 13. P. 274. DOI:10.3390/atmos13020274.

5. Malakhova, V. V., Eliseev, A. V. Estimation of the methane release intensity from the Arctic shelf bottom sediments // Proc. SPIE. 28th Intern. Symp. on Atmosph. and Ocean Optics: Atmosph. Phys. 2022. V. 12341, 123416B. DOI: 10.1117/12.2644854.

6. Martynova, Yu. V., Krupchatnikov, V. N., Gochakov, A. V., Antokhina, O. Yu. Relationship between anomalies of the rate of snow cover formation in Western Siberia and atmospheric dynamics in the Northern Hemisphere in the autumn – winter season // Izvestiya, Atmosph. and Ocean. Phys. 2022. V. 58. No. 1. P. 95–109. DOI: 10.31857/S0002351522010072.

7. Mokhov, I. I., Malakhova, V. V., Arzhanov, M. M. Model estimates of intra- and intersentennial degradation of permafrost on the Yamal Peninsula under warming // Dokl. Earth Sci. 2022. V. 506, iss. 2. P. 782–789. DOI: 10.1134/S1028334X22600426.

8. Zuev, V. V., Savelieva, E., Krupchatnikov, V. N., Borovko, I. V. On the role of extratropical volcanic eruptions in Arctic ozone depletion // Proc. SPIE. 2022. V. 12341. P. 1234171. DOI: 10.1117/12.2643384.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Malakhova, V. V. Numerical modeling of methane hydrates dissociation in the submarine permafrost // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. V. 1040. P. 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/1040/1/012022.

2. Iakshina, D. F., Golubeva, E. N. Recent climatic change research in the Chukchi and Beaufort Sea based on numerical simulation // Fund. and Appl. Hydrophys. 2022. T. 15, iss. 2. С. 60–75. DOI: 10.48612/fpg/zkvg-71uu-xk44.

3. Kraineva, M., Golubeva, E. Formation of heat anomalies in the Laptev Sea (2000–2020 years) // Proc. in GeoMedia. 2022. V. 15. DOI 10.48612/fpg/zkvg-71uu-xk44.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Боровко, И. В., Градов, В. С., Крупчатников, В. Н. Численное исследование влияния индекса арктической осцилляции на характеристики атмосферных блокирований // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2022. С. 75–78.

2. Гаврилов, А. В., Малахова, В. В., Деревягин А. Ю., Пижанкова Е. И., Попова А. А. Вклад оледенения среднего неоплейстоцена в формирование мерзлых толщ восточно-сибирского шельфа // Мониторинг в криолитозоне : Сб. докл. 6-й Конф. геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов, Москва, 14–17 июня 2022 г. / под ред. Р. Г. Мотенко. М.: 2022. С. 864–869.

3. Гаврилов, А. В., Малахова, В. В., Пижанкова, Е. И., Попова, А. А. Мощность мерзлых толщ о. Новая Сибирь по данным геотермии и численного моделирования // Мониторинг в криолитозоне : Сб. докл. 6-й Конф. геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых,

инженеров и специалистов, Москва, 14–17 июня 2022 г. / под ред. Р. Г. Мотенко. М.: 2022. С. 869–876.

4. Голубева, Е. Н., Крайнева, М. В. Исследование изменчивости состояния морей Сибирского сектора Арктики в 21 столетии на основе численного моделирования // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2022. С. 78–81.

5. Градов, В. С., Платов, Г. А., Володин, Е. М. Результаты моделирования с помощью новой климатической модели INMCM-SIBCIOM // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2022. С. 72–75.

6. Градова, М. А., Голубева, Е. Н. Численное моделирование влияния тепла арктических рек на состояние морского льда // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2022. С. 66–69.

7. Зуев, В. В., Савельева, Е. С., Крупчатников, В. Н., Боровко, И. В. О роли извержений вне-тропических вулканов в формировании арктических озоновых аномалий // Материалы 28-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. E-2–E-5. DOI: 10.56820/OAOPA.2022.99.22.002.

8. Крылова, А. И., Лаптева, Н. А. Модель маршрутизации речного стока в континентальном масштабе с переменной скоростью потока // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 102–108. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-102-108.

9. Леженин, А. А., Рапуга, В. Ф. Влияние ветрового режима на загрязнение атмосферы г. Новосибирска // Интерэкспо Гео Сибирь. 2022. Т. 4. С. 109–115. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-109-115.

10. Леженин, А. А., Рапуга, В. Ф. Оценка характеристик подъема дымовых выбросов ТЭЦ с использованием спутниковой информации // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : Материалы 4-й Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Барнаул, 29 авг. – 3 сент. 2022 г. Т. 3. С. 237–241.

11. Малахова, В. В. Моделирование разложения гидратов метана, сформировавшихся в многолетнемерзлых породах // Материалы 28-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. D-191–D-194. DOI: 10.56820/OAOPA.2022.25.25.001.

12. Малахова, В. В., Голубева, Е. Н. Оценка потоков метана в атмосферу из морей арктического шельфа // Труды Междунар. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2022. С. 69–72.

13. Михайлюта, С. В., Леженин, А. А. Влияние выбросов автономных источников теплоснабжения на загрязнение атмосферного воздуха // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 116–123. DOI 10.33764/2618-981X-2022-4-116-123.

14. Рапута, В. Ф., Коковкин, В. В., Амикишиева, Р. А. Наземный и спутниковый мониторинг загрязнения снежного покрова в окрестностях цементного завода // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 6. С. 495–499. DOI: 10.15372/АОО20220610.

15. Рапута, В. Ф., Леженин, А. А. Модели оценивания параметров дымовых выбросов от высотных труб ТЭЦ по спутниковой информации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 54–61. DOI 10.33764/2618-981X-2022-4-54-61.

16. Рапута, В. Ф., Юсупов, Д. В. Модель оценивания литохимического потока ртути по течению реки / Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : Материалы 4-й Всерос. науч. конф. с междунар. участием, Барнаул, 29 авг. – 3 сент. 2022 г. Т. 3. Барнаул, 2022. С. 268–273.

17. Боровко, И. В. Моделирование переноса примесей с помощью модели Planet Simulator // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 74. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-95.

18. Голубева, Е. Н., Крайнева, М. В. Численное моделирование состояния вод и морского льда сибирских арктических морей в 21 столетии // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 12. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-0098.

19. Градов, В. С., Платов, Г. А., Володин, Е. М. Моделирование климата Арктики с помощью новой климатической модели INMCM-SibCIOM // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 75–76. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-99.

20. Градова, М. А., Голубева, Е. Н. Новая версия численной модели динамики полярного океана с учетом погруженного морского льда // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 76. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-00.

21. Крайнева, М. В., Платов, Г. А. Оценка влияния океанических процессов на формирование тенденций арктического льда // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 78. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-04.

22. Krupchatnikov, V. N., Gochakov, A. V. Investigation of features eddy momentum and heat fluxes in the region of jet streams SibCIOM // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 78–79. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-05.

23. Крылова, А. И., Лаптева, Н. А. Континентальная модель маршрутизации с переменной скоростью речного стока // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 79. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-06.

24. Леженин, А. А., Рапута, В. Ф. Оценка траекторий подъема дымовых шлейфов от высотных труб ТЭЦ // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 81–82. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-10.

25. Леженин, А. А., Ковадло, П. Г., Коробов, О. А., Шиховцев, А. Ю. Применение модели WRF для уточнения структуры оптической турбулентности // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 81. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-09.

26. Малахова, В. В. Оценка площади распространения подводной мерзлоты и зоны стабильности гидратов метана на Арктическом шельфе // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 82. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-11.

27. Малахова, В. В., Голубева, Е. Н. Влияние изменений климата на эмиссию метана на акватории Арктических морей // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 83. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-12.

28. Платов, Г. А. Использование мезомасштабного моделирования для построения параметризации вихревого переноса в арктических морях // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 85. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-14.

29. Рапуга, В. Ф., Гребенщикова, В. И. Оценка атмосферных выносов тяжелых металлов на оз. Байкал в зимний период времени // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 87. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-17.

30. Рапуга, В. Ф., Леженин, А. А. Оценка атмосферного загрязнения в районе южного Байкала по данным наблюдений дымовых шлейфов ТЭЦ // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 154. DOI:10.24412/cl-35065-2022-1-02-42.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Всероссийская научная конференция "Современные проблемы наук о Земле", Москва, Отделение наук о Земле РАН, 11–15 апреля 2022 г. – 1 доклад (Платов Г. А.).

2. Межрегиональная научно-практическая конференция с международным участием "Актуальные вопросы гигиены в условиях современных вызовов", посвященная 100-летию Госсанэпидслужбы, Новосибирск, 14–15 апреля 2022 г. – 2 пленарных доклада (Леженин А. А., Рапуга В. Ф.).

3. 18-я Международная выставка и научный конгресс "Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2022" на тему "Электронное геопространство на службе общества", Новосибирск, 19–21 мая 2022 г. – 12 докладов (Амикишиева Р. А., Боровко И. В., Градова М. А., Голубева Е. Н., Градов В. С., Крайнева М. В., Крупчатников В. Н., Крылова А. И., Леженин А. А., Малахова В. В., Платов Г. А., Рапуга В. Ф.).

4. 27-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Москва, 5–9 июля 2022 г. – 6 докладов (Крупчатников В. Н., Боровко И. В., Малахова В. В., Леженин А. А., Рапуга В. Ф., Амикишиева Р. А.).

5. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 13 докладов, из них 1 пленарный (Платов Г. А., Градова М. А., Голубева Е. Н., Малахова В. В., Градов В. С., Леженин А. А., Рапуга В. Ф., Крылова А. И., Крайнева М. В., Боровко И. В.).

6. 4-я Всероссийская научная конференция с международным участием "Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии", Барнаул, 29 августа – 3 сентября 2022 г. – 3 доклада (Крылова А. И., Леженин А. А., Рапуга В. Ф.).

7. Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды "ENVIROMIS-2022", Томск, 12–17 сент. 2022 г. – 5 докладов (Боровко И. В., Градова М. А., Градов В. С., Крупчатников В. Н., Малахова В. В., Голубева Е. Н., Платов Г. А., Крайнева М. В.).

8. 4-я Всероссийская конференция с международным участием "Турбулентность, динамика атмосферы и климата", посвященная памяти акад. А. М. Обухова, Москва, 22–24 ноября 2022 г. – 1 доклад (Крупчатников В. Н., Платов Г. А., Градов В. С., Боровко И. В.).

9. 11-я Международная научно-практическая конференция "Морские исследования и образование: MARESEDU-2022", Москва, 25–29 октября 2022 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).
10. 6-я конференция геокриологов России "Мониторинг в криолитозоне", Москва, 14–17 июня 2022 г. – 2 доклада (Малахова В. В.).
11. 24-я Международная научная конференция (школа) по морской геологии, Москва, 11–15 апреля 2022 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).
12. 29-я Конференция "Аэрозоли Сибири", Томск, 22 – 25 ноября 2022 г. – 6 докладов (Крылова А. И., Леженин А. А., Малахова В. В., Рапуга В. Ф.).
13. "Ломоносовские чтения 2022", секция "Геология", Москва, 14–22 апреля 2022 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).
14. 38-я Международная конференция "Ляпуновские чтения", Иркутск, 5–9 декабря 2022 г. – 3 доклада (Рапуга В. Ф., Леженин А. А., Ярославцева Т. В., Амикишиева Р. А.).
15. 8-я Международная научная конференция-школа молодых ученых "Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах", Москва, 12–14 октября 2022 г. – 2 доклада (Крайнева М. В., Градова М. А. Голубева Е. Н.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Платов Г. А.:

– член оргкомитета конференции "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 18-й Международной выставки и научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь-2022" на тему "Электронное геопространство на службе общества", Новосибирск, 19–21 мая 2022 г.,

– член программного комитета конференции "Марчуковские научные чтения 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

2. Крупчатников В. Н. – член программного комитета конференции "Марчуковские научные чтения 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

3. Леженин А. А. – член организационного комитета конференции "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 18-й Международной выставки и научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь-2022" на тему "Электронное геопространство на службе общества", Новосибирск, 19–21 мая 2022 г.

4. Крайнева М. В. – член организационного комитета конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Монографии – 1

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 8

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 11

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 42

Докладов на конференциях – 59, в том числе 3 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 5

Кадровый состав

1. Платов Г. А. зав. лаб. д.ф.-м.н.
2. Амикишиева Р. А. инженер
3. Боровко И. В. с.н.с. к.ф.-м.н.
4. Голубева Е. Н. г.н.с. д.ф.-м.н.
5. Градова М. А. м.н.с.
6. Градов В. С. м.н.с.
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. к.ф.-м.н.
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. – профессор НГУ
 Крупчатников В. Н. – профессор НГУ
 Леженин А. А. – доцент СИУ (филиал РАНХиГС при Президенте РФ)
 Платов Г. А. – доцент НГУ
 Рапута В. Ф. – ст. преподаватель НГУ
 Крылова А. И. – ст. преподаватель НГУ
 Ярославцева Т. В. – доцент ВКИ НГУ
 Градов В. С. – ассист. преподавателя НГУ

Руководство аспирантами

- Градов В. С. – 3-й год, НГУ, руководитель Платов Г. А.
 Градова М. А. – 3-й год, ИВМиМГ СО РАН, руководитель Голубева Е. Н.

Руководство студентами

- Пичахчи К. – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
 Войт И. А. – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
 Туркова А. С. – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
 Ивкина М. А. – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
 Новикова В. Д. – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
 Роговой М. Ю. – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
 Сластин Н. К. – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.
 Чечера С. А. – ВКИ НГУ, руководитель Ярославцева Т. В.

Хаустов М. О. – ВКИ НГУ, руководитель Амикишиева Р. А.

Васильев Н. Д. – ВКИ НГУ, руководитель Амикишиева Р. А.

Ушаков Р. Е. – ВКИ НГУ, руководитель Амикишиева Р. А.

Коробкин А. С. – ВКИ НГУ, руководитель Амикишиева Р. А.

Защита диссертаций

Якшина Д. Ф. "Исследование влияния океанических потоков тепла на состояние морского льда Северного Ледовитого океана на основе численного моделирования", специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы. 29 июня 2022 г. Руководитель Голубева Е. Н.

ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИРОДНОЙ СРЕДЕ

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

Важнейшие достижения

Разработана новая версия комплекса моделей, алгоритмов и программ, предназначенная для моделирования распространения микропластика (МП) в оз. Байкал

К.ф.-м.н. Цветова Е. А.

Пластисфера – новый термин, недавно появившийся в научной среде. Он отражает факт изменения экосистемы планеты под влиянием поступающего в нее пластика. В связи с большой степенью неопределенности, присущей всем составляющим процесса моделирования природных объектов начиная от формулировок проблем и постановок задач и заканчивая интерпретацией результатов моделирования, естественно использовать сценарный подход, который позволяет получить вариантную оценку результатов в зависимости от задаваемых параметров. В отчетный период выполнены исследования по моделированию распространения МП на сценарных расчетах с различными вариантами задания источников загрязнений, связанных с распространением МП, а также параметров, участвующих в моделях. Моделирование выполняется на основе трехмерной негидростатической модели гидродинамики озера и модели распространения примесей.

Результаты исследований опубликованы в работе

Tsvetova, E. Transport model: microplastic in Lake Baikal // Proc. SPIE. V. 12341. 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 1234165 (2022). <https://doi.org/10.1117/12.2644796>.

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. Транспортная модель: микропластик в озере Байкал // 28-й Симпозиум "Оптика атмосферы и океана", Томск, 4–8 июля 2022 г.

2. Численное моделирование распространения микропластика в озере Байкал // Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

3. Пластисфера Байкала: сценарии математического моделирования // 29-я Рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 22–25 ноября 2022 г.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 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 НИР 0251-2021-0003.

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

Раздел 1

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

Этап 2022 г.

В настоящем проекте рассматриваются проблемы сложности, чувствительности и неопределенности в интегрированных моделях и структурах систем моделирования в области математического моделирования природных процессов. Один из главных вопросов природоохранного прогнозирования – наличие большого спектра неопределенностей, в том числе и в экологических моделях, что существенно осложняет решение вопросов "достаточной сложности" и интегрированности моделей, используемых для экологических прогнозов. Понятно, что для решения задач охраны окружающей среды нецелесообразно использовать весь комплекс моделей, описывающих взаимодействие атмосферы, океана, суши, ближнего космоса и т. д., включенных в модель системы Земли. Значит, нужно ограничивать сложность моделей соответствующих масштабов, предусматривая при этом возможность учета влияния того, что было отброшено.

Основные типы неопределенностей в моделях качества атмосферы – это неполное знание источников воздействий, конкретных параметров в уравнениях модели, параметризациях подсеточных масштабов, цепочках трансформаций и т. д. Наилучшим выходом видится использование данных наблюдений, возможно, в режиме не только прямых, но и обратных связей. Задачи поиска источников и идентификация параметров – самые распространенные постановки таких задач. Причем обратные задачи усвоения данных формулируются как взаимосвязанные обратные задачи на заданных интервалах (окнах усвоения). В условиях дефицита данных измерений целесообразно использовать методы решения обратных задач продолжения, учитывая, что математические модели в режиме усвоения данных выступают в роли инструментов интерполяции или экстраполяции данных расчетов или данных наблюдений.

Интегрированность в моделях качества атмосферы для задач охраны окружающей среды осуществляется с помощью нескольких составляющих: моделей процессов, моделей и данных наблюдений, а также и управляющих соотношений, которые должны объединить цели и результаты исследований. Методы теории чувствительности работают через оценки вариаций обобщенных функционалов, формулирующих цели исследований, к возмущениям параметров системы для всего комплекса моделей, отдельных фрагментов моделей, целевых функционалов качества прогнозирования природной среды и т. д.

Обращение к упомянутым выше проблемам природоохранного прогнозирования и проектирования обуславливает актуальность решаемых в отчетном периоде конкретных задач.

1. Для трехмерной модели адвекции-диффузии-реакции примесей в атмосфере разработаны и протестированы алгоритмы идентификации источников на основе ансамблей решений сопряженных уравнений и операторов чувствительности.

В результате выполнения задач данного этапа реализованы алгоритмы идентификации источников примесей (правых частей уравнений) для трехмерных моделей адвекции-диффузии-реакции по данным измерения концентраций. При моделировании качества воздуха задача идентификации источников выбросов по данным измерений является ключевой обратной задачей. Трехмерные модели позволяют реалистично моделировать процессы переноса и трансформации примеси в атмосфере, но вместе с тем требуют, во-первых, задания большого количества априорной информации для адекватного описания происходящих в атмосфере процессов, во-вторых, существенных вычислительных ресурсов и памяти, особенно в режиме решения обратных задач.

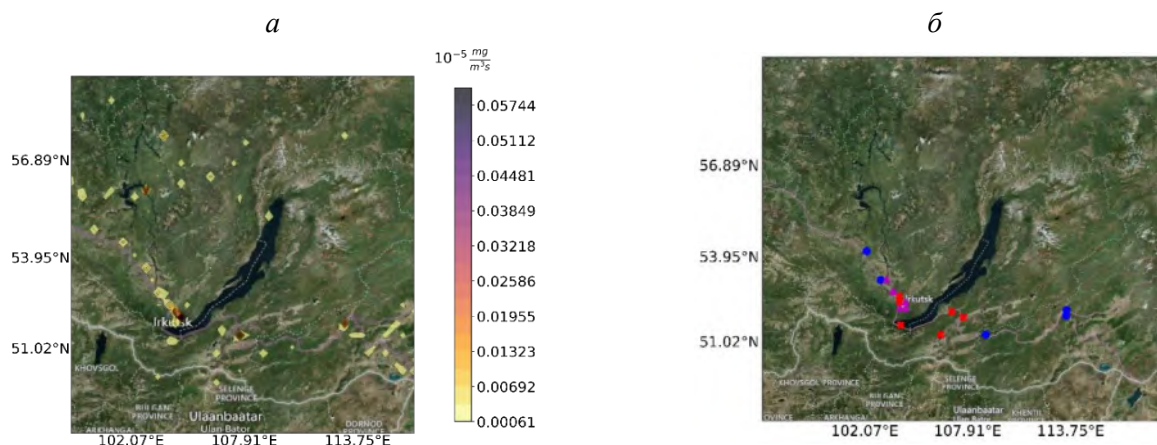


Рис. 1: Схема объектов в постановке модельной обратной задачи идентификации источников. Точное распределение источников NO (а) и расположение постов мониторинга (б). По значениям концентраций O_3 в точках проведения мониторинга требуется оценить неизвестный стационарный источник

Для идентификации источников в работе реализован алгоритм на основе операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений в трехмерном случае. Оператор чувствительности позволяет связать вариацию искомым величин с вариацией наблюдаемых переменных модели. Для вычисления операторов чувствительности обратной задачи используются наборы согласованных в смысле тождества Лагранжа численных схем, разработанные и реализованные на предыдущем этапе выполнения проекта. Ансамблевый характер алгоритмов обеспечивает их эффективное распараллеливание и допускает выполнение на высокопроизводительных кластерных системах. Новым элементом является реализация алгоритма на основе операторов чувствительности для трехмерных моделей адвекции-диффузии-реакции.

Разработанный алгоритм протестирован на различных сценариях обратного моделирования. На рис. 1 представлена постановка задачи определения стационарного источника примесей по косвенным данным измерений, когда измеряемыми являются концентрации вещества, связанного системой химических трансформаций с веществом, выбрасываемым источниками примесей. Размерность задачи: 5 (веществ) \times 60 (точек по x) \times 57 (точек по y) \times 10 (слоев по z) \times 5201 (точек по времени). Количество искомым – 34200. Изменения заданы на "поверхности" в точках мониторинга, и в конце временного интервала также делается "снимок" поля концентрации во всей области. Данные измерений при восстановлении агрегированы в 97 значений.

На рис. 2 представлены результаты восстановления распределенного наземного источника без ограничения на уровень его расположения по вертикали. Анализируя рис. 2, можно отметить, что, несмотря на отсутствие информации о расположении источника исключительно на поверхности, его "след" уже на втором уровне модели по вертикали существенно слабее "следа" на "поверхности", т. е. на первом уровне модели. Аналогичную картину можно наблюдать и на рис. 3, на котором представлена проекция точного решения на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности на разных высотах. Эта характеристика, согласно нашим предыдущим исследованиям, позволяет оценить, что можно определить по имеющимся данным наблюдений не решая обратной задачи.

Таким образом, можно заключить, что реализованный алгоритм расширяет область применимости алгоритмов на основе операторов чувствительности на трехмерные обратные задачи для

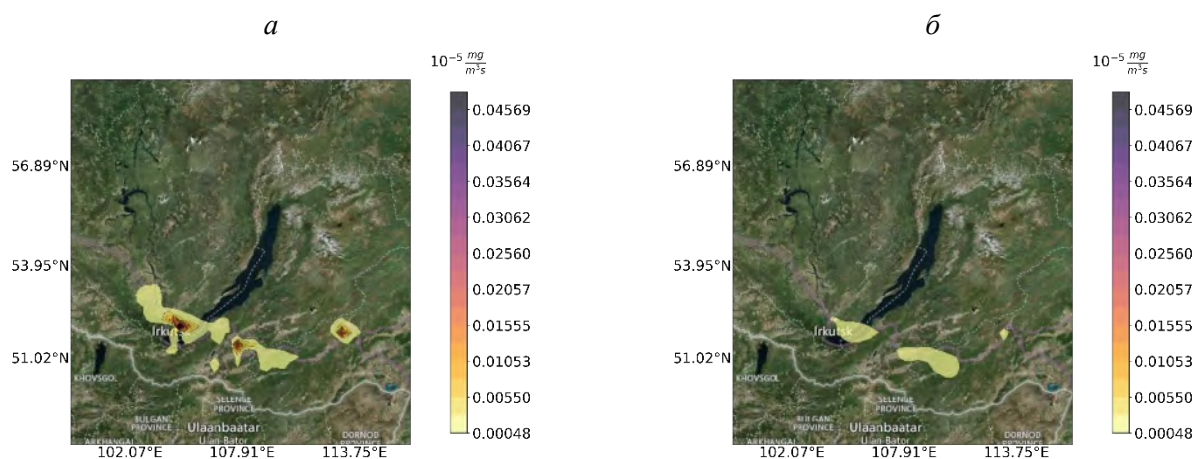


Рис. 2: Результат восстановления трехмерного источника на разных высотах:
 а – "поверхность" (1-й уровень); б – 580 м (2-й уровень)

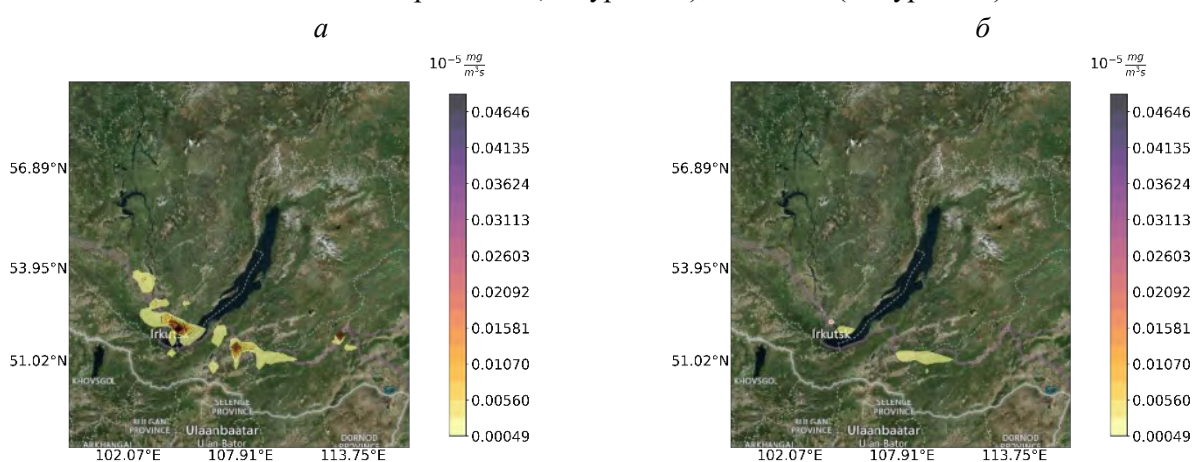


Рис. 3: Проекция точного решения на ортогональное дополнение к ядру оператора чувствительности на разных высотах: а – "поверхность" (1-й уровень по вертикали); б – 580 м (2-й уровень) моделей адвекции-диффузии-реакции, возникающие в различных областях, в частности при оценке и прогнозировании качества атмосферы.

2. Усовершенствованы блоки тепло-массо-переноса в пограничных слоях атмосферы для уточнения процессов взаимодействия атмосферы с неоднородной поверхностью Земли в базовых гидродинамических моделях, разрабатываемых в проекте. С этой целью выполнен ряд исследований, представленных ниже.

Эффекты бифуркации при конечно-элементном моделировании атмосферных полей в лесном массиве. Цель исследования – изучение бифуркационных эффектов, возникающих за счет преобладания нелинейных членов в уравнениях динамики пограничного слоя атмосферы и нахождение экономичных способов включения эффектов растительного покрова в численную мезомасштабную модель, предназначенную для расчета областей с крутой орографией.

Упрощенные модели пограничного слоя атмосферы применяются в широком диапазоне возможных приложений, например для определения начальных профилей метеорологических переменных в сложных трехмерных моделях. При введении параметризации распределения атмосферных полей с высотой в лесном массиве в уравнениях возникают преобладающие нелинейные члены. Обычные критерии устойчивости численного решения систем линейных уравнений являются слишком неточными при наличии сильной нелинейности. В работе изучалось поведение

решения при стремлении к стационарному состоянию. При определенной величине шага по времени возникает бифуркационный каскад, который можно устранить, существенно уменьшив шаг. Соответствующее нелинейное разностное уравнение исследовалось методами теории бифуркаций. Получен улучшенный критерий устойчивости, который переходит в обычный критерий при стремлении нелинейности к нулю. Полученный критерий устойчивости был применен при расчете распределения атмосферных полей в лесном массиве для различных типов растительности.

Схема параметризации, предложенная В. К. Шиллингом, была применена в рамках атмосферной модели, основанной на конечных элементах. Основным преимуществом схемы является то, что динамические и термодинамические эффекты лесного покрова могут быть удовлетворительно моделированы с использованием грубого разрешения в численной модели. Применимость этого подхода в численных моделях показана с помощью двумерной модели конечных элементов для холма, равномерно покрытого однородным лесным массивом, состоящим из хвойных деревьев высотой порядка 20 м.

Рассмотрены линейный и нелинейный критерии устойчивости при стремлении метеорологических полей к стационарному состоянию. Для явных численных схем линейный критерий устойчивости непригоден, если преобладают нелинейные члены уравнений. Нелинейный критерий в этом случае дает точную оценку малости шага по времени для получения истинного решения в стационарном состоянии.

Численное исследование переноса примеси в пограничном слое атмосферы на основе трехпараметрического RANS-приближения. Для описания рассеяния пассивной примеси от непрерывного поверхностного источника в пограничном слое атмосферы (ПСА) сформулирована эйлерова дисперсионная модель турбулентной диффузии пассивного скаляра в устойчиво стратифицированной атмосфере. Для этого базовая трехпараметрическая модель турбулентности $E - \epsilon - \langle \theta^2 \rangle$ T-RANS, с помощью которой исследуются структурные особенности проникающей конвекции над островом тепла в устойчиво стратифицированной атмосфере при слабом окружающем ветре и подавляющей инверсии, дополнена уравнениями для осредненной концентрации $C(x,t)$, вектора турбулентного потока примеси $f_i \equiv \langle u_i c \rangle$ и корреляции между флуктуациями концентрации и температуры $\langle c\theta \rangle$. Трехпараметрическая модель турбулентности с дополнительными уравнениями образует замкнутую систему для вычисления характеристик полей ветра, температуры и пассивной примеси. Турбулентные потоки импульса, тепла и примеси определяются полностью явными анизотропными алгебраическими выражениями. Основная цель численного моделирования заключалась в учете влияния плавучести на распределение концентрации примеси в перемешанном и инверсионных слоях над островом тепла.

На рис. 4 показаны два сценария моделирования турбулентной циркуляции и рассеяния примеси над протяженным поверхностным источником тепла и примеси. Первый сценарий приведен для иллюстрации. Он относится к моделированию циркуляции и рассеяния пассивной примеси для лабораторного эксперимента, в котором локализованный источник тепла задается в виде диска, моделирующего прототип города. Во втором сценарии моделируется развитие пограничного слоя атмосферы в течение суток. Горизонтальная протяженность области моделирования равна 120 км с разрешением 1 км. Вертикальное разрешение равно 10 м в пределах первых

50 метров от подстилающей поверхности с последующим растяжением сетки до высоты 1000 м (выше, до 3000 м, шаг постоянен). В центре вычислительной области с абсциссой от 45 до 55 км расположена "урбанизированная" область. В обоих сценариях вертикальный турбулентный тепловой факел от локализованного источника и связанная с ним циркуляция развиваются вследствие различия температур между островом тепла и окружающей средой. Турбулентное движение в центре острова тепла доминирует за счет флуктуирующей силы плавучести. В том и другом сценарии задается непрерывный поверхностный источник. В первом случае область источника примеси расположена вблизи поверхности нагреваемого диска D , во втором случае источник примеси расположен вблизи поверхности урбанизированной области.

О степени достоверности результатов можно судить по косвенным признакам. Во-первых, по сути аналогичная модель переноса активной примеси (тепла) дает результаты, вполне удовлетворительно согласующиеся с данными прямых инструментальных измерений в лаборатории. Во-вторых, точность численного решения для первого сценария проверена на последовательно измельченных сетках (25×116 узлов по горизонтали и вертикали соответственно и сетке 50×232 узла).

На рис. 4 слева изображены контуры концентрации примеси для источника, протяженность которого совпадает с протяженностью источника тепла (диаметром нагреваемого диска D), и контуры функции тока, показывающие формирование в пределах перемешанного слоя ($0 \leq z/z_i \leq 1$) двух интенсивных вихрей, создающих мощное восходящее движение в центральной части острова тепла. Видно, что под влиянием интенсивного восходящего движения

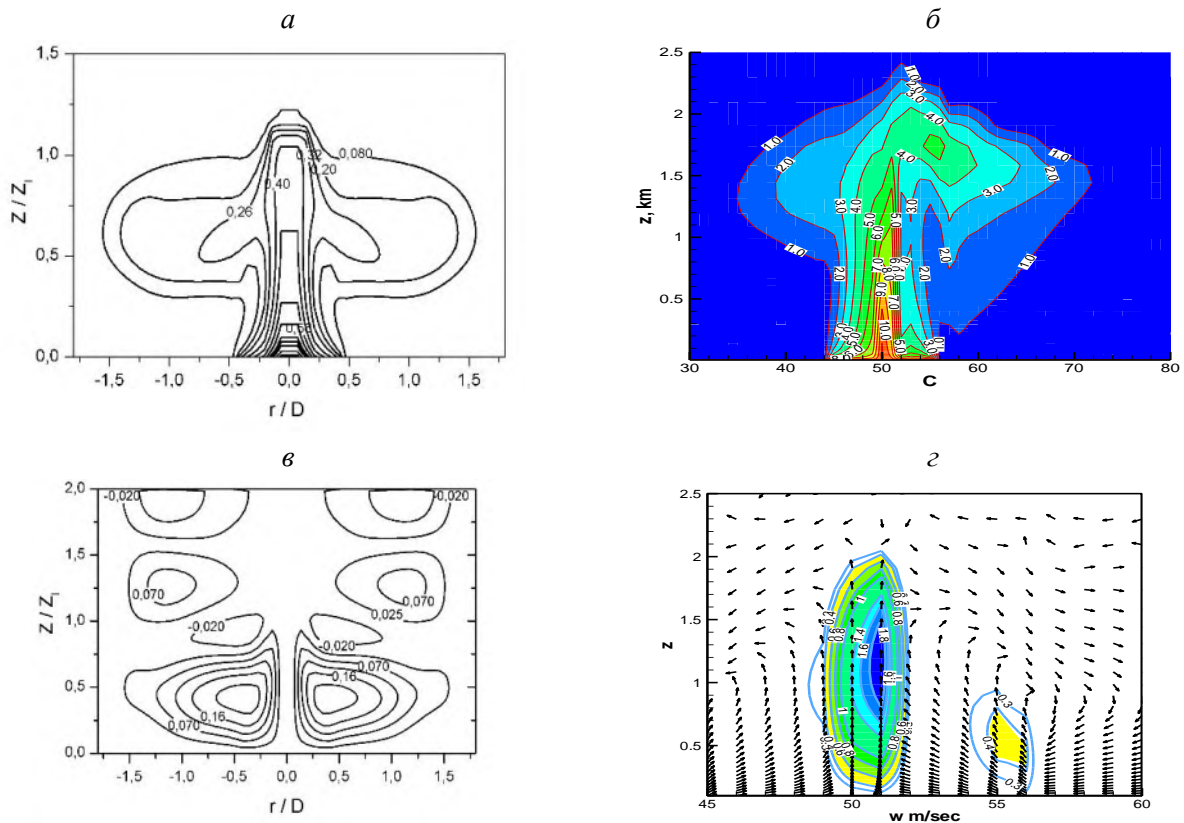


Рис. 4: Рассчитанное распределение примеси для лабораторного эксперимента (D – диаметр источника тепла и примеси, r – текущая координата) (а); вычисленная концентрация пассивной примеси C в ПСА (б); линии тока над островом тепла (в); векторное поле скорости среднего ветра и изолинии средней вертикальной скорости на 12 час. (г)

примесь, не накапливаясь вблизи поверхности, переносится в перемешанный слой и далее в слой инверсии, рассеивается в горизонтальном направлении, а также проникает за пределы инверсионного слоя ($z/z_i \approx 1$). Для ПСА (второй сценарий) наблюдается похожая картина в том смысле, что примесь, не накапливаясь вблизи поверхности, переносится вверх и боковыми движениями рассеивается по всей области (правая часть рис. 4). Как и в первом сценарии, примесь проникает за пределы инверсионного слоя.

Таким образом, моделирование распространения пассивной примеси от непрерывного поверхностного источника над островом тепла с помощью разработанной трехпараметрической теории турбулентного переноса импульса, тепла и вещества позволило получить результаты, качественно согласующиеся с данными лабораторных измерений распространения пассивной примеси в конвективном пограничном слое. В частности, модель воспроизводит проникновение примеси из слоя перемешивания в инверсионный слой.

В рамках базового проекта продолжалась работа по отладке и исследованию свойств мезомасштабной модели гидротермодинамики атмосферы.

Основными уравнениями модели являются три уравнения движения, уравнения переноса тепла и влаги, уравнение неразрывности. Система уравнений записывается для отклонений метеорологических величин от их фоновых значений, которые считаются известными и заданными. Для моделирования переноса примеси используется адвективно-диффузионное уравнение. Система уравнений замыкается начальными и краевыми условиями. На открытых боковых границах области задавались однородные условия Неймана, на верхней границе – условия выхода полей метеоэлементов на их крупномасштабные фоновые значения. Взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью в модели описывается через параметризацию приземного слоя атмосферы. Применение теории приземного слоя приводит к условиям третьего рода на нижней расчетной границе. В модели учитывается поток солнечной радиации на подстилающую поверхность с учетом ориентации склонов, и для каждого момента времени рассчитывается температура подстилающей поверхности. Данные о крупномасштабных составляющих метеополей берутся из расчетов прогнозной модели COSMO конфигурации COSMO-RuSib.

Одной из целей работы в отчетный период был сценарный расчет на период 12 суток, начиная с 24.07.2019, по моделированию распространения дыма от пожаров над территорией, ограниченной 48° и 60° с. ш. и 96° и 120° в. д., в центре которой расположено оз. Байкал. Начальное поле примеси задавалось нулевым. Десять постоянных источников пассивной примеси, имитирующих выбросы дыма от пожаров, задавались в основном в северной части территории в местах скопления реальных очагов возгорания.

По схеме расчетов на каждом шаге по времени решается система уравнений гидротермодинамики атмосферы. Найденные значения компонент скорости ветра являются входными параметрами для решения уравнения переноса примесей на том же шаге по времени. Каждые три часа в модели динамики атмосферы обновляется информация о фоновых полях метеоэлементов. Таким образом, с помощью мезомасштабной модели динамики атмосферы воссоздается поле ветра в Байкальском регионе, далее по модели распространения примесей рассчитывается перенос примесей от распределенных источников.

