

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 2017 г.



Новосибирск-2018



## СОДЕРЖАНИЕ

Научно-организационная деятельность.....	4
Важнейшие результаты научных исследований в 2016 г. ....	17
Лаборатория методов Монте-Карло .....	22
Лаборатория численного анализа стохастических дифференциальных уравнений.....	31
Лаборатория стохастических задач .....	39
Лаборатория вычислительной физики.....	54
Лаборатория математических задач химии .....	64
Лаборатория математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере .....	70
Лаборатория математического моделирования гидротермодинамических процессов в природной среде.....	90
Лаборатория численного анализа и машинной графики.....	103
Лаборатория математических задач геофизики .....	113
Лаборатория численного моделирования сейсмических полей .....	129
Лаборатория математического моделирования волн цунами .....	137
Лаборатория геофизической информатики .....	146
Лаборатория обработки изображений.....	158
Лаборатория системного моделирования и оптимизации.....	167
Лаборатория синтеза параллельных программ.....	180
Лаборатория параллельных алгоритмов решения больших задач .....	189
Лаборатория Сибирский суперкомпьютерный центр .....	200
Справочная информация .....	208

## НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Награды сотрудников Института в 2017 г.:

- юбилейные медали "80 лет Новосибирской области" вручены акад. РАН А. Н. Коновалову, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихину, д.т.н. В. В. Ковалевскому, чл.-корр. РАН Г. А. Михайлову, к.ф.-м.н. С. В. Бредихину;
- Почетной грамотой Президента РФ награжден чл.-корр. РАН Г. А. Михайлов;
- Памятной серебряной медалью в ознаменование 60-летия Сибирского отделения Российской академии наук награждены акад. РАН А. Н. Коновалов, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин; чл.-корр. РАН Г. А. Михайлов, чл.-корр. РАН Г. Г. Лазарева;
- медалью им. К. Э. Циолковского Федерации космонавтики России награжден к.т.н. Г. И. Салов.

Проведено 18 заседаний Ученого совета института, на которых были рассмотрены научные, кадровые и организационные вопросы, заслушаны научные доклады сотрудников Института:

- "Применение эволюционных алгоритмов для оптимизации и синтеза регулярных сетей и некоторых нелинейных моделей", к.т.н. О. Г. Монахов;
- "Модели и алгоритмы для некоторых оптимизационных задач в сетях передачи данных", к.т.н. О. Д. Соколова;
- "Метод Гельфанда – Левитана – Крейна в многомерных обратных задачах", к.ф.-м.н. М. А. Шишленин;
- "Об одной теореме стохастической аппроксимации для операторных уравнений 1-го рода в произвольном сепарабельном гильбертовом пространстве и ее применение к задачам обнаружения объектов, скрытых в шумах", к.т.н. Г. И. Салов;
- "Стохастические методы моделирования в задачах оптоэлектроники и физики гетерогенных структур", д.ф.-м.н. К. К. Сабельфельд;
- "Векторные алгоритмы метода Монте-Карло с конечной трудоемкостью", к.ф.-м.н. И. Н. Медведев;
- "Сибирский суперкомпьютерный центр", д.т.н. Б. М. Глинский, д.т.н. В. В. Ковалевский, д.ф.-м.н. И. М. Куликов, д.ф.-м.н. М. А. Марченко, к.ф.-м.н. И. Г. Черных, д.ф.-м.н. М. А. Шишленин;
- отчет об участии во II Всероссийской конференции "Центры коллективного пользования и уникальные научные установки организаций, подведомственных ФАНО России", к.ф.-м.н. И. Г. Черных, д.ф.-м.н. М. А. Марченко;

Также на заседаниях Ученого совета были заслушан доклад гостя Института "Изучение вулканов сейсмическими методами", чл.-корр. РАН И. Ю. Кулаков.

Продолжена работа по грантам Президента РФ по поддержке молодых кандидатов наук (к.ф.-м.н. Пененко А. В., к.ф.-м.н. И. М. Куликов, к.ф.-м.н. Терехов А. В.), получены два новых гранта (Каргаполова Н. А., д.ф.-м.н. И. М. Куликов).

Продолжена работа по четырем проектам Российского научного фонда, руководители: д.ф.-м.н. В. П. Ильин, д.ф.-м.н. К. К. Сабельфельд, д.ф.-м.н. Ю. М. Лаевский, д.ф.-м.н. В. А. Вшивков, к.ф.-м.н. Пененко А. В.

В 2017 г. проводились работы по 17 базовым проектам фундаментальных научных исследований, 46 проектам РФФИ (из них 34 инициативных, 9 молодежных, 4 проекта ориентированных фундаментальных исследований, 3 проекта на поддержку проведения конференций), 5 проектам РНФ, 8 проектам Президиума РАН и ОМН РАН.

В институте работают два совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук: Д 003.061.01 (председатель чл.-корр. РАН Михайлов Г. А.) и Д 003.061.02 (председатель чл.-корр. РАН Кабанихин С. И.). В 2017 г. были проведены 4 заседания по присуждению степени кандидата наук и 2 заседания по присуждению степени доктора наук, в том числе сотрудникам ИВМиМГ СО РАН Куликову И. М. (д.ф.-м.н.), Марченко М. А. (д.ф.-м.н.), Берендееву Е. А. (к.ф.-м.н.).

Институт является базовым для шести кафедр университетов Новосибирска:

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

– двух кафедр Новосибирского государственного технического университета: параллельных вычислительных технологий (факультет прикладной математики и информатики) и сетевых информационных технологий (факультет автоматизации и вычислительной техники)).

В Институте работают десять научных семинаров. В Институте проводится обучение в аспирантуре по шести образовательным программам (специальностям), работают два совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

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

### **Издательская деятельность**

– С 1993 г. издается журнал "Journal of Inverse and Ill-Posed Problems", периодичность шесть номеров в год. Главный редактор – директор ИВМиМГ СО РАН, член-корреспондент РАН С. И. Кабанихин. Ответственный редактор – д.ф.-м.н. М. А. Шишленин. Журнал индексируется в системах цитирования Web of Science и Scopus. Импакт фактор журнала 0,987. Квартиль журнала Q1.

– С 1998 г. издается "Сибирский журнал вычислительной математики", периодичность четыре номера в год. Главный редактор – директор ИВМиМГ СО РАН, член-корреспондент РАН С. И. Кабанихин. Заместители главного редактора: академик РАН А. Н. Коновалов, д.ф.-м.н. Ю. М. Лаевский. Журнал индексируется в системах цитирования Web of Science и Scopus.

– С 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, д.ф.-м.н. В. В. Шахов.

– 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.

– С 1995 г. издается журнал "Monte Carlo Methods and Applications" с периодичностью четыре номера в год. Главный редактор – д.ф.-м.н. К. К. Сабельфельд. Журнал индексируется в системе цитирования Scopus.

### **Международные конференции**

Проведены три международные конференции:

1. Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2017", Новосибирск, 25.06.2017 г. – 14.07.2017 г.

2. Международная конференция "Параллельные вычислительные технологии – 2017", Новосибирск, 4.09.2017 г.–8.09.2017 г.
3. 13-я Международная Азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем" (в рамках конференции IEEE Sibircon – 2017), Новосибирск, 18.09.2017 г. – 22.09.2017 г.

### **Международные соглашения, контракты, гранты**

Выполнялись либо были заключены: два меморандума о взаимопонимании, четыре договора и три соглашения:

1. Меморандум о взаимопонимании между Институтом вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация, 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.

Срок меморандума: 01.01.2007 г. – 31.12.2017 г.

2. Договор о научно-исследовательском сотрудничестве между Институтом вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация, и Восточно-Казахстанским государственным техническим университетом им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан.

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

Срок договора: 23.10.2015г. – 23.10.2020г.