В конце июля – начале августа 2019 г. в Байкальском регионе наблюдалось большое количество пожаров севернее оз. Байкал. До 26 июля дымовые шлейфы наблюдались только на севере

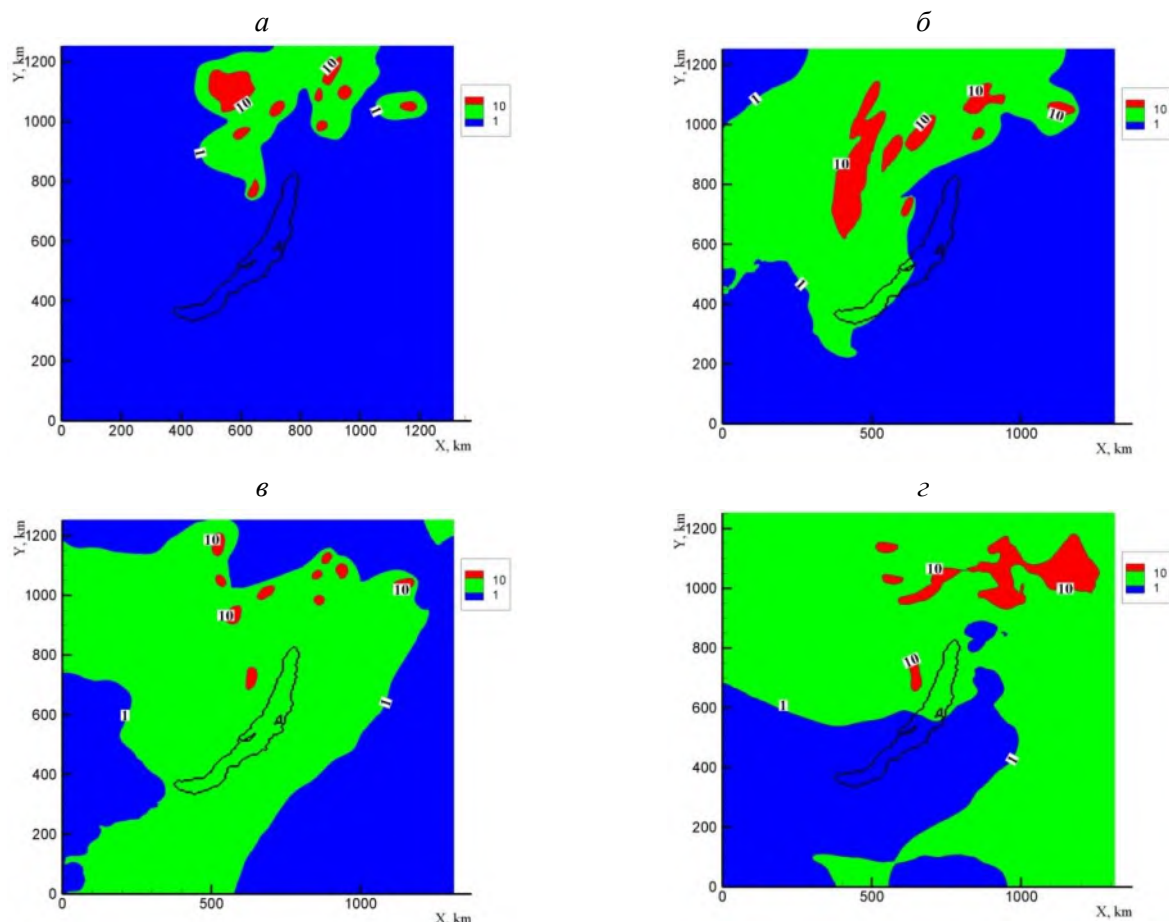


Рис. 5: Расчетные интегральные поля концентрации пассивной примеси (усл. ед.) от 10 источников для различных дат. Суммирование проведено по всем вертикальным уровням области интегрирования (от 100 м над поверхностью и примерно до 7 км над уровнем моря):
а – 05:00 25.07.2019; *б* – 05:00 29.07.2019, *в* – 31.07.2019; *г* – 02.08.2019

рассматриваемой территории. Затем произошло смещение дымовых шлейфов к югу. Дымом заняло практически всю моделируемую территорию. К началу августа произошел разворот и смещение воздушных масс, после чего дым сносился на восток и северо-восток.

В нашем сценарии получились похожие картины развития ситуации. Рассчитанные поля концентраций пассивной примеси представлены на рис. 6. В первые дни расчета примесь локализуется на севере области (рис. 5*а*), затем происходит смещение дыма к югу (рис. 5*б*) и задымление почти всей территории (рис. 5*в*). В первые дни августа происходит смещение дыма к северо-востоку и территория начинает очищаться (рис. 5*г*). На рис. 6 представлены расчетные дымовые шлейфы и спутниковые снимки пожаров, сделанные 26 и 30 июля.

Кроме моделирования переноса трассеров, имитирующих поведение дымовых шлейфов от пожаров, в сценариях рассматривался перенос пассивных примесей от точечных антропогенных приподнятых источников. Источники были заданы на местах расположения труб котельных и ТЭЦ. Для численного эксперимента взяты объекты, расположенные в Иркутске, Ангарске, Шелехове, Усолье-Сибирском, Байкальске, Гусиноозерске, Улан-Удэ, Каменске, Слюдянке, Бабушкине (рис. 7).

Моделирование динамики атмосферы региона и процессов рассеивания невесомых пассивных примесей показало, что загрязнения от источников Иркутско-Черемховского промышлен-

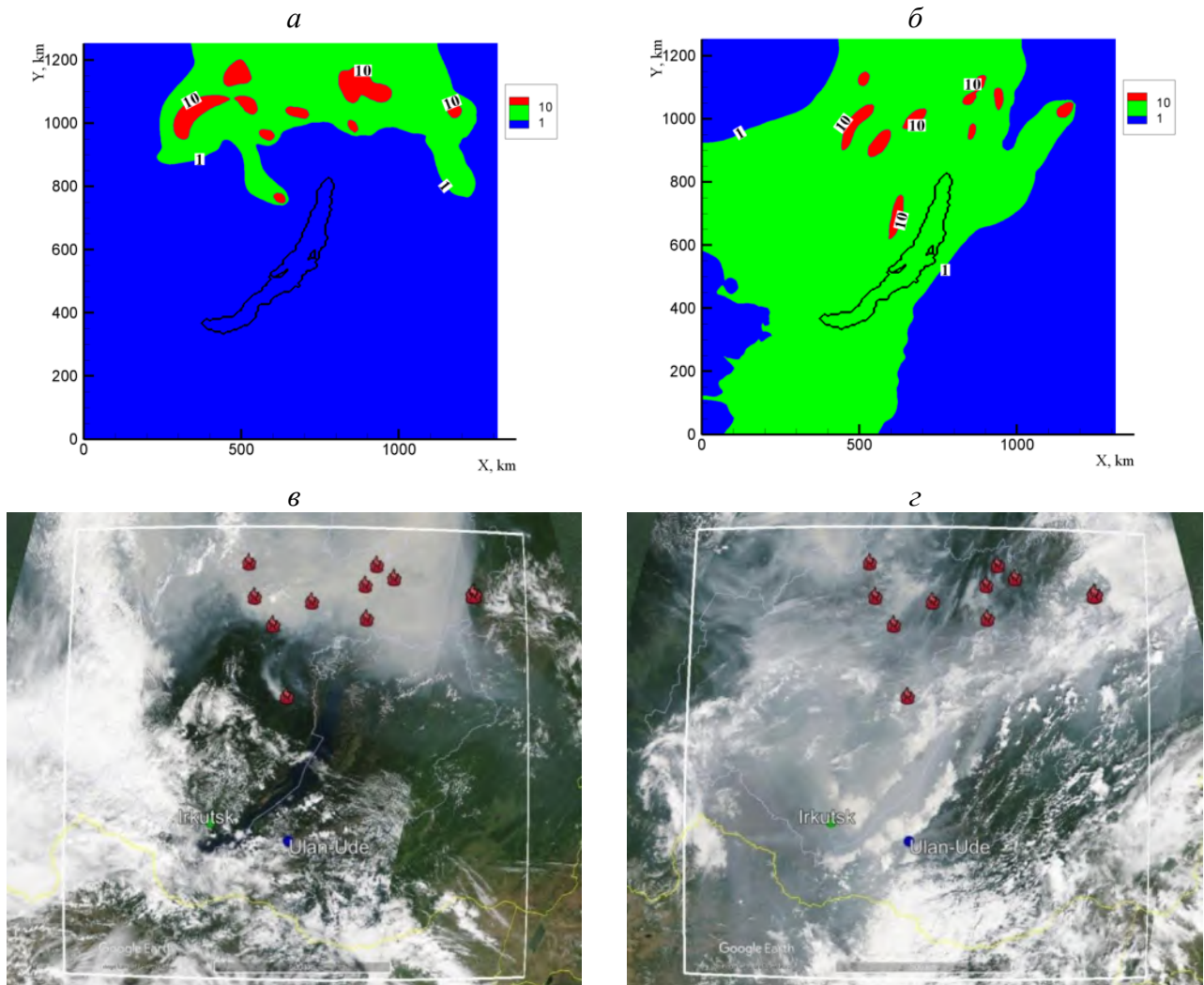


Рис. 6: Распространение дыма над Байкальской территорией: поля примеси, рассчитанные на 05:00 26 июля (а), 05:00 30 июля (б); космические снимки 26 июля (в), 30 июля (з)

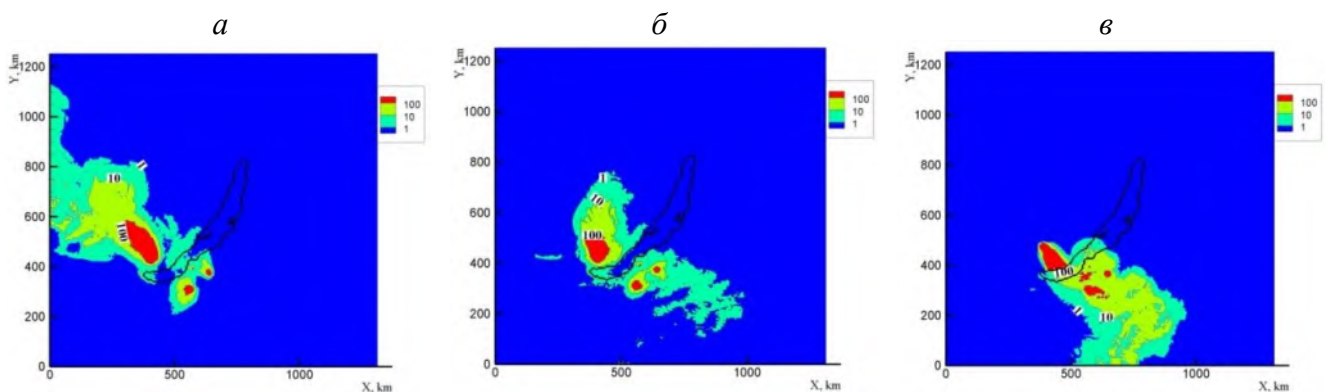


Рис. 7: Интегральная функция распределения пассивной примеси от 10 источников на высоте 100 м над поверхностью на 05:00 местного времени 25.07.2019 (а), 28.07.2019 (б), 01.08.2019 (в)

ного комплекса могут достигать акватории Байкала. В условиях рассмотренного сценария источники на восточном побережье Байкала также оказывают загрязняющее воздействие на атмосферу над озером. В сочетании со смогом от лесных пожаров это приводит к значительной нагрузке на атмосферу региона.

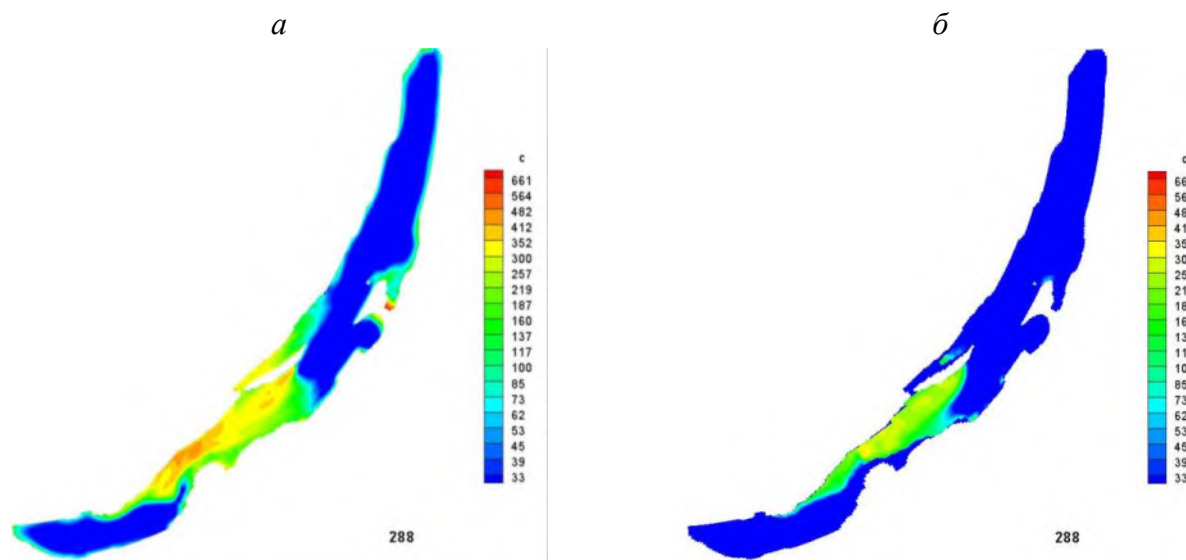


Рис. 8: Распределение МП в конце "климатического" августа:
а – в поверхностном слое; *б* – на глубине 50 м

3. Построены новые численные алгоритмы решения задач гидротермодинамики и распространения примесей в локальных зонах оз. Байкал; выполнена их эффективная реализация.

Разработана новая версия комплекса моделей, алгоритмов и программ, предназначенная для моделирования распространения микропластика (МП) в озере. Пластисфера – новый термин, который недавно появился в научной среде. Он отражает факт изменения экосистемы планеты под влиянием поступающего в нее пластика. Озеро Байкал, по распространению в его водах МП, практически не отличается от Великих Американских озер, где загрязнение МП началось значительно раньше, чем в Байкале. Пластик химически инертен, но его микрочастицы, попав в воду, способны аккумулировать присутствующие в воде токсичные органические вещества, а также тяжелые металлы. То есть МП практически становится в один ряд с другими загрязнителями озера. Поэтому мотивацией исследований является попытка оценить текущее состояние проблемы с учетом специфики оз. Байкал. В этом случае целесообразно опираться на имеющиеся разработки в области математического моделирования процессов, протекающих в озере. В связи с большой степенью неопределенности, присущей всем составляющим процесса моделирования природных объектов начиная от формулировок проблем и постановок задач и заканчивая интерпретацией результатов моделирования, естественно использовать сценарный подход, который позволяет получить вариантную оценку результатов в зависимости от задаваемых параметров. В отчетный период разработаны новые версии комплекса моделей и выполнено моделирование распространения МП в сценарных расчетах с различными вариантами задания источников загрязнений, связанных с распространением МП, а также других параметров, участвующих в моделях. Моделирование выполняется на основе трехмерной негидростатической модели гидродинамики озера и модели распространения примесей. На рис. 8 показаны результаты расчетов распространения МП в период "открытой" воды. На них выделены участки, наиболее загрязненные МП в рассматриваемом сценарии.

4. Разработаны макеты высокопроизводительных технологий построения карт автоматической и контролируемой классификации больших объемов данных ДЗЗ.

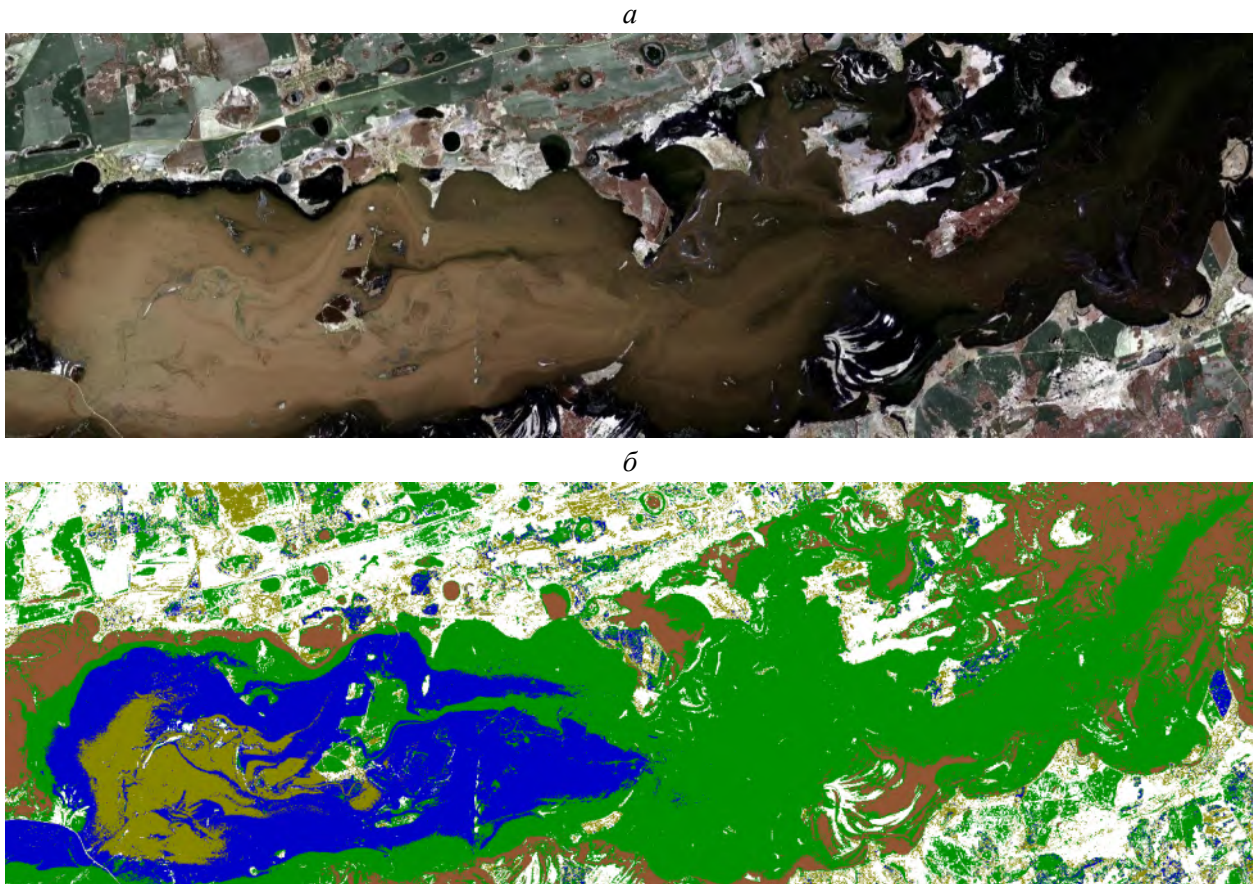


Рис. 9: Фрагмент космического снимка паводковой обстановки в Тюменской обл. (КА Sentinel-2, 11.05.2017 г.) (а); результат контролируемой классификации байесовским поэлементным классификатором; выделены 4 зоны затопления (б)

Технологии обработки больших объемов данных ДЗЗ созданы на базе оригинальной разработки коллектива – программного комплекса обработки спутниковых данных PlanetaMonitoring. В рамках отчетного периода усовершенствованы программные модули автоматической классификации (кластерного анализа) алгоритмом К-средних и контролируемой классификации (классификации с обучением) на основе байесовской стратегии максимального правдоподобия для нормально распределенных векторов признаков (семь классификаторов: один поэлементный и шесть объектных), а также принципа минимума расстояния (два объектных классификатора).

В указанные модули введены: возможность сборки и исполнения кода модулей как 64-рядных библиотек; параллельное исполнение вычислений в рамках стандарта OpenMP; возможность исполнения в автономном (пакетном) режиме для использования в качестве компонент распределенной системы облачных Web-сервисов.

Реализовано расширение фреймворка обработки спутниковых данных на удаленной высокопроизводительной ЭВМ SSCCIP возможностью выполнения обработки на ЭВМ, оснащенной несколькими ускорителями Intel Xeon Phi.

Разрабатываемый фреймворк (программная платформа) обработки спутниковых данных на удаленной высокопроизводительной ЭВМ SSCCIP расширен возможностью выполнения обработки на удаленной ЭВМ, оснащенной несколькими ускорителями Intel Xeon Phi. Результат опирается на прошлогодние работы по расширению библиотеки ParImProLib возможностью распараллеливания вычислений одновременно с помощью технологий MPI и OpenMP.

Дополнительно выполнена интеграция системы SSCCIP с разрабатываемым фреймворком облачных технологий обработки ДЗЗ SSCCcloudIP, позволяющая создавать Web-сервисы, выполняющие обработку на удаленной суперЭВМ.

Разработан подход и макетные программные средства для синхронной визуализации картографических объектов всего Земного шара в "голографическом" режиме.

В результате проведенной работы представляется возможным построение видеоролика, демонстрирующего, например, динамику распределения населения на карте земного шара, что информационно обеспечивает четырехмерный поток данных, следуя идеям, заложенным в проекте "4D Anatomy".

Для визуализации четырехмерных объектов предлагается установить гомеоморфизм шара с объектами, находящимися на четырехмерной гиперсфере, средствами картографических проекций: задавая внутри шара соседние "слои" географическими картами, соответствующим "соседним" моментам времени, можно получить послойные параллели в четырехмерном пространстве. Последовательно переходя между соседними слоями, можно визуализировать кинокартину в технологии, отображающей процесс изменения мира.

Решение задачи Радона на многообразиях ломаных (т. е. угловых структур); развитие масштабируемых масок выделения углов на многомерных сетках. Угловые структуры имеются на многих изображениях и являются объектом обнаружения в задачах обработки визуальных данных. Наряду с этими проблемами актуальной является задача Радона в электронной позитронной томографии, где данные комптоновского рассеяния являются интегралами по ломаным линиям, состоящим из двух отрезков. Близкая задача моделирования и учета рассеяния и изменения траектории гамма-фотонов существует и в рентгеновской томографии. В 2021 г. были получены масштабируемые маски для трехмерного случая как результат обобщения двумерной постановки. В отчетный период выполнено обобщение масштабируемых масок на угловые структуры в виде ломаных, или V-линий (V-lines). Также были продолжены исследования и опубликованы результаты применения сингулярного разложения преобразования Радона при устранении полосовых помех на спутниковых снимках и для других задач, связанных с регулярностью текстур.

Более подробно изложим результаты, относящиеся к рассмотрению шума, вызванного электрическими или электромеханическими помехами во время получения и передачи спутниковых изображений (так называемый "дрейф темновых токов"). В этом случае изображение получается с аддитивно наложенным искажением в виде пространственных синусоид различных частот. Традиционно такой шум может быть значительно уменьшен путем частотной фильтрации в области пространства Фурье. Преобразование Фурье синусоиды имеет вид парных сопряженных импульсов, расположенных в центрально-симметричных точках частотной области, соответствующих частотам синусоиды. Если амплитуды синусоидальной волны в пространственной области достаточно велики, можно ожидать, что эти пары будут заметны в спектре импульсов изображения по одной на каждую синусоиду в исходном изображении. Таким образом, периодический шум может быть проанализирован и отфильтрован довольно эффективно с использованием частотных методов. Подход сводится к использованию селективных фильтров (режекторный, полосовой и узкополосный), способных изолировать шум.

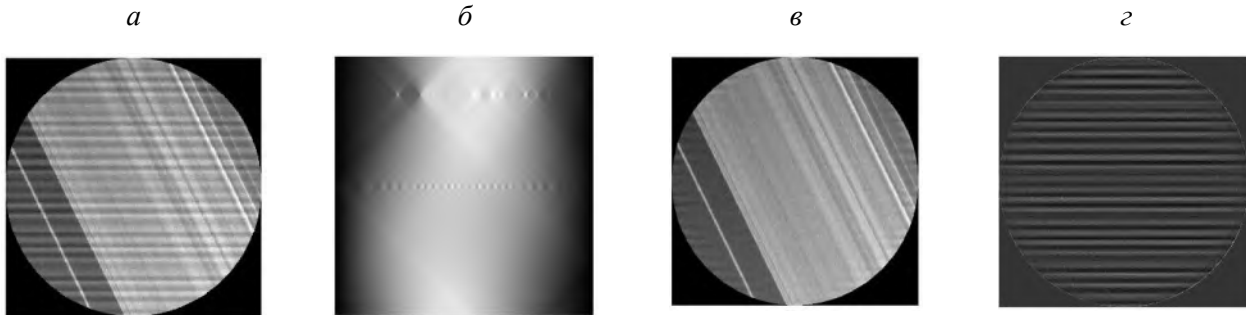


Рис. 10: Кольца Сатурна, снимок, переданный с космической станции Кассини:

a – изображение $z = u + v$ является суммой искомого изображения (u), зашумленного параллельными полосами v ; $б$ – преобразование Радона (синограмма); $в$ – результат Z приближения на основе SVD; $г$ – разность изображений a и $в$, т. е. аппроксимация полосовой помехи

Реализован альтернативный подход на основе преобразования Радона и его сингулярного разложения (SVD) в суммы плоских волн для устранения помехи в виде интерференции полос. Мотивацией использования преобразования Радона является наблюдение, что последовательность полос – это плоская волна. Нам нужно извлечь одну плоскую волну (или несколько соседних) из зашумленного изображения. По сравнению с частотным подходом проекции пространства Радона еще сохраняют свою связь с пространственной геометрией.

Проиллюстрируем пример расчета реконструкции SVD для реальной задачи удаления полосовых помех на изображении. На рис. 10а представлено изображение колец Сатурна, переданное межпланетной станцией Кассини, подверженное полосовому шуму. Оно обозначается как z и трактуется как сумма полезных неизвестных образов u , на которые накладывается полосовая помеха v , а образ $z = u + v$ есть образ, наблюдаемый системой регистрации и передачи данных дистанционного зондирования. Искажения, накладываемые полосами, неизвестны. Однако заранее известны их направления, они представляют собой параллельные горизонтальные линии.

Изображение колец Сатурна (рис. 10а) и его преобразование Радона, или синограмма, представляют собой изображения 512×512 . Отсчеты ("детекторы") расположены построчно сверху вниз и составляют горизонтальную ось (рис. 10б). Реконструкция, или SVD-решение минимальной нормы, показана на рис. 10в, а разницу между изображением z и его аппроксимацией Z можно увидеть на рис. 10г. Аппроксимация Z получена выбрасыванием (обнулением) одной информативной проекции в синограмме, отвечающей за присутствие помехи, и применением SVD-восстановления к оставшимся проекционным данным.

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.

Продолжена разработка методологии решения задач природоохранного прогнозирования и проектирования, которые формулируются как математические задачи продолжения. Суть подхода заключается в том, что функция состояния модели исследуемых процессов восстанавливается по неполной информации с помощью алгоритмов, идентифицирующих функции неопределенности, дополнительно введенных в модель. Выбор множества допустимых функций

неопределенности позволяет регулировать свойства решений. В результате задача о поиске функции неопределенности становится вспомогательной для продолжения функции состояния из наблюдаемой области в ненаблюдаемую. Причем продолжение возможно в широком смысле: по пространству, времени или даже по компонентам функции состояния. Кроме функций неопределенности в нашем подходе существенное значение имеют функции чувствительности целевых функционалов, отвечающих за конкретные цели исследований.

В ходе выполнения проекта были рассмотрены следующие задачи:

1. Сформулирована общая методология решения задач последовательного продолжения в рамках вариационного принципа в формулировках со слабыми ограничениями. Наряду с оптимизационным мы развиваем также подход с использованием операторов чувствительности и ансамблей решений сопряженных уравнений. Описаны базовые алгоритмы решения задач продолжения с использованием метода расщепления и методов конечных элементов/объемов на основе уравнения конвекции-диффузии-реакции.

2. Разработаны последовательные алгоритмы продолжения в различных формулировках. В том числе изучались задачи продолжения для нелинейных моделей с многокомпонентными функциями состояния. В качестве функций неопределенности выступали правые части моделей (источники) и коэффициенты операторов трансформации примесей. Для идентификации функций неопределенности использовались оптимизационные метаэвристические и градиентные алгоритмы, а также алгоритмы на основе ансамблей решений сопряженных уравнений и операторов чувствительности. Выполнено численное сравнение результатов различных постановок обратных задач и задач усвоения данных, которые рассматривались как последовательные решения связанных обратных задач.

3. Выполнен анализ разработанных алгоритмов в контексте решения природоохранных задач. Численные эксперименты показали, что во многих практических постановках относительная ошибка оценки функции состояния модели может быть существенно меньше, чем ошибка восстановления функции неопределенности, например в источниках. Это можно объяснить тем, что часть функции неопределенности, выбранной исследователем, может быть ненаблюдаемой по имеющимся данным. Так, в случае устойчивого направленного переноса примесь уносится ветровыми потоками и не попадает на датчики системы наблюдений. Тем не менее поиск функции неопределенности в заданных множествах позволяет контролировать получаемое решение задачи продолжения и сохранять его физический смысл, следовательно, и возможность содержательной интерпретации и использования в других моделях. Еще один существенный вывод: в наших численных экспериментах решение классической обратной задачи продолжения на интервале времени не обязательно давало результаты лучше, чем задача последовательного усвоения данных в окнах усвоения, несмотря на то, что последняя была более ограниченной в количестве данных измерений. Это может объясняться усложнением поведения решения при увеличении количества неизвестных, например появлением большего числа локальных минимумов целевого функционала невязки.

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 1.10.2020).

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

Крупномасштабные обратные задачи нуждаются не только в эффективных алгоритмах, но и в их реализации на современной вычислительной инфраструктуре. Алгоритмы идентификации источников примесей в атмосфере и оценки информативности разнородных данных мониторинга на основе ансамблей решений сопряженных уравнений и операторов чувствительности (разработанные на предыдущих этапах выполнения проекта) в отчетном году адаптированы к выполнению на высокопроизводительных вычислительных системах с распределенной памятью. Это позволяет уменьшить время обработки данных мониторинга, использовать для интерпретации данных более детальные модели адвекции-диффузии-реакции примесей в атмосфере и обрабатывать большее количество разнородных данных.

Эффективность распараллеливания была изучена в сценарии обратного моделирования для региона оз. Байкал. Реализация значительно сокращает время моделирования сценария с нескольких дней до десятков минут и обеспечивает удовлетворительную масштабируемость до 200 исполняемых потоков. Показано, что запуск двух процессов MPI на двухпроцессорном узле с привязкой к процессору обеспечивает лучшую производительность, чем настройка одного процесса на узел, несмотря на избыточность вычислений. Таким образом, достигнутые результаты способствуют более широкому применению алгоритмов обратного моделирования в крупномасштабных исследованиях.

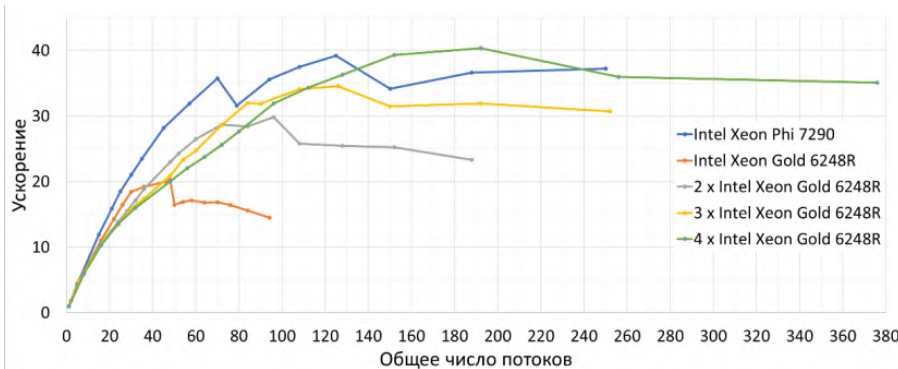


Рис.11: Ускорение решения обратной задачи идентификации источников выбросов в Байкальском регионе по разнородным данным измерений качества воздуха на различных конфигурациях кластера НКС-1П ССКЦ



Рис. 12: Продолжительность последовательного и параллельного решения обратной задачи на различных конфигурациях кластера НКС-1П ССКЦ

Кроме того на данном этапе представлена версия интерфейсов в виде WPS сервисов. Так как установка и настройка разработанной системы обратного моделирования – это достаточно сложная техническая задача, то представление результатов разработки алгоритма в виде прикладных WPS сервисов с веб-интерфейсом позволяет привлечь к использованию алгоритмов более широкий круг исследователей и пользователей.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Методы математического моделирования для цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки // *Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории. Сер.: Интеграционные проекты СО РАН / Пененко А. В., Рапуга В. Ф., Огородников В. А., Пененко В. В., Акентьева М. С., Амикишиева Р. А., Гочаков А. В., Каргаполова Н. А., Леженин А. А., Пьянова Э. А., Скорик В. С. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2022. С. 294–333.*

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Penenko, A., Rusin, E. Parallel implementation of a sensitivity operator-based source identification algorithm for distributed memory computers // *Math.* 2022. No. 10. 4522. <https://doi.org/10.3390/math10234522>.

2. Kazantsev, I. G., Turebekov, R. Z., Sultanov, M. A. Inpainting of regular textures using ridge functions // *J. Inverse and Ill-posed Problems.* 2022. V. 30, No. 5. P. 759–766. <https://doi.org/10.1515/jiip-2021-0053>.

3. Penenko, A. V., Konopleva, V. S., Penenko, V. V. Comparison of inverse and data assimilation problems in the inverse modeling of atmospheric chemistry // *Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123416O (2022).* <https://doi.org/10.1117/12.2644951>.

4. Pyanova, E. A., Gochakov, A. V. Modeling of atmospheric circulation and transport of impurities from natural and industrial sources in the Baikal region // *Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics 123415T (2022).* <https://doi.org/10.1117/12.2644606>.

5. Yudin, M. S. Bifurcation effects in finite element simulation of atmospheric fields in and above a forest stand // *Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 123416V (2022).* <https://doi.org/10.1117/12.2645118>.

6. Tsvetova, E. Transport model: microplastic in Lake Baikal // *Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; 1234165 (2022).* <https://doi.org/10.1117/12.2644796>.

7. Penenko, V. V. Notes on environmental forecasting in the current conditions // *Proc. SPIE 12341, 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; 123416U (2022).* <https://doi.org/10.1117/12.2645093>

8. Zubairova, U. S., Kravtsova, A. Yu., Romashchenko, A. V., Pushkareva, A. A., Doroshkov, A. V. Particle-based imaging tools revealing water flows in maize nodal vascular plexus // *Plants.* 2022. V. 11, iss. 12. 1533. DOI: 10.3390/plants11121533.

9. Bobrovskikh, A. V., Zubairova, U. S., Bondar, E. I., Doroshkov, A.V., Lavrekha, V. V. Transcriptomic data meta-analysis sheds light on high light response in *Arabidopsis thaliana* L. // Intern. J. Molec. Sci. 2022. V. 23, iss. 8. 4455. DOI: 10.3390/ijms23084455.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Kazantsev, I. G., Turebekov, R. Z., Sultanov, M. A. Restoration of images corrupted by stripe interference using Radon domain filtering // Sib. Electron. Math. Rep. 2022. V. 19, No. 2. P. 540–547. DOI: <https://doi.org/10.33048/semi.2022.19.045>.

2. Penenko, A. V., Konopleva, V. S., Penenko, V. V. Inverse modeling of atmospheric chemistry with a differential evolution solver: Inverse problem and Data assimilation // 2022 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1023 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1023/1/012015>.

3. Penenko, A., Penenko, V., Tsvetova, E., Gochakov, A., Ryanova, E., Konopleva, V. Sensitivity operator-based approach to the interpretation of heterogeneous air quality monitoring data // LNCS (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2022. 13127. P. 164–171. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97549-4_19.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Yarovenko, I. P., Kazantsev, I. G. An extrapolation method for improving the linearity of CT-values in X-ray pulsed tomography // Far Eastern Math. J. 2022. V. 22, No. 2. P. 269–275. <https://doi.org/10.47910/FEMJ202238>.

2. Kadyroldina, A. T., Orazova, A. Zh., Krasavin A. L., Kazantsev, I. G., Dyomina I. A., Alontseva, D. L. Development of new control algorithms for a robotic arm equipped with a 3D scanning or machine vision system // Bull. D. Serikbayev of EKTU. 2022. No. 1. P. 39–59. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2022_1_39.

3. Пененко, В. В. О природоохранном прогнозировании в современных условиях // Материалы 28-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г. [Электрон. ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. D352–D354. ISBN: 978-5-94458-190-7. DOI: 10.56820/ОАОРА.2022.50.36.003.

4. Пененко, А. В., Пененко, В. В., Цветова, Е. А., Гочаков, А. В., Пьянова, Э. А., Ходжер, Т. В., Жамсуева, Г. С., Заяханов, А. С. Численный эксперимент по оценке источников загрязнения атмосферы на основе данных корабельной экспедиции и решения обратной задачи // Материалы 28-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г. [Электрон. ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. D315–D318. ISBN: 978-5-94458-190-7. DOI: 10.56820/ОАОРА.2022.48.77.001

5. Цветова, Е. А. Транспортная модель: микропластик в озере Байкал // Материалы 28-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г. [Электрон. ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. D328–D331. ISBN: 978-5-94458-190-7. DOI: 10.56820/ОАОРА.2022.41.68.001

6. Пененко, А. В., Скорик, В. С., Пененко, В. В. Обратное моделирование химии атмосферы с помощью метаэвристического алгоритма: обратная задача и усвоение данных // Материалы 28-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г. [Электрон. ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. D291–D294. ISBN: 978-5-94458-190-7. DOI: 10.56820/ОАОРА.2022.77.50.001.

7. Курбацкая, Л. И. Циркуляция и рассеяние загрязнений над городом в устойчиво стратифицированной окружающей среде // *Материалы 28-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы"*, Томск, 4–8 июля 2022 г. [Электрон. ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. D173–D177. ISBN: 978-5-94458-190-7. DOI: 10.56820/OAOPA.2022.11.75.001.

8. Ходжер, Т. В., Жамсуева, Г. С., Заяханов, А. С., Балин, Ю. С., Пененко, В. В. Мониторинг и оценка опасных природных явлений (лесные пожары) и антропогенных источников на качество атмосферы Байкальского региона на основе комплексных дистанционных и наземных локальных измерений, и математического моделирования // *Материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием "Экологические проблемы бассейна озера Байкал"*, Улан-Удэ, 28 авг. – 1 сент. 2022 г. [Электрон. ресурс]. С. 111–115. DOI: 10.31554/978-5-7925-0621-3-2022-111-115.

9. Пененко, А. В., Русин, Е. В. Реализация на суперэвм алгоритма решения обратных задач на основе операторов чувствительности в рамках платформы обратного моделирования IMDAF // *Суперкомпьютерные дни в России : Труды междунар. конф.*, Москва, 26–27 сент. 2022 г. М.: МАКС Пресс, 2022. С. 155–156.