3. Договор о сотрудничестве между Институтом вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация, и Малазийским технологическим университетом, г. Джохор, Малайзия.

Координаторы: от ИВМиМГ СО РАН – зав. лабораторией синтеза параллельных программ профессор, д.т.н. В. Э. Малышкин; от малазийского технологического университета – профессор, заместитель директора по науке и инновациям Мохд Азрай Кассим /Mohd Azraai Kassim.

Срок договора: 05.12.2013г. – 05.12.2017 г.

4. Лицензионный договор на использование названия журнала и его отличительных характеристик "Сибирский журнал вычислительной математики" между компанией "Pleiades Publishing Ltd.", Британские Виргинские Острова, США, Сибирским Отделением Российской Академии наук и Институтом вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Координаторы: от "Pleiades Publishing Ltd" – президент А. Шусторович; от Сибирского отделения Российской Академии наук – Председатель СО РАН, академик Н. Л. Добрецов; от ИВМиМГ СО РАН – директор, главный редактор лицензионного журнала "Сибирский журнал вычислительной математики" чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин.

Срок договора: 06.08.07 г. – 06.08.17 г.

5. Договор о сотрудничестве на проведение исследований задач, возникающих при разведке и добычи нефти и газа в Республике Узбекистан между Каршинским государственным университетом, г. Карши, Республика Узбекистан, и Институтом вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация.

Координаторы: от Каршинского государственного университета – ректор Б. А. Шоимкулов; от ИВМиМГ СО РАН – директор, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин.

Срок договора: 23.01.2015г. – 23.01.2019 г.

6. Меморандум о взаимном сотрудничестве между Международным казахско-турецким университетом им. Ходжи Ахмеда Ясави, г. Туркестан, Республика Казахстан, и Институтом вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация.

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

Срок меморандума: 28.10.2015г. – 28.10.2020г.

7. Соглашение о сотрудничестве N170-1/15 между АО "Международный университет информационных технологий", г. Алматы, Республика Казахстан, и Институтом вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация.

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. – 02.11.2020 г.

8. Соглашение о научном сотрудничестве между Школой математики Шанхайского университета финансов и экономики, г. Шанхай, Китай и Институтом вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация.

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

Срок соглашения: 06.12.2016г. – 06.12.2021г.

9. Соглашение о сотрудничестве в сфере образования, науки, научно-технической и инновационной деятельности между Международным университетом инновационных технологий, г. Бишкек, Кыргызстан и Институтом вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация.

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. – 10.10.2022г.

### **Командировки за рубеж**

В 2017 г. за рубеж командировано 30 сотрудников, вместо 47 в 2016 г., причем, командировок для участия в международных конференциях 23 (из них 3 в страны ближнего зарубежья); краткосрочных командировок, касающихся научной кооперации, 6 (из них 4 в страны ближнего зарубежья). Страны, в которые было осуществлено командирование: Германия, Австрия, Франция, Нидерланды, Португалия, Испания, Болгария, Греция, Китайская Народная Республика, Республика Корея, Индонезия, Республика Казахстан, Республика Кыргызстан.

**Германия**

1. Сабельфельд К. К., г.н.с., д.ф.-м.н. Совместная работа по исследованию методов катодолюминисценции и ростовых экспериментов GaN нановискеров, Институт твердотельной электроники, г. Берлин, Германия; с 04.07.2017 г. по 12.08.2017 г.

**Австрия**

2. Воронина Т. А., с.н.с. Участие в Генеральной Ассамблее Европейского Геофизического Союза (EGU General Assembly – 2017), г. Вена, Австрия; с 25.04.2017 г. по 28.04.2017 г.

3. Куликов. И. М., н.с., д.ф.-м.н. Участие в рабочем совещании с докладом о векторизации вычислений в моделировании МГД потоков в астрономических объектах, г. Вена, Австрия; с 01.08.2017 г. по 08.08.2017 г.