10. Penenko, A., Skorik, V., Zubairova, U. Inverse modeling of biological processes in sensitivity operator framework // *Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology (BGRS/SB-2022) : Abst. the 13th Intern. Multiconf.*, Новосибирск, 4–8 июля 2022 г. Новосибирск: ИЦИГ СО РАН, 2022. P. 1111. DOI: 10.18699/SBB-2022-666.

11. Kurbatskaya, L. I. Features of turbulent transport in the stably stratified boundary layer atmosphere // *The 21th Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022) : Abst.*, Новосибирск, 8–14 августа 2022 г. Part I. Новосибирск: Изд-во СО РАН. С. 108–109. DOI: 10.53954/9785604788967_108.

12. Юдин, М. С. Эффекты бифуркации при численном моделировании атмосферных полей в лесном массиве // *Материалы 28-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы"*, Томск, 4–8 июля 2022 г. [Электрон. ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2022. С. D348–D351. ISBN: 978-5-94458-190-7. DOI: 10.56820/OAOPA.2022.59.67.001.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г. – 7 докладов (Пененко В. В., Пененко А. В., Русин Е. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).

2. 21-я Международная конференция по методам аэрофизических исследований, Новосибирск, 8–14 августа 2022 г. – 1 доклад (Курбацкая Л. И.).

3. "Технопром 2022", Новосибирск, 23–25 августа 2023 г. – 1 доклад (Пененко А. В.).

4. ENVIROMIS-2022, Томск, 12–17 сентября 2022 г. – 1 приглашенный доклад (Пененко А. В., Русин Е. В., Скорик В. С., Пененко В. В.).

5. Международная конференция "Суперкомпьютерные дни в России" в рамках конгресса "Суперкомпьютерные дни в России", Москва, 26–27 сентября 2022 г. – 2 доклада (Марченко М. А., Пененко А. В., Русин Е. В.).

6. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 9 докладов (Пененко В. В., Пененко А. В., Русин Е. В., Казанцев И. Г., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).

7. 29-я рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 22–25 ноября 2022 г. – 7 докладов (Пененко В. В., Пененко А. В., Русин Е.В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А., Юдин М. С.).

8. 38-я международная конференция "Ляпуновские чтения", Иркутск, 5–9 декабря 2022 г. – 1 доклад (Пененко В. В., Пененко А. В., Русин Е.В., Пьянова Э. А., Цветова Е. А.).

9. Научная конференция "Современные проблемы обратных задач", Новосибирск, 19–23 декабря 2022 г. – 2 доклада (Казанцев И. Г.).

10. Научная конференция "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 18-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 18–20 мая 2022 г. – 5 докладов (Пененко В. В., Пененко А. В., Курбацкая Л. И., Пьянова Э. А., Цветова Е. А.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Пененко В. В.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.,

– член программного комитета 29-й рабочей группы "Аэрозоли Сибири", Томск, 22–25 ноября 2022 г.,

– член программного комитета 28-го Международного симпозиума "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Томск, 4–8 июля 2022 г.;

2. Пененко А. В.:

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.,

– член программного комитета ENVIROMIS-2022, Томск, 12–17 сентября 2022 г.;

3. Русин Е. В. – член оргкомитета научной конференции "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 18-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь", Новосибирск, 18–20 мая 2022 г.

4. Пьянова Э. А. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 9

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 12

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 14

Докладов на конференциях – 36, в том числе 1 пленарный

Участников оргкомитетов конференций – 7

Кадровый состав

1. Пененко В. В. зав. лаб. д.ф.-м.н.

2. Бучнев А. А. с.н.с. к.т.н.

3. Зубаирова У. С. н.с. к.б.н.

4. Казанцев И. Г. в.н.с. д.ф.-м.н.

- | | | |
|--------------------|--------|-----------|
| 5. Курбацкая Л. И. | с.н.с. | |
| 6. Пененко А. В. | в.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 7. Пьянова Э. А. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 8. Русин Е. В. | с.н.с. | к.т.н. |
| 9. Цветова Е. А. | в.н.с. | к.ф.-м.н. |
| 10. Юдин М. С. | с.н.с. | |
| 11. Скорик В. С. | инж. | |
| 12. Иванова Г. И. | техник | |

Педагогическая деятельность

Пененко В. В. – профессор НГУ

Пененко А. В. – ст. преподаватель НГУ

Руководство студентами

Скорик В. С. – 2-й год магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Сортоева К. С. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Кардаш Р. Д. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Артемчик Г. О. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Емельянов М. К. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Цыбенова З. В. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Защита дипломов

Скорик (Коноплева) В. С. – магистр ММФ НГУ, руководитель Пененко А. В.

Награды

Д.ф.-м.н. Пененко А. В. – лауреат именной премии Правительства Новосибирской обл. в 2022 г. за работу "Алгоритмы идентификации источников загрязнений для моделей качества воздуха различной сложности с использованием операторов чувствительности и гетерогенных данных мониторинга".

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ ГЕОФИЗИКИ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Имомназаров Х. Х.

Важнейшее достижение

Реконструкция рассеивающих объектов субсейсмического масштаба методом зеркального обращения времени

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

Пространственная локализация неоднородных включений в геологической среде имеет принципиальное значение для повышения разрешающей способности и достоверности методов интерпретации геофизических данных. Предложен метод локализации случайных неоднородностей субсейсмического масштаба в однородной упругой среде методом зеркального обращения времени (TRM). Метод основан на принципе обратимости во времени волновых процессов в средах без поглощения. Взаимодействие волнового поля с субсейсмическими неоднородностями рассматривается как процесс возникновения вторичных источников излучения, порождаемых включениями. Возникающие вторичные источники выступают индикаторами наличия в среде геологической неоднородности и локализуются методом зеркального обращения времени по записям системы возбуждения и регистрации на свободной поверхности. Верификация предложенного метода проведена с использованием синтетических данных для тестовых моделей, рассчитанных конечно-разностным методом на сдвинутых сетках для системы динамической теории упругости (рис. 1).

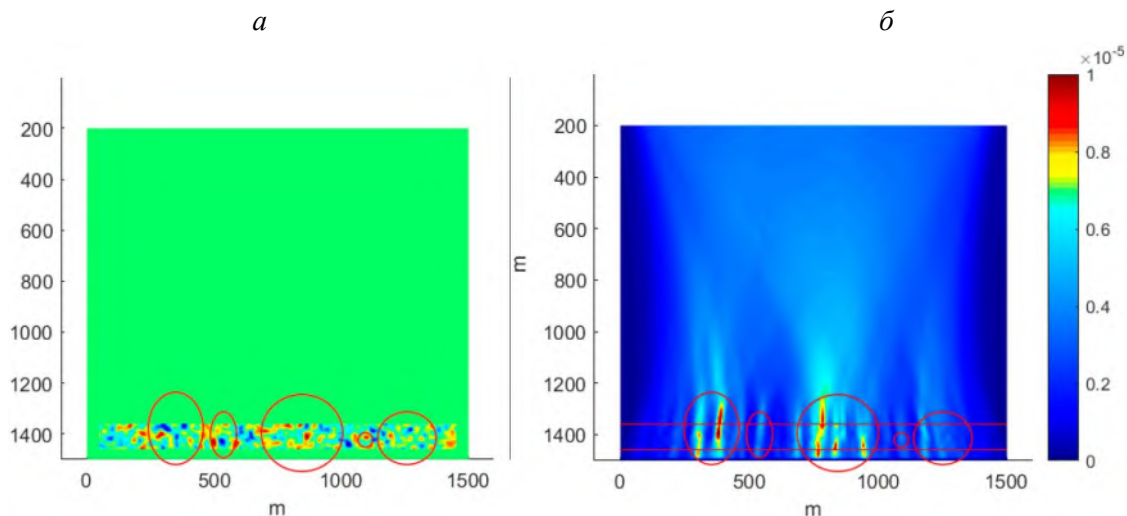


Рис. 1: Результаты моделирования: *а* – начальное распределение скорости V_p в случайно неоднородном слое; *б* – распределение полной энергии волнового поля методом TRM

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Reshetova, G., Galaktionova, A. Reconstruction of subsurface scattering objects by the time reversal mirror // Sib. Electron. Math. Rep. 2022. V. 19(2). P. 517–527.
2. Галактионова А. А., Решетова, Г. В. Реконструкция рассеивающих объектов путем зеркального обращения времени // Геофизика. 2022. № 3. С. 76–81.

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. 5-я Международная геолого-геофизическая конференция "ГеоЕвразия-2022. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес", Москва, 30 марта – 1 апреля 2022 г.

2. Международная конференция "Марчужковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

3. 23-я Уральская молодежная научная школа по геофизике, Екатеринбург, 21–25 марта 2022 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 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 НИР 0251-2021-0004.

Руководитель – д.т.н. Ковалевский В. В.

Этап 2022 г. "Математическое моделирование. Высокопроизводительные вычисления. Информационно-вычислительные системы и среды в науке и образовании".

В полуплоскости R_+^2 рассмотрена стационарная система двухскоростной гидродинамики с одним давлением и однородными дивергентными и краевыми условиями для двух скоростей. Данная система является переопределенной. Ее решение сводится к последовательному решению двух краевых задач: задачи Стокса для одной скорости и давления и переопределенной системы для другой скорости. Доказано существование и единственность обобщенного решения с соответствующей оценкой устойчивости при надлежащем выборе функциональных пространств.

Построено фундаментальное решение для описания трехмерных стационарных течений вязких жидкостей двухскоростного континуума с равновесием фаз по давлению в диссипативном приближении.

Рассмотрена обратная динамическая задача пороупругости кусочно-гладкого коэффициента сдвига по дополнительной информации колебаний точек свободной поверхности. Считается, что выполнена гипотеза Гупилла о равном времени распространения возмущений по слоям насыщенной жидкостью пористой среды. Получены рекуррентные формулы для восстановления неизвестного коэффициента сдвига.

Рассмотрены разностные схемы с оптимальными параметрами для решения уравнений Максвелла. Для получения численных значений оптимальных параметров используется преобразование Лагерра. В разностное уравнение 2-го порядка аппроксимации для гармоник Лагерра вводятся дополнительные параметры, их оптимальные значения определяются минимизацией погрешности численного решения на точном аналитическом решении уравнений для гармоник. Проводя обратное преобразование Лагерра уравнений Максвелла, строятся дифференциально-разностные уравнения, являющиеся разностными по пространству и дифференциальными по времени. Дифференциально-разностные уравнения решаются конечно-разностным методом с итерациями по малым параметрам. Рассмотрены оптимальные разностные схемы для одномерных и двумерных уравнений Максвелла. Рассмотрено несколько вариантов построения разностных схем. Приведены оптимальные параметры разностных схем. Показано, что использование оптимальных разностных схем ведет к повышению точности решения уравнений.

Разработаны уравнения геофизической электродинамики ларморовского типа, позволившие объяснить такие эффекты, как появление в непроводящей атмосфере непотенциального магнитного поля, эффект Ааронова – Бома, тороидальное магнитное поле в конденсаторе, краткосрочный предвестник землетрясений в несиловом полоидальном электрическом поле и др. Уравнения сопоставлены по результатам применения геофизической электродинамики и электродинамики Максвелла. Обоснованы не объясненные ранее эффекты в физике, геофизике, сейсмологии.

Разработаны алгоритмы и создано программное обеспечение для решения задач восстановления пространственного расположения сейсмических источников и реконструкции случайных неоднородностей субсейсмического масштаба внутри геологической среды. Алгоритм решения основан на использовании метода зеркального обращения времени, в основе которого лежит свойство обратимости волновых процессов по времени в средах без поглощения.

Разработаны алгоритмы и созданы две трехмерные программы малоуглубинной электроразведки для зондов ЭМС и GEOVIZER. Программы написаны с учетом GPU архитектуры, что позволяет быстро решать прямые задачи. Программы протестированы на трехслойных моделях сред (сравнение с точным решением) в широком диапазоне сопротивлений. Проведены численные эксперименты для типичного набора объектов – шар, параллелепипед, цилиндр. Проведены расчеты по созданной ранее программе численного моделирования для метода электротомографии для сложных разломных участков верхней части земной коры.

В сейсмогеодинамическом исследовании с помощью системы GIS-ENDDDB параметр крипекс использован для проверки тезиса о воздействии на крупные коровые события со стороны среднеглубинных процессов, связанных с преобразованием и перемещением вещества в верхней мантии и наоборот, о последующем влиянии подвижек в этих толчках на изменение состояния среднеглубинных процессов. В области подготовки сильного корового землетрясения (за 1–3 года до него, а для взбросового и взбросо-сбросового типа подвижек и после него) выявлена закономерность прямой корреляции графиков $M_S(t)$ и $Cr(t)$.

Получены новые формулы, связывающие величины, известные в геометрии векторного поля и являющиеся характеристиками векторных полей, – поле присоединенных векторов векторного поля и его вектора кривизны. Обе эти величины входят в первое и второе представления Ю. А. Аминова для гауссовой кривизны и в формулы, полученные А. Г. Меграбовым в 2010–2020-х гг. На основе этих формул найдены новые дифференциальные законы сохранения для различных дифференциальных уравнений: уравнения эйконала, гидродинамических уравнений Эйлера и для семейств кривых и поверхностей. Уравнение эйконала является основной математической моделью кинематической сейсмологии и геометрической оптики.

Разработана и проверена на экспериментальных данных математическая модель взаимодействия циркадного осциллятора в печени мыши с системой потребления NAD⁺, включающей ферменты SIRT1, PARP1, CD38, активность которых меняется с возрастом. В модель включены гены *Arntl*, *Clock/Npas2*, *Per1/2*, *Cry1/2*, *Rora/g*, *Rev-Erbalpha/beta*, *Dbp*, *Nfil3*, *Nampt*, важные для функционирования циркадного осциллятора в печени млекопитающих. В частности, эксперимент с нокаутом генов описывался в модели в виде внешнего воздействия, блокирующего экспрессию соответствующих генов.

Для верификации модели использовались экспериментальные данные о суточной динамике концентрации мРНК и белков в клетках печени мыши дикого типа, влияние нокаутов различных

генов циркадного осциллятора на динамику экспрессии генов и изменение периода колебаний и т. д. Моделирование показало выраженную циркадную активность CD38, PARP1 и SIRT1, а также то, что возрастные изменения активности этих ферментов приводят к возрастным нарушениям метаболизма NAD⁺. Такие нарушения могут быть одной из причин дисфункции циркадных осцилляторов в печени и способствовать нарушению циркадных ритмов в организме.

Построена нелинейная динамическая система, описывающая в общем виде функционирование минимального автономного циркадного осциллятора в клетке млекопитающего. При описании регуляции экспрессии генов в математической модели аналитический вид функций не конкретизирован, сформулированы минимальные требования: гладкость, монотонность и ограниченность. Получены условия единственности стационарных точек динамической системы и существования циклов в фазовых портретах. Для проведения численных экспериментов с данной моделью и визуализации их результатов разработано облачное клиент-серверное приложение. Разработана база данных, включающая информацию о SNP полиморфизмах в промоторах всех генов человека и их влиянии на изменение уровня экспрессии гена при данной мутации.

Разработан параллельный алгоритм численного моделирования распространения акусто-гравитационных волн для совмещенной модели "земля – атмосфера" в случае стратифицированной по вертикали модели атмосферы и криволинейной границы раздела "земля – атмосфера". Известно, что вязкость магм в значительной степени определяет прохождение вибросейсмических колебаний через вулканические структуры и существенно меняется от процессов, таких, например, как перемещение магматических расплавов в вулканах, и дифференциации магм в результате флюидно-магматического взаимодействия. Поэтому для моделирования распространения вибросейсмических колебаний через вулканические структуры рассмотрены различные модели вязкоупругих сред и разработаны вычислительные алгоритмы для 2D и 3D моделирования прохождения вибросейсмических колебаний в вязкоупругих средах.

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.

Построено фундаментальное решение для описания трехмерных стационарных течений вязких жидкостей двухскоростного континуума с равновесием фаз по давлению в диссипативном приближении.

Исследована внешняя двумерная краевая задача для переопределенной стационарной системы, возникающая в двухскоростной гидродинамике. Для рассматриваемой задачи установлена вариационная постановка. 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. Исследована в полуплоскости $y > 0$ стационарная система двухскоростной гидродинамики с одним давлением и однородными дивергентными и краевыми условиями для двух скоростей. Данная система является переопределенной. Ее решение сводится к последовательному решению двух краевых задач: задачи Стокса для одной скорости и давления и переопределенной системы для другой скорости. Доказано существование и единственность обобщенного решения с соответствующей оценкой устойчивости при надлежащем выборе функциональных пространств. Доказано существование и единственность обобщенного решения и оценка устойчивости краевой задачи с неоднородными условиями для переопределенной системы уравнений Пуассона в полуплоскости.

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. Предложен алгоритм численного решения начально-краевой задачи для симметричной t -гиперболической системы уравнений в частных производных. Данная задача моделирует распространение сейсмических волн в пороупругой среде, насыщенной вязкой жидкостью, характеризующейся такими физическими параметрами, как скорости распространения продольных и поперечных волн, плотность материалов среды и пористость. Разработаны эффективные алгоритмы для моделирования распространения акустико-гравитационных и сейсмических волн, возбуждаемых сингулярными источниками различных типов, и их взаимодействия на границе раздела в совмещенной модели "земля – атмосфера".

Результаты работ по проектам РНФ

Проект РНФ № 22-21-00759 "Неразрушающий контроль методом зеркального обращения времени".

Руководитель д.ф.-м.н. Решетова Г. В.

В первый год выполнения проекта разработаны численные алгоритмы решения задач восстановления положений источников в случайно-неоднородных средах и реконструкции мелкомасштабных случайно-неоднородных скоплений в однородной среде. Для решения этих задач применялся метод зеркального обращения времени (Time Reversal Mirror (TRM)). При создании алгоритма реконструкции мелкомасштабных случайно-неоднородных скоплений в однородной среде мы целенаправленно отказались от использования существующих методов обработки сейсмических данных, таких, например, как метод миграции в обратном времени (Reverse Time Migration (RTM)). С помощью зарегистрированных отраженных или преломленных волн достаточно уверенно восстанавливается геометрия границ в слоисто-неоднородных средах. Однако выявление скоплений мелкомасштабных неоднородностей может вызывать серьезные затруд-

нения в силу того, что характерные размеры этих объектов гораздо меньше доминирующей длины сейсмических волн и вызывают чрезвычайно слабый сейсмический отклик. Однако присутствие в среде мелкомасштабных неоднородностей приводит к появлению поля рассеянных/рефрагированных волн, и этот факт использован нами как индикатор нарушения сплошности геологической среды. Было выдвинуто предположение, что если локализовать места возникновения рассеянных волн, то можно будет определить и положения породивших его рассеивателей. С помощью численного моделирования подтверждено, что скопления мелкомасштабных неоднородностей представляют собой вторичные источники, излучающие рассеянные волны. Именно поэтому можно использовать эти волны для локализации скоплений мелкомасштабных неоднородностей путем выполнения TRM. Численные расчеты выполнены конечно-разностным методом с аппроксимацией системы уравнений на сдвинутых сетках. Для программной реализации метода TRM создан двухуровневый метод распараллеливания, естественным образом вытекающий из структуры алгоритма.

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Меграбов, А. Г. Дифференциальные инварианты группы эквивалентности и их приложения. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. 482 с.
2. Sharapov, V., Perepechko, Y., Mikheeva, A., Ashchepkov, I., Lyamina, V., Boguslavsky, A. Morphotectonic and petrological characteristics of Permo-Triassic traps of Siberia. Preprints 2022, 2022030045. DOI: 10.20944/preprints202203.0045.v1.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Аксёнов, В. В. О свойствах силы Лоренца в естественном магнитном поле Земли // Изв. Вузов. Физика. 2022. Т. 65. № 3. С. 32–36. DOI: 10.17223/00213411/65/3/32; DOI: 10.1007/s11182-022-02651-z.
[Aksenov, V. V. Properties of the Lorentz force in the Earth's natural magnetic field // Russ. Phys. J. 2022. V. 65. P. 428–433. <https://doi.org/10.1007/s11182-022-02651-z>].
2. Cheverda, V., Bratchikov, D., Gadyshin, K., Golubeva, E., Malakhova, V., Reshetova, G. Subsea methane hydrates: Origin and monitoring the impacts of Global Warming // Appl. Sci. 2022. 12(23). 11929. DOI: 10.3390/app122311929.
3. Чеверда, В. А., Протасов, М. И., Лисица, В. В., Решетова, Г. В., Петров, Д. А., Мельник, А. А., Шиликов, В. В., Мельников, Р. С., Волянская, В. В. Трехмерная модель нефтегазовых резервуаров на основе обработки рассеянных сейсмических волн методом Гауссовых пучков // Геол. и Геофиз. 2022. Т. 63. № 1. С. 130–146. DOI: 10.15372/GiG2020177.
4. 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. Model. 2022. V. 106. С. 567–600. DOI: 10.1016/j.apm.2022.02.021.
5. Имомназаров, Х. Х., Холмуродов, А. Э., Омонов, А. Т. Прямая и обратная динамическая задача пороупругости // Вестн. Том. гос. ун-та. Матем. и механ. 2022. № 75. С. 87–99. DOI: 10.17223/19988621/75/8.

6. Imomnazarov, K. Kh., Iskandarov, I. K., Kuyliev, S. B., Urev, M. V. A boundary value problem for one overdetermined system arising in two-velocity hydrodynamics // *Math. Notes of NEFU*. 2022. V. 29(1). P. 13–23. DOI: 10.25587/SVFU.2022.17.23.002.

7. Rasskazov, D., Chadaeva, I., Sharypova, E., Zolotareva, K., Khandaev, B., Ponomarenko, P., Podkolodnyy, N., Tverdokhleby, N., Vishnevsky, O., Bogomolov, A., Podkolodnaya, O., Savinkova, L. Plant_SNP_TATA_Z-Tester: A Web service that unequivocally estimates the impact of proximal promoter mutations on plant gene expression // *Intern. J. Molecul. Sci.* 2022. V. 23, iss. 15. 8684. DOI: 10.3390/ijms23158684.

8. Вишневский, О. В., Чадаева, И. В., Шарыпова, Е. Б., Хандаев, Б. М., Золотарева, К. А., Казачек, А. В., Пономаренко, П. М., Подколodный, Н. Л., Рассказов, Д. А., Богомоллов, А. Г., Подколodная, О. А., Савинкова, Л. К., Землянская, Е. В., Пономаренко, М. П. Промоторы генов, кодирующих β -амилазу, альбумин и глобулин пищевых растений в сравнении с непищевыми, характеризуются более низкой аффинностью к ТАТА-связывающему белку: *in silico* анализ // *Вавилов. журн. ген. и селек.* 2022. Т. 26(8). С. 798–805. DOI: 10.18699/VJGB-22-96.

9. Glinskiy, B. M., Kovalevsky, V. V., Khairtdinov, M. S., Fatyanov, A. G., Martynov, V. N., Karavaev, D. A., Sapetina, A. F., Sobisevich, A. L., Sobisevich, L. E., Braginskaya, L. P., Grigoryuk, A. P. The experimental study and simulation of volcanic structures using active vibroseismic methods // *J. Volcanol. and Seismol.* 2022. № 16(4). P. 280–298. DOI: 10.1134/S0742046322040030.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Romenski, E., Reshetova, G. Computational model for fluid and elastic solid interaction based on symmetric hyperbolic thermodynamically compatible systems theory // 13376 LNCS. 2022. P. 303–313. DOI: 10.1007/978-3-031-10450-3_26.

2. Reshetova, G., Galaktionova, A. Reconstruction of subsurface scattering objects by the time reversal mirror // *Sib. Electron. Math. Rep.* 2022. V. 19(2). P. 517–527. DOI: 10.33048/semi.2022.19.043.

3. Mastryukov, A. F. Finite difference schemes of 4th order approximation for Maxwell's equations // *Num. Analysis and Appl.* 2022. V. 15(3). P. 236–246. DOI: 10.1134/S1995423922030053.

4. Imomnazarov, K. Kh., Khujaev, L. Kh., Yangiboev, Z. Sh. On an inverse dynamic poroelasticity problem for a layered medium // *Math. Notes of NEFU*. 2022. V. 29(2). P. 19–30. DOI: 10.25587/SVFU.2022.10.86.002.

5. Imomnazarov, K. K., Jabborov, N. M. Application of A-analytic functions to the investigation of the Cauchy problem for a stationary poroelasticity system // *J. Math. Sci. (United States)*. 2022. V. 265(1). P. 33–42. DOI: 10.1007/s10958-022-06042-0.

6. Bliyeva, D., Baigereyev, D., Imomnazarov, K. Computer simulation of the seismic wave propagation in poroelastic medium // *Symmetry*. 2022. V. 14(8). 1516. DOI: 10.3390/sym14081516.

7. Akinshin, A. A., Ayupova, N. B., Golubyatnikov, V. P., Kirillova, N. E., Podkolodnaya, O. A., Podkolodnyy, N. L. On a numerical model of a circadian oscillator // *Num. Analysis and Appl.* 2022. V. 15, iss. 3. P. 187–196. DOI: 10.1134/S1995423922030016.

8. Имомназаров, Б. Х., Имомназаров, Ш. Х., Маматкулов, М. М., Худайназаров, Б. Б. Фундаментальное решение для стационарного уравнения двухскоростной гидродинамики с равновесием фаз по давлению в диссипативном приближении // *СибЖИМ*. 2022. Т. 25, № 3. С. 33–40. DOI: 10.33048/SIBJIM.2022.25.304.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Галактионова, А. А., Решетова, Г. В. Реконструкция рассеивающих объектов путем зеркального обращения времени // Геофиз. 2022. № 3. С. 76–81.
2. Урев, М. В., Имомназаров, Х. Х., Искандаров, И. К. Двумерная краевая задача для одной переопределенной системы // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 138–143. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-138-143.
3. Имомназаров, Х. Х., Хужаев, Л. Х., Янгибоев, З. Ш. Об одной обратной динамической задаче пороупругости для слоистой среды // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 93–101. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-93-101.
4. Хайретдинов, М. С., Михайлов, А. А. Численное моделирование распространения упругих волн в смежных средах БРЗ // Тезисы докладов Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 71–72. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-93.
5. Аксёнов, В. В. Обзор обоснований к введению термина геофизическая электродинамика // Изв. Вузов. Геология и разведка. 2022. № 2. С. 24–30. DOI: 0.32454/0016-7762-2022-64-2-24-30.
6. Аксёнов, В. В. О трех электродинамиках // Сб. научных статей Межвуз. междунар. конгр. "Высшая школа: Научные исследования". Ч. 2. М.: Инфинити, 2022. С. 96–109. DOI: 10.34660/INF.2022.97.15.198.
7. Aksenov, V. V. Electrodynamics of toroidal and poloidal electromagnetic fields and Maxwell's electrodynamics // Proc. of the intern. University Sci. Forum "Practice Oriented Science: UAE-Russia – India", July 9, 2022. Part. 1. P. 199–227. DOI: 10.34660/INF.2022.28.37.028.
8. Аксёнов, В. В. Результаты геофизической электродинамика и электродинамика геомагнетизма // Сб. научных статей Межвуз. междунар. конгр. "Высшая школа: Научные исследования". Ч. 2. М.: Инфинити, 2022. С. 112–123. DOI: 10.34660/INF.2022.60.30.291.
9. Михеева, А. В., Калинин, И. И. О влиянии глубинной сейсмичности на подготовку крупных землетрясений южно-азиатского региона // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 124–131. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-124-131.
10. Галактионова, А. А., Решетова, Г. В. Метод зеркального обращения времени в применении к задаче реконструкции рассеивающих объектов // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 66–67. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-81.
14. Галактионова, А. А. Применение метода зеркального обращения времени для реконструкции рассеивающих объектов // Сб. материалов 23-й Уральской молодежной научной школы по геофизике, Екатеринбург, 21–25 марта 2022 г. С. 38–42.
15. Суродина, И. В., Балков, Е. В. Численное моделирование показаний зондов для малоглубинной электроразведки // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 70–71. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-90.
16. Нестерова, Г. В., Суродина, И. В., Черняк, Н. М. Синтетические диаграммы электрического и электромагнитного каротажа при интерпретации данных в системе АТЛАС МФМ электроразведки // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 68. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-85.
17. Podkolodny, N. L., Tverdokhleba, N. N., Podkolodnaya, O. A. Modeling age-related alterations in the mouse liver circadian clock caused by an imbalance in the NAD + consumption system // Тез.

Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 129. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-02-26.

18. Podkolodnyy, N. L., Tverdokhleby, N. N., Podkolodnaya, O. A. Age-related alterations in the mouse liver circadian clock are caused by an imbalance of the NAD⁺ consumption system // Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology (BGRS/SB-2022), Novosibirsk, Jul. 4–8, 2022. P. 230. DOI: 10.18699/SBB-2022-127.

19. Golubyatnikov, V., Akinshin, A., Ayupova, N., Kirillova, N., Podkolodnyy, N., Podkolodnaya, O. A. Mathematical and numerical modelling of the circadian oscillator // Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology (BGRS/SB-2022). Novosibirsk, Jul. 4–8, 2022. P. 1099. DOI: 10.18699/SBB-2022-657.

20. Мартынов, В. Н., Караваев, Д. А., Сапегина, А. Ф., Собисевич, А. Л., Собисевич, Л. Е., Брагинская, Л. П., Григорюк, А. П. Экспериментальное изучение и моделирование вулканических структур с использованием активных вибросейсмических методов // Вулканол. и сейсмол. 2022. № 4. С. 47–66. DOI: 10.31857/S0203030622040034.

21. Имомназаров, Х. Х., Мукимов, А. Х., Салаев, Д. К. Одномерная обратная задача для системы уравнений типа Хопфа // Материалы междунар. науч.-практ. конф. "Современные проблемы прикладной математики и информационных технологий", Бухара, 11–12 мая 2022 г. С. 209–210.

22. Имомназаров, Б. Х., Имомназаров, Х. Х., Урев, М. В. Некоторые вариационные задачи с седловыми точками возникающие в электродинамике и многоскоростной гидродинамике // Материалы междунар. науч.-практ. конф. "Современные проблемы прикладной математики и информационных технологий", Бухара, 11–12 мая 2022 г. С. 327–328.

23. Имомназаров, Б. Х., Имомназаров, Ш. Х., Маматкулов, М. М., Худайназаров, Б. Б. Фундаментальное решение для одной переопределенной системы типа Стокса // Междунар. науч. конф. "Неклассические уравнения математической физики и их приложения", Ташкент, 6–8 окт. 2022 г. С. 100–101.

24. Имомназаров, Х. Х., Бахромов, Р. Х. Об одной краевой задаче в полупространстве для переопределенной системы типа Стокса // Междунар. науч. конф. "Неклассические уравнения математической физики и их приложения", Ташкент, 6–8 окт. 2022 г. С. 102–103.

25. Имомназаров, Б. Х., Искандаров, И. К., Урев, М. В. Об одной задаче с седловой точкой для стационарного магнитного потенциала и двухскоростной гидродинамики // Междунар. науч. конф. "Неклассические уравнения математической физики и их приложения", Ташкент, 6–8 окт. 2022 г. С. 101–102.

26. Имомназаров, Х. Х. Об одной краевой задаче, возникающей в двухжидкостной среде // Междунар. науч. конф. "Неклассические уравнения математической физики и их приложения", Ташкент, 6–8 окт. 2022 г. С. 22–23.

27. Урев, М. В., Искандаров, И. К., Куйлиев, С. Б. Переопределенная система уравнений Пуассона, возникающая в двухскоростной гидродинамике и электродинамике // Междунар. науч. конф. "Неклассические уравнения математической физики и их приложения", Ташкент, 6–8 окт. 2022 г. С. 185.

Свидетельства о патентах

1. Patent No : WO 2022/114985 A1. Systems and methods to correct seismic data for undesired effects caused by near surface velocity variations by correcting for long-wavelength statics / Galaktionova, A. A., Belonosov, A. S., Rovetto, D., Belonosov, M. A. Publ. date 02.06.2022. URL: patentimages.storage.googleapis.com/01/6a/7d/0db783472f4a0d/US11397271.pdf.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Марчуковские научные чтения – 2022, Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 5 докладов (Подколотный Н. Л., Суродина И. В., Галактионова А. А., Решетова Г. В., Михайлов А. А.).

2. 18-й Международный научный конгресс "Геосибирь-2022", Новосибирск, 18–20 мая 2022 г. – 3 доклада (Урев М. В., Имомназаров Х. Х., Михеева А. В.).

3. 16-я Международная сейсмологическая школа "Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных", Минск, 12–16 сентября 2022 г. – 1 доклад (Михеева А. В.).

4. Межвузовский международный конгресс "Высшая школа: научные исследования", Москва, 28 апреля 2022 г. – 1 доклад (Аксёнов В. В.).

5. International university scientific forum "Practice oriented science: UAE – Russia – India", UAE, July 9, 2022 – 1 доклад (Аксёнов В. В.).

7. The Thirteenth International Multiconference "Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology" (BGRS/SB-2022), Новосибирск, 4–8 июля 2022 г. – 2 доклада, из них 1 приглашенный (Подколотный Н. Л.).

8. 23-я Уральская молодежная научная школа по геофизике, Екатеринбург, 21–25 марта 2022 г. – 1 доклад (Галактионова А. А.).

9. 5-я Международная геолого-геофизическая конференция "ГеоЕвразия-2022. Геологоразведочные технологии – наука и бизнес", Москва, 30 марта – 1 апреля 2022 г. – 1 доклад (Галактионова А. А., Решетова Г. В.).

10. 5-я Международная конференция "Суперкомпьютерные технологии математического моделирования", Москва, 27–30 июня 2022 г. – 1 доклад (Решетова Г. В.).

11. Международная научно-практическая конференция "Современные проблемы прикладной математики и информационных технологий", Бухара, 11–12 мая 2022 г. – 2 доклада (Урев М. В., Имомназаров Х. Х.).

12. Международная научная конференция "Неклассические уравнения математической физики и их приложения", Ташкент, 6–8 октября 2022 г. – 5 докладов (Урев М. В., Имомназаров Ш. Х., Имомназаров Х. Х.).

13. The Uzbekistan-Malaysia international conference "Computational models and technologies", Tashkent, September 16–17, 2022 – 3 доклада (Васильев Г. С., Имомназаров Х. Х., Михайлов А. А.).

Участие в организации конференций

1. Имомназаров Х. Х. – член организационного комитета "Неклассические уравнения математической физики и их приложения", Бухара, 6–8 октября 2022 г.

2. Подколотный Н. Л. – член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.;

3. Суродина И. В. – член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Монографий, глав в монографиях – 2
 Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 9
 Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 17
 Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 44
 Свидетельств о регистрации программ – 1
 Докладов на конференциях – 26, в том числе 1 приглашенный
 Участников оргкомитетов конференций – 3

Кадровый состав

1. Имомназаров Х. Х. зав. лабораторией д.ф.-м.н.
2. Аксёнов В. В. г.н.с. д.ф.-м.н.
3. Белоносков А. С. с.н.с. к.ф.-м.н.
4. Галактионова А. А. м.н.с.
5. Куликов А. И. ведущ. программист
6. Мартынов В. Н. с.н.с.
7. Мастрюков А. Ф. с.н.с. к.ф.-м.н.
8. Меграбов А. Г. в.н.с. д.ф.-м.н.
9. Михайлов А. А. н.с. к.ф.-м.н.
10. Михеева А. В. н.с. к.ф.-м.н.
11. Подколодный Н. Л. с.н.с.
12. Решетова Г. В. г.н.с. д.ф.-м.н.
13. Суродина И. В. с.н.с. к.ф.-м.н.
14. Урев М. В. в.н.с. д.ф.-м.н.
15. Шерстюгина Л. П. техник 1-й катег.

Галактионова А. А. – молодой научный сотрудник.

Педагогическая деятельность

- Аксёнов В. В. – профессор СибУПК
 Белоносков А. С. – доцент ММФ НГУ
 Меграбов А. Г. – профессор НГТУ
 Михеева А. В. – ст. преподаватель НВВКУ
 Подколодный Н. Л. – ст. преподаватель ФИТ НГУ
 Урев М. В. – доцент НГУ, профессор СибАГС

Руководство студентами

- Аманбаев Х. С. – магистрант, 1-й год, НГТУ, руководитель Имомназаров Х. Х.
 Палвонов Ш. Г. – магистрант, 1-й год, НГТУ, руководитель Имомназаров Х. Х.
 Романов Д. Н. – бакалавр НГУ, руководитель Урев М. В.
 Ставничий Г. Е. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Подколодный Н. Л.
 Филонов С. В. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Подколодный Н. Л.

ЛАБОРАТОРИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Шишленин М. А.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 г.
в соответствии с планом НИР института**

Предложен метод горизонтальной диагонализации и подгонки (МГДП) для решения некорректной задачи Коши для трехмерного уравнения Пуассона с данными, заданными на части границы (задача продолжения). МГДП заключается в дискретизации по горизонтальным переменным и преобразовании системы дифференциальных уравнений в диагональную форму. Это позволяет разделить исходную трехмерную задачу продолжения на некоторое количество одномерных задач по вертикальной переменной. Уменьшение количества одномерных задач может быть осуществлено с учетом уровня шума, так что оно является параметром регуляризации. Численные расчеты показали, что МГДП применим к крупномасштабным задачам и для числа разбиений по горизонтальным переменным менее 2500 значительно эффективнее, чем метод простой итерации.

Разработаны вычислительные модели на основе законов сохранения в применении к задачам зондирования с данными на части границы. Задача продолжения формулируется для гиперболической системы уравнений акустики, где на части границы области задается дополнительное условие на акустическое давление и необходимо найти распределение давления, скоростей распространения волны по переменным во всей области. Задача продолжения сводится к задаче оптимизации целевого функционала.

Одним из основных результатов работы является обоснование того, что сочетание агентного и дифференциального моделирования позволяет значительно улучшить качество сценариев развития эпидемий. Основная проблема, возникающая при моделировании инфекционных заболеваний, заключается в том, что вирус SARS-CoV-2 является новым и относительно малоизученным. Степень влияния социально-экономических характеристик на распространение туберкулеза также требует дополнительного изучения. Многие параметры перечисленных моделей являются неизвестными (по крайней мере на начальном этапе эпидемии), а зачастую изменяются с появлением новых штаммов. Возникает необходимость решать обратные задачи, разрабатывать алгоритмы регуляризации обратных задач для математических моделей эпидемиологии. Обратные задачи заключаются в идентификации неизвестных параметров моделей по дополнительной информации о развитии эпидемии (данные о смертности, количестве заболевших, привитых и др.).

Проведен анализ идентифицируемости и чувствительности используемых моделей, а также построены алгоритмы регуляризации решения обратных задач с использованием неполных и неточных данных, недостаток которых компенсируется использованием априорной информации об искомом решении. На основе анализа чувствительности обратных задач удалось выявить параметры дифференциальных и агентных моделей. Такой подход при решении некорректных задач использовали А. Н. Тихонов, С. К. Годунов, В. В. Васин, А. Г. Ягола и др. В работах О. И. Криворотко приведен и обоснован комплексный анализ дифференциальных моделей, основанных на совмещении классических подходов линейной алгебры (анализ сингулярных чисел линеаризованных операторов обратных задач, свойств матриц чувствительности), дифференциальной алгебры, а также современных байесовских алгоритмов и методов машинного обучения (модели

линейной регрессии, нейронные сети). Еще один важный результат работы состоит в построении и обосновании комбинированных алгоритмов численного решения обратных задач для математических моделей эпидемиологии в свете неполных и неточных данных, основанных на применении глобальных и локальных оптимизационных подходов. На основе разработанной комбинированной математической модели распространения COVID-19 получены качественные сценарии распространения эпидемии новой коронавирусной инфекции в нескольких регионах страны, а также в некоторых других странах. На этой основе были скорректированы сценарии распространения коинфекции туберкулеза и ВИЧ в особо неблагоприятных регионах Российской Федерации по заболеваемости и смертности от туберкулеза.

Так как текущая эпидемия COVID-19 загрузила системы здравоохранения стран и регионов, важным является определение ключевых социально-экономических характеристик, влияющих на развитие других инфекционных заболеваний на примере эпидемии коинфекции туберкулеза и ВИЧ. На синтетических данных показано, что использование ограничений на параметры и априорной информации о решении (в виде функционала А. Н. Тихонова) значительно повышает устойчивость полученного решения задачи об источнике.

Также необходимо отметить совместную работу с учеными из Великобритании (D. Lesnic, Университет Лидса), США (С. Kerr, Институт моделирования заболеваний (Сизтл)), Казахстана (М. А. Бектемесов, Казахский национальный педагогический университет им. Абая; К. Т. Исаков, Евразийский национальный университет), Китая (S. Zhang, Тяньцзинский университет финансов и экономики; J. Cheng, Шанхайский университет финансов и экономики) и многими российскими научными группами и университетами.

Численно исследована обратная задача для модели SEIR-HCD распространения COVID-19 в Новосибирской обл., описываемая системой из семи нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Обратная задача заключается в выявлении коэффициентов системы ОДУ (коэффициента заражения, доли инфицированных, госпитализированных и летальных случаев) и некоторых исходных данных (исходное количество бессимптомных и симптомных инфицированных) по дополнительным данным о ежедневных выявленных, критических и летальных случаях COVID-19. Ввиду некорректности обратной задачи применена регуляризация на основе использования дополнительной информации о поздних антителах IgG к COVID-19 и подробной статистики смертности. Обратная задача сводится к задаче минимизации функции невязки. Был применен подход на основе усвоения данных, основанный на сочетании глобального (ПО OPTUNA) и градиентного методов решения задачи минимизации. Численные результаты показывают, что добавление новой информации улучшило базовый сценарий прогнозирования (рис. 1). Абсолютная точность прогнозирования увеличена в 2 раза.

Проведен сравнительный анализ численного решения задачи определения источника диффузионно-логистической модели по данным о диффузионном процессе в фиксированные моменты времени и точках пространства градиентными методами для случаев непрерывной и дискретной постановок. Получены выражения вычисления градиента целевого функционала для двух постановок, связанных с решением соответствующих сопряженных задач. Показано, что в случае аппроксимации дискретных функций модели кубическими сплайнами точность восстановленного источника совпадает с решением в непрерывной постановке. Численные эксперименты решения задачи об источнике для дискретной модели распространения информации в онлайн социальных



Рис. 1: Моделирование (22.05.2020–17.10.2021) и прогнозирование (18.10.2021–25.11.2021) сценариев новых выявленных случаев в Новосибирской обл. для модели SEIR-HCD для случая восстановления параметров путем решения обратной задачи (кривая серого цвета) и решения обратной задачи с дополнительной информацией о доле поздних антител IgG (кривая красного цвета); черные точки – реальные данные о новых выявленных случаях COVID-19 с 22.05.2020 по 17.10.2021 сетях показали, что применение дискретного подхода в разы увеличивает вычислительное время по сравнению с использованием непрерывного подхода.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Petrakova, V., Krivorotko, O. Mean field game for modeling of COVID-19 spread // *J. of Math. Analysis and Appl.* 2022. V. 514, iss. 1. P. 126271–12624. DOI: 10.1016/j.jmaa.2022.126271.
2. Zvonareva, T. A., Krivorotko, O. I. Comparative analysis of gradient methods for source identification in a diffusion-logistic model // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2022. V. 62, iss. 4. P. 674–684. DOI: 10.1134/s0965542522040145.
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 // *Infect. Disease Model.* 2022. V. 7, iss. 1. P. 30–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idm.2021.11.004>.
4. Alsulami, A., Glukhov, A., Shishlenin, M., Petrovskii, S. Dynamical modelling of street protests using the Yellow Vest Movement and Khabarovsk as case studies // *Sci. Rep.* 2022, V. 12, iss. 1. Art. num. 20447. <https://doi.org/10.5064/F6QS68PH>.
5. Shishlenin, M., Savchenko, N., Novikov, N., Klyuchinskiy, D. Modeling of 2D acoustic radiation patterns as a control problem // *Math.* 2022. V. 10, iss. 7. Art. num. 1116. <https://doi.org/10.3390/math10071116>.
6. Argun, R. L., Gorbachev, A. V., Lukyanenko, D. V., Shishlenin, M. A. Features of numerical reconstruction of a boundary condition in an inverse problem for a reaction-diffusion-advection equation with data on the position of a reaction front // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2022. V. 62, iss. 3. P. 441–451. DOI: 10.1134/S0965542522030022.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

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

Свидетельства о регистрации в Роспатенте

1. Свидетельство № 2022664244. Автоматизированная программа для прогнозирования распространения COVID-19 в регионах Российской Федерации на основе усвоения данных в модели SEIR-HCD // Зятков Н. Ю., Криворотько О. И., Неверов А. В.; Федеральная служба по интеллектуальной собственности РФ (Роспатент) – заявка № 2022662856, дата поступления 7 июля 2022 г., зарегистрирована 27 июля 2022 г.

2. Свидетельство № 2022664019. Моделирование распространения COVID-19 на основе модели игры среднего поля // Петракова В. С., Криворотько О. И.; Федеральная служба по интеллектуальной собственности РФ (Роспатент) – заявка № 2022662669, дата поступления 6 июля 2022 г., зарегистрирована 21 июля 2022 г.

Участие в конференциях и совещаниях

1. 53-я Всероссийская молодежная школа-конференция "Современные проблемы математики и ее приложений", Екатеринбург, 31 января – 4 февраля 2022 г. – 1 доклад (Криворотько О. И.).

2. Международная конференция "Динамика в Сибири", Новосибирск, 1–6 марта 2022 г. – 2 доклада (Шишленин М. А., Криворотько О. И.).

3. The 10th International Conference "Inverse Problems: Modeling and Simulation" (IPMS 2022), Mellieha (Malta), May 22–28, 2022.

4. 5-я Международная конференция "Суперкомпьютерные технологии математического моделирования" (СКТеММ'22), Москва, 27–30 июня 2022 г. – 3 доклада (Кабанихин С. И., Криворотько О. И., Шишленин М. А.).

5. 13th International multiconference "Bioinformatics of Genome Regulation and Structure/Systems Biology" (BGRS/SB-2022), Novosibirsk, July 4–8 2022; symposium "Mathematics, bioinformatics and systems computational biology of COVID-19" – 6 докладов, из них 1 пленарный (Кабанихин С. И., Криворотько О. И.).

6. Научная конференция "День Лаврентьева", посвященная 90-летию со дня рождения акад. М. М. Лаврентьева. Новосибирск, 15 августа 2022 г. – 4 доклада (Криворотько О. И., Шишленин М. А., Новиков Н. С., Зятков Н. Ю.).

7. 8th International conference "Quasilinear Equations, Inverse Problems and their Applications", Sirius (Sochi), August 22–26, 2022 г.

8. Конференция "Игры среднего поля, теория управления средним полем и их приложения", Сириус (Сочи), 3–7 октября 2022 г. – 5 докладов (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Зятков Н. Ю., Криворотько О. И.).

9. "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 1 доклад (Шишленин М. А.).

10. Научная школа "Современные методы теории информации и оптимизации", Сириус (Сочи), 21 октября – 3 ноября 2022 г. – 1 доклад (Криворотько О. И.).

11. 2-я Конференция математических центров России, Москва, 7–11 ноября 2022 г. – 3 доклада (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Криворотько О. И.).

12. Международная конференция "Прикладная математика иммунологии и вирусологии", Сириус (Сочи), 14–18 ноября 2022 г. – 1 доклад (Кабанихин С. И., Криворотько О. И.).

13. 14-я Международная молодежная научная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", посвященная 90-летию со дня рождения акад. М. М. Лаврентьева, Новосибирск, 24–27 декабря 2022 г. – 3 доклад (Кабанихин С. И., Криворотько О. И., Шишленин М. А.).

14. Международная конференция "Современные проблемы обратных задач", посвященная 90-летию со дня рождения акад. М. М. Лаврентьева, Новосибирск, 19–23 декабря 2022 г. – 5 докладов (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Зятков Н. Ю., Криворотько О. И., Новиков Н. С.).

15. 6th International Workshop on Computational Inverse Problems and Application, Shenzhen (China), July 22–26, 2022 – 2 приглашенных доклада (Кабанихин С. И., Шишленин М. А.).

16. International conference on differential equations and applications, Dedicated to Professor Dinh Nho Hao on the Occasion of his 60th Birthday, Hanoi (Vietnam), August 17–20, 2022 г. – 2 доклада (Кабанихин С. И., Шишленин М. А.).

17. 2-я Всероссийская конференция "Математика в медицине", Владивосток, 10–15 октября 2022 г. – 2 доклада (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Новиков Н. С.).

18. 1-я Всероссийская школа-семинар Национального центра физики и математики для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов в области математического моделирования на суперЭВМ экса- и зеттафлопсной производительности, Саров, 5–9 декабря 2022 г.

19. Научная конференция "Вычислительная математика и приложения", Сириус (Сочи), 1–5 августа 2022 г. – 3 доклада (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Новиков Н. С.).

20. 20-я Научная школа "Нелинейные волны – 2022", Нижний Новгород, 7–13 ноября 2022 г. – 1 доклад (Кабанихин С. И., Шишленин М. А., Новиков Н. С.).

21. 18-я Международная конференция "Супервычисления и математическое моделирование", Саров, 23–26 мая 2022 г. – 1 доклад (Кабанихин С. И., Шишленин М. А.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Кабанихин С. И.:

– председатель программного комитета 14-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 24–27 декабря 2022 г.;

– председатель организационного комитета 14-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 24–27 декабря 2022 г.;

– председатель программного комитета Международной конференции "Современные проблемы обратных задач", Новосибирск, 19–23 декабря 2022 г.;

– председатель организационного комитета Международной конференции "Современные проблемы обратных задач", Новосибирск, 19–23 декабря 2022 г.;

– заместитель председателя программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

2. Шишленин М. А.:

– заместитель председателя программного комитета 14-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 24–27 декабря 2022 г.;

– заместитель председателя организационного комитета заместитель председателя Программного и организационного комитета 14-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 24–27 декабря 2022 г.;

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.;

– заместитель председателя программного комитета Международной конференции "Современные проблемы обратных задач", Новосибирск, 19–23 декабря 2022 г.;

– заместитель председателя организационного комитета Международной конференции "Современные проблемы обратных задач", Новосибирск, 19–23 декабря 2022 г.

3. Криворотько О. И. – заместитель председателя организационного комитета 14-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 24–27 декабря 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 6

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 7

Свидетельств о регистрации программ в Роспатенте – 2

Докладов на конференциях – 42, в том числе пленарных 16

Участников оргкомитетов конференций – 11

Кадровый состав

1. Шишленин М. А. зав. лабораторией д.ф.-м.н.

2. Кабанихин С. И. г.н.с. д.ф.-м.н.

3. Зятьков 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

Зятьков 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 НГУ

Криворотько О. И. – доцент НГУ

Новиков Н. С. – ст. преподаватель НГУ, СУНЦ НГУ

Руководство студентами

Губер А. В. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.

Руководство аспирантами

- Звонарева Т. А. – 2-й год, НГУ, руководитель к.ф.-м.н. Криворотько О. И.
Приходько А. Ю. – 2-й год, НГУ, руководитель Шишленин М. А.

Защита дипломов

- Звонарева Т. А. – магистр ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И.
Неверов А. В. – магистр ММФ НГУ, руководитель Криворотько О. И.
Безгачев М. В. – магистр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Савченко Н. А. – магистр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Воробьев М. С. – магистр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Сурнин П. С. – магистр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.
Глухов А. И. – магистр ММФ НГУ, руководитель Шишленин М. А.

ЛАБОРАТОРИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Гусяков В. К.

Важнейшие достижения**Построение численной модели Камчатского цунами 4 ноября 1952 г.**

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

Камчатское цунами 4 ноября 1952 г. было вызвано подводным землетрясением магнитудой 9.0, происшедшем на западном склоне Курило-Камчатской глубоководной впадины. На ближайшем побережье о-вов Парамушир и Шумшу высоты заплеска достигали 20–23 м. Волнами цунами был практически уничтожен г. Северо-Курильск. Точное число жертв этой катастрофы по современным оценкам составило от 10 до 14 тыс. человек, и до сих пор это событие остается крупнейшим стихийным бедствием на территории РФ. Землетрясение вызвало трансокеанское цунами, высоты которого на Гавайях достигали 9.1 м и до 2 м на побережье Чили. Построение численных моделей таких экстремальных событий имеет большое значения для правильной оценки уровня цунамиопасности на протяженных участках побережья Мирового океана. Для построения такой модели и ее реализации для всего тихоокеанского бассейна реализован численный метод расчета цунами в рамках нелинейной модели мелкой воды с применением вентильной матрицы, программируемой пользователем (FPGA). Суть подхода заключается в использовании специализированной платы с учетом интенсивности потоков данных при расчете динамики волны по разностной схеме МакКормака. Адаптация алгоритма к FPGA осуществлена в сотрудничестве с ИАЭ СО РАН. Использование такой вычислительной архитектуры позволило достичь ускорения расчетов более чем в 200 раз по сравнению с моделированием на аналогичном компьютере без FPGA платы

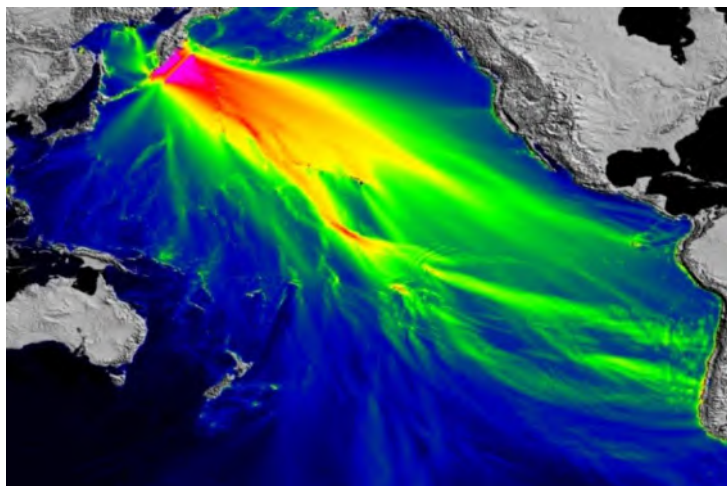


Рис. 1: Расчетная диаграмма максимальных высот Камчатского цунами 4 ноября 1952 г.

Результаты исследований опубликованы в работе

Lavrentiev, M., Lysakov, K., Marchuk, An., Oblaukhov, K., Shadrin, M. Hardware/software solution for low power evaluation of tsunami danger // J. Low Power Electron. and Appl. 2022. 12(1), 6. <https://doi.org/10.3390/jlpea12010006>.

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

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 г.
в соответствии с планом НИР института**

Разработаны принципы оптимального размещения глубоководных регистраторов уровня океана для решения задачи быстрого восстановления начального смещения водной поверхности в очаге цунами по данным этих датчиков. Подход основан на аппроксимации реального очага линейной комбинацией нескольких "базисных" источников, форма вертикального смещения в которых характерна для рассматриваемой цунамигенной зоны. Предварительно численно моделируется распространение цунами от каждого из базисных очагов размером 50 на 100 км, при этом в базе данных сохраняются рассчитанные мареограммы во всех точках предполагаемого расположения регистраторов. Задача восстановления очага заключается в нахождении коэффициентов в линейной комбинации синтетических мареограмм, наилучшим образом аппроксимирующих реальную запись цунами в нескольких регистраторах. В результате исследования оптимального расположения глубоководных регистраторов в акватории около полуострова Канто (Япония) указаны виртуальные датчики (рис. 2а), позволяющие за кратчайшее время восстановить с заданной точностью очаг (рис. 2б), состоящий из четырех "базисных" очагов. При этом ставилась задача получить результат в течение ограниченного времени, меньшего чем время прихода волны к побережью.

В рамках темы, связанной с исследованием процесса распространения волны цунами в океане с заданным рельефом дна, рассматривалось описывающее этот процесс двумерное уравнение эйконала. Установлен следующий факт: если в однородной среде источники расположены на эвольвенте заданной кривой, то возмущения распространяются по лучам, являющимся касательными к этой кривой, а фронты волн – ее эвольвенты. Особый интерес представляет случай, когда исходная кривая (эволюта) является замкнутой гладкой кривой, ограничивающей выпуклую фигуру. В этом случае волновое поле выполняет вращение вокруг этой фигуры (на рис. 3а приведен

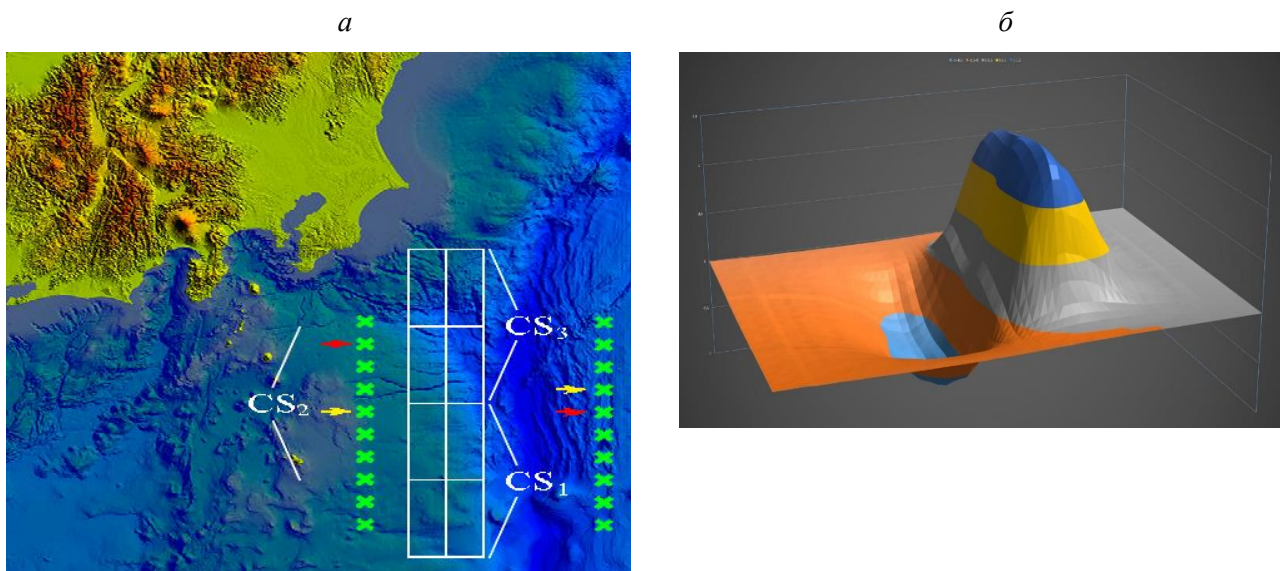


Рис. 2: География и батиметрия расчетной области у побережья центральной Японии (а) (белые прямоугольники – 8 "базисных" источников; зеленые "крестики" – виртуальные глубоководные регистраторы цунами); смещение водной поверхности в восстановленных очагах CS_i ($i = 1, 2, 3$), каждый из которых состоял из суммы 4 "базисных" источников с разными коэффициентами (б)

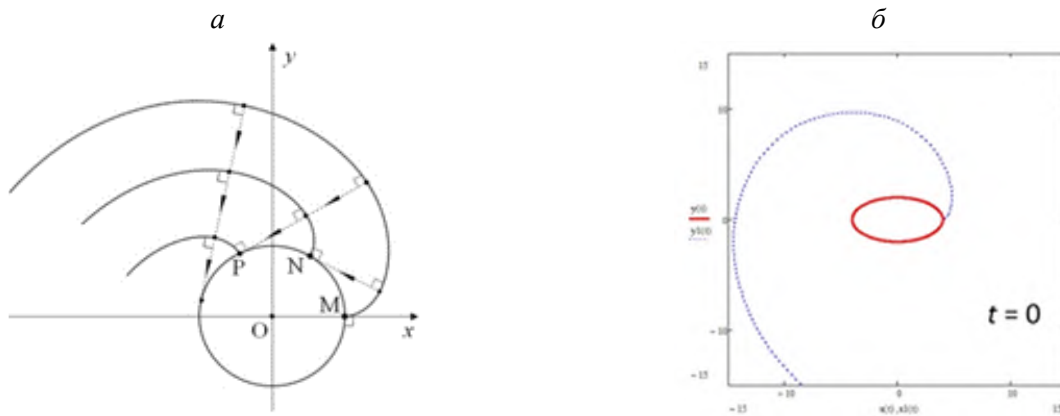


Рис. 3: Фронты волн в виде эвольвент для случаев круглого (а) и эллиптического (б) островов (пример для окружности). На рис. 3б показан тот же случай для фигуры, являющейся эллипсом (начальное положение фронта).

На основе этого результата рассмотрена кинематика волнового фронта вблизи круглого острова, окруженного областью с постоянной глубиной D_0 . Построена кинематическая картина движения фронта волны цунами, генерированной вытянутым источником, имеющим форму сегмента эвольвенты к береговой линии этого острова. Теоретические результаты подтверждены численным расчетом кинематики волнового фронта на основе принципа Гюйгенса. Фокусирующая способность очага такой конфигурации (сегмент эвольвенты) была подтверждена численным моделированием генерации и распространения цунами по модели мелкой воды. В результате выявлена область повышенной амплитуды волны вдоль половины береговой линии круглого острова (рис. 4). Максимальные высоты у побережья становятся выше, если имеется узкая зона перехода глубины от нулевого значения (на береговой линии) до глубины D_0 .

На рис. 4 видно, что повышенная амплитуда цунами наблюдается практически вдоль всей верхней половины береговой линии. При фокусировке волны источником в форме сегмента окружности (рис. 5) повышенная амплитуда наблюдается в окрестности единственной точки у

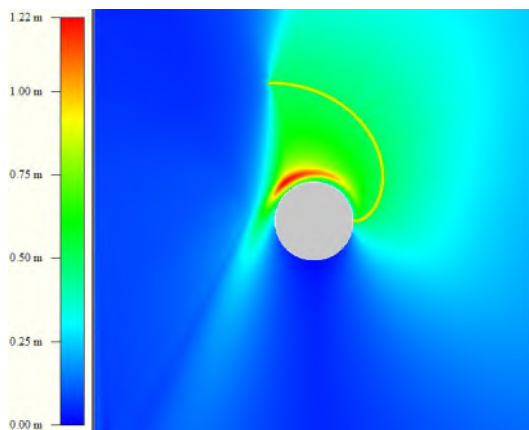


Рис. 4: Пространственное распределение максимумов высоты волны в результате моделирования распространения цунами от вытянутого источника в форме эвольвенты вокруг круглого острова радиусом 90 км с параболическим дном в десятикилометровой окрестности.

Максимальная высота в источнике 1 м

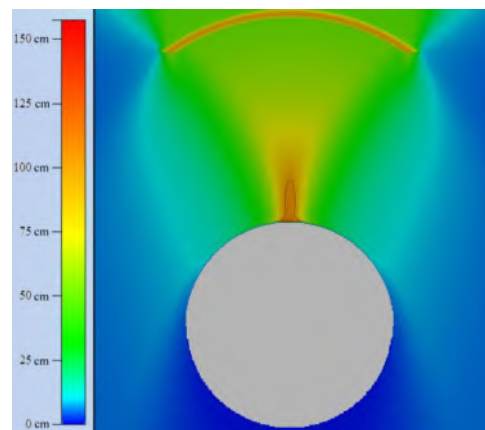


Рис. 5: Максимальные высоты волны в окрестности круглого острова в результате фокусировки цунами, генерированной "ленточным" источником в виде сегмента окружности. Коричневая изолиния у верхнего края острова ограничивает область с максимальными высотами более 100 см

побережья, при этом максимальная высота в этом месте сравнима с высотами цунами вдоль всей верхней половины береговой линии в случае источника в форме эвольвенты.

В рамках выполнения базового задания по решению обратной задачи восстановления источника цунами предложен способ практического использования метода усеченного сингулярного разложения для системы предупреждения о цунами. Применение метода усеченного сингулярного разложения (метод g -решения) для инверсии волн, порожденных цунами вблизи Соломоновых островов 6 февраля 2013 г. и зарегистрированных системой наблюдения, состоящей из буев ДАРТ: 55012, 55023, 52403, 52402, 52406, 51425, позволило выделить наиболее информативную часть этой системы наблюдения путем оценки доли удельной энергии волны в локации каждого буя (рис. 6). Предлагаемый метод, основанный на обращении удаленных записей колебаний поверхности океана, подавляет неустойчивость численного решения, обусловленную некорректностью задачи.

Данные наиболее информативных датчиков позволяют не только более точно восстановить первоначальную форму волны цунами, но и одновременно, без новых расчетов распространения волны от восстановленного источника, получить высоты морской поверхности в пунктах, где не было наблюдения ("фиктивные" станции), которые использовались в предварительных расчетах матрицы системы. Оценивая доли удельной энергии, порожденные каждой пространственной модой, можно быстро и уверенно определить один из основных параметров инверсии – число g , что оказалось гораздо эффективнее, чем анализ сингулярного спектра (рис. 7).

В итоге осуществление предлагаемого подхода представляется следующим образом:

1) цунамигенная зона покрывается набором областей поиска, для каждой из которых заранее насчитывается матрица, состоящая из откликов на пространственные гармоники (используемые в качестве источников) в серии датчиков, включающих как реально существующие станции, так и "фиктивные" (где хотелось бы быстро получить высоты волны);

2) для каждой области поиска можно заранее определить набор наиболее информативных буев. Локации датчиков, оказавшихся наиболее информативными для нескольких зон поиска, нужно считать наиболее перспективными для создания эффективной системы наблюдения;

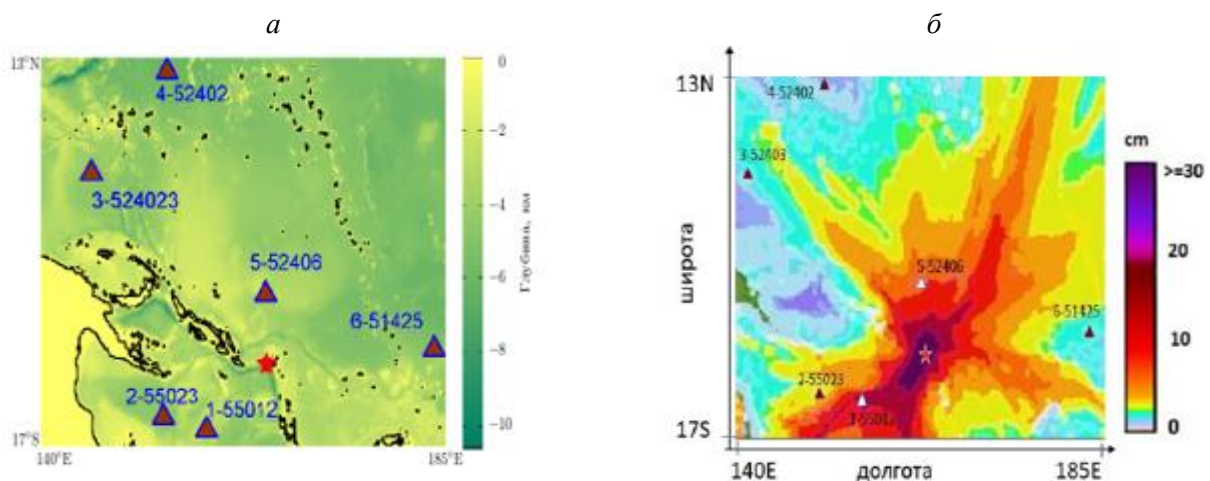


Рис. 6: Глубины в области моделирования цунами 06.02.2013 на Соломоновых островах (коричневые треугольники – буи ДАРТ 1-55012, 2-55023, 3-52403, 4-52402, 5-52406, 6-51425; красная звездочка – эпицентр землетрясения; черная линия соответствует нулевой глубине) (а); максимальные амплитуды волны цунами (см за 24 часа распространения волны) (б)

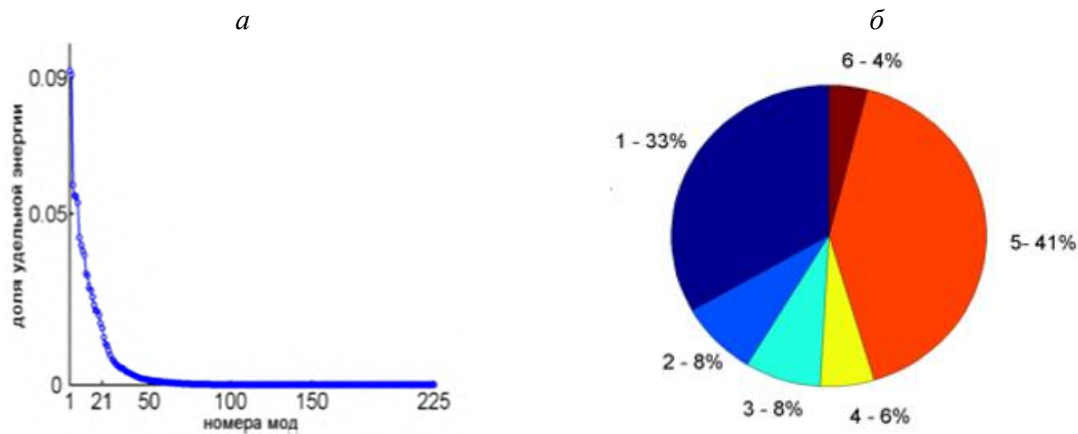


Рис. 7: Распределение удельной энергии по модам и по датчикам ДАРТ для цунами 06.02.2013 вблизи Соломоновых островов: доли удельной энергии, создаваемые каждой модой (а); доли удельной энергии волны исследуемого цунами в каждом из шести датчиков (б)

3) результатом инверсии для таких данных будет не только начальная форма волны цунами, но и возможность быстро вычислить колебания водной поверхности в точках расположения "фиктивных" станций, так как решение прямой задачи для них уже проведено при расчете упомянутой выше матрицы.

Для задачи оценки цунамиопасности побережья Карагинского залива (Камчатский кр.) проведен анализ исторических цунамигенных землетрясений Алеутско-Аляскинской зоны, в частности, выполнена делинеация очагов сильнейших цунами, происшедших в этой зоне за инструментальный период 1903–2022 гг. (рис. 8). Делинеация проводилась на основе сейсмоструктурных и тектонических особенностей региона, данных о сейсмичности и вдольбереговых распределений высот цунами. Установлено, что в очагах шести сильнейших землетрясений (магнитуда $M_w > 8.3$), происшедших в этом районе с 1906 по 2022 гг., произошло вспарывание фактически всей протяженности поверхностной зоны контакта между Тихоокеанской и Североамериканской плитами, за исключением самого западного участка в районе о-ва Беринга. Таким образом, подтверждено существование крупной сейсмической брешы в западном сегменте Алеутской дуги, на котором за весь период инструментальных наблюдений не было зарегистрировано крупных землетрясений. На существование этой брешы было впервые указано еще в конце 1970-х гг. Таким образом, на данный момент этот район может рассматриваться как наиболее опасный с точки

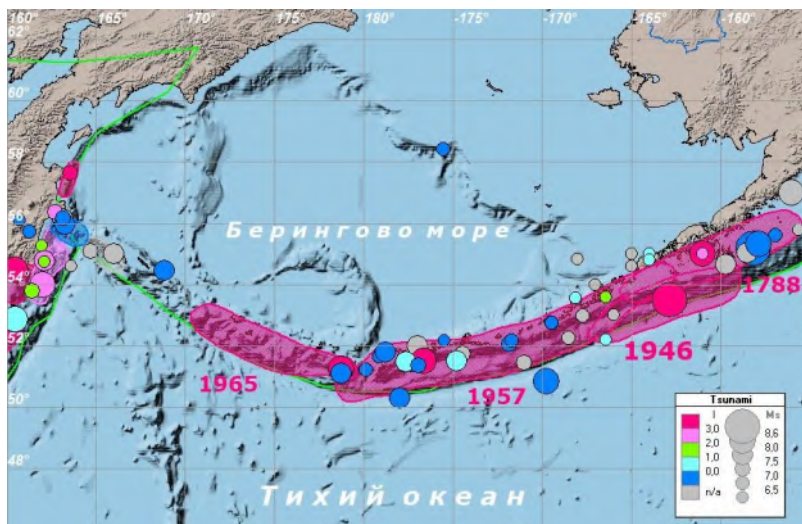


Рис. 8: Карта цунамигенных очагов, происшедших в Алеутско-Аляскинской дуге за инструментальный период наблюдений (1903–2022 гг.) (площадные фигуры с красной заливкой – очаги мега-землетрясений 1946, 1957, 1964, 1965 гг.; кружки с размером, пропорциональным магнитуде землетрясения – эпицентры других цунамигенных очагов, цвет соответствует интенсивности цунами по шкале Соловьева – Иمامуры)

зрения возникновения сильнейшего (с магнитудой до 9.0) землетрясения, цунами от которого может создать угрозу для побережья Камчатки и северных Курильских островов.

В рамках выполнения базового задания по созданию новых методов моделирования цунами продолжалась работа по созданию и программной реализации нового метода расчета распространения волн цунами на произвольных треугольных сетках. Для решения задачи был использован разрывный метод Галёркина с тейлоровскими базисными функциями до второго порядка включительно. Вопрос о возникновении разрыва на границах сеточных элементов выражается через постановку и решение задачи Римана на границе между ячейками, для временной аппроксимации ради простоты использовалась неявная схема Кранка – Николсона второго порядка точности.

Программная реализация метода выполнена на языке C++ путем создания шести модулей, выполняющих следующие подзадачи: 1) обеспечение взаимодействия с сеточными генераторами, такими как Netgen и Cubdat; 2) определение треугольного сеточного элемента и сопутствующих ему структур (вершина, ребро); 3) вычисление комбинации базисных функций, необходимых для построения матричных операторов; 4) построение матричных операторов; 5) решение задачи Римана; 6) решение СЛАУ.

В данный момент проводится тестирование программной реализации на задаче "lake at rest" ("спокойное озеро"), которая характеризуется нулевыми скоростями в начальный момент времени и отсутствием возмущений на свободной поверхности (сумма функций дна и глубины постоянна). Такая картина должна сохраняться с течением времени. Для "спокойного озера" берутся периодические граничные условия.

Параметры тестовой задачи в начальный момент времени: расчетная область 100×100 м, глубина 1 м во всей области, скорости нулевые, дно ровное, постоянное, расчетное время 5 с, шаг по времени 1 с. Расчетная область представлена в виде треугольной сетки из 128 элементов. Возмущение в расчетную область поступает через одну из внешних границ. Результат расчета показан на рис. 9. Выполненный тест показывает, что центр области, где не было возмущения, остался спокойным, т. е. результат работы программы соответствует ожиданиям.

В рамках направления по созданию и поддержке средств информационного обеспечения исследований природных катастроф продолжалась работа по развитию приложения (графической

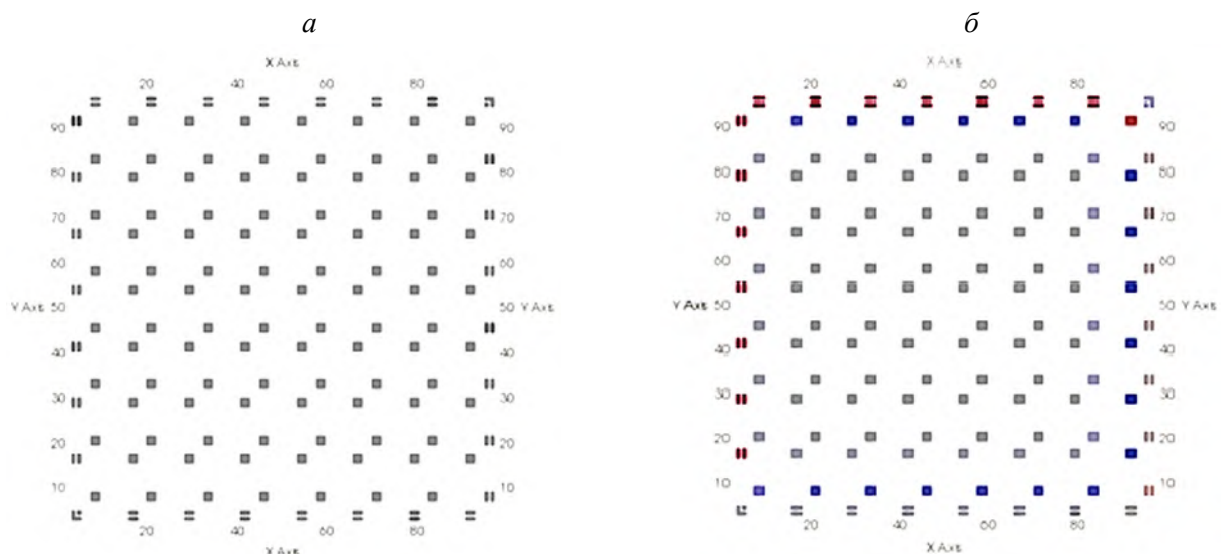


Рис. 9: Распределение глубины воды в барицентрах ячеек в моменты времени $t = 0$ с (а) и $t = 5$ с (б)



Рис. 10: Главное окно приложения PDM/IMP с обзорной картой импактных структур Земли. Показано положение 1163 кратеров. Раскраска событий по параметру Age (возраст кратера) в соответствии с легендой; серым цветом показаны кратеры, возраст которых неизвестен; крестиками обозначены события с пустым полем диаметра кратера

оболочки) PDM/TSU для работы с базой данных по цунами и приложения PDM/IMP, предназначенного для поддержки базы данных по импактным структурам Земли, а также поддержка лабораторного веб-сайта и веб-версии баз данных по природным катастрофам (<http://tsun.sccc.ru/nh>). В частности, в 2022 г. переписан программный код лабораторного вебсайта (<http://tsun.sccc.ru/>) на основе современных технологий HTML 5, CSS 3, PHP 5.6, Javascript с использованием элементов адаптивной верстки и возможностью простого и быстрого редактирования содержимого.