**Франция**

4. Каргаполова Н. А., н.с., к.ф.-м.н. Участие в международной конференции "Наука о данных и окружающая среда", г. Брест, Франция; с 03.07.2017 г. по 09.07.2017 г.

**Португалия**

5. Гусяков В. К., д.ф.-м.н., зав. лаб. Участие в 5-м выездном симпозиуме по цунами, г. Лиссабон, Португалия; с 03.09.2017 г. по 07.09.2017 г.

6. Каргаполова Н. А., н.с., к.ф.-м.н. Участие в 31-й Европейской конференции по моделированию, г. Лиссабон, Португалия; с 22.10.2017 г. по 29.10.2017 г.

**Испания**

7. Каргаполова Н. А., н.с., к.ф.-м.н. Участие в 7-й Международной конференции по методологии и методам моделирования и их приложениям, г. Мадрид, Испания; с 23.07.2017 г. по 31.07.2017 г.

**Нидерланды**

8. Каргаполова Н. А., н.с., к.ф.-м.н. Участие в 10-й Международной конференции по анализу электронных знаний, г. Делфт, Нидерланды; с 24.06.2017 г. по 02.07.2017 г.

**Греция**

9. Каргаполова Н. А., н.с., к.ф.-м.н. Участие в 10-й Международной конференции по анализу электронных знаний, г. Делфт, Нидерланды; с 24.06.2017 г. по 02.07.2017 г.

10.\* Воскобойникова Г. М., м.н.с. Участие в 7-й Международной конференции по экспериментам / процессам / моделированию / оптимизации, г. Афины, Греция; с 05.07.2017 г. по 08.07.2017 г.

**Болгария**

11.\* Воскобойникова Г. М., м.н.с. Участие в 9-й Международной конференции Евро-Американского консорциума по продвижению применения математики в технических и естественных науках, г. Албена, Болгария; с 21.06.2017 г. по 26.06.2017 г.

12.\* Воскобойникова Г. М., м.н.с. Участие в 17-й Международной междисциплинарной геоконференции и международной выставке по геонаукам, г. Албена, Болгария; с 27.06.2017 г. по 06.07.2017 г.

13. Ефимова А. А., м.н.с. Участие в 9-й Международной конференции Евро-Американского Консорциума по продвижению применения математики в технических и естественных науках, г. Албена, Болгария; с 21.06.2017 г. по 26.06.2017 г.

---

\*Здесь и далее символом "\*" отмечено командирование за счет гранта Фонда фундаментальных исследований.

14. Пененко А. В., с.н.с. Участие в международной конференции "Крупномасштабные научные вычисления", г. Созополь, Болгария; с 03.06.2017 г. по 10.06.2017 г.

### **Индонезия**

15. Гусяков В. К., д.ф.-м.н., зав. лаб. Участие в международном симпозиуме по цунами Международного Союза Геофизиков и Геодезистов, о. Бали, Индонезия; с 21.08.2017 г. по 27.08.2017 г.

### **Китайская Народная Республика**

16. Кабанихин С. И., директор, чл.-корр. РА Н. Участие в международной конференции "Прикладные обратные задачи" и подписание договора о сотрудничестве, г. Шанхай и г. Ханчжоу, Китай; с 26.05.2017 г. по 09.06.2017 г.

17. Криворотько О. И., м.н.с., к.ф.-м.н. Участие в международной конференции "Прикладные обратные задачи", г. Ханчжоу, Китай; с 28.05.2017 г. по 01.06.2017 г.

18. Кабанихин С. И., директор, чл.-корр. РА Н. Обсуждение перспектив совместных работ и подписание договора о сотрудничестве, г. Тяньцзинь (Тяньцзинский университет), Китай; с 05.07.2017 г. по 18.07.2017 г.

19. Кабанихин С. И., директор, чл.-корр. РА Н. Участие в 1-й математической конференции стран БРИКС, г. Пекин, Китай; с 21.08.2017 г. по 04.09.2017 г.

20. Кабанихин С. И., директор, чл.-корр. РА Н. Участие в международной конференции по математическому моделированию и вычислениям и в Форуме по укреплению международного сотрудничества с Китайской Академией наук, г. Шеньчжэнь, Китай; с 16.11.2017 г. по 25.11.2017 г.

21. Шишленин М. А., с.н.с., д.ф.-м.н. Научная работа по теме: "Обратные задачи в геофизике", Фуданьский университет, г. Шанхай, Китай; с 24.11.2017 г. по 02.12.2017 г.

### **Республика Корея**

22. Мигов Д. А., н.с., к.ф.-м.н. Участие в 12-м Международном форуме по прорывным технологиям, г. Ульсан, Республика Корея; с 31.05.2017 г. по 07.06.2017 г.

### **Монголия**

23. Ковалевский В. В., зам. директора, д.ф.-м.н. Участие в международной конференции по астрономии и геофизике" и согласование совместных работ по активной сейсмологии, г. Улан-Батор, Монголия; с 18 по 25 июля 2017 г.

### **Республика Казахстан**

24. Кабанихин С. И., директор, чл.-корр. РА Н. Обсуждение и согласование плана научных работ в Казахском национальном университете, г. Алматы, Республика Казахстан; с 27.04.2017 г. по 08.05.2017 г.

25.\* Соболева О. Н., с.н.с., д.ф.-м.н. Участие в международной конференции "Актуальные проблемы чистой и прикладной математики", г. Алматы, Республика Казахстан; с 22.08.2017 г. по 25.08.2017 г.

26. Михеева А. В., н.с., к.ф.-м.н. Научная работа по теме: "Изучение глобальных геотектонических структур в среде "GIS ENDDB" по данным сейсмичности и томографии", г. Алматы, Республика Казахстан; с 11.09.2017 г. по 15.09.2017 г.

27. Родионов А. С., зав. лаб., д.т.н. Участие в международной научно-практической конференции "Информатика и прикладная математика", г. Алматы, Республика Казахстан; с 26.09.2017 г. по 29.09.2017 г.

28. Кабанихин С. И., директор, чл.-корр. РА Н. Участие в VI Конгрессе математического общества тюркского мира, г. Астана, Республика Казахстан; с 01.10.2017 г. по 08.10.2017 г.

### **Республика Кыргызстан**

29. Токтошов Г. Ы., н.с., к.т.н. Научная работа по апробации новых моделей по оптимизации инженерных сетей различного назначения, г. Бишкек, Республика Кыргызстан; с 02.10.2017 г. по 20.10.2017 г.

30. Кабанихин С. И., директор, чл.-корр. РА Н. Обсуждение сотрудничества между казахским национальным университетом и ИВМиМГ СО РАН, г. Алматы, Республика Казахстан; с 24.12.2017 г. по 29.12.2017 г.

### **Прием зарубежных ученых и представителей фирм:**

В 2017 г. были приняты 62 иностранных гостя из 13 стран: Великобритания – 1; США – 1; Франция – 3; Италия – 1; Болгария – 2; КНР – 21; Малайзия – 1; Пакистан – 1; Ирак – 1; Сирия – 1; Индия – 1; Турция – 1; Казахстан – 27; из них 12 научных сотрудников; преподавателей – 9; студентов – 41.

1. Леопольд Томас Генри ПРАЙС/Leopold Thomas Henry PRICE, студент Университета Бирмингема, Великобритания. Срок визита: 19.10.2015г. – 30.07.2017 г. Цель визита: обучение по магистерской программе НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН и НГУ по теме: "Теория вероятности и математическая статистика". Ответственный за курс третьего семестра ведущий научный сотрудник лаборатории стохастических задач д.ф.-м.н. Войтишек А. В.

2. Ван СЯОТУН/Wang XIAOTONG, инженер, провинция Чжецзян, г. Шень Чжоу, Китай. Срок визита: 19.10.2015г. – 30.07.2017 г. Цель визита: обучение по магистерской программе НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН и НГУ по теме: "Обратные и некорректные задачи: теория, численные методы и приложения". Ответственный за курс третьего семестра старший научный сотрудник лаборатории математических задач геофизики д.ф.-м.н. Шишленин М. А.