В состав приложения PDM/IMP, предназначенного для поддержки базы данных по импактным структурам Земли и их визуализации (среда разработки Visual studio, C#), добавлена возможность отрисовки оттененного 3D рельефа суши и морского дна (рис. 10). Проведена работа по оптимизации кода и его тестирование, перестроена иерархия классов для панелей Settings, написаны классы событий для панелей установки параметров и обработчики для этих событий. Для сохранения программных данных освоена и применена технология XML-языка описания данных и работы с ними.

Продолжалась работа над дальнейшим пополнением и верификацией экспертной базы данных по импактным структурам Земли EDEIS (Expert Database on the Earth Impact Structures) (<https://tsun.sccc.ru/nh/impact.php>). По состоянию на декабрь 2022 г. она содержит данные о 1221 структурах (27 падений крупных метеоритов и метеоритных полей, 216 достоверных, 198 предполагаемых, 522 возможных, 124 сомнительных, 134 опровергнутых), 4265 фотографий, 1050 текстовых описаний, 1919 ссылок. За 2022 г. в базу добавлены данные о 14 новых структурах, 72 фотографии структур, 46 текстовых описаний, 40 библиографических ссылок. Общий объем базы данных – 675 МБ.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Lavrentiev, M., Lysakov, K., Marchuk, An., Oblaukhov, K., Shadrin, M. Hardware/software solution for low power evaluation of tsunami danger // J. Low Power Electron. and Appl. 2022. V. 12(1), iss. 6. <https://doi.org/10.3390/jlpea12010006>.

2. Sassa, S., Grilli, S. T., Tappin, D. R., Sassa, K., Karnawati, D., Gusiakov, V. K., Løvholt, F. Understanding and reducing the disaster risk of landslide induced tsunamis: Outcome of the panel discussion and the World Tsunami Awareness Day Special Event of the Fifth World Landslide Forum // Progress in Landslide Research and Technology. 2022. V. 1, iss. 1. Book Ser. of the Intern. Consort. on Landslides. Springer Nature Switzerland AG. P. 533–535. DOI 10.1007/978-94-007-2162-3_36.

3. Lavrentiev, M., Lysakov, K., Marchuk, An., Oblaukhov, K., Shadrin, M. Algorithmic design of an FPGA-based calculator for fast evaluation of tsunami wave danger // Algorithms. 2021. V. 14, iss. 343. <https://doi.org/10.3390/a14120343>. (Не вошла в отчет за 2021 г.).

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Lavrentiev, M., Marchuk, An., Lysakov, K., Oblaukhov, K., Kuzakov, D., Shadrin, M. Algorithm for fast evaluation of tsunami danger for near field event // Proc. of the 2022 Intern. conf. on Ocean Studies (ICOS), Vladivostok, Oct. 5–8, 2022. P. 33–137. DOI: 10.1109/ICOS55803.2022.10033412. ISBN 978-1-6654-7371-2.

2. Kuzakov, D., Lavrentiev, M., Marchuk, An. Toward the optimization of measurement system for tsunami warning // IEEE Conference Series. OCEANS 2021. San Diego – Porto, 2021. P. 1–4. DOI: 10.23919/OCEANS44145.2021. (Не вошла в отчет за 2021 г.).

3. Lavrentiev, M., Shadrin, M., Marchuk, An., Oblaukhov, K. The wavelength influence on tsunami height in Seto Inland Sea // IEEE Conference Series. OCEANS 2021. San Diego – Porto, 2021. P. 1–5. DOI: 10.23919/OCEANS44145.2021.9705819. (Не вошла в отчет за 2021 г.).

Издания, включенные в реферативную базу данных РИНЦ

1. Марчук, Ан. Г. Метод расчета кинематики волнового фронта цунами в сеточной области // Вестн. НГУ. Сер.: Информ. технол. 2022. Т. 20, № 1. С. 57–66. DOI: 10.25205/1818-7900-2022-20-1-57-66.

2. Воронина, Т. А., Воронин, В. В. Выбор наиболее информативной части системы мониторинга цунами на основе метода R-решения // Выч. мет. и програм. 2022. № 23. С. 230–239. DOI: 10.26089/NumMet.v23r314.

3. Сергеев, В. А. Шкалы и их фреймы в геокатастрофике // Нанотехнол.: наука и произв-во. 2022. № 3. С. 59–64.

4. Сергеев В. А. Шкалы измерения и их многозначность // Нанотехнол.: наука и произв-во. 2022. № 3. С. 65–69.

5. Marchuk An. G. A numerical method for computing tsunami travel times to the rectangular grid nodes // Bull. NCC. Ser. Math. Model. in Geoph. 2021, iss. 23. P. 25–32.

6. Горшунов, В. С., Гусяков, В. К., Ильин, В. П., Петухов, А. В., Роменский, Е. И. О моделировании цунами с помощью разрывных методов Галёркина на неструктурированной сетке // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 28. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-12.

7. Voronina, T. A. Selection of the most informative set of monitoring stations for the tsunami wave-forms inversions: the case study of the Solomon Islands Tsunami on February 6, 2013 // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 66. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-80.

8. Марчук, Ан. Г., Москаленский, Е. Д. Фокусирование волновой энергии вдоль побережья круглого острова // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 83. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-13.

9. Лаврентьев, М. М., Марчук, Ан. Г., Облаухов, К. К. Экономичные численные расчеты распространения цунами с применением FPGA // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 94. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-28.

Участие в конференциях и совещаниях

1. The 12th South China Sea Tsunami Workshop, virtual meeting, January 13–14, 2022 – 3 доклада (Гусяков В. К., Марчук Ан. Г., Воронина Т. А.).
2. Conference on Mathematics of Wave Phenomena, Karlsruhe (Germany), February 14–18, 2022 – 1 доклад (Марчук Ан. Г.).
3. 24-я Международная научная конференция (школа) по морской геологии, Москва, 11–14 апреля 2022 г. – 1 пленарный доклад (Гусяков В. К.).
4. Всероссийская научная конференция "Современные проблемы наук о Земле", Москва, 11–15 апреля 2022 г. – 1 доклад (Гусяков В. К.).
5. Международная конференция "Марчуковские научные чтения 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 4–8 октября 2022 г. – 4 доклада (Гусяков В. К., Марчук Ан. Г., Москаленский Е. Д., Воронина Т. А.).
6. 2022 International Conference on Ocean Studies (ICOS), Vladivostok, 5–8 October, 2022 – 1 доклад (Марчук Ан. Г.).
7. 4-я Всероссийская научная конференция с международным участием "Волны цунами: моделирование, мониторинг, прогноз", Москва, 15–16 ноября 2022 г. – 3 доклада, из них 1 пленарный (Гусяков В. К., Воронина Т. А.).
8. 20-я Международная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли", Москва, 14–18 ноября 2021 г. – 1 доклад (Гусяков В. К.).

Участие в организации научных мероприятий

Гусяков В. К. – член программного комитета 4-й Всероссийской научной конференции с международным участием "Волны цунами: моделирование, мониторинг, прогноз", Москва, 15–16 ноября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 3
 Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 5
 Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 15
 Докладов на конференциях – 15, в том числе 2 пленарных
 Участников оргкомитетов конференций – 1

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. | |
| 8. Лысковская Е. В. | инженер 1-й катег. | |
| 9. Калашникова Т. В. | ведущ. инженер | |
| 10. Ляпидевская З. А. | ведущ. программист | |
| 11. Зиновьев П. С. | инженер 1-й катег. | |

ЛАБОРАТОРИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ИНФОРМАТИКИ

Зав. лабораторией д.т.н. Ковалевский В. В.

Важнейшие достижения**Цифровая платформа для комплексного геофизического мониторинга Байкальской природной территории.**

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

Разработана цифровая инфраструктура – электронная онлайн-платформа, позволяющая осуществлять в реальном времени сбор, анализ и визуализацию на единой временной сетке долговременных рядов данных, полученных в ходе комплексного геофизического мониторинга (магнитотеллурического, сейсмологического, деформометрического, гидрогеологического, эманационного и температурного) в период с 2019 по 2022 гг. на научных стационарах ИЗК СО РАН и ИСЗФ СО РАН, расположенных на территории Прибайкалья. Интеграция и анализ данных на единой временной сетке позволяет выявлять аномалии и тренды во временных рядах, которые могут интерпретироваться как предвестники землетрясений. Структурная схема цифровой платформы (ЦП) приведена на рис. 1. Коллектор данных периодически подгружает в локальное хранилище данные, поступающие с приборов, размещенных на пунктах мониторинга. Пользователи на рабочих станциях через веб-браузер формируют запросы к ЦП и получают результаты, выбирая интересующий их интервал времени, пункты и виды мониторинга, виды анализа. Кроме традиционных методов анализа, таких как спектральный и корреляционный, применяются методы нелинейной динамики, в частности оценка фрактальных и энтропийных параметров.

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

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

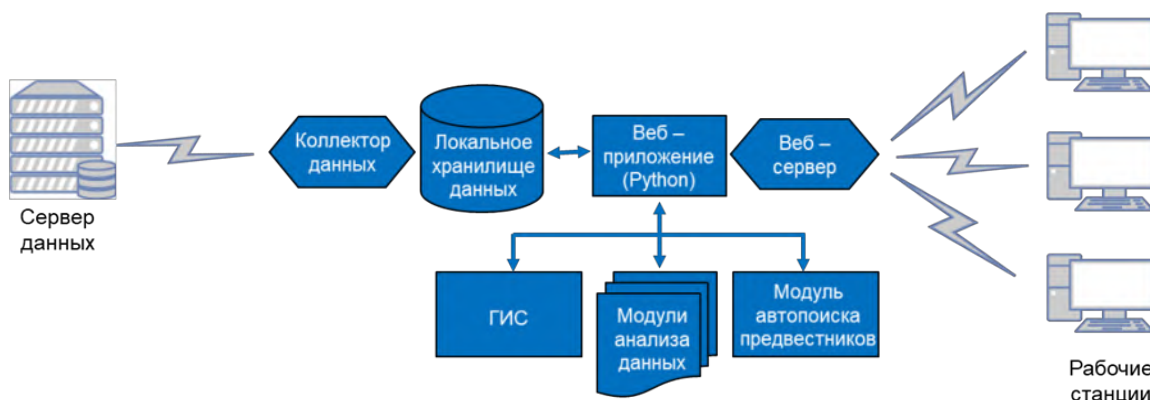


Рис. 1: Цифровая платформа для комплексного геофизического мониторинга

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Григорюк, А. П., Брагинская, Л. П., Ковалевский, В. В., Семинский, И. К. Цифровая платформа для комплексного геофизического мониторинга Байкальской природной территории // Материалы 1-й Всерос. науч. конф. "Добрецовские чтения: наука из первых рук", Новосибирск, 1–5 авг. 2022 г. С. 31–34.

2. Григорюк, А. П., Брагинская, Л. П., Семинский, И. К., Семинский, К. Ж., Ковалевский В. В. Цифровая платформа для интеграции и анализа данных геофизического мониторинга Байкальской природной территории // Электронные библиотеки. 2022. Т. 25, № 5. С. 303–316. DOI: <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2022-25-4-303-316>.

Результаты исследований представлены в докладах на конференциях:

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

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 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 НИР 0251-2022-0004.

Руководитель – д.т.н. Ковалевский В. В.

Этап 2022 г.

Построено аналитическое решение сейсмических волновых полей для радиально-симметричного трехслойного шара планетарных размеров. Исследованы и с помощью новой асимптотики раскрыты вычислительные особенности разных типов, возникающие в аналитическом решении. Исследована погрешность при переходе на асимптотику в аналитическом решении. Доказано, что она по степенному закону стремится к нулю при увеличении индексов бесселевых функций. Это позволило создать метод устойчивого вычисления полученного аналитического решения для шара планетарных размеров. Созданная на этой основе программа дает возможность проводить исследования волновых полей с высокой детальностью. Проведены расчеты для усредненной модели Земли, включающей мантию, жидкое и твердое ядра. Показано, что раньше РКР-волны никакие волны не приходят, т. е. "предвестники" в данном случае не возникают.

Для учета слабых изменений скоростных свойств в модели реализована возможность "плавного" изменения в процентном соотношении к исходным данным (используется сплайн-функция принадлежности). Изменение значений скоростей волн проводится последовательно путем задания нескольких круговых подобластей при совпадении центров их расположения (рис. 3). Можно учитывать аномальные зоны в структуре модели и исследовать чувствительность методов вибросейсмического мониторинга к изменениям значений параметров. 2D моделирование сейсмического поля проводится на основе численной схемы повышенного порядка точности по пространству в комбинации

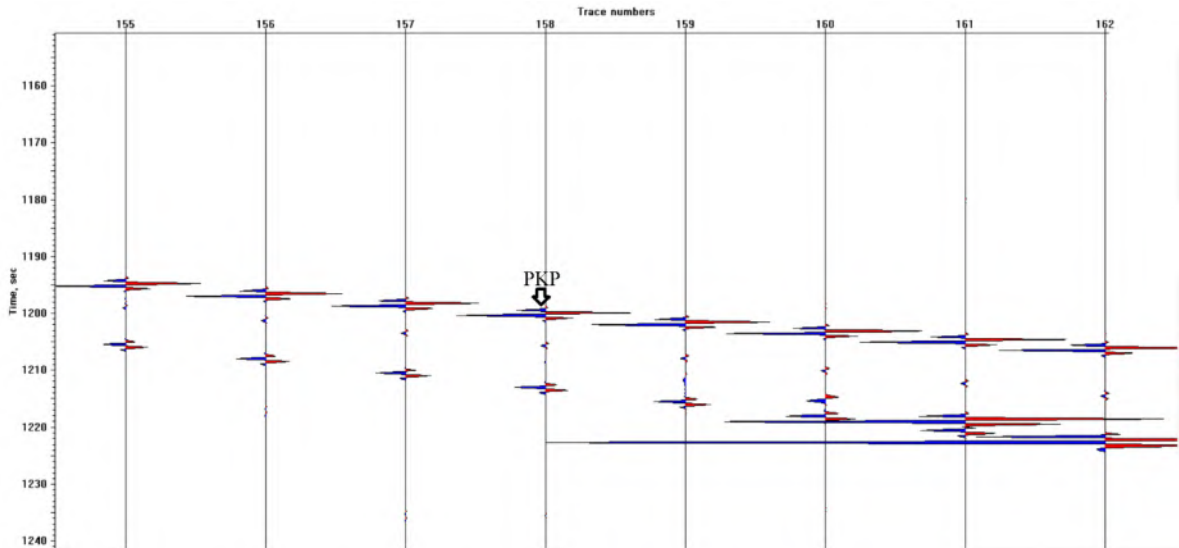


Рис. 2: Фрагмент расчета u_r компоненты сейсмического волнового поля для усредненной модели Земли, включающей мантию, жидкое и твердое ядра; волна РКР выделена стрелкой; по горизонтали – расстояние (град.); по вертикали – время (сек, возрастает вниз)

с неотражающими границами и программной реализации для суперЭВМ ССКЦ СО РАН. В ходе выполнения работ построены реалистичные 2D модели Байкальской рифтовой зоны с учетом внесения слабого изменения значений параметров модели в круговой окрестности внутри рассматриваемой области (рис. 4). Проведено математическое моделирование сейсмического поля для 2D моделей при использовании разработанных программ и вычислительных ресурсов ЦКП ССКЦ СО РАН. Получены результаты в виде сеточных моделей и теоретических сейсмограмм, для которых возможна постобработка и сравнение для выявления отличительных особенностей в геолого-геофизическом строении и корректировки значений скоростных параметров (рис. 2).

Рис. 3: Модель с неоднородным слабым изменением значений скоростных свойств +15 % с "плавным" повышением для нескольких подобластей ($R = 10$ км, изменение +10 %; $R = 5$ км, изменение +5 %)

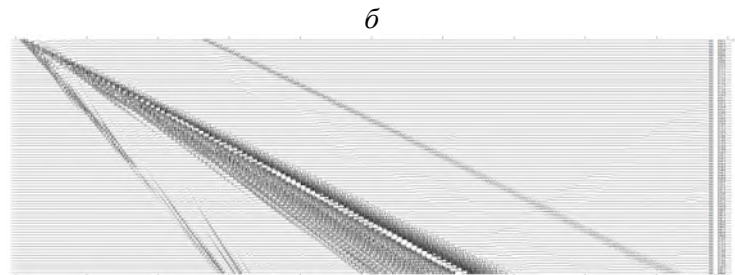
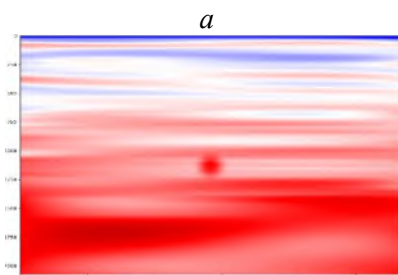
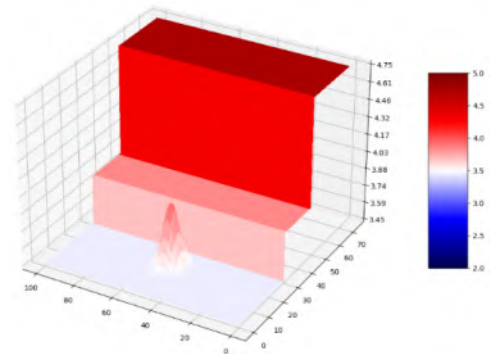


Рис. 4: Характерная модель участка Байкальской рифтовой зоны со слабым изменением скоростных параметров внутри области (а); синтетическая сейсмограмма для вертикальной компоненты по результатам моделирования (б)

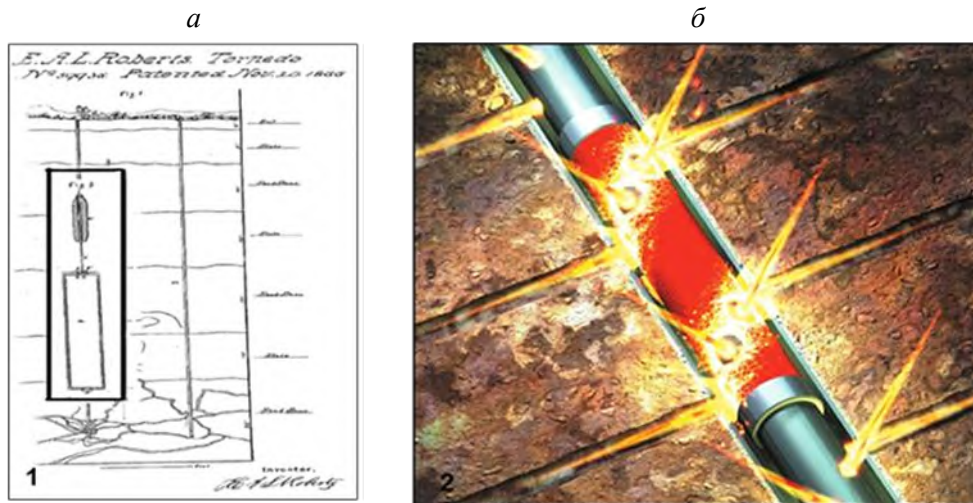


Рис. 5: Первая торпеда (а) и современный генератор давления (б) (рисунки из открытых интернет-источников)

Рассмотрены основные этапы развития метода гидроразрыва пласта (ГРП) и роль геофизических методов исследования в скважинах (ГИС) в эволюции парадигмы ГРП. Показано их взаимное влияние и совершенствование метода ГРП на основе привлечения данных ГИС, и наоборот, совершенствование геофизических методов исследования в скважинах для обеспечения потребностей ГРП. Выделено несколько этапов в истории развития гидравлического разрыва пласта, когда методы ГИС позволили переосмыслить роль и место ГРП как основного способа интенсификации притока при добыче углеводородов. Подчеркивается особая роль математического моделирования в симуляторах ГРП. Современные системы позволяют в реальном времени контролировать проведение гидроразрыва с одновременным изменением параметров модели, сопоставлять реальное распространение трещины с моделью ГРП, оценивать поток флюида в каждый обрабатываемый интервал и корректировать модель трещин.

Разработана вычислительная технология моделирования процессов распространения сейсмоакустических волн в смежных средах (земля – атмосфера – вода – лед) и определения скоростных характеристик сложнопостроенной геофизической структуры Байкальской рифтовой зоны в направлении (юго-восток) – (северо-запад) оз. Байкал. Основные этапы моделирования включают построение реалистичной численной модели скоростного строения глубинных структур БРЗ в районе оз. Байкал, базирующейся на модели обобщенного скоростного ГСЗ-разреза. Численное зондирование осуществляется с применением импульса Пузырева и алгоритмов и программ решения динамической задачи расчета волновых полей в неоднородных упругих средах. По результатам зондирования получены мгновенные снимки волновых полей, отражающие динамику их распространения во времени и пространстве, а также синтетические сеймотрассы с

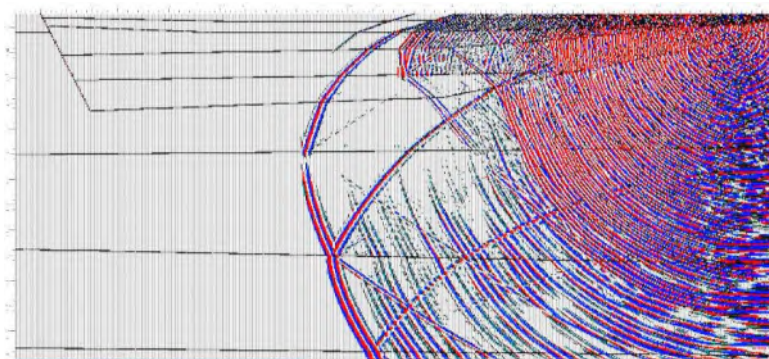


Рис. 6: Мгновенный снимок волнового поля, $t = 10$ сек

выделением типов отраженных волн. Пример мгновенного снимка волнового поля для области протяженностью 90 км в момент времени 10 сек приведен на рис. 6.

На основе численного моделирования восстановлены характеристики скоростного разреза (рис. 7) и проведен их сопоставительный анализ с

соответствующими полученными ранее результатами глубинного сейсмического зондирования. Результаты сопоставления характеризуют согласие теоретического и экспериментального подходов.

В рамках изучения проблемы взаимодействия смежных геофизических полей выполнен анализ геофизических данных, полученных в совместных экспериментах по вибрационному зондированию сопряженных сред "земля – вода – атмосфера – лед" на Байкале. 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 возможности регистрации в воде гидроакустической волны от вибратора на временах вступления сейсмической волны Р как результата трансформации в направлении "дно – море". Выполнено численное моделирование распространения акустосейсмических волн в рассматриваемых средах.

Изучалась задача взаимодействия акустических волн, падающих в воздухе под заданным углом с некоторой многослойной моделью, состоящей из трех слоев: лед – вода – грунт, и сейсмических волн, возникающих в этих упругих средах. Для решения поставленной задачи была построена и решена система из 9 дифференциальных уравнений упругости с условиями на границах, которая описывает распространение падающих и отраженных акустических волн в воздухе, преломленных и отраженных сейсмических волн в упругих средах для модели "лед – вода – упругое полупространство (грунт)", нахождение и анализ их амплитуд, а затем вычисление коэффициентов падения, отражения и преломления. Выполнено численное моделирование, проведено сравнение с результатами натурных экспериментов, полученных в районе оз. Байкал.

Проведена серия полевых экспериментов по записи транспортных шумов в летнее, осеннее и зимнее время года (сроки выполнения работ: август, конец сентября, конец ноября 2022 г.). На основе спектрального и спектрально-временного анализов полученных сейсмических и акустических записей транспортных шумов выделены информативные параметры, характерные для источников. Оценены критические уровни транспортных шумов на низких частотах. Изучены зависимости спектральных функций от пространственно-скоростных режимов движения объектов. Показана высокая корреляционная зависимость между значениями спектральных мод колебаний, определяемых числом оборотов двигателя, от скорости движения объектов. Оценены закономерности затухания колебаний как функция расстояния для разных типов транспортных средств (тяжелая колесная и гусеничная техника, железнодорожный транспорт). Измеренные перечисленные параметры являются основой для решения задачи распознавания источников шумов на основе использования метода замкнутых разделяющих поверхностей в пространстве информативных признаков.

В рамках решения проблемы мониторинга и исследования природных и техногенных опасных явлений выполнены записи шумов различных видов автомобильного, железнодорожного и

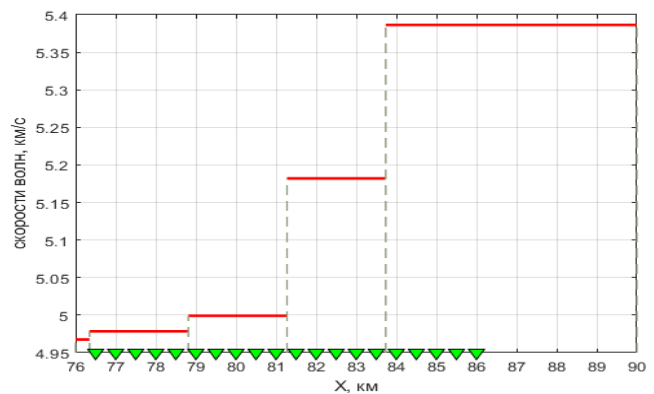


Рис. 7: Гистограмма восстановленных скоростей волн V_p как функция дальности

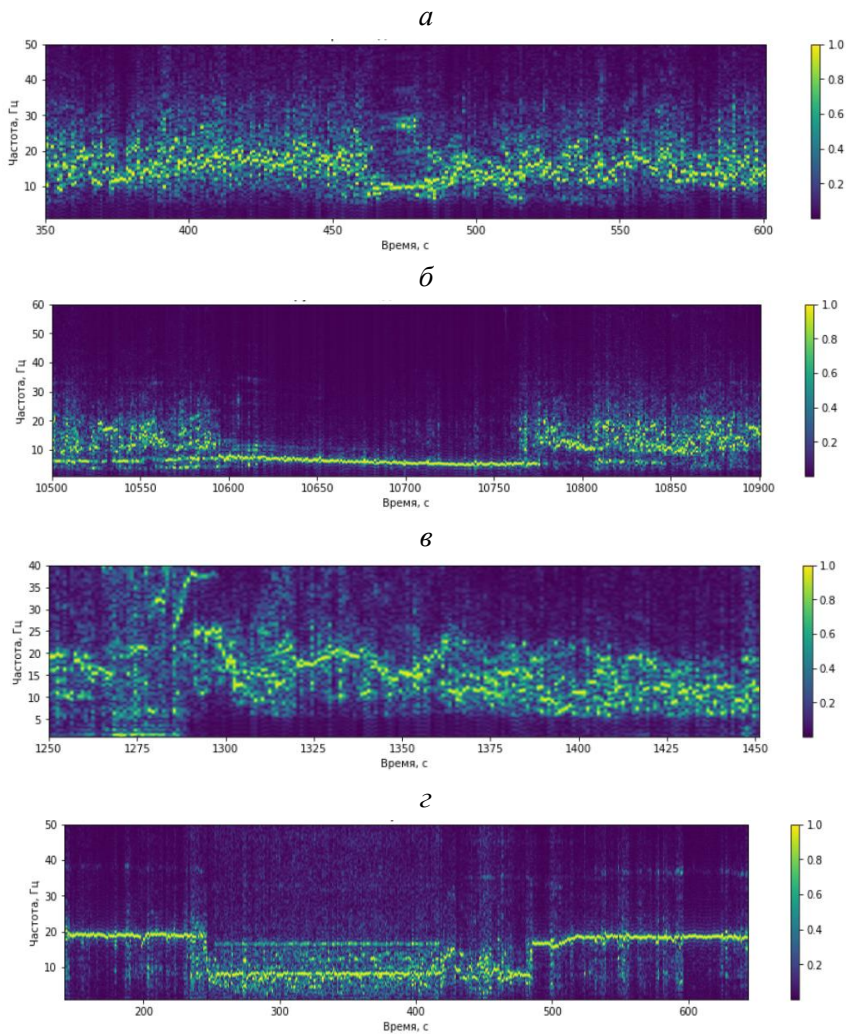


Рис. 8. Примеры нормированных по амплитуде спектрально-временных графиков сейсмических колебаний, возникающих при движении электропоезда (а), грузового поезда (б), КамАЗа (в), гусеничного транспорта (г)

гусеничного транспорта и проанализированы их спектрально-временные функции с учетом пространственного положения и режимов движения источников шумов. Предложен и экспериментально апробирован подход к решению задачи геолокации подвижного транспортного объекта с

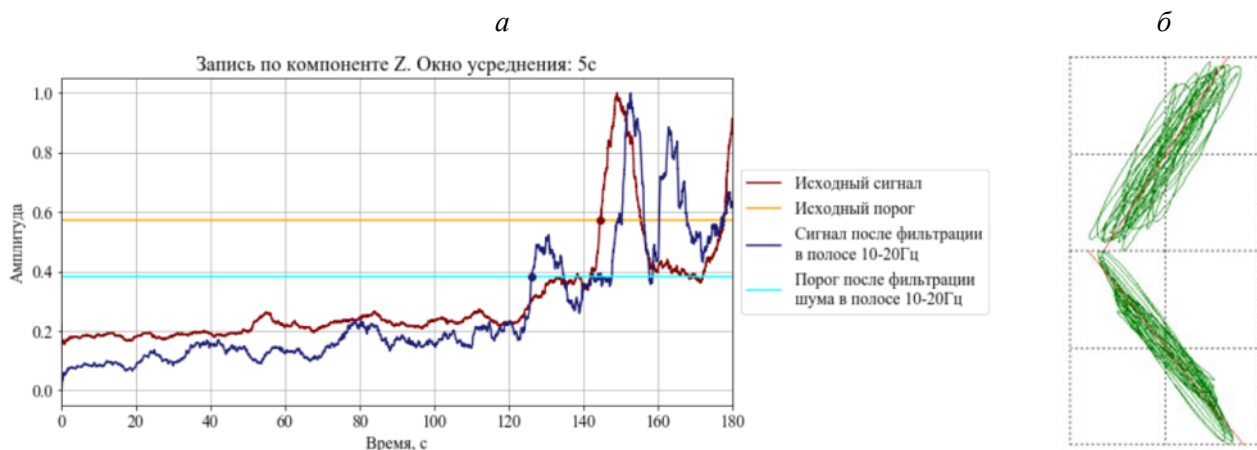


Рис. 9: Результат работы алгоритма обнаружения на примере обработки записи колебаний движущейся гусеничной техники с применением порога обнаружения с уровнем значимости 0.95 на расстоянии от сейсмического датчика около 1470 м при фильтрации в полосе частот 10–20 Гц и на расстоянии около 1350 м без предварительной фильтрации (а); пример иллюстрации положений "эллипсов рассеяния" (б)

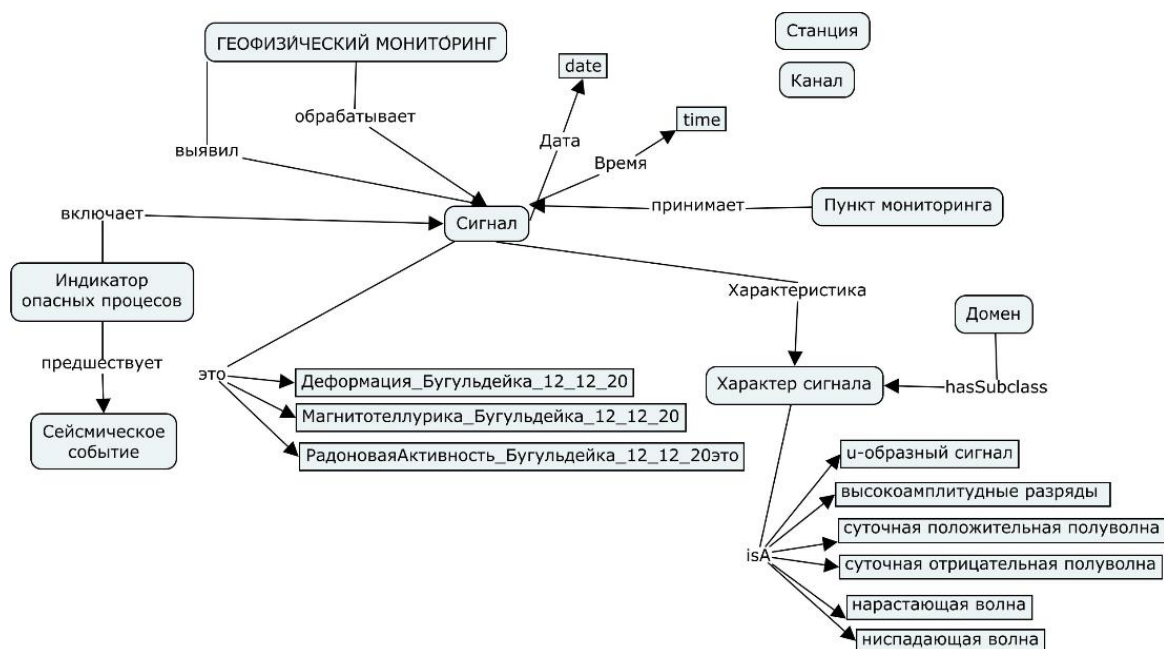


Рис. 10: Онтологический граф. Экспертное правило

помощью сосредоточенного трехкомпонентного сейсмического датчика с применением метода спектрально-поляризационной обработки и сейсмической антенны в виде линейки из пространственно разнесенных сейсмодатчиков. Разработаны алгоритмы и программы для решения перечисленных задач в реальном масштабе времени. В результате проведения натурных экспериментов точность пеленгования с помощью поляризационного метода составляет около 22 %, с помощью сейсмической антенны из пяти датчиков – 5 %. Разработана концептуальная модель семантической подсистемы цифровой платформы (ЦП) комплексного геофизического мониторинга Байкальской природной территории (БПТ) как многофункционального рекомендательного ресурса, обеспечивающего единое информационное пространство знаний предметной области и эффективного взаимодействия пользователя с ЦП. Информационным ядром подсистемы является база знаний, состоящая из онтологии предметной области — комплексного геофизического мониторинга — и экспертных правил прогноза сейсмической активации. База экспертных правил позволит связать задачи обнаружения предвестников сейсмических событий с методами и средствами их решения посредством сервисов ЦП.

В подсистему будут интегрированы сервисы логического вывода, позволяющих на основе экспертных правил извлекать из онтологии знания, не представленные в ней явно. Онтология разрабатывается в редакторе Protgrе с использованием машины логического вывода (Reasoner) HermiT 1.4.3.456. Подсистема может рассматриваться как интеллектуальный ассистент, повышающий эффективность взаимодействия пользователя с ЦП.

Выполнена разработка архитектуры цифровой электронной онлайн-платформы (ЦП), позволяющей осуществлять анализ и визуализацию на единой временной сетке долговременных рядов данных, полученных в ходе комплексного геофизического мониторинга (магнитотеллурического, сейсмологического, деформометрического, гидрогеологического, эманионного и температурного) в период с 2019 по 2022 гг. на научных стационарах ИЗК СО РАН и ИСЗФ СО РАН, расположенных на территории Прибайкалья. Разработаны вычислительные и картографические сервисы ЦП.

Результаты работ по проектам РФФИ

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.

В интересах изучения скоростного строения Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) разработана оригинальная вычислительная технология 2D моделирования процессов распространения сейсмоакустических волн в смежных средах, реализованная на суперЭВМ. Технология базируется на построении реалистичной численной модели скоростного разреза БРЗ, применении новых методов прямого и обратного численного моделирования. Результатами решения являются полная картина волнового поля и синтетические сейсмограммы, восстановленные скоростные характеристики сложнопостроенной геолого-геофизической структуры БРЗ в районе юго-восточной части оз. Байкал. На основе сопоставления результатов численного моделирования и натуральных экспериментов доказана эффективность созданной вычислительной технологии для прогнозирования характеристик сейсмоакустических волновых полей. Такая технология в перспективе может стать альтернативой трудоемким и дорогостоящим натурным экспериментам.

Договор № 97/223А от 05.10.2022 на выполнение научно-исследовательских работ по теме "Геомеханический и фильтрационный блок методики интерпретации геолого-промысловых данных скважины на основе динамических моделей эволюции свойств коллектора при вскрытии его бурением".

Руководитель – д.т.н. Ельцов И. М.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Glinskiy, B. M., Kovalevsky, V. V., Khairtdinov, M. S., Fatyanov, A. G., Martynov, V. N., Karavaev, D. A., Sapetina, A. F., Sobisevich, A. L., Sobisevich, L. E., Braginskaya, L. P., Grigoryuk, A. P. The experimental study and simulation of volcanic structures using active vibroseismic methods // *J. Volcanology and Seismology*, 2022. V. 16(4). P. 280–298. DOI: 10.1134/S0742046322040030.

2. Kovalevsky, V. V., Sobisevich, A. L., Tubanov, Ts. A., Braginskaya, L. P., Grigoryuk, A. P. Vibroseismic investigations of the Baikal rift zone with a powerful CVO-100 vibrator // *Geodynam. and Tectonophys.* 2022. V. 13(2), 0589. DOI: 10.5800/GT-2022-13-2-0589.

3. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Prigarin, V., Sapetina, A., Ulyanichev, I., Zavyalov, O. A new parallel code based on a simple piecewise parabolic method for numerical modeling of colliding flows in relativistic hydrodynamics // *Mathem.* 2022. V. 10(11), 1865. DOI: 10.3390/math10111865.

4. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Sapetina, A., Lomakin, S. The efficiency of hydrodynamic code on Intel Xeon scalable architecture // *Proc. of the 2021 Ivannikov Memorial Workshop (IVMEM 2021)*, Kazan, Sept. 23–24, 2022. P. 38–41. DOI: 10.1109/IVMEM53963.2021.00013 (не вошла в отчет 2021 г.).

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Prigarin, V., Sapetina, A., Ulyanichev, I., Zavyalov, O. A new approach to the supercomputer simulation of carbon burning sub-grid physics in Ia type supernovae explosion // *CCIS.* 2022. 1618. P. 210–232. DOI: 10.1007/978-3-031-11623-0_15.

2. Mikhaylenko, D. A., Yakimenko, A. A. Algorithm for the camera scene 3D model calculation // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2021) : Proc. of the 15th Intern. sci. and techn. conf., Novosibirsk, Nov. 19–21, 2021. Novosibirsk: Publ. NSTU, 2021. P. 418–421. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647439 (не вошла в отчет 2021 г.)
3. Stubarev, I. M., Alsowa, O. K., Yakimenko, A. A. Effectiveness research of the apriori algorithm implementations as part of the recommendation system // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2021): Proc. of the 15th intern. sci. and techn. conf., Novosibirsk, Nov. 19–21, 2021. Novosibirsk: Publ. NSTU, 2021. P. 587–590. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647623 (не вошла в отчет 2021 г.).
4. Kopylova, O., Khairtdinov, M. Statistical algorithms for analysis, measurement, and recognition of transport noises // Proc. of IEEE Intern. Multi-Conference on Engin., Comput. and Inform. Sci. ("Sibircon-2022"), Novosibirsk – Yekaterinburg, Nov. 11–13, 2022. P. 940–943. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016946.
5. Pinigina, D. L., Kopylova, A. O. Optimization algorithm for estimating the velocity characteristics of complex medium // Proc. of IEEE Intern. Multi-Conference on Engin., Comput. and Inform. Sci. ("Sibircon-2022"), Novosibirsk – Yekaterinburg, Nov. 11–13, 2022. P. 960–964. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016913.
6. Khairtdinov, M., Shimanskaya, G., Kovalevsky, V. Optimality and unity of interactions of geophysical fields and waves // Proc. of IEEE Intern. Multi-Conference on Engin., Comput. and Inform. Sci. ("Sibircon-2022"), Novosibirsk – Yekaterinburg, Nov. 11–13, 2022. P. 930–933. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017120.
7. Simonov, V. S., Khairtdinov, M. S. Automatic decomposition of a sequential algorithm for MapReduce frameworks // Proc. of IEEE Intern. Multi-Conference on Engin., Comput. and Inform. Sci. ("Sibircon-2022"), Novosibirsk – Yekaterinburg, Nov. 11–13, 2022. P. 1780–1789. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017034.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Глинский, Б. М., Ковалевский, В. В., Хайретдинов, М. С., Фатьянов, А. Г., Мартынов, В. Н., Караваев, Д. А., Сапегина, А. Ф., Собисевич, А. Л., Собисевич, Л. Е., Брагинская, Л. П., Григорюк, А. П. Экспериментальное изучение и моделирование вулканических структур с использованием активных вибросейсмических методов // Вулканол. и сейсмол. 2022. № 4. С. 47–66. DOI: 10.31857/S0203030622040034.
2. Ковалевский, В. В., Собисевич, А. Л., Тубанов, Ц. А., Брагинская, Л. П., Григорюк, А. П. Вибросейсмические исследования байкальской рифтовой зоны с мощным вибратором ЦВО-100 // Геодинам. и тектонофиз. 2022. Т. 13, № 2. Art. num. 0589. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0589>.
3. Астафьев, В. Н., Ельцов, И. Н. Роль геофизических исследований в скважинах в эволюции парадигмы гидравлического разрыва пласта. // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефтепродуктов. 2022. Вып. 6 (140). С. 9–37. DOI: 10.17122/ntj-oil-2022-6-9-37.
4. Хайретдинов, М. С., Ковалевский, В. В. Сейсмические вибраторы в изучении межволновых взаимодействий. // Проблемы машиноведения : Материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Омск, 22–23 марта 2022 г. С. 15–22. DOI: 10.25206/978-5-8149-3453-6-2022-15-22.

5. Ковалевский, В. В., Собисевич, А. Л., Тубанов, Ц. А., Брагинская, Л. П., Григорюк, А. П. Вибросейсмические исследования байкальской рифтовой зоны с мощным вибратором ЦВО-100 // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса от океана к континенту : Материалы науч. конф., Иркутск, 18–21 окт. 2022 г. С. 126–127.
6. Брагинская, Л. П., Григорюк, А. П., Загорулько, Г. Б., Ковалевский, В. В., Семинский, И. К. Управление данными и знаниями по геофизическому мониторингу Байкала // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса от океана к континенту : Материалы науч. конф., Иркутск, 18–21 окт. 2022 г. С. 31–32.
7. Ефимов, С. А. Синтез математической модели ядра преобразования для обработки вибросейсмических данных методом обратной фильтрации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 78–85. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-78-85.
8. Брагинская, Л. П., Григорюк, А. П., Загорулько, Г. Б., Ковалевский, В. В., Семинский, И. К. Семантическая подсистема цифровой платформы для геофизического мониторинга // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 144. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-02-09.
9. Ковалевский, В. В., Брагинская, Л. П., Григорюк, А. П., Тубанов Ц. А. Вибросейсмический мониторинг в Байкальском регионе // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 144. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-02-13.
10. Григорюк, А. П., Брагинская, Л. П., Ковалевский, В. В., Семинский И. К. Цифровая платформа для интеграции и анализа данных комплексного геофизического мониторинга Байкальской природной территории // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 146. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-02-10.
11. Семинский, И. К., Поспеев, А. В., Григорюк, А. П., Брагинская, Л. П. Подход к магнитотеллурическому мониторингу тектонической активизации на Байкальском рифте: производственная технология и обработка данных // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 151. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-02-20.
12. Фатьянов, А. Г. Построение аналитического решения и устойчивого метода его вычисления для шара планетарных размеров с жидким ядром // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 19. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-91.
13. Копылова, О. А., Хайретдинов, М. С. Статистические алгоритмы анализа, измерения и распознавания транспортных шумов в задачах геоэкологии // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 67. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-83.
14. Хайретдинов, М. С., Михайлов А. А. Численное моделирование распространения упругих волн в смежных средах Байкальской рифтовой зоны // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 71. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-93.

Участие в конференциях и совещаниях

1. International Conference on Parallel Computational Technologies, Dubna, March 29–31, 2022 – 1 доклад (Караваев Д. А.).

2. IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (Sibircon-2022), Novosibirsk – Yekaterinburg, November 11–13, 2022 – 4 доклада (Копылова О. А., Хайретдинов М. С., Шиманская Г. М., Ковалевский В. В.).
3. Международная конференция "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 18-го конгресса Интерэкспо "Гео-Сибирь", Новосибирск, 18–20 мая 2022 г. – 8 докладов (Ефимов С. А., Хайретдинов М. С., Фатьянов А. Г., Копылова О. А., Григорюк А. П., Караваев Д. А., Брагинская Л. П.).
4. 18-я Международная школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем" (OPCS-22), пансионат "Ак Бермет" (Кыргызская респ.), 20–30 июля 2022 г. – 3 доклада (Копылова О. А., Хайретдинов М. С., Шиманская Г. М., Седухина Г. Ф.).
5. 19-я Международная научно-практическая конференция "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии" (ИНФО-2022), Сочи, 1–10 октября 2022 г. – 2 доклада (Копылова О. А., Хайретдинов М. С.).
6. 6-я Международная научно-техническая конференция "Проблемы машиноведения", Омск, 22–23 марта 2022 г. – 1 пленарный доклад (Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В.).
7. Международная конференция "Дифференциальные уравнения и математическое моделирование", Улан-Удэ, 22–25 августа 2022 г. – 1 доклад (Фатьянов А. Г.).
8. Международная конференция "Artificial Intelligence Journey" (AIJ), Новосибирск, 6 декабря 2022 г. – 1 доклад (Якименко А. А.).
9. Международная конференция "Марчуковские научные чтения" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 7 докладов, из них 1 пленарный (Фатьянов А. Г., Копылова О. А., Хайретдинов М. С., Григорюк А. П., Брагинская Л. П., Ковалевский В. В.).
10. Всероссийская научная конференция "Добрецовские чтения: наука из первых рук" Новосибирск, 1–5 августа 2022 г. – 1 доклад (Григорюк А. П., Брагинская Л. П., Ковалевский В. В.).
11. 6-я Всероссийская конференция "Информационные технологии для наук о Земле и цифровизация в геологии и горнодобывающей промышленности" (ITES-2022), Владивосток, 3–7 октября 2022 г. – 1 доклад (Григорюк А. П., Брагинская Л. П., Ковалевский В. В.).
12. 20-я научная конференция "Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту", Иркутск, 18–21 октября 2022 г. – 2 доклада (Григорюк А. П., Брагинская Л. П., Ковалевский В. В.).
13. 11-я Всероссийская конференция "Актуальные проблемы прикладной математики и механики", посвященная памяти акад. А. Ф. Сидорова, пос. Кабардинка (Краснодарский кр.), 1–7 сентября 2022 г. – 1 доклад (Шиманская Г. М., Хайретдинов М. С., Михайлов А. А.).
14. Международный форум "Природопользование и сохранение всемирного природного наследия", UNESCO, Санкт-Петербург, 1–4 декабря 2022 г. – 1 доклад (Копылова О. А.).
15. 7-я Всероссийская научная конференция "Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды", Санкт-Петербург, 24–26 мая 2022 г. – 1 доклад (Копылова О. А.).
16. 2-я Международная конференция "Дифференциальные уравнения и математическое моделирование", Улан-Удэ, 22–25 августа 2022 г. – 1 доклад (Фатьянов А. Г.).
17. Научная конференция "Междисциплинарные исследования магматических и геотермальных систем", Петропавловск-Камчатский, 2 июля 2022 г. – 1 доклад (Ельцов И. Н.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Ковалевский В. В.:

– член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.,

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.;

2. Фатьянов А. Г. – член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 4

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 11

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 15

Докладов на конференциях – 35, в том числе пленарных – 2

Участников оргкомитетов конференций – 3

Кадровый состав

- | | | | |
|-----|-------------------|------------------------|-----------|
| 1. | Ковалевский В. В. | и.о. зав. лабораторией | д.т.н. |
| 2. | Брагинская Л. П. | ведущ. программист | |
| 3. | Григорюк А. П. | н.с. | |
| 4. | Ельцов И. Н. | г.н.с. | д.т.н. |
| 5. | Ефимов С. А. | н.с. | |
| 6. | Иванова И. Н. | ведущ. инженер | |
| 7. | Кайсина Н. В. | ведущ. инженер | |
| 8. | Караваев Д. А. | н.с. | к.ф.-м.н. |
| 9. | Копылова О. А. | инженер | |
| 10. | Мичурина Н. М. | ведущ. инженер | |
| 11. | Седухина Г. Ф. | н.с. | |
| 12. | Фатьянов А. Г. | г.н.с. | д.ф.-м.н. |
| 13. | Хайретдинов М. С. | г.н.с. | д.т.н. |
| 14. | Шиманская Г. М. | н.с. | к.т.н. |
| 15. | Якименко А. А. | н.с. | к.т.н. |

Караваев Д. А., Копылова О. А. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

Ельцов И. Н. – зав. кафедрой НГТУ, профессор НГУ, доцент НГУ

Хайретдинов М. С. – профессор НГТУ

Якименко А. А. – зав. кафедрой, доцент НГТУ

Руководство студентами

Соколов П. А. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Ельцов И. Н.

Косякина Е. Э. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Ельцов И. Н.

- Хлыстун Е. С. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Ельцов И. Н.
Палванов Шухрат Гайрат угли – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Ельцов И. Н.
Аманбаев Хушнудбек Сапайбой угли – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Ельцов И. Н.
Хакимжанов А. А. – 3-й курс НГТУ, руководитель Ельцов И. Н.
Мирасова Е. Р. – 3-й курс НГТУ, руководитель Ельцов И. Н.
Крекнин А. О. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
Панфилов Д. Д. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
Емелин М. С. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Косинцев А. М. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Криволицкая Т. Н. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Мамытов Р. Т. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Неуструев С. Ю. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Рейх Э. А. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Скороходов Ф. А. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Чарушин Д. Д. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Шперлинг В. К. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.

Руководство аспирантами

- Добродородный В. И. – 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.
Стубарев И. М. – 3-й год, НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Харюткина С. А. – 3-й год, НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Булатов А. Д. – 3-й год, НГТУ, руководитель Якименко А. А.
Михайленко Д. А. – 4-й год, НГТУ, руководитель Якименко А. А.

Защита дипломов

- Такмаков И. В. – бакалавр НГТУ, руководитель Якименко А. А.

ЛАБОРАТОРИЯ СИСТЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ

Зав. лабораторией д.т.н. Родионов А. С.

Важнейшие достижения

Синтез, маршрутизация и параллельная оптимизация семейств циркулянтных сетей

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

Разработаны и экспериментально исследованы в сети на кристалле два вида алгоритмов парной маршрутизации константной сложности для оптимальных циркулянтных сетей степени четыре, позволяющие создавать серию алгоритмов маршрутизации для различных подклассов оптимальных сетей и сократить время работы и требуемую память по сравнению с известными алгоритмами. Построена новая серия семейств циркулянтных сетей степени шесть с общими структурными и коммуникационными свойствами, перспективная как масштабируемая модель топологий сетей на кристалле. На рис. 1 показана зависимость изменения числа вершин графов полученной серии от ее параметров.

Разработан параллельный генетический алгоритм для оптимизации циркулянтных сетей, основанный на MPI модели. Получено линейное ускорение для параллельных программ с различным числом процессов, выполнена оценка эффективности на кластере Kunpeng ИВМиМГ СО РАН. Для различных степеней вершин найдены сети с меньшим средним расстоянием и большей пропускной способностью, чем известные в литературе. На рис. 2 показано ускорение работы алгоритма в зависимости от числа вычислительных ядер кластера Kunpeng.

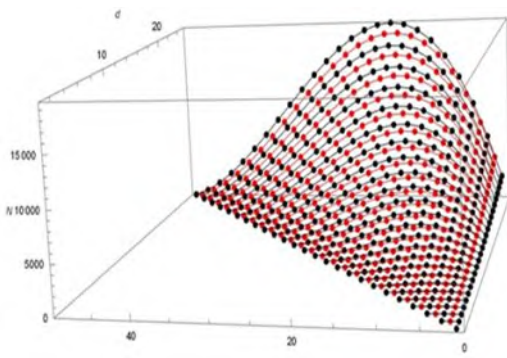


Рис. 1: Число вершин N графов серии

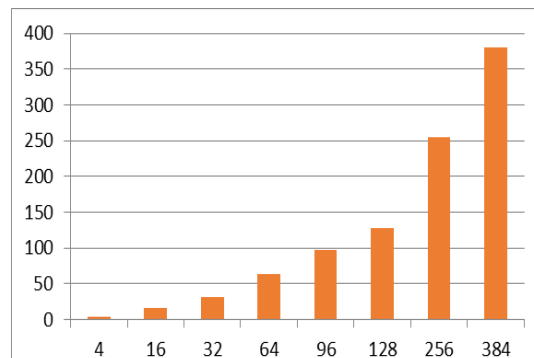


Рис. 2: Ускорение для числа ядер кластера Kunpeng

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Monakhova, E. A., Monakhov, O. G., Romanov, A. Yu. Routing algorithms in optimal degree four circulant networks based on relative addressing: Comparative analysis for networks-on-chip // IEEE Trans. on Network Sci. and Engin. 2022. P. 1–13. DOI: 10.1109/TNSE.2022.3211985 (IF = 5.033, Q1).
2. Монахова, Э. А., Монахов, О. Г. Построение серий семейств циркулянтных сетей степени шесть // Дискр. анализ и исслед. операций. 2022. Т. 29, № 4. С. 59–76, DOI: 10.33048/daio.2022.29.743 (IF=0.294, WoS RSCI, Scopus Q2).
3. Монахова, Э. А., Монахов, О. Г. Эффективный алгоритм поиска кратчайших путей в плотных Гауссианских сетях // Прикл. дискр. матем. 2022. № 58. С. 94–104. DOI: 10.17223/20710410/58/9, (IF=0.408, WoS, Scopus Q4).

4. Monakhova, E., Monakhov, O., Lezhnev, E., Romanov, A. Optimal routing algorithm in dense Gaussian networks-on-chip // Intern. Conf. on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Maldives, Nov. 16–18, 2022. DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988159 (Scopus).

5. Monakhov, O., Monakhova, E. Parallel genetic algorithm for synthesis of optimal circulant networks on Kunpeng processors // Intern. Conf. IEEE SIBIRCON 2022 (OPCS 2022), Novosibirsk, Nov. 11–13, 2022. P. 950–953. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017065 (Scopus).

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 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 НИР 0251-2021-0005.

Руководители: д.ф.-м.н. 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".

Разработаны новые эффективные алгоритмы парной маршрутизации константной сложности для сетей на кристалле с топологией оптимальных циркулянтных сетей степени четыре. Построена новая серия семейств циркулянтных сетей степени шесть с общими структурными и коммуникационными свойствами, перспективная как масштабируемая модель топологий сетей на кристалле.

Разработан параллельный генетический алгоритм, основанный на MPI модели, для оптимизации больших циркулянтных сетей. Получены линейное ускорение для параллельных программ с различным числом процессов, выполнена оценка эффективности на кластере Kunpeng ИВ-МиМГ СО РАН.

Разработан новый алгоритм константной временной сложности для поиска векторов кратчайших путей в плотных гауссианских сетях, перспективных в качестве топологии в сетях на кристалле по сравнению с другими сетчатыми структурами. Предложенный алгоритм был синтезирован в сети на кристалле с гауссианской топологией. Продемонстрировано его превосходство по оценкам памяти и числа логических элементов в зависимости от числа узлов в сети с шестью другими алгоритмами, реализованными в сети на кристалле.

Исследовалось решение задачи синтеза серий циркулянтных сетей с общими структурными и коммуникационными свойствами. Серии семейств циркулянтных сетей задаются аналитически с помощью определяющих соотношений между числом вершин графа N , его образующими и порождающей функцией $p(d)$, где d – диаметр графа.

Рассматривались задачи проектирования и оптимизации инженерных сетей различного назначения. Для моделирования использован гиперсетевой подход, позволяющий компактно описывать иерархические сети. Критерием оптимальности сети выступает ее стоимость. Изучался случай, когда необходимо обеспечить достаточный уровень надежности сети с точки

зрения минимальной вероятности связности между всеми выделенными парами узлов в условиях отказа линий первичной сети.

Рассмотрена задача оптимального подключения базовых станций сети связи к центрам пита-

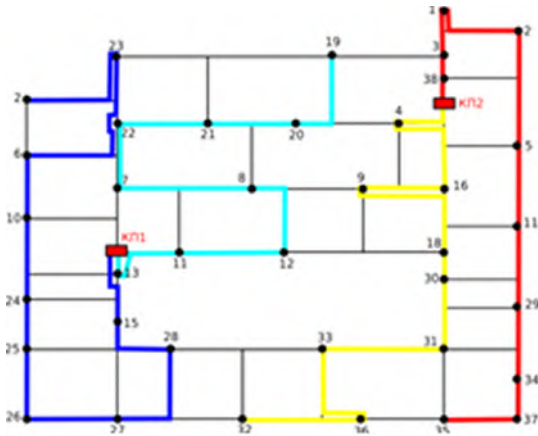


Рис. 3: Результат работы алгоритма:

4 цепи подключения базовых станций

ния в шахте. Под подключением понимается набор путей по выработкам шахты, соединяющих каждую базовую станцию из заданного набора с каким-либо центром питания. Критерий оптимальности – стоимость подключения (рис. 3).

Разработан метод оптимизации мобильных сенсорных сетей с ненадежным обнаружением событий, представляющих интерес. Предложена методика оценки надежности обнаружения события отдельным сенсором. Для заданной вероятности обнаружения события за предписанное время решена задача минимизации количества узлов сети. При этом учтены различные сценарии мобильности узлов. Выведены соответствующие функции распределения времени обнаружения. Для сети мониторинга, узлы которой установлены на транспортных средствах, разработана постановка задачи минимизации функции штрафа, включающая стоимость сети и потери от несвоевременного обнаружения событий. Получено решение данной задачи. Полученные результаты позволяют минимизировать стоимость развертывания системы мониторинга воздуха в современных мегаполисах, а также повысить рентабельность ее эксплуатации.

Для графов вида одномерной квадратной решетки разработан линейный по сложности алгоритм вычисления полиномов надежности в явном виде, т. е. получено эффективное решение NP-трудной задачи в частном случае. Для обоснования предложенного алгоритма использовался метод факторизации, позволяющий свести задачу вычисления связности случайного графа с ненадежными ребрами к исследованию двух случайных графов меньшего размера. Доказано, что полиномы надежности полученных графов выражаются через полиномы надежности регулярных структур меньшей размерности. Таким образом получена рекуррентная формула для вычисления полинома надежности исходного графа. Реализована программа вычисления полиномов надежности с использованием пакета SymPy.

Рассмотрена задача эффективного сжатия больших информационных массивов со смешанными типами данных – строковыми и числовыми. Как известно, кодирование этих двух типов данных имеет определенную специфику. Разработан новый метод сжатия больших информационных массивов, позволяющий эффективно кодировать как числовые, так и строковые данные. Данный метод может быть использован как для сжатия больших информационных массивов числовых данных (например, данных, полученных в результате физического эксперимента), так и для сжатия массивов, содержащих большое количество строковых данных (таких как библиотечные базы данных), что позволит уменьшить объем занимаемой памяти и повысить скорость кодирования.

Разработан адаптивный алгоритм сжатия бинарных изображений, позволяющий учитывать их статистические свойства. За счет учета статистической структуры метод улучшает степень сжатия изображений по сравнению с известным методом JPEG, широко используемым на практике.

Проведен анализ направлений развития существующих программных решений и средств информационной поддержки дистанционного проведения научных исследований на примере систем поддержки конференций и систем управления научными данными (CRIS). Выполнена последующая интеграция выбранного в результате анализа программного средства данного класса на мощностях ЦКП ССКЦ СО РАН. Развернут программно-технический комплекс с обеспечением доступа к нему пользователей посредством сети Интернет.

Продолжается изучение научного соавторства с точки зрения комплексной сети, представляющей множественные отношения между группами авторов научных публикаций, размещенными в общей библиографической базе данных (БД). Анализируется гиперграф комплексной сети научного соавторства в отличие от традиционного подхода к изучению соавторства, базирующегося на построении взвешенного либо невзвешенного графа. Приведены формальные сведения, необходимые для описания множественных отношений между группами соавторов, и представлены две модели анализируемой КС. На основе реальной информации, извлеченной из библиографической БД, сконструирован гиперграф сети соавторства, измерены его параметры и сформулированы основные свойства. Приведен содержательный пример.

Экспериментальное изучение сетей научного соавторства дало следующие результаты:

Параметр	Значение
Размер, число ребер $ E $ (число НП)	91113
Порядок, число вершин $ V $ (число авторов)	32434
Ранг $r(H^{ca})$ (максимальное число соавторов НП)	17
Число вершин максимальной компоненты (при общем числе компонент $\sim 10^3$)	29270
Средняя степень $avrdeg(E_i)$ (среднее число соавторов НП)	2,3
Средняя степень $avrdeg(v_i)$ (среднее число НП одного автора)	2,8
Распределение степеней вершин $deg(v_i)$ следует степенному закону $Px \sim x^{-\gamma}$	$x_{min} = 6,$ $\gamma = 1,64$

Решалась задача развития и модернизации системы имитационного моделирования, разработанной в лаборатории. Разработаны и протестированы модели социальных процессов, взаимодействия мобильных объектов, промышленного производства и др. Один из примеров – решение задачи оптимизации системы сбора данных о загрязнении городской атмосферы (рис. 4).

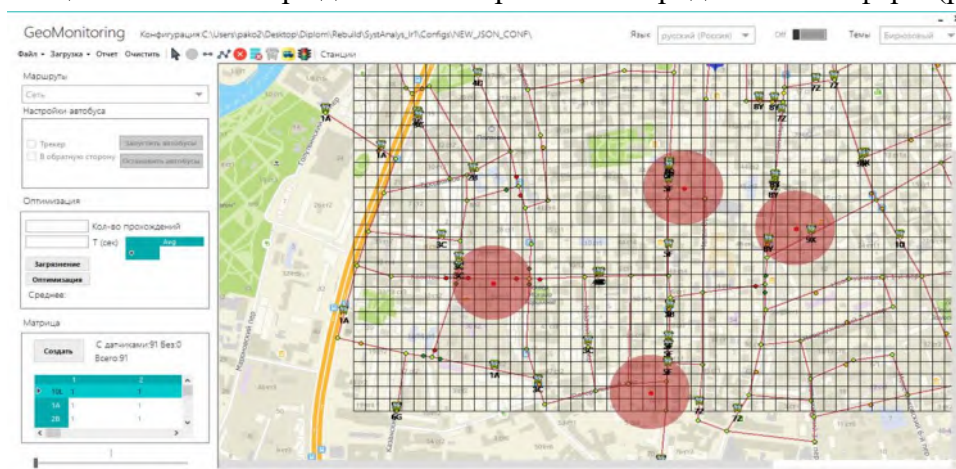


Рис. 4. Пример работы системы City Monitoring

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

1. Shakhov, V., Materukhin, A., Sokolova, O., Koo, I. Optimizing urban air pollution detection systems // *Sensors*. Jun. 2022. V. 22, No. 13. P. 4767. DOI: 10.3390/s22134767.
2. Monakhova, E. A., Monakhov, O. G., Romanov A. Yu. Routing algorithms in optimal degree four circulant networks based on relative addressing: Comparative analysis for networks-on-chip // *IEEE Trans. on Network Sci. and Engin.* 2022. P. 1–13. DOI: 10.1109/TNSE.2022.3211985.
3. Монахова, Э. А., Монахов, О. Г. Эффективный алгоритм поиска кратчайших путей в плотных гауссианских сетях // *Прикл. дискр. матем.* 2022. № 58. С. 94–104. DOI: 10.17223/20710410/58/9.
4. Монахова, Э. А., Монахов, О. Г. Построение серий семейств циркулянтных сетей степени шесть // *Дискр. анализ и исслед. операций.* 2022. Т. 29, № 4. С. 59–76. DOI: 10.33048/daio.2022.29.743.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Kratov, S., Podsadnikov, A. The development of the massive open online course on distance forms of research and training // *Proc. of the 16th Intern. conf. on ubiquitous information management and communication "IMCOM 2022"*, Seoul (Korea), Jan. 3–5, 2022. DOI: 10.1109/IMCOM53663.2022.9721752.
2. Rodionov, A. Network probabilistic connectivity: Optimal structures II // *Proc. of the 16th Intern. conf. on ubiquitous information management and communication "IMCOM 2022"*, Seoul (Korea), Jan. 3–5, 2022. DOI: 10.1109/IMCOM53663.2022.9721775.
3. Shakhov, V., Yurgenson, A., Chen, H. On reliability of pipeline monitoring sensor networks // *Proc. of the 16th Intern. conf. on ubiquitous information management and communication "IMCOM 2022"*, Seoul (Korea), Jan. 3–5, 2022. DOI: 10.1109/IMCOM53663.2022.9721631.
4. Kratov, S., Sokolova, O. On popularization of scientific developments and use of free and open source software // *Proc. Intern. conference engineering technologies and computer science "EnT 2021"*, Moscow, June 15–16. P. 45–48 (не вошла в отчет 2021 г.).
5. Monakhova, E., Monakhov, O., Lezhnev, E., Romanov, A. Optimal routing algorithm in dense Gaussian networks-on-chip // *Intern. Conf. on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, Maldives, Nov. 16–18, 2022. DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988159.
6. Monakhov, O., Monakhova, E. Parallel genetic algorithm for synthesis of optimal circulant networks on Kunpeng processors // *Intern. Conf. IEEE SIBIRCON 2022 (OPCS 2022)*, Novosibirsk, Nov. 11–13, 2022. P. 950–953. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017065.
7. Migov, D., Yurgenson, A. On optimal connection of base stations of wireless communication network to power supply centers in a mine // *Intern. Conf. IEEE SIBIRCON 2022 (OPCS 2022)*, Novosibirsk, Nov. 11–13, 2022. P. 980–983. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017054.
8. Shakhov, V., Chen, H., Rodionov, A. Reliability polynomial for rectangular lattice strip // *Intern. Conf. IEEE SIBIRCON 2022 (OPCS 2022)*, Novosibirsk, Nov. 11–13, 2022. P. 990–994. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017123.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Токтошов, Г. Ы. Методология выбора трасс для прокладки сетей и коммуникаций // Вестн. СибГУТИ. 2022. Т. 1, № 1. С. 97–107. DOI: 10.55648/1998-6920-2022-16-1-97-107.
2. Щербакова, Н. Г. Моделирование групповых взаимодействий комплексных систем. Обзор // Пробл. информ. 2022. № 3. С. 24–45. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-3-24-45.
3. Кальней, А. М. Оптимизация размещения контрольных устройств на каналах в сетях мониторинга // Пробл. информ. 2022. № 4. С. 28–38. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-4-28-38.
4. Родионов, А. С. Можно ли добиться дальнейшего ускорения расчета характеристик связности случайного графа? // Пробл. информ. 2022. № 4. С. 39–52. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-4-39-52.
5. Бакулина, М. П. Эффективное сжатие без потерь больших массивов информационных данных // Пробл. информ. 2022. № 4. С. 63–69. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-4-63-69.
6. Бредихин, С. В., Ляпунов, В. М., Щербакова, Н. Г. Гиперсеть научного соавторства. Анализ данных БД Ререс // Пробл. информ. 2022. № 4. С. 70–83. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-4-70-83.
7. Шахов, В. В., Чен, Х., Юргенсон, А. Н., Лошкарев, А. В. К вопросу оценки надежности линейных беспроводных сенсорных сетей // Пробл. информ. 2022. № 4. С. 120–128. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-4-120-128.
8. Ляхов, О. А. Отображение нескладируемых ресурсов в моделях календарного планирования проектов // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 120. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-72.
9. Токтошов, Г. Ы. Многокритериальные задачи оптимизации сетей инженерных коммуникаций // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 18. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-76.
10. Бакулина, М. П. Адаптивный метод сжатия бинарных изображений // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 117. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-66.
11. Рудометов С. В. Внешнее связывание имитационных моделей в системе MTSS // Тез. Междунар. конф. "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 121. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-75.

Участие в конференциях и совещаниях

1. 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences "SIBIRCON", (OPCS 2022), Novosibirsk, November 11–13, 2022 – 3 доклада (Монахов О. Г., Монахова Э. А., Мигов Д. А., Юргенсон А. Н., Шахов В. В., Родионов А. С.).
2. Intern. Conf. on Electrical, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), Male (Maldives), November 16–18, 2022 – 1 доклад (Монахова Э. А., Монахов О. Г.).
3. The 18th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS), Novosibirsk – Moscow – Issyk-Kul, July 20–30, 2022 – 2 доклада, из них 1 пленарный (Родионов А. С., Шахов В. В.).
4. IMCOM, Seoul (Korea), January 3–5, 2022 – 3 доклада (Родионов А. С., Кратов С. В., Шахов В. В., Юргенсон А. Н.).

5. 17th ISP Conference Mathematical Modeling and Simulation Systems (MODS2022), Москва, 14–16 ноября 2022 г. – 1 доклад (Ткачѳв К. В.).

6. Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2022" (МНЧ-2022), Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 4 доклада, из них 1 пленарный (Ляхов О. А., Токтошов, Г. Ы., Бакулина М. П., Рудометов С. В.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Родионов А. С.:

– член (сопредседатель) программного комитета "18th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS)", Novosibirsk – Moscow – Issyk-Kul, July 20–30, 2022,

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2021", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.,

– член программного комитета 16th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM), Seoul (Korea), January 3–5, 2022,

– член программного комитета 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON) (OPCS 2022), Novosibirsk, November 11–13, 2022;

2. Шахов В. В. – член программного комитета 16th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM), Seoul (Korea), January 3–5, 2022;

3. Токтошов Г. Ы. – член организационного комитета "18th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS) ", Novosibirsk – Moscow – Issyk-Kul, July 20–30, 2022;

4. Соколова О. Д. – ученый секретарь программного комитета "18th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS) ", Novosibirsk – Moscow – Issyk-Kul, July 20–30, 2022;

5. Юргенсон А. Н. – член организационного комитета 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON) (OPCS 2022), Novosibirsk, November 11–13, 2022.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 4

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 11

Публикаций, индексируемых в библиографической базе РИНЦ – 22

Докладов на конференциях – 13, в том числе 2 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 8

Кадровый состав

1. Родионов А. С.	зав. лаб.	д.т.н.
2. Бакулина М. П.	н.с.	к.ф.-м.н.
3. Бредихин С. В.	в.н.с.	к.т.н.
4. Волжанкина К. А.	м.н.с.	
5. Капустина Г. А.	ведущ. инженер	

6. Кратов С. В.	н.с.	
7. Ляпунов В. М.	ведущ. инженер	
8. Ляхов О. А.	н.с.	к.э.н.
9. Мигов Д. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
10. Моисеенко В. В.	н.с.	
11. Монахов О. Г.	в.н.с.	к.т.н.
12. Монахова Э. А.	с.н.с.	к.т.н.
13. Рудометов С. В.	н.с.	к.т.н.
14. Соколова О. Д.	с.н.с.	к.т.н.
15. Ткачёв К. В.	м.н.с.	
16. Токтошов Г. Ы.	н.с.	к.т.н.
17. Трофимова Л. В.	ведущ. инженер	
18. Шахов В. В.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
19. Щербакова Н. Г.	с.н.с.	
20. Юргенсон А. Н.	н.с.	к.ф.-м.н.

Педагогическая деятельность

Родионов А. С.	– профессор НГУ и СибГУТИ
Бакулина М. П.	– доцент НГУ
Токтошов Г. Ы.	– доцент СибГУТИ
Волжанкина К. А.	– ст. преподаватель ВКИ НГУ
Ткачёв К. В.	– ст. преподаватель ВКИ НГУ
Мигов Д. А.	– ст. преподаватель НГУ, доцент НГТУ
Шахов В. В.	– доцент НГТУ

Руководство студентами

Черепанов А. С.	– 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Родионов А. С.
Ятманов Р. Д.	– 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Родионов А. С.

Руководство аспирантами

Кальней А. М.	– 4-й год, ИВМиМГ, руководитель Родионов А. С.
---------------	--

Защита дипломов

Черепанов А. С.	– 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Родионов А. С.
-----------------	---

ЛАБОРАТОРИЯ СИНТЕЗА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Зав. лабораторией д.т.н. Малышкин В. Э.

Важнейшие достижения

Специализированные алгоритмы автоматического конструирования и исполнения высокопроизводительных параллельных программ для задач линейной алгебры с разреженными матрицами в системе LuNA

Беляев Н. А.

Разработаны специализированные алгоритмы конструирования и исполнения параллельных программ для системы LuNA, которые обеспечивают более высокую эффективность исполнения LuNA-программ для задач разреженной линейной алгебры. Ускорение достигается за счет того, что входная LuNA-программа проверяется на принадлежность к упомянутому классу задач, и если это так, то дальнейшая трансляция и исполнение программы осуществляются с использованием разработанных специализированных системных алгоритмов. Специализированная поддержка отдельных классов прикладных алгоритмов является стандартным способом повышения эффективности программ в системах параллельного программирования.

Основная идея разработанного решения базируется на распространенных в ручном параллельном программировании практиках реализации задач разреженной линейной алгебры. А именно, для множества вычислительных операций и переменных (фрагментов данных и вычислений LuNA-программы) формируется статически определенный граф информационно зависимых задач. Далее выполняется декомпозиция этого графа на множество подграфов по количеству вычислительных узлов. При разбиении минимизируются количество межузловых дуг и разница в количестве вершин на узел. Такое разбиение является известной задачей и решается с помощью пакета METIS. Далее на каждом вычислительном узле работает специализированная исполнительная система, выполняющая задачи в локальном графе готовности входных данных асинхронно в многопоточном режиме и асинхронно передающая необходимые данные соседним узлам.

На основе этого подхода была автоматически сконструирована тестовая параллельная программа описания на языке LuNA численного алгоритма матрично-векторного умножения разреженной матрицы на вектор. Производительность автоматически сконструированной программы лишь незначительно уступила реализации этого численного алгоритма из библиотеки Intel MKL

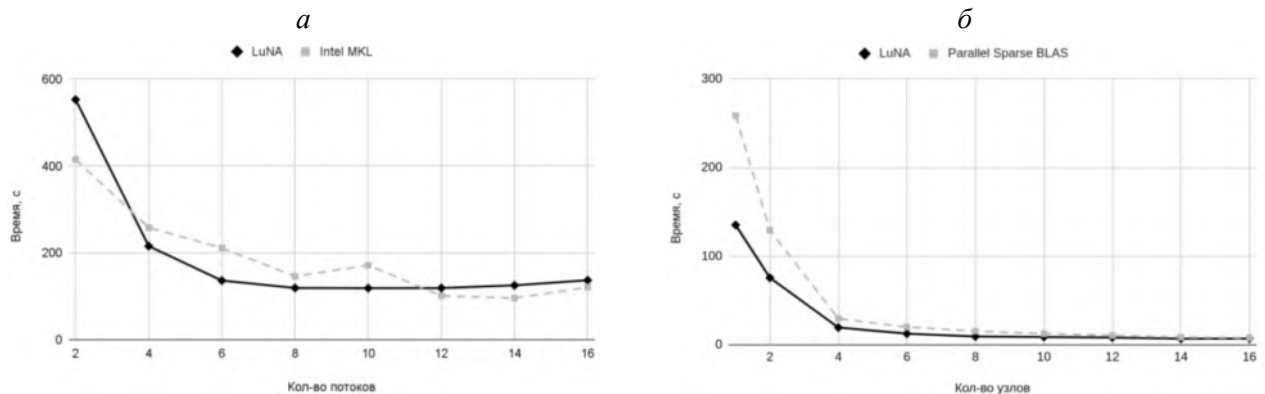


Рис. 1: Сравнение производительности параллельной программы, автоматически сконструированной системой LuNA с библиотечной реализацией параллельного умножения разреженной матрицы на вектор в составе библиотек Intel MKL (а) и Parallel Sparse BLAS (б)

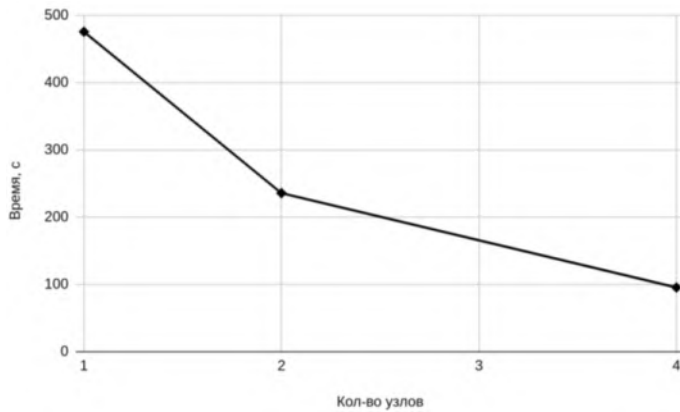


Рис. 2: Результаты измерения производительности параллельной программы, сконструированной системой LuNA по описанию алгоритма Гаусса –Зейделя предобусловливания разреженной СЛАУ

и превзошла производительность реализации из библиотеки Parallel Sparse BLAS (рис. 1), что является хорошим результатом в области автоматической генерации программ. Необходимо отметить, что разработка такой LuNA-программы существенно менее трудоемка, чем ручное программирование. Также на основе предложенного подхода реализован алгоритм предобусловливателя Гаусса – Зейделя для разреженной СЛАУ как пример задачи, не имеющей готового библиотечного решения, но попадающей в класс алгоритмов, реализуемых в рамках предложенного подхода. Тестирование показало высокий коэффициент распараллеливания сконструированной программы (рис. 2).