3. Мухаммад ТАЛХА МИРЗА/Muhammad TALHA MIRZA, студент университета Карачи, г. Карачи, Пакистан. Срок визита: 01.11.2015г. – 30.07.2017 г. Цель визита: обучение по магистерской программе НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН и НГУ "Теория вероятности и математическая статистика". Ответственный за курс второго и третьего семестра ведущ. научный сотрудник лаборатории стохастических задач, д.ф.-м.н. Войтишек А. В.

4. Изатулла МУХАММАД / Izzatullah MUHAMMAD, инженер фирмы "LEAP ENERGY PARTNERS", г. Куала-Лумпур, Малайзия. Срок визита: 23.11.2015г. – 01.09.2017г. Цель визита: обучение по магистерской программе НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН и НГУ "Обратные и некорректные задачи: теория, численные методы и приложения". Ответственный за курс третьего семестра старший научный сотрудник лаборатории математических задач геофизики д.ф.-м.н. Шишленин М. А.

5. Ли ФАНЬ/Li FAN, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 11.10.2016г. – 11.10.2017 г. Цель визита: обучение в магистратуре ММФ НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН и НГУ по специализации "Обратные задачи охраны окружающей среды и экологии". Ответственный за курс первого семестра зав. лабораторией математического моделирования гидродинамических процессов в природной среде д.ф.-м.н. Пененко В. В.

6. Чжэн ЦЗЯНПЭН/Zheng TSZYANPEN, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 11.10.2016г. – 11.10.2017 г. Цель визита: обучение в магистратуре ММФ НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН и НГУ по

специализации "Обратные задачи охраны окружающей среды и экологии". Ответственный за курс первого семестра зав. лабораторией математического моделирования гидродинамических процессов в природной среде д.ф.-м.н. Пененко В. В.

7. Сыхуэй ВАН/Sihui WANG, студентка Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 15.10.2016г. – 04.10.2018г. Цель визита: обучение в магистратуре НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН и НГУ по программе "Прикладная математика и информатика". Ответственный за курс первого семестра г.н.с. лаборатории вычислительной физики д.ф.-м.н. Ильин В. П.

8. Цюли ЛИ/Qiuli LI, студентка Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 15.10.2016г. – 04.10.2018г. Цель визита: обучение в магистратуре НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН и НГУ по программе "Прикладная математика и информатика". Ответственный за курс первого семестра зав. лабораторией математических задач химии д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

9. Яру ПАНЬ /Yaru PAN, студентка Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 15.10.2016г. – 04.10.2018г. Цель визита: обучение в магистратуре НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН и НГУ по программе "Прикладная математика и информатика". Ответственный за курс первого семестра зав. лабораторией математических задач химии д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

10. Дарья Витальевна ПРЯДЧЕНКО, Восточно-Казахстанская область, Республика Казахстан. Срок визита: 01.11.2016 г. – 30.08.2017 г. Цель визита: обучение в бакалавриате НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН и НГУ по программе "Разработка алгоритмов и программного обеспечения для решения задач оптимального размещения геометрических фигур на плоскости". Ответственный за курс первого семестра на базе ИВМиМГ СО РАН и НГУ ведущий программист лаборатории численного моделирования сейсмических полей Куликов А. И.

11. Хасахайн-Али ХУССЕЙН/Hasahain-Ali HUSSEIN, студент университета имени Имама Джавара аль Садика, г. Наджаф, Республика Ирак. Срок визита: 07.11.2016 г. – 30.06.2017 г. Цель визита: обучение по магистерской программе факультета автоматизации и вычислительной техники НГТУ на базе ИВМиМГ СО РАН и НГТУ по специализации "Прикладные информационные системы и технологии". Ответственный за курс первого семестра на базе ИВМиМГ СО РАН и НГТУ г.н.с. лаборатории геофизической информатики д.т.н. Хайретдинов М. С.

12. Цюань МУ/Quan MU, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 05.12.2016г. – 30.07.2018г. Цель визита: обучение в магистратуре НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН по программе "Прикладная математика и информатика". Ответственный за курс первого семестра в.н.с. лаборатории стохастических задач д.ф.-м.н. Пригарин С. М.

13. Мэн СУНЬ/Meng SUN, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 08.02.2017 г. – 30.06.2018г. Цель визита: обучение по магистерской программе НГУ по специализации "Методы сплайн-функций. Теория и приложения" на базе НГУ, ИВМиМГ СО РАН и ИМ СО РА Н. Ответственный за курс первого семестра и.о. зав. лабораторией численного анализа и машинной графики д.ф.-м.н. Дебелов В. А.

14. Суцзянь ЧЖАО/XUEJIAN ZHAO, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 08.02.2017 г. – 30.06.2018г. Цель визита: обучение по магистерской программе НГУ по специализации "Математические

методы геофизики" на базе НГУи ИВМиМГ СО РАН. Ответственный за курс первого семестра и.о. зав. лабораторией численного анализа и машинной графики д.ф.-м.н. Дебелов В. А.

15. Жадыры Саматовна МУКАТОВА, студентка НГУ, гражданка Республики Казахстан. Срок визита: 20.02.2017 г. – 30.06.2020г. Цель визита: обучение по магистерской программе НГУ по специализации "Механика и Математическое моделирование" на базе НГУи ИВМиМГ СО РАН. Ответственный за курс первого семестра Пененко А. В., к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории математического моделирования гидродинамических процессов в природной среде.

16. Хасан АЛХУССЕЙН/Hasan ALHUSSEIN, студент университета г. Алеппо, Сирия. Срок визита: 08.03.2017 г. – 30.06.2018г. Цель визита: обучение по магистерской программе НГУ по специализации "Использование гемологии для изучения расширений групп" на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН. Ответственный за курс первого семестра и.о. зав. лабораторией численного анализа и машинной графики д.ф.-м.н. Дебелов В. А.

17. Асем ТУРАРБЕК/Assem TURARBЕК, докторант Казахского национального университета им Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 02.04.2017 г. – 02.05.2017 г. Цель визита: Научная стажировка по программе докторантов по теме "Обратные задачи математической физики". Ответственный за стажировку с.н.с. лаборатории математических задач геофизики д.ф.-м.н. Шишленин М. А.

18. Жоламан БЕКТЕМЕСОВ/Zholaman BEKTEMESOV, магистрант Казахского национального университета им Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 02.04.2017 г. – 20.04.2017 г. Цель визита: обучение по магистерской программе НГУ по специализации "Обратные задачи математической физики" на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН. Ответственный за обучение с.н.с. лаборатории математических задач геофизики д.ф.-м.н. Шишленин М. А.

19. Зарина Толеубековна ХАСЕНОВА, докторант Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан. Срок визита: 28.04.2017 г. – 27.05.2017 г. Цель визита: работа по индивидуальной программе докторанта по теме: "Разработка серверного приложения для усвоения данных химических концентраций в режиме реального времени".

20. Тео Оливье ЛЕФЕВЬР/Theo Olivier LEFEBVRE, студент лицея Сан Жозеф ля Саль, г. Лорьян, Франция. Срок визита: 29.04.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: Прохождение стажировки по темам: основы параллельного программирования; введение в организацию распределенных вычислений.

21. Тома Франсуа Роже ЛЕ ГОФФ/Thomas Francois Roger LE GOFF, студент лицея Сан Жозеф ля Саль, г. Лорьян, Франция. Срок визита: 29.04.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: прохождение стажировки по темам: основы параллельного программирования; введение в организацию распределенных вычислений.

22. Эрве Пьер Франсуа ЭД /Herve Pierre Francois EUDE, студент лицея Сан Жозеф