Результаты исследований опубликованы в работе

Беляев Н. А. Автоматическое конструирование высокопроизводительных параллельных программ для задач разреженной линейной алгебры в системе LuNA // Пробл. информ. 2022. № 3. С. 46–60. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-3-46-60.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершаемым в 2022 г. в соответствии с планом НИР института

Проект НИР № 1 "Суперкомпьютерные технологии решения больших задач естествознания, математические модели, методы анализа и оптимизации сложных информационных систем".

Номер государственной регистрации НИР 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 2022 г. Блок 2 "Разработка экспериментальных модулей и функциональных баз активных знаний для применения на суперкомпьютерах; реализация класса задач моделирования физической среды с использованием библиотеки клеточно-автоматных топологий и решение тестовых задач моделирования".

1. Разработана подсистема автоматизированного выбора алгоритма динамической балансировки нагрузки на вычислительные узлы в системе LuNA.

В научном численном моделировании на суперЭВМ часто возникает проблема статического или динамического обеспечения баланса вычислительной нагрузки. Эта проблема не имеет

эффективного универсального решения, вследствие чего на практике используются различные частные и эвристические алгоритмы балансировки нагрузки на вычислительные узлы. Несмотря на то, что эта тема хорошо разработана в литературе и имеется большое количество методов, алгоритмов и программ балансировки нагрузки, их применение в каждом конкретном случае представляет собой проблему. Даже настройка параметров подходящего алгоритма балансировки нагрузки может стать непреодолимым препятствием для пользователя суперЭВМ. Это обуславливает актуальность автоматического обеспечения балансировки нагрузки на узлы как подзадачи автоматического конструирования параллельных программ. Если в системе программирования имеется набор алгоритмов балансировки в виде, допускающем их автоматическое применение, то обозначенная проблема становится неактуальной для пользователя. В системе автоматического конструирования параллельных программ LuNA имеются средства для накопления и автоматического применения алгоритмов статической и динамической балансировки вычислительной нагрузки на узлы.

В рамках системы LuNA разработана модульная подсистема автоматизированного выбора алгоритма статической или динамической балансировки вычислительной нагрузки. Подсистема подразумевает наличие нескольких алгоритмов динамической балансировки нагрузки, возможно имеющих параметры (например, допустимое значение дисбаланса), а также наличие модуля выбора действующего алгоритма балансировки и его параметров (метабалансировщика). На текущем этапе выбор осуществляется вручную, а метабалансировщик реализует его. В дальнейшем планируется автоматический выбор. Метабалансировщик является слабосвязанным заменяемым модулем системы, а модульная организация алгоритмов балансировки допускает добавление в систему новых алгоритмов динамической балансировки нагрузки (расширяемость). Три имеющихся в системе LuNA алгоритма балансировки нагрузки (один статический и два динамических) были оформлены в качестве таких модулей.

Для проверки работоспособности предложенной схемы на примере различных задач было выполнено экспериментальное исследование зависимости времени выполнения задач от алгоритма балансировки нагрузки и его параметров. Тестирование производилось на кластере Информационно-вычислительного центра Новосибирского государственного университета. Характеристика каждого узла: 12 ядер и 24 Гб ОЗУ.

Результаты экспериментального исследования приведены в табл. 1. Они носят предварительный характер, однако подтверждают, что в различных условиях предпочтительными оказываются разные алгоритмы динамической балансировки нагрузки или значения параметров этих алгоритмов. Система LuNA может выступать в качестве основы для накопления различных алгоритмов динамической балансировки нагрузки и экспериментального исследования подходов к автоматизации выбора этих алгоритмов из числа имеющихся и настройки их параметров.

2. Разработан инструментарий отладки фрагментированных программ на основе подхода "посмертный анализ" (`luna_trace`). Созданный инструмент способен обнаруживать ряд часто встречающихся семантических ошибок в программах для системы LuNA.

При использовании системы LuNA для конструирования численных параллельных программ существует проблема отладки. Отчасти она решается с использованием существующих средств и подходов, но для языка программирования LuNA, на котором пользователи составляют программы в соответствующей системе, характерны собственные логические ошибки, не имеющие

Таблица 1: Время выполнения программы в зависимости от алгоритма балансировки нагрузки и его параметров (NB – без балансировки, ST – статическая балансировка, WR – алгоритм Work Requesting, RB – алгоритм Rope of Beads)

Тип	Кол-во узлов	Параметры балансировки	Результат, сек
NB	1		128.88
WR	2	Количество соседей – 2	129.02
WR	4	Количество соседей – 2	97.94
WR	4	Количество соседей – 4	93.54
ST	2		129.92
ST	4		88.47
ST+WR	2	Количество соседей – 2	130.19
ST+WR	4	Количество соседей – 2	89.32
ST+WR	4	Количество соседей – 4	117.53
RB	2	Подотрезков – 20	130.59
RB	2	Подотрезков – 60	137.63
RB	4	Подотрезков – 20	91.57
RB	4	Подотрезков – 60	93.40
RB+WR	2	Подотрезков – 20; количество соседей – 2	128.76
RB+WR	2	Подотрезков – 60; количество соседей – 2	130.23
RB+WR	4	Подотрезков – 20; количество соседей – 2	92.86
RB+WR	4	Подотрезков – 20; количество соседей – 4	95.27
RB+WR	4	Подотрезков – 60; количество соседей – 2	93.17
RB+WR	4	Подотрезков – 60; количество соседей – 4	97.73

взаимно однозначного соответствия с ошибками в императивных языках, равно как и в параллельных программах, использующих MPI, OpenMP или другие распространенные технологии. В связи с этим требуются специфичные для фрагментированных программ средства отладки.

Компилятор языка LuNA в результате серии преобразований выдает на выходе код на языке C++, который далее можно транслировать каким-либо известным компилятором (например, gcc). Поскольку для программ на C++ создано множество разнообразных инструментов отладки, то можно пытаться отлаживать данное промежуточное представление в виде C++-кода. Но поиск ошибок в таком C++-коде традиционными средствами не решает проблему отладки полностью. Причина заключается в том, что пользователю трудно сопоставить данную C++-программу с исходной LuNA-программой. В этой связи известные диалоговые отладчики (gdb, TotalView, Arm DDT) не подходят для задачи отладки фрагментированных программ. К тому же в случае "больших" вычислительных программ предпочтительно автоматизированное средство отладки, выдающее список найденных ошибок без участия пользователя или с минимальным участием.

К настоящему времени создано инструментальное средство "посмертного анализа" luna_trace, при котором во время выполнения LuNA-программы журналируется и затем анализируется информация о ходе исполнения программы. Средство способно обнаруживать ошибки:

- множественной инициализации одного фрагмента данных несколькими фрагментами вычислений;
- отсутствия инициализации фрагмента данных, являющегося входным для какого-либо фрагмента вычислений;
- циклической зависимости по данным между фрагментами вычислений.

```
Following CFs appear to be root cause of the system hang:

set(b, a * a) [./root.fa:11] never finished
main
  in sub main() [./root.fa:9]

Awaited DF a
full name a, a declared in sub main
- - - -

2 more CFs nnever finished but had data dependences on other hang CFs
```

Рис. 3: Вывод инструментального средства luna_trace

Кроме того, инструментальное средство обнаруживает факт зависания фрагментированной программы и автоматически прерывает ее в таком случае.

Программное средство написано на языке программирования Python и предоставляет пользователю интерфейс командной строки. Оно предназначено для анализа файлов трассы, генерируемых при выполнении фрагментированных программ исполнительной системой LuNA, с целью поиска некоторых типичных семантических ошибок и анализа их причин.

По ходу работы параллельного MPI-приложения, в которое в итоге транслируется LuNA-программа, на каждом процессе собирается трасса с информацией о запускаемых фрагментах вычислений, а также об обрабатываемых ими входных и выходных фрагментах данных. Созданное программное средство производит автоматическую агрегацию этих трасс и выводит пользователю сообщение об ошибке с исчерпывающей информацией о месте и причине (рис. 3).

Средство автоматизированного обнаружения семантических ошибок luna_trace может быть использовано в учреждениях науки, университетах и организациях, тематика которых связана с разработкой параллельных программ численного моделирования.

3. Разработана фрагментированная реализация метода частиц-в-ячейках (PIC) с использованием библиотеки управления распределенными данными Didal (disitributed data library). По результатам тестирования на вычислительном кластере с распределенной памятью производительность полученной фрагментированной реализации оказалась выше, чем у существующей MPI-реализации, при этом масштабируемость обеих реализаций оказалась сравнимой.

Библиотека управления распределенными данными Didal предназначена для упрощения разработки фрагментированных программ для вычислительных систем с распределенной памятью. С использованием библиотеки была разработана фрагментированная реализация PIC (particle-in-cell) метода для задачи моделирования динамики самогравитирующего пылевого облака. На рис. 4 показан результат работы программы (данные визуализированы с помощью визуализатора Paraview).

Тестирование производительности полученной фрагментированной реализации было проведено на кластере МВС-10П ОП2 МСЦ РАН (2 процессора Intel Xeon Gold 6248R (Cascade Lake) на вычислительный узел, коммуникационная сеть Intel Omni-Path). Для сравнения использовалась аналогичная MPI-реализация этой же задачи. В первом варианте (рис. 5) использовался фиксированный размер задачи со следующими параметрами: сетка 128^3 ячеек, 10^7 частиц, 8^3 фраг-

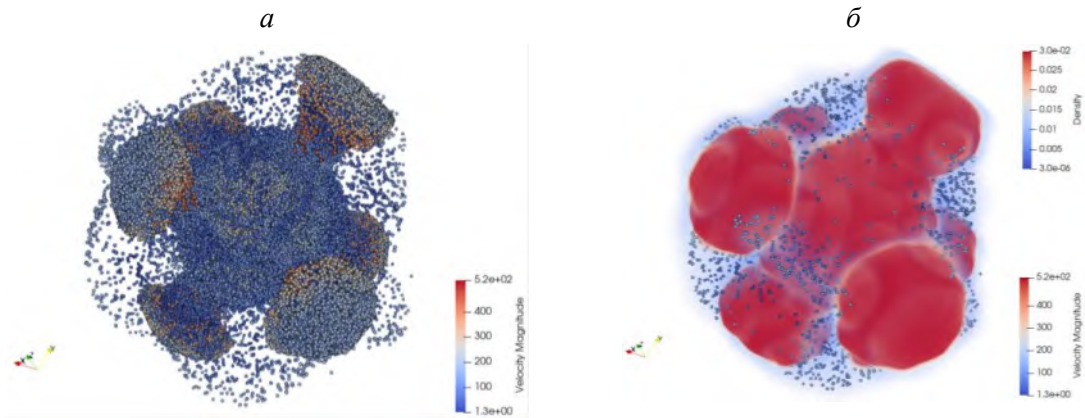


Рис. 4: Результат работы фрагментированной реализации PIC метода (на одном из временных шагов): распределение частиц (а); распределение частиц и плотности (б)

ментов (для фрагментированной реализации), 10^3 шагов по времени, частицы изначально распределены в облаке в центре расчетной области. Во втором варианте (рис. б) использован фиксиро-

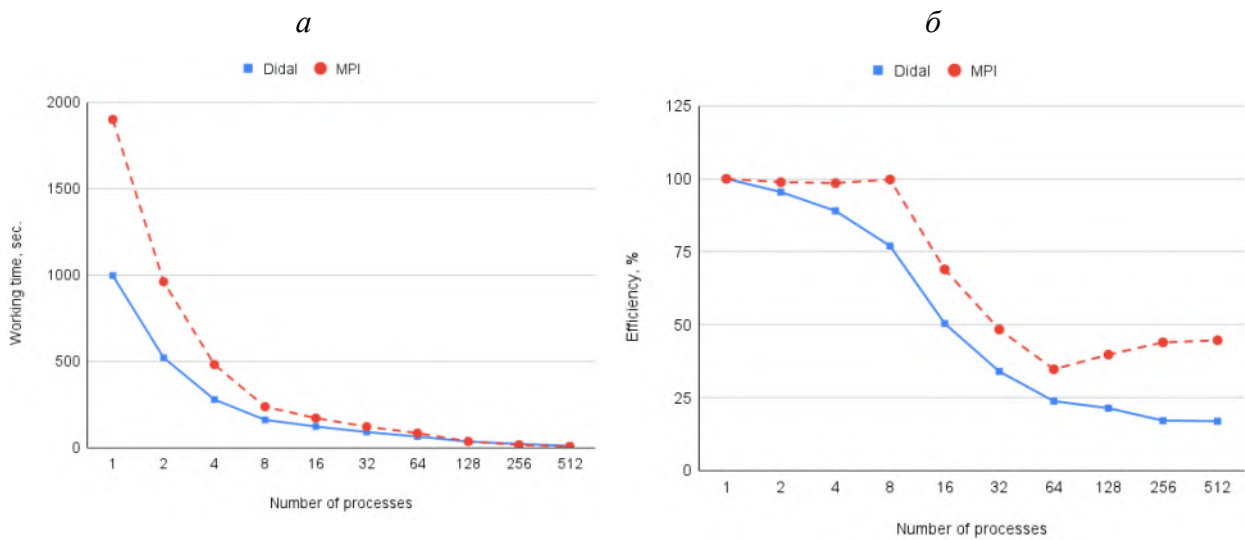


Рис. 5: Фиксированный размер задачи, время работы (а) и эффективность (б)

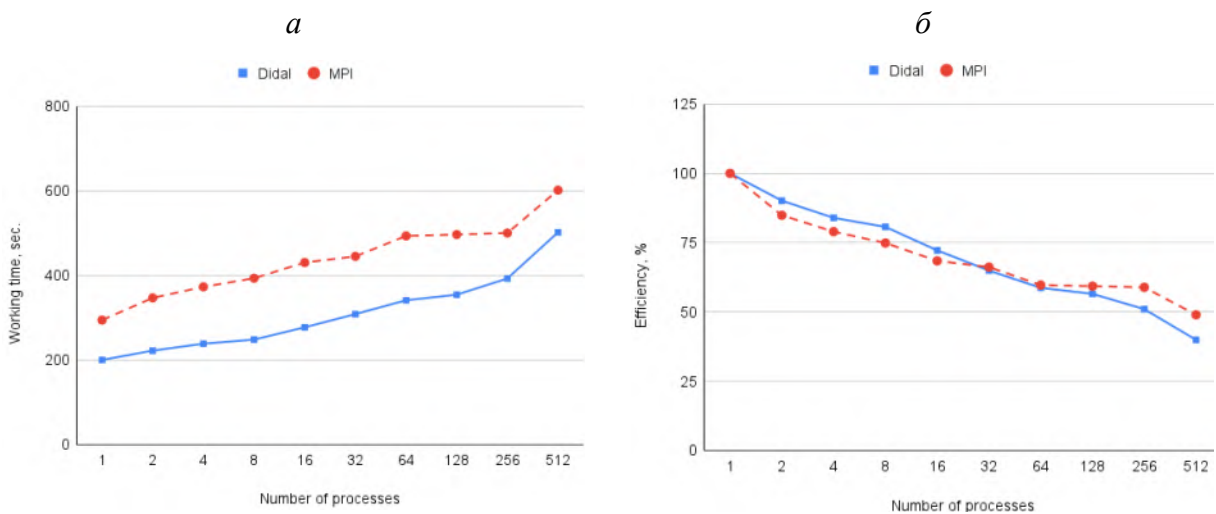


Рис. 6: Фиксированный размер задачи в каждом процессе, время работы (а) и эффективность (б)

ванный размер задачи на процесс (так называемая слабая масштабируемость) со следующими параметрами в каждом процессе: сетка 128^3 ячеек, 10^6 частиц, 8^3 фрагментов (для фрагментированной реализации), 10^3 шагов по времени, частицы изначально распределены равномерно в расчетной области.

Полученные результаты показывают, что фрагментированная реализация имеет лучшую производительность, чем аналогичная MPI-реализация, и сравнимую масштабируемость. Связано это как с улучшением работы с кэшем вследствие фрагментации, так и с тем, что Didal автоматически поддерживает асинхронные коммуникации, что позволяет обеспечить наложение коммуникаций и вычислений.

Полученные результаты показывают, что библиотека Didal может использоваться для создания эффективных фрагментированных реализаций сложных численных задач. В дальнейших планах – развитие библиотеки (в том числе реализация динамической балансировки нагрузки как универсальных алгоритмов, так и конкретно для PIC метода) и реализация с ее помощью фрагментированных версий других численных задач.

4. Разработан метод кодирования нуклеотидных последовательностей для использования библиотеки cuSTAR, реализующей ассоциативные вычисления на графических ускорителях, для решения задач биоинформатики. Проведен анализ способов в зависимости от размера занимаемой памяти и времени поиска отдельного нуклеотида в последовательности.

За последние несколько лет обработка генома стала широко востребованной задачей. Различными вариантами обработки занимаются как частные лаборатории (от выполнения ДНК-тестов до создания генетических паспортов), так и научные коллективы. При этом и первые, и вторые обрабатывают большие объемы данных как за счет количества образцов, так и за счет длины этих образцов: от десятков тысяч до нескольких миллиардов нуклеотидов. Кроме того, расширяется область применения молекулярно-генетических исследований (биомедицина, фармакология, нанобиоинженерия и т. д.). Заметим, что огромная часть вычислений связана с поиском отдельных нуклеотидов или их последовательностей как в большой последовательности, так и в большом числе последовательностей.

Для таких вычислений целесообразно использовать ассоциативные параллельные архитектуры, поскольку они специализируются на быстром поиске. Однако такие системы слабо представлены на рынке компьютерной техники в отличие от широкодоступных графических ускорителей. Библиотека cuSTAR была разработана для реализации абстрактной модели ассоциативных вычислений (STAR-машины) на графических ускорителях.

Данная работа представляет возможные способы организации данных биоинформатики для обработки системой cuSTAR. Это первая работа из предполагаемого цикла разработки ассоциативных алгоритмов для решения задач биоинформатики.

Последовательности нуклеотидов повсеместно представляются массивом символьного типа. Однако такое представление невозможно использовать в системе cuSTAR, поскольку типы данных для ассоциативной обработки в этой системе – это бинарные таблицы, столбцы и строки. Поэтому символы "A", "C", "G", "T", а также символ "-" для обозначения неизвестного или произвольного нуклеотида кодируются бинарными словами.

Первое представление использует только 3 бита, поэтому оно названо "mem_opt" (оптимальное по занимаемой памяти). Второе представление, time_opt, использует 4 бита: "1000" для аденина,

Таблица 2: Оценка размера памяти, необходимой для хранения нуклеотидных последовательностей разной длины

Метод	CPU (B)	GPU (KB)					
		100	1000	10000	100000	1000000	10000000
Mem_opt	72	0.05	0.38	3.68	36.63	366.21	3662.11
Time_opt	88	0.06	0.5	4.91	48.84	488.28	4882.81
char[]	8	0.1	0.98	9.77	97.66	976.56	9793.63

"0100" для цитазина, "0010" для гуанина и "0001" для тинина. С одной стороны, при таком представлении объем памяти увеличивается на 22 % на CPU и на 33 % на GPU (табл. 2). С другой стороны, каждому нуклеотиду соответствует определенный столбец таблицы, позиции символа "-" легко определяются. Для определения всех позиций заданного нуклеотида в последовательности вместо поиска слова в таблице требуется определить номер столбца, который этому нуклеотиду соответствует, что существенно сокращает время выполнения операции (рис. 7). При этом стоит отметить, что `time_opt` занимает в 2 раза меньше памяти на GPU, чем при стандартном представлении последовательности нуклеотидов в виде символьного массива.

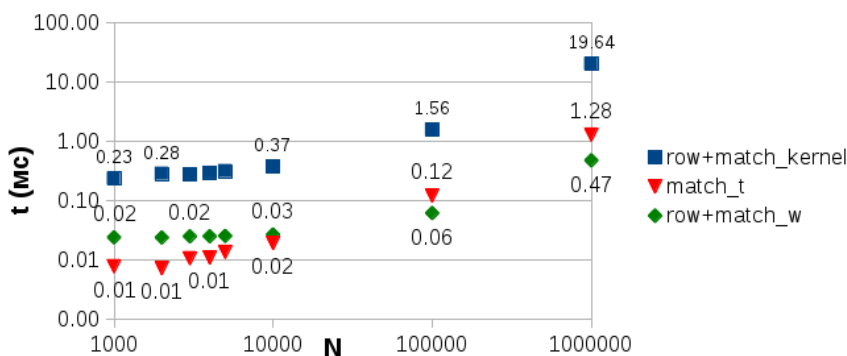


Рис. 7: Время поиска нуклеотида в последовательности для `mem_opt` (`row+match_kernel`) и для `time_opt` (`match_t`, `row+match_w`)

Таким образом, предложенные способы кодирования данных компактнее стандартного представления в виде массива символов. Представление `time_opt` позволяет проводить поиск нуклеотидов в последовательности на порядок быстрее, чем процедура из библиотеки стандартных ассоциативных алгоритмов. В то же время представление `mem_opt` предпочтительней в случае, если используется представление нуклеотидной последовательности в виде графовой структуры, например графа де Брёйна.

5. Созданы программные модули, реализующие имитационную модель разделения двух жидких фаз на поверхности вещества, с использованием библиотеки клеточно-автоматных топологий (под топологией понимается структура регулярного графа, вершинам которого соответствуют клетки массива, а ребрам – отношение соседства). Модули протестированы в последовательном режиме и на многопроцессорном вычислителе с общей памятью.

Разработаны программные модули – препроцессор, симулятор и постпроцессор, – реализующие дискретную имитационную модель разделения двух жидких фаз на поверхности вещества. Основой модели является двумерный синхронный клеточный автомат на квадратной решетке. Алфавит состояний клеток булев. Операционный режим клеточного автомата синхронный. При создании программных модулей применялась разрабатываемая в лаборатории на протяжении нескольких последних лет библиотека клеточно-автоматных топологий, предназначенная для

удобной и технологичной программной реализации клеточных автоматов как в последовательном варианте, так и на параллельных вычислительных системах.

Библиотека предоставляет разработанным модулям довольно широкий круг возможностей. В симуляторе функционал библиотеки используется для обеспечения обмена данными между клетками автомата на каждой итерации в соответствии с топологией клеточного массива, выбранной из расширяемого списка. Инициализация клеток массива при подготовке исходных данных препроцессором также реализуется библиотечными функциями. Постпроцессору библиотека обеспечивает извлечение состояний клеток для получения результата моделирования. Сохранение клеточного массива в файл, как и чтение из файла сохраненного клеточного массива во всех трех модулях, также производится путем обращения к библиотеке. Прикладному программисту остается только реализовать функции переходов клетки.

Работоспособность разработанных модулей и подключенных к ним библиотечных функций протестирована в последовательном режиме и на многопроцессорном вычислителе с общей памятью. С помощью новых модулей проведено компьютерное моделирование процесса коагуляции в эмульсии. На рис. 8 приведены результаты этого моделирования. Клеточный массив имеет размер 1000×1000 клеток, состояние каждой из которых показывает, какая из двух несмешивающихся фаз занимает эту клетку. В начальный момент времени ($t = 0$) фазы, окрашенные на рисунке черным и белым цветами, соответственно распределены по клеткам в случайном порядке равновероятно. В ходе моделирования ($t = 100, \dots, 10000$) наблюдается процесс коагуляции фаз,

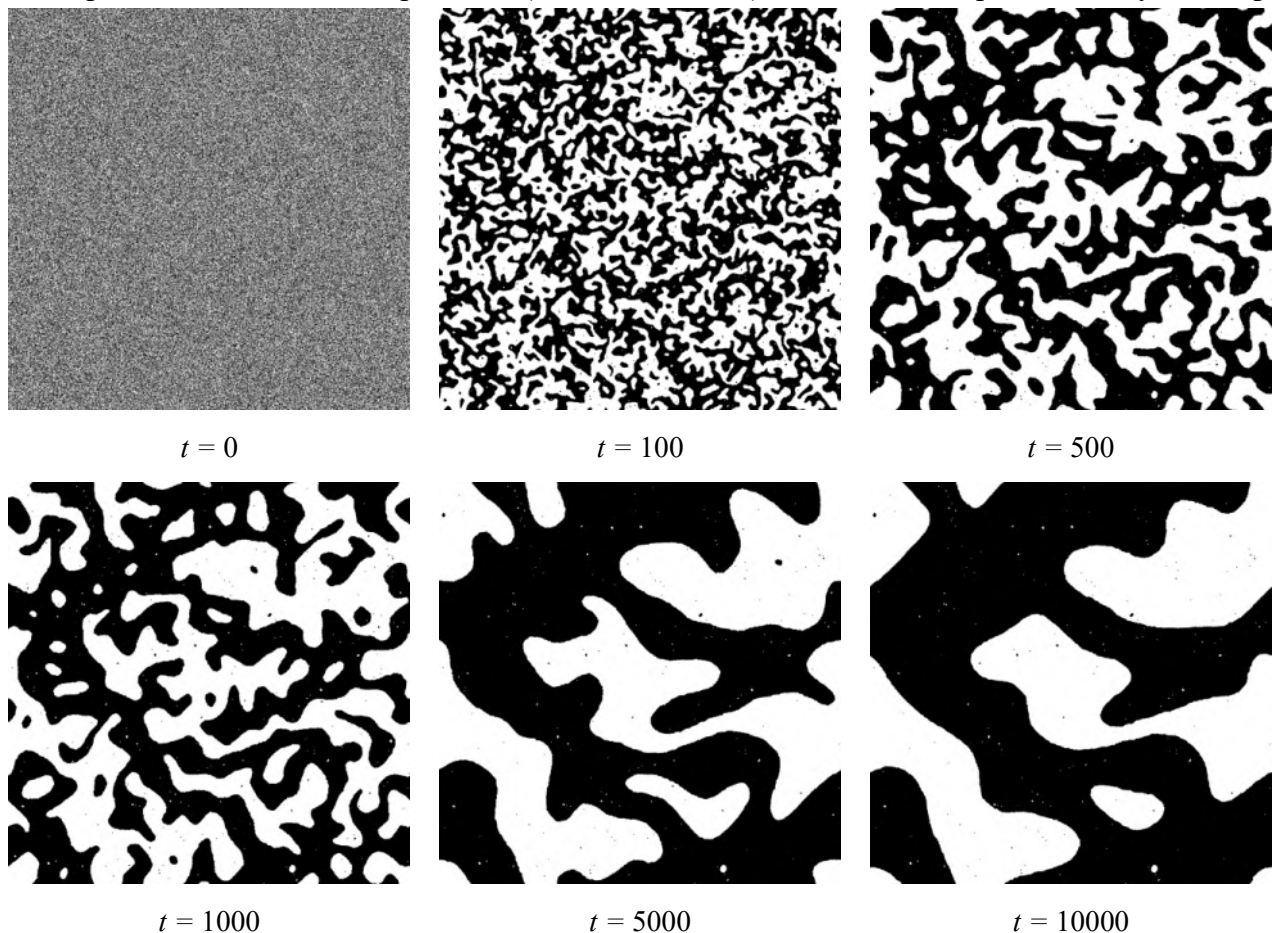


Рис. 8: Результаты компьютерного моделирования разделения двух жидких фаз на поверхности вещества

составляющих эмульсию. Полученный результат подтвердил, что использование библиотеки клеточно-автоматных топологий в имитационном моделировании повышает качество программного кода и существенно сокращает трудозатраты квалифицированных программистов, требуемые для создания программной реализации клеточного автомата.

б. Разработана методика представления ряда свойств целенаправленно развивающихся систем в виде геометрических объектов при их моделировании (продолжающаяся разработка).

За отчетный период в рамках продолжения прошлогодних работ удалось представить некоторые новые свойства развивающихся систем в виде геометрических объектов. В сочетании с представлением траекторий развития как кривых в пространстве факторов (достижение 2021 г.) удалось представить процессы развития для двух стратегий разработки программных систем – последовательное и итеративное. В результате определены требования к технологическому инструментарию менеджера проекта, а также подготовлены спецификации этого инструментария как задание на разработку программной системы поддержки. Нашла свое подтверждение выдвинутая в прошлом году гипотеза о том, что геометрическое представление может быть использовано для общей модели системы автономных фрагментов, реализующих наиболее подходящие вычислительные системы.

В качестве иллюстративных примеров графического герметичного представления развивающихся систем на рис. 9–11 показаны схемы выполнения проектов из области разработки программных систем.

Главное преимущество развиваемого подхода относится к автоматизации деятельности менеджера проектов в части планирования и контроля выполнения планов, что достигается за счет



Рис. 9: Детализированное представление развития программного проекта

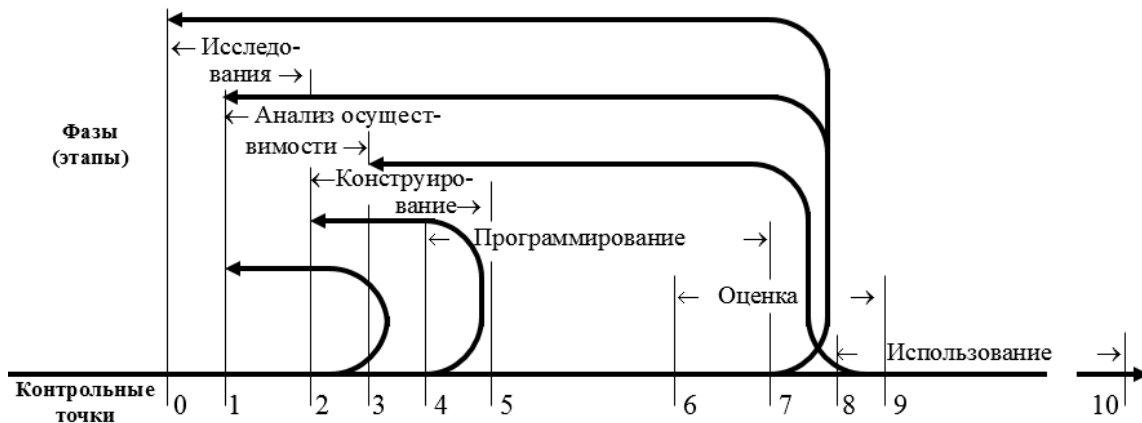


Рис. 10: Учет итеративности в модели фазы – функции Гантера

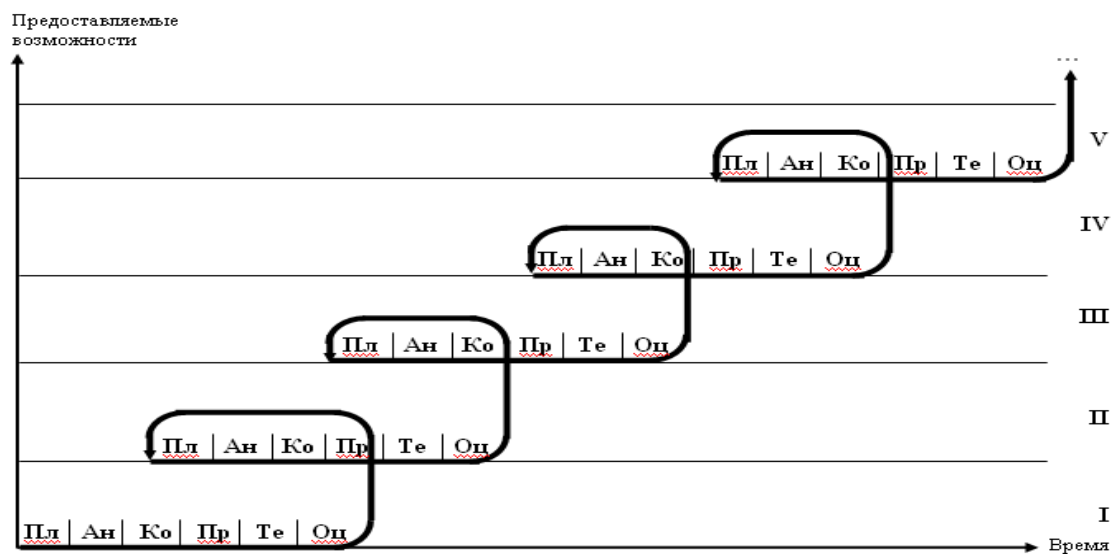


Рис. 11: Пять итераций цикла развития проекта в спиральной модели Г. Буча. Обозначения этапов, повторяющихся на каждой итерации: Пл – планирование, Ан – анализ, Ко – конструирование, Пр – программирование, Те – тестирование, Оц – оценка

задания семантической нагрузки и требуемых действий для элементов геометрического представления развития проекта. Дополнительные преимущества связаны с приписыванием элементам геометрического представления различных содержательных функций, поддерживающих деятельность менеджера.

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Malyshkin, V., Vlasenko, A., Michurov, M. Automated debugging of fragmented programs in LuNA system / D. Balandin, K. Barkalov, I. Meyerov (eds.) *Mathematical Modeling and Supercomputer Technologies. MMST 2022. Communications in Computer and Information Science. Vol. 1750.* Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24145-1_22.

2. Malyshkin, V. Parallel computing technologies. Preface // *J. Supercomput.* 2022. Vol. 78, iss. 4. P. 6054–6055. DOI: 10.1007/s11227-011-0615-3.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Беляев, Н. А. Автоматическое конструирование высокопроизводительных параллельных программ для задач разреженной линейной алгебры в системе LuNA // Пробл. информ. 2022. № 3. С. 46–60. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-3-46-60.
2. Малышкин, В. Э., Перепёлкин, В. А., Чмиль, А. С. Разработка подсистемы автоматизированного применения алгоритмов динамической балансировки нагрузки для системы LuNA // Пробл. информ. 2022. № 4. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-4-107-119.
3. Власенко, А. Ю., Мичуров, М. А., Мустафин, Д. Э. Автоматизация отладки и балансировки нагрузки во фрагментированных программах // Пробл. информ. 2022. № 3. С. 61–76. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-3-61-76.
4. Медведев, Ю. Г. Имитационное моделирование прохождения ламинарного потока через локальное сужение в трубе // Пробл. информ. 2022. № 2. С. 44–52. DOI: 10.24412/2073-0667-2022-2-44-52.
5. Снытникова, Т. В. Библиотека реализации ассоциативных вычислений на графических ускорителях cuSTAR: представление данных для задач биоинформатики // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 97. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-32.
6. Скопин, И. Н. Концепция модельного времени развивающихся систем // Марчуковские научные чтения. 2022 : Тез. Междунар. конф., 3–7 окт. 2022 г. С. 96. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-31.
7. Щукин, Г. А. Параллельная фрагментированная реализация метода частиц-в-ячейках (PIC) с помощью библиотеки управления распределенными данными Didal // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тез. Междунар. конф., 3–7 окт. 2022 г. С. 100. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-36.

Участие в конференциях и совещаниях

1. 39-я Всероссийская летняя молодежная школа-конференция по параллельному программированию, 4–15 июля 2022 г., Новосибирск – 2 пленарных доклада (Перепёлкин В. А., Медведев Ю. Г.).
2. 16-я Международная научная конференция "Параллельные вычислительные технологии 2022" (ПаВТ'2022), г. Дубна (Московская обл.), 29–31 марта 2022 г. – 1 доклад (Киреев С. Е.).
3. Национальный Суперкомпьютерный Форум (НСКФ-2022), Переславль-Залесский, 29 ноября – 2 декабря 2022 г. – 1 доклад (Скопин И. Н.).
4. 5-я Международный образовательный форум "Алтай – Азия 2022: Евразийское образовательное пространство – новые вызовы и лучшие практики", Барнаул, 15–17 сентября 2022 г. – 1 доклад (Арыков С. Б.).
5. The 3rd International Workshop on advanced information and computation technologies and systems, Irkutsk, December, 2022 – 1 доклад (Скопин И. Н.).
6. 20-я Открытая всероссийская конференция "Преподавание информационных технологий в Российской Федерации – 2022", Москва, 19–20 мая 2022 г. – 1 доклад (Скопин И. Н.).
7. Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 3 доклада (Скопин И. Н., Снытникова Т. В., Щукин Г. А.).

8. Международная конференция "Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии", Нижний Новгород, 14–17 ноября – 1 доклад (Власенко А. Ю., Малышкин В. Э.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Малышкин В. Э.:

– член организационного комитета 39-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 4–15 июля 2022 г.,

– член организационного комитета 38-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 31 января – 4 февраля 2022 г.;

2. Арыков С. Б. – член организационного комитета 39-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 4–15 июля 2022 г.;

3. Власенко А. Ю.:

– член организационного комитета 39-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 4–15 июля 2022 г.,

– член организационного комитета 38-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 31 января – 4 февраля 2022 г.;

4. Городничев М.А.:

– член организационного комитета 39-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 4–15 июля 2022 г.,

– член организационного комитета 38-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 31 января – 4 февраля 2022 г.;

– член организационного комитета конференции "Установки мегасайнс и медиумсайнс: вопросы диверсификации программно-аппаратного обеспечения и информационной безопасности", Новосибирск, 12–13 декабря 2022 г.

5. Киреев С. Е.:

– член организационного комитета 39-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 4–15 июля 2022 г.,

– член организационного комитета 38-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 31 января – 4 февраля 2022 г.;

6. Калгин К. В. – член организационного комитета 39-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 4–15 июля 2022 г.,

7. Маркова В. П.:

– член организационного комитета 39-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 4–15 июля 2022 г.,

– член организационного комитета 38-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 31 января – 4 февраля 2022 г.;

8. Медведев Ю. Г.:

– член организационного комитета 14-й Международной конференции "Новые информационные технологии в исследовании сложных структур" (ИСАМ-2022), оз. Байкал, 19–24 сентября 2022 г.,

– член программного комитета 14-й Международной конференции "Новые информационные технологии в исследовании сложных структур" (ИСАМ-2022), оз. Байкал, 19–24 сентября 2022 г.,

9. Перепёлкин В. А.:

– член организационного комитета 39-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 4–15 июля 2022 г.,

– член организационного комитета 38-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 31 января – 4 февраля 2022 г.;

10. Щукин Г.А.:

– член организационного комитета 39-й Всероссийской летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 4–15 июля 2022 г.,

– член организационного комитета 38-й Зимней школы ИВМиМГ СО РАН по параллельному программированию, Новосибирск, 31 января – 4 февраля 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 9

Докладов на конференциях – 11, в том числе 2 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 19

Кадровый состав

1. Малышкин В. Э.	г.н.с., зав. лабораторией	д.т.н.
2. Арыков С. Б.	м.н.с.	к.ф.-м.н.
3. Власенко А. Ю.	н.с.	к.т.н.
4. Городничев М. А.	н.с.	
5. Калгин К. В.	м.н.с.	к.ф.-м.н.
6. Киреев С. Е.	н.с.	
7. Маркова В. П.	с.н.с.	к.т.н.
8. Медведев Ю. Г.	с.н.с.	к.т.н.
9. Перепёлкин В. А.	н.с.	
10. Савукова В. А.	ст. техник	
11. Скопин И. Н.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
12. Снытникова Т. В.	м.н.с.	к.т.н.
13. Щукин Г. А.	н.с.	

Педагогическая деятельность

Малышкин В. Э.	– профессор, зав. кафедрой, НГУ; профессор, зав. кафедрой НГТУ
Арыков С. Б.	– доцент НГТУ
Власенко А. Ю.	– доцент НГУ
Маркова В. П.	– доцент НГУ, НГТУ
Медведев Ю. Г.	– доцент НГУ
Городничев М. А.	– ст. преподаватель НГУ, ассистент НГТУ
Калгин К. В.	– ст. преподаватель НГУ
Киреев С. Е.	– ст. преподаватель НГУ

- Перепёлкин В. А. – ст. преподаватель НГУ, НГТУ
Щукин Г. А. – ассистент НГТУ

Руководство студентами

- Абрамушкина Е. С. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Алексейчук С. Д. – 3-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Балашов А. А. – 3-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Баранов И. Н. – 1-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Белявцев Б. В. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Богданович П. Ю. – 3-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Болдырев С. Д. – 3-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Бондарев В. Д. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Медведев Ю. Г.
Брусникин М. А. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Бурнышев Е. К. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Медведев Ю. Г.
Валитов А. А. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Васильев И. А. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Скопин И. Н.
Галишева К. А. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Гемуев А. Б. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Глебов Т. В. – 3-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Голиков М. О. – 2-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Дастай-оол С. А. – 3-й курс, 4-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Городничев М. А.
Дорн А. А. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Дягилев М. А. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Еделев А. О. – 3-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Ефимцев Ф. А. – 1-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Закиров В. К. – 2-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Ивакин А. О. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Иванченко Д. В. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Капралова Р. Е. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Квашнин А. А. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Кирсанов И. Д. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Скопин И. Н.
Киселев К. С. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Клейменов Д. И. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Скопин И. Н.
Колесников А. А. – 3-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Котенок В. И. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Скопин И. Н.
Кразер В. Л. – 3-й курс ММФ НГУ, руководитель Скопин И. Н.
Крупская В. А. – 1-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Кудрявцев А. А. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Кузнецов К. В. – 3-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Курбатов М. А. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Власенко А. Ю.
Лебедев Н. В. – 4-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Левченко К. К. – 1-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Леонтьева М. К. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Медведев Ю. Г.

- Лямин А. С. – 2-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Малханов В. В. – 2-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Матус Н. Е. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Мичуров М. А. – 1-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Власенко А. Ю.
Морозов Р. С. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Муратов М. А. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Мухиддинов Д. Х. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Скопин И. Н.
Нуштаев Ю. Ю. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Пирожков А. К. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Половникова П. С. – 4-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Попов Р. Д. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Медведев Ю. Г.
Пчелинцев С. Е. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Медведев Ю. Г.
Синюков В. К. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Скрипникова В. С. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Медведев Ю. Г.
Спирин В. А. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Толкачева Р. Э. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Трубицына Ю. С. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Медведев Ю. Г.
Трынкин М. А. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Уточкин С. Е. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Федоров В. Е. – 3-й курс ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Хайруллаев У. Б. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Скопин И. Н.
Царев В. Д. – 3-й курс ФИТ НГУ, руководитель Власенко А. Ю.
Чемагин А. С. – 1-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Шевченко С. В. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Скопин И. Н.

Руководство аспирантами

- Артюхов А. А. – 2-й курс аспирантуры ФИТ НГУ, руководитель Малышкин В. Э.
Кудинов А. Ю. – 1-й курс аспирантуры ИВМиМГ СО РАН, руководитель Малышкин В. Э.

Защита дипломов

- Баранов И. Н. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Ефимцев Ф. А. – бакалавр ФПМИ НГТУ, руководитель Городничев М. А.
Кошкарев А. В. – бакалавр ФПМИ НГТУ, руководитель Арыков С. Б.
Крупская В. А. – бакалавр ФПМИ НГТУ, руководитель Городничев М. А.
Кудинов А. Ю. – магистр ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Левченко К. К. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.
Мичуров М. А. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Власенко А. Ю.
Мустафин Д. Э. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Власенко А. Ю.
Налепова Е. Д. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Городничев М. А.
Чемагин А. С. – бакалавр ФИТ НГУ, руководитель Киреев С. Е.
Чмиль А. В. – магистр ФИТ НГУ, руководитель Перепёлкин В. А.

ЛАБОРАТОРИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

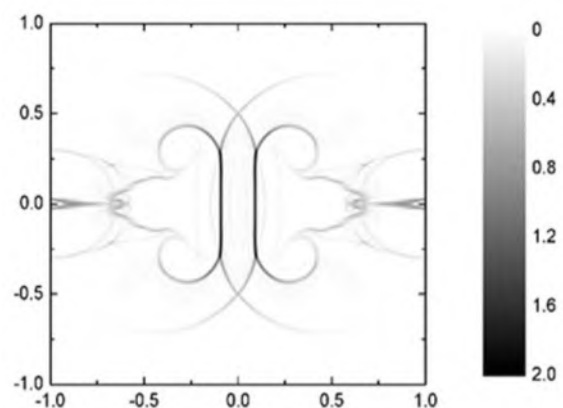
Зав. лабораторией к.ф.-м.н. Черных И. Г.

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

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

Использование современных суперЭВМ накладывает значительные ограничения на минимизацию межпроцессных коммуникаций при реализации программных кодов на архитектурах с распределенной памятью. С использованием технологии Coarray Fortran был разработан новый программный код, масштабируемость которого достигает 92 % при использовании 192 процессоров, что соответствует MPI кодам. Характерное число потоков, выполняющихся над общим полем памяти в современных суперЭВМ, достигает нескольких сотен. Для повышения производительности многопоточной программы были использованы шаблоны компоновки данных Intel SDLT и средства автоматической векторизации современного стандарта OpenMP на основе технологий AVX-512. Их использование позволило на порядок повысить производительность вычислений в рамках одного процесса. В то же время повышение производительности требует значительного увеличения энергопотребления процессора. Нами разработана пошаговая методология расчета энергопотребления с использованием аппаратных возможностей Intel и программного обеспечения Intel VTune с оценкой углеродного следа от высокопроизводительного оборудования с водяным охлаждением при его вычислительной нагрузке кодами для моделирования лабораторной и космической плазмы. Использование систем с жидкостным охлаждением позволило на 25 % снизить энергопотребление по сравнению с воздушным охлаждением. Использование методики расчета энергопотребления позволяет найти оптимальное с точки зрения значения флорпс/Ватт число ядер в каждом узле используемого суперкомпьютера для проведения вычислительных экспериментов. Таким образом, разработана методика разработки масштабируемых программных кодов для моделирования лабораторной и космической плазмы с учетом оценки вклада в углеродный след.

Рис. 1: Шлирен безразмерной функции плотности в экваториальной плоскости при взаимодействии двух релятивистских джетов



Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Prigarin, V., Sapetina, A., Ulyanichev, I., Zavyalov, O. A New parallel code based on a simple piecewise parabolic method for numerical modeling of colliding flows in relativistic hydrodynamics // Math. 2022. V. 10 (11). Art. Num. 1865.

2. Akimova, E., Misilov, V., Kulikov, I., Chernykh, I. OMPEGAS: Optimized relativistic code for multicore architecture // *Math.* 2022. V. 10, iss. 11. Art. Num. 2546.

3. Chernykh, I., Kulikov, I., Vshivkov, V., Genrikh, E., Weins, D., Dudnikova, G., Chernoshtanov, I., Boronina, M. Energy efficiency of a new parallel PIC code for numerical simulation of plasma dynamics in open trap // *Math.* 2022. V. 10, iss. 11. Art. Num. 3684.

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. Национальный Суперкомпьютерный Форум (НСКФ-2022), Переславль-Залесский (Ярославская обл.), 29 ноября – 2 декабря 2022 г.

2. "Challenges and Innovations in Computational Astrophysics IV", виртуальный формат, 21–23 ноября 2022 г.

3. Prospects for Low Frequency Radio Astronomy in South America (IAR 60th), Буэнос-Айрес (Аргентина), 15–18 ноября 2022 г.

4. "Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии", виртуальный формат, 14–18 ноября 2022 г.

5. The 5th Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes, виртуальный формат, 12–14 октября 2022 г.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2022 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 0251-2022-0005.

Руководители: д.ф.-м.н. РАН Марченко М. А., к.ф.-м.н. Черных И. Г.

Разработан новый численный метод решения уравнений идеальной магнитной гидродинамики на основе комбинации метода Годунова, схем Рое и Русанова и кусочно-параболического представления решения для физических переменных. Гибридная схема решения задачи Римана связана с возможностью воспроизводить численное решение без особенностей вдоль направлений, что особенно важно, когда восстанавливаются компоненты скорости и магнитного поля в поперечном направлении. Разработанный численный метод реализован в виде программного комплекса для массивно-параллельных суперЭВМ. На кластере НКС-1П ССКЦ проведены исследования параллельной реализации и вычислительные эксперименты. Рассмотрена задача взаимодействия облака молекулярного водорода с набегающей межзвездной средой.

Для параллельного программного кода для моделирования трехмерной динамики двухфазных (газопылевых) систем на основе метода SPH (метода сглаженных частиц) разработан модельный тест по разлету газопылевого шара в вакуум, имеющий аналитическое решение и, таким образом, может использоваться для проверки численного кода. Показано совпадение результатов теста с численным кодом при различных параметрах трения между фазами.

На основе созданного ранее метода нулевых столкновений разработан новый скоростной специализированный алгоритм попарных ион-ионных столкновений для метода частиц-в-ячейках без использования тригонометрических функций. Предложенный метод лишен недостатков предыдущего подхода, связанного с необходимостью проводить коррекции энергии и импульса

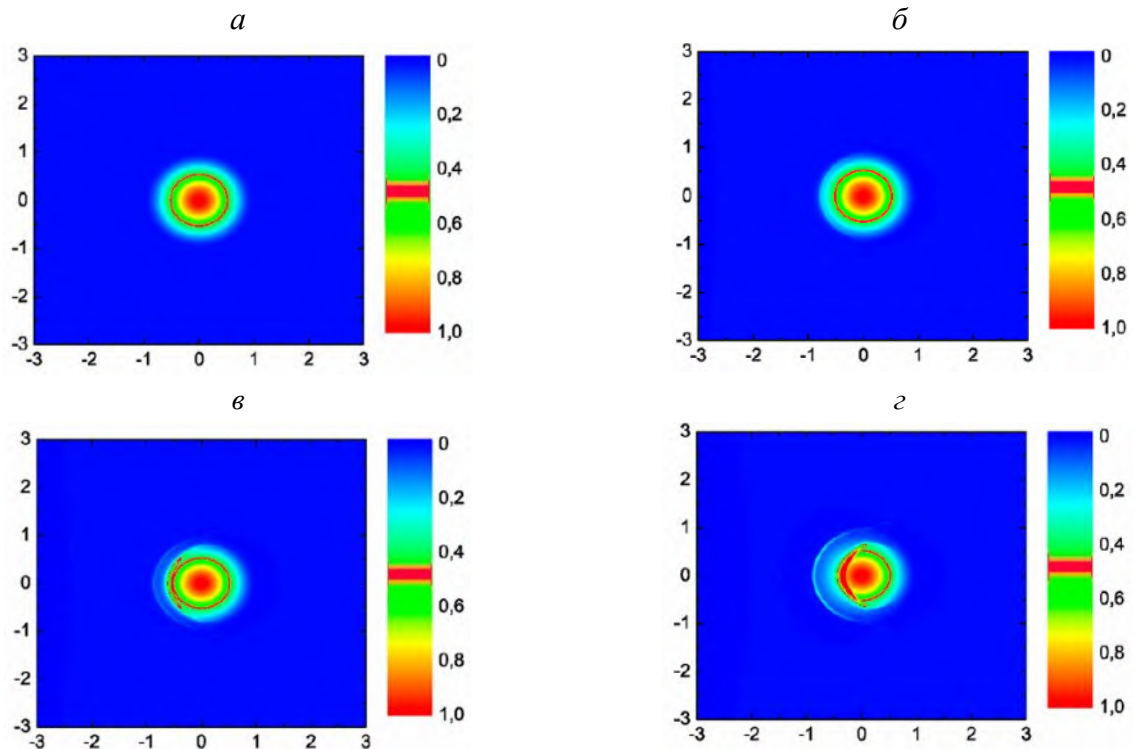


Рис. 1: Задача взаимодействия молекулярного облака с межзвездной средой: распределение плотности в 10^3 см^{-3} в начальный момент времени (а); на момент времени 500 тыс. лет (б); 800 тыс./лет (в); 1 млн лет (г). Для вычислительного эксперимента использована сетка 256^3 ячеек

частиц, что позволяет обсчитывать столкновения еще на 5–10 % быстрее. Кроме того, предложенный способ удобен для проведения параллельных вычислений, так как все расчеты проводятся внутри одной ячейки. Проведено сравнение нового алгоритма с другими алгоритмами парных столкновений, показавшее его высокую эффективность

Получена оценка погрешности созданного алгоритма, основанного на точном решении уравнений движения заряженных частиц в электромагнитных полях, применительно к решению задачи нагрева и удержания плазмы в открытых магнитных системах.

Продолжены работы по моделированию динамики плазмы в диамагнитном режиме открытой магнитной ловушки в двумерной постановке. В частности, модель дополнена возможностью инжектировать ионы из точки вне оси ловушки с заданным углом инжекции. На основе вычислительных экспериментов исследована зависимость характеристик формирующейся магнитной каверны как от параметров инжектируемых ионных пучков (координаты и угла точки инжекции, тока и температуры), так и структуры магнитного поля ловушки (величины пробочного отношения и положения пробок в области). Показано, что в результате непрерывной внеосевой инжекции ионных пучков под углом к оси пробкотрона происходит формирование каверн магнитного поля и фоновой плазмы. При этом напряженность магнитного поля и плотность фоновой плазмы внутри каверн могут составить несколько процентов от начальных значений. Режим диамагнитного удержания плазмы при малых углах инжекции сопровождается формированием области повышенной плотности быстрых ионов на границе каверны магнитного поля.

На основе трехмерной гибридной модели выполнена серия вычислительных экспериментов для исследования режима внеосевой атомарной инжекции в открытую магнитную систему.

Изучена зависимость процесса развития желобков на границе формирующейся магнитной каверны от угла инъекции. Характерная азимутальная длина волны желобковых возмущений (азимутальное волновое число) зависит от скорости инжектируемого пучка и определяется лармовским радиусом инжектируемых ионов. Рост желобков и развитие желобковой неустойчивости сопровождается изменением структуры диамагнитной каверны. Расчеты, выполненные с использованием трехмерной модели, показали, что распространение инжектируемого пучка сопровождалось вытеснением магнитного поля и формированием магнитной каверны, размер которой зависит от параметров инжектируемого пучка, а именно от его энергии и угла инъекции. Образование всплывающих по радиусу желобков, вытянутых вдоль магнитного поля, имеет место на границе магнитной каверны. Рост желобков сопровождается разрушением каверны магнитного поля. Данный процесс можно интерпретировать как развитие желобковой неустойчивости, которая возможна в диамагнитном режиме осесимметричного пробкотрона.

Численно исследована возможность экспериментальной реализации обратного эффекта Фарадея, индуцированного радиационным трением, при облучении плотной плазменной мишени двумя перекрывающимися линейно поляризованными лазерными пучками мульти-петаваттной мощности. Расчеты показали, что использование двух 15-петаваттных ортогонально поляризованных пучков, пересекающихся под небольшим углом, позволяет реализовать условия, необходимые для экспериментального наблюдения этого эффекта. В частности, при параметрах лазерных пучков, которые планируется реализовать на установке XCELS, возможна генерация продольного квазистатического магнитного поля пиковой напряженностью $\approx (2-3)$ ГГс.

Проведен анализ и обобщение результатов исследования возможности применения мощных прецизионных вибросейсмических источников, разработанных в СО РАН для мониторинга живущих вулканов. Показано, что предложенный подход с использованием активных вибросейсмических методов может успешно применяться на практике для уточнения особенностей сейсмического поля, глубинной структуры геофизической среды, изучения влияния геометрии магматического очага и наличия выходных каналов на данные, получаемые системой наблюдения на свободной поверхности. Проведенные исследования доказывают возможность использования вибросейсмических источников с высокой точностью периодического излучения для исследования вулканических структур и активного мониторинга вулканической активности.

Разработан комплекс параллельных программ для моделирования распространения сейсмических волн в 2D и 3D упругих средах с четвертым порядком точности по пространству на основе явных конечно-разностных схем четвертого порядка точности на сдвинутых сетках. Применение таких схем по сравнению со схемами второго порядка точности позволяет уменьшить накопление ошибки при расчете поля на длинные расстояния, а также сократить размер сетки благодаря более слабым требованиям, накладываемым на соотношение между количеством узлов сетки и длиной моделируемой волны. Сравнение тестовой производительности для многоядерных процессоров Intel и ускорителей NVIDIA GPU показало небольшое (в 1.2 раза) увеличение времени расчетов по сравнению со схемой второго порядка за счет программной оптимизации под архитектуру.

Предложена концептуальная модель построения схемы решения задач математической физики на основе онтологии интеллектуальной поддержки. Сформулированы основные правила вывода для построения схемы решения астрофизических задач на естественном языке с

последующей формализацией с использованием средств Semantic Web и добавлением в разработанную ранее онтологию интеллектуальной поддержки решения астрофизических задач. На примере решения задачи развития спиральной неустойчивости в протозвездном диске показаны результаты работы машины вывода в редакторе Protégé. Важная особенность такого подхода – возможность быстрого выбора пользователем подходящего решения поставленной задачи.

Модернизирована созданная ранее мультиагентная модель вычислительной системы для возможности гибкого управления параметрами всех подсистем суперкомпьютера. Создана методика определения оптимальных параметров суперкомпьютеров на основе имитационного моделирования, предполагающая:

1. Проведение анализа потоков данных и пользовательских заданий; для наглядности были использованы модель потока данных с детектора элементарных частиц и поток заданий, возникающий при их обработке.

2. Проведение серии полномасштабных модельных экспериментов (для всех возможных параметров потоков данных и задач) с целью определения максимально необходимого количества ресурсов на основе модели суперкомпьютера с неограниченными ресурсами.

3. Проведение серии полномасштабных модельных экспериментов (для всех возможных параметров потоков данных и задач) с целью определения минимально необходимого количества ресурсов на основе модели суперкомпьютера с конкурентным доступом к ограниченным ресурсам.

4. Сведение параметров из всех серий модельных экспериментов в единую диаграмму и ее анализ для определения оптимальных параметров.

5. Модельные эксперименты с полученными параметрами для различных характеристик потоков данных и задач с целью удостовериться, что эти параметры оптимальны.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 18-29-21025 "Суперкомпьютерное моделирование плазменных течений в режимах диамагнитного удержания открытых ловушек".

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

В результате выполнения проекта создана двумерная гибридная численная модель течения плазмы в осесимметричной открытой ловушке, основанная на кинетическом приближении для ионной компоненты плазмы и МГД приближении для замагниченной электронной компоненты. В модели учитываются механизмы диссипации, связанные с конечной проводимостью плазмы и электронной теплопроводностью, ион-ионные столкновения, многокомпонентный состав плазмы и ионного пучка, различные методы непрерывной осевой и внеосевой инжекции ионов.

На основе двумерной гибридной модели выполнена серия вычислительных экспериментов для исследования диамагнитного режима нагрева и удержания плазмы в открытой магнитной системе, когда давление плазмы близко к давлению магнитного поля. Исследована структура магнитного поля и определено время формирования магнитной каверны в зависимости от энергии, тока и ионного состава инжектируемого пучка. Изучен эффект преимущественного нагрева электронов в переходном слое на границе плазма – вакуум, обусловленный омическим нагревом, протекающим по слою диамагнитным током, который приводит к формированию положительного электростатического потенциала в переходном слое и в пробках. Показано, что скорость наблюдаемого в переходном слое азимутального вращения плазмы, которое может стабилизиро-

вать часть магнитогидродинамических неустойчивостей и уменьшить поперечный перенос вещества и энергии, может составлять несколько процентов от скорости быстрых ионов. Исследована возможность формирования конфигурации с обращенным магнитным полем при внеосевой атомарной инжекции в открытую ловушку, когда пучок высокоскоростных ионов генерировался внутри охватывающего ось ловушки кольца.

Проект РФФИ № 19-51-14002 "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 дополнении закона сохранения полной механической энергии газа уравнением состояния для идеального газа с учетом переменного отношения теплоемкостей газа и параболического терма. 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.

Результаты работ по проектам РФФ

Грант РФФ № 18-11-00044 "Разработка, реализация и исследование эффективных параллельных вычислительных методов для решения уравнений гидродинамики с использованием технологии вложенных сеток на массивно-параллельных суперЭВМ".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Куликов И. М.

В рамках работы по проекту в 2022 г. построена модель альфа-сети 15 ядерных реакций для семи изотопов: ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{56}Ni , ^4He . В результате рассмотрения характерных режимов горения материалов белых карликов была построена свертка ядерных реакций в виде аналитических функций для изменения массовой доли изотопов в зависимости от температуры и плотности. Вместе со сверткой турбулентного горения материала белых карликов удалось построить эффективную гидродинамическую модель эволюции белых карликов и взрыва сверхновых типа Ia. Были проведены вычислительные эксперименты по исследованию основных сценариев взрыва

сверхновых типа Ia. В результате вычислительных экспериментов определены характеристики, которые лежат в основе трех механизмов взрыва сверхновых типа Ia:

- механизм кинетического удара на основе соударения белого карлика с компаньоном;
- механизм гравитационного удара на основе влияния внешнего источника;
- механизм теплового удара на основе формирования точки поджигания.

В основе всех сценариев взрыва сверхновых типа Ia лежит один из представленных механизмов. В целом вычислительные эксперименты по исследованию сценариев взрыва сверхновых типа Ia подтверждают гипотезу о взрыве белых карликов дочандрасекаровской массы, высказанной проф. А. В. Тутуковым в 2018 г. Для разрешения математической модели был доработан численный метод в части аппроксимации адвективного члена в уравнениях гидродинамики. Для этого использовано точное решение о распаде разрыва уравнений для пыли. Построенный численный метод детально верифицирован и расширен на решение уравнений специальной релятивистской гидродинамики. Важнейший результат в части параллельной реализации – редизайн программного кода с использованием односторонних сетевых коммуникаций средствами языка Coarray Fortran. В ходе вычислительных экспериментов достигнуто 17-кратное ускорение при 32 образах Coarray Fortran программы и 92 % эффективность при использовании 192 образов Coarray Fortran. Вычислительные эксперименты показали, что оптимальное увеличение образов Coarray Fortran программы следует проводить в следующей последовательности: увеличение числа узлов, потоков, процессоров и только в последнюю очередь – ядер.

Грант РФФИ № 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.

В отчетном периоде проведена работа по созданию новых схем решения уравнений движения заряженных частиц. Созданная и апробированная на предыдущем этапе выполнения проекта схема обобщена на случай движения частиц в релятивистском пределе. Полученная схема имеет второй порядок точности. Разработан новый алгоритм интерполяции электрических и магнитных полей в местоположение частиц, который заключается в выполнении всех арифметических операций, не связанных с частицами, вне цикла по частицам. Если рассматривается группа частиц, находящихся в одной ячейке, то некоторые операции, зависящие от номера ячейки и общие для всех частиц, находящихся в этой ячейке, могут выполняться один раз и, следовательно, требуют меньше времени вычислений. Закончена работа по векторизации численного кода, когда одна операция применяется к нескольким данным одновременно. Это позволяет использовать процессоры в интенсивном режиме и значительно повысить производительность кода. Исследована зависимость эффективности полученного кода от количества модельных частиц. Реализован комплекс программ для анализа и представления результатов решения задачи в графическом виде. Поскольку вычисление в основном коде некоторых величин, необходимых для графической диагностики решений, сильно замедляет расчеты, то анализ результатов осуществляется по файлам выданных, соответствующих необходимым моментам времени, при необходимости – параллельно.

Проведено исследование плазменных процессов в открытых магнитных ловушках на основе созданных гибридных численных моделей. Расчеты показали, что вытекание плазмы сопровож-

дается раскручиванием ее вокруг оси вследствие преимущественной потери ионов в направлении вращения, противоположном направлению циклотронного вращения (так называемый plasma spin-up). При вытекании полный момент импульса возрастает, несмотря на снижение концентрации ионов, а средний момент импульса на одну частицу увеличивается более чем в два раза. Из-за раскручивания время вытекания увеличивалось и, по-видимому, определялось потерей момента импульса вследствие трения ионов об электроны в переходном слое на границе плазма – вакуум. Еще один источник расхождения между аналитическими и численными расчетами может заключаться в сравнительно большом отношении ларморовского радиуса ионов (посчитанного по вакуумному магнитному полю) к радиусу плазмы. Эта величина определяет отношение ширины переходного слоя к радиусу плазмы и в аналитических моделях, как правило, предполагается малым. Однако в проведенных численных расчетах оно не мало (порядка 0.2–0.3).

Публикации

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Prigarin, V., Sapetina, A., Ulyanichev, I., Zavyalov, O. A. New parallel code based on a simple piecewise parabolic method for numerical modeling of colliding flows in relativistic hydrodynamics // *Math.* 2022. V.10, iss. 11. Art. Num. 1865. DOI: 10.3390/math10111865.
2. Akimova, E., Misilov, V., Kulikov, I., Chernykh, I. OMPEGAS: Optimized relativistic code for multicore architecture // *Math.* 2022. V. 10, iss. 11. Art. Num. 2546. DOI: 10.3390/math10142546.
3. Chernykh, I., Kulikov, I., Vshivkov, V., Genrikh, E., Weins, D., Dudnikova, G., Chernoshtanov, I., Boronina, M. Energy efficiency of a new parallel PIC code for numerical simulation of plasma dynamics in open trap // *Math.* 2022. V. 10, iss. 11. Art. Num. 3684. DOI: 10.3390/math10193684.
4. Куликов, И. М., Черных, И. Г., Ульяничев, И. С., Тутуков, А. В. Математическое моделирование ядерного горения углерода в белых карликах с использованием 7-изотопной сети реакций // *СибЖИМ.* 2022. Т. 25, № 3. С. 55–66. DOI: 10.1134/S1990478922030085.
5. Куликов, И. М., Черных, И. Г., Тутуков, А. В. Математическое моделирование высокоскоростного столкновения белых карликов – механизма взрыва сверхновых типа Ia/Iax // *СибЖИМ.* 2022. Т. 25, № 1. С. 80–91. DOI: 10.1134/S1990478922010070.
6. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Prigarin, V., Sapetina, A., Ulyanichev, I., Zavyalov, O. A new approach to the supercomputer simulation of carbon burning sub-grid physics in Ia type supernovae explosion // *CCIS.* 2022. V. 1618. P. 210–232. DOI: 10.1007/978-3-031-11623-0_15.
7. Chernykh, I., Vorobyov, E., Elbakyan, V., Kulikov, I. The impact of compiler level optimization on the performance of iterative Poisson solver for numerical modeling of protostellar disks // *CCIS.* 2022. V. 1510. P. 415–426. DOI: 10.1007/978-3-030-92864-3_32.
8. Kulikov, I. M. Using a combination of Godunov and Rusanov solvers based on the piecewise parabolic reconstruction of primitive variables for numerical simulation of supernovae Ia type explosion // *Lobachevskii J. Math.* 2022. V. 43. P. 1545–1559. DOI: 10.1134/S1995080222090153.
9. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Sapetina, A. The energy efficiency research of Godunov Method on Intel Xeon scalable architecture // *IEEE. 2021 Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS).* 2022. Art. Num. 21722440. DOI: 10.1109/ISPRAS53967.2021.00030.

10. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Sapetina, A., Lomakin, S. The Efficiency of hydrodynamic code on Intel Xeon scalable architecture // IEEE. 2021 Ivannikov Memorial Workshop (IVMEM). 2022. Art. Num. 21704168. DOI: 10.1109/IVMEM53963.2021.00013.

11. Куликов, И. М. Кусочно-линейная реконструкция переменных, уменьшающая диссипацию метода HLL при решении уравнений газодинамики // СибЖВМ. 2022. Т. 25, № 2. С. 141–156. DOI: 10.1134/S1995423922020045.

12. Боронина, М. А., Куликов, И. М., Черных, И. Г., Винс, Д. В. Использование комбинации схем Роу и Русанова для численного решения уравнений магнитной гидродинамики в задачах космической плазмы // СибЖИМ. 2022. Т. 25. № 4(92). С. 14–26. DOI: 10.33048/SIBJIM.2021.25.402.

13. Sapetina, A., Kulikov, I., Zagorulko, G., Glinskiy, B. Constructing an expert system for solving astrophysical problems based on the ontological approach // CCIS. 2022. V. 1618. P. 30–42. DOI: 10.1007/978-3-031-11623-0_3.

14. Glinskiy, B. M., Kovalevsky, V. V., Khairtdinov, M. S., Fatyanov, A. G., Martynov, V. N., Karavaev, D. A., Sapetina, A. F., Sobisevich, A. L., Sobisevich, L. E., Braginskaya, L. P., Grigoryuk A. P. The experimental study and simulation of volcanic structures using active vibroseismic methods // J. Volcanology and Seismology. 2022. V. 16. P. 280–298. DOI: 10.1134/S0742046322040030.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Stoyanovskaya, O. P., Grigoryev, V. V., Suslenkova, A. N., Davydov, M. N., Snytnikov, N. V. Two-phase gas and dust free expansion: Three-dimensional benchmark problem for CFD codes // Fluids. 2022. V. 7, iss. 2. DOI: 10.3390/fluids7020051.

2. Wiens, D., Chernykh, I., Logashenko I. Full-scale simulation of the super C-Tau factory computing infrastructure to determine the characteristics of the necessary hardware // LNCS. 2022. V. 13708. P. 450–460. DOI: 10.1007/978-3-031-22941-1_33.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Глинский, Б. М., Ковалевский, В. В., Хайретдинов, М. С., Фатьянов, А. Г., Мартынов, В. Н., Караваев, Д. А., Сапетина, А. Ф., Собисевич, А. Л., Собисевич, Л. Е., Брагинская, Л. П., Григорюк, А. П. Экспериментальное изучение и моделирование вулканических структур с использованием активных вибросейсмических методов // Вулканология и сейсмология. 2022. № 4. С. 47–66. DOI: 10.31857/S0203030622040034.

2. Черноштанов, И. С., Дудникова, Г. И., Вшивков, В. А., Боронина, М. А., Соловьев, А. А. Численное моделирование перехода в диамагнитный режим в осесимметричной открытой ловушке // Тез. 49-й Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу "ICPAF-2022", Москва, 14–18 марта 2022 г. С. 67. DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.034.

3. Вшивков, В. А., Боронина, М. А., Вшивков, К. В., Дудникова, Г. И., Ефимова, А. А., Судаков А. М. Численные схемы для моделирования течений плазмы в открытых магнитных системах // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тезисы Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 24–25. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-07.

4. I. S. Chernoshtanov, A. A. Efimova, A. A. Soloviev, V. A. Rapid algorithm of pairwise collisions for particle-in-cell method // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тезисы Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 99. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-35.

5. Воропаева Е. С. Методы численного решения уравнений движения заряженной частицы в электромагнитном поле // Тез. докл. 23-й Всерос. конф. молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям, Новосибирск, 24–28 октября 2022 г. С. 14.

Свидетельства о регистрации в Роспатенте

Свидетельство № 2023610467. Программа для ЭВМ "Программный комплекс для численного решения уравнений динамической теории упругости на суперЭВМ с возможностью использования ускорителей вычислений Intel Xeon Phi KNL или NVIDIA GPU" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Сапетина А. Ф. Дата поступления заявки: 29.12.2022.

Участие в конференциях и совещаниях

1. The 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, 12–14 октября 2022 г., виртуальный формат – 5 докладов, из них 3 приглашенных (Боронина, М. А., Воропаева Е. С., Вшивков В. А., Вшивков К. В., Дудникова Г. И., Ефимова А. А., Куликов И. М., Соловьёв А. А.).

2. Национальный суперкомпьютерный форум (НСКФ-2022), Переславль-Залесский (Ярославская обл.), 29 ноября – 2 декабря 2022 г. – 1 доклад (Куликов И. М.).

3. Challenges and innovations in computational astrophysics IV, виртуальный формат, 21–23 ноября 2022 г. – 1 доклад (Куликов И. М.).

4. Prospects for low frequency radio astronomy in South America (IAR 60th), Буэнос-Айрес (Аргентина), 15–18 ноября 2022 г. – 1 доклад (Куликов И. М.).

5. Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии, виртуальный формат, 14–18 ноября 2022 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

6. 25th Annual international conference on particle physics and cosmology "COSMO 2022", Рио-де-Жанейро (Бразилия), 22–26 августа 2022 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

7. Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ) 2022, г. Дубна (Московская обл.), 29–31 марта 2022 г. – 3 доклада, из них 1 пленарный (Боронина М. А., Вшивков К. В., Глинский Б. М., Дудникова Г. И., Ефимова А. А., Куликов И. М., Сапетина А. Ф., Черных И. Г.).

8. 49-я Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (ICPAF-2022), г. Звенигород (Московская обл.), 14–18 марта 2022 г. – 1 доклад (Боронина М. А., Вшивков В. А., Дудникова Г. И., Соловьёв А. А.).

9. Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 2 доклада (Боронина М. А., Вшивков В. А., Вшивков К. В., Дудникова Г. И., Ефимова А. А., Соловьёв А. А., Судаков А. М.).

10. 11-я Всероссийская конференция с элементами школы молодых ученых "Актуальные проблемы прикладной математики и механики", посвященная памяти акад. А. Ф. Сидорова, с. Кабардинка (Краснодарский кр.), 1–7 сентября 2022 г. – 1 доклад (Вшивков К. В., Дудникова Г. И., Ефимова А. А.).

11. Суперкомпьютерные дни в России (RuSCD2022), Москва, 26–27 сентября 2022 г. – 1 доклад (Винс Д. В., Черных И. Г.).

12. Методы численного решения уравнений движения заряженной частицы в электромагнитном поле // 60-я Международная научная студенческая конференция, Новосибирск, 10–20 апреля 2022 г. Россия – 1 доклад (Воропаева Е. С.).

13. 23-я Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Новосибирск, 24–28 октября 2022 г. – 1 доклад (Воропаева Е. С.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Куликов И. М. – председатель организационного комитета The 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, virtual hosted in Novosibirsk, 12–14 октября 2022 г.;

2. Боронина М. А.:

– член организационного комитета 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, virtual hosted in Novosibirsk, 12–14 октября 2022;

– член организационного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.;

– член программного комитета 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, Virtual hosted in Novosibirsk, 12–14 октября 2022;

3. Вшивков В. А. – председатель программного комитета 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, virtual hosted in Novosibirsk, 12–14 октября 2022 г.;

4. Глинский Б. М.:

– член программного комитета Международной научной конференции "Суперкомпьютерные дни в России 2022", Москва, 26–27 сентября 2022 г.;

– член программного комитета Всероссийской научной конференции с международным участием "Параллельные вычислительные технологии 2022", г. Дубна (Московская обл.), 29–31 марта 2022 г.;

– член программного комитета Международной конференции "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г.;

5. Дудникова Г. И. – член программного комитета 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, virtual hosted in Novosibirsk, October 12–14, 2022;

6. Черных И. Г. – член программного комитета 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, virtual hosted in Novosibirsk, 12–14 октября 2022 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 14

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 16

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 18

Свидетельств о регистрации программ в Роспатенте – 1

Докладов на конференциях – 18, в том числе 1 пленарный и 3 приглашенных

Участников оргкомитетов конференций – 10

Кадровый состав

1. Черных И. Г.	зав. лаб.	к.ф.-м.н.
2. Боронина М. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
3. Винс Д. В.	н.с.	к.т.н.
4. Воропаева Е. С.	инженер	
5. Вшивков В. А.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
6. Вшивков К. В.	н.с.	к.ф.-м.н.
7. Глинский Б. М.	г.н.с.	д.т.н.
8. Дудникова Г. И.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
9. Ефимова А. А.	м.н.с.	
10. Зернова Л. В.	ведущ. программист	
11. Кононов А. А.	электроник 1-й катег.	
12. Куликов И. М.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
13. Кучин Н. В.	гл. специалист по системному ПО	
14. Лисейкина Т. В.	с.н.с.	Dr. rer. nat. habil.
15. Ломакин С. В.	ведущ. программист	
16. Макаров И. Н.	ведущ. программист	
17. Сапетина А. Ф.	м.н.с.	
18. Снытников Н. В.	н.с.	к.ф.-м.н.
19. Судаков А. М.	инженер	

Винс Д. В., Воропаева Е. С., Сапетина А. Ф., Судаков А. М. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

Вшивков В. А.	– профессор НГУ
Вшивков К. В.	– ст. преподаватель НГУ
Глинский Б. М.	– профессор НГУ
Куликов И. М.	– профессор НГТУ, доцент НГУ
Сапетина А. Ф.	– ст. преподаватель НГУ
Соловьев А. А.	– ст. преподаватель НГУ

Руководство студентами

Воропаева Е. С.	– 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Вшивков В. А.
Холияров У. А.	– 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Вшивков В. А.

Руководство аспирантами

Судаков А. М.	– 3-й год аспирантуры ИВМиМГ, руководитель Вшивков В. А.
Пригарин В. Г.	– 4-й курс аспирантуры НГТУ, руководитель Куликов И. М.
Ульяничев И. С.	– 4-й курс аспирантуры НГТУ, руководитель Куликов И. М.

Защита дипломов

Пригарин В. Г.	– аспирантура НГТУ, руководитель Куликов И. М.
Ульяничев И. С.	– аспирантура НГТУ, руководитель Куликов И. М.

Награды

1. Куликов И. М. – лауреат именной премии Правительства Новосибирской обл. за выдающиеся научные достижения в 2022 г.

2. Сапетиной А. Ф. присужден Диплом II степени победителя конкурса докладов молодых ученых международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ'2022) за научный доклад "The expert system constructing for solving astrophysical problems based on the ontological approach".

3. Воропаевой Е. С. присужден диплом I степени на 60-й Международной научной студенческой конференции за доклад "Методы численного решения уравнений движения заряженной частицы в электромагнитном поле" и победителя конкурса молодых учёных 23-й Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям за доклад "Методы численного решения уравнений движения заряженной частицы в электромагнитном поле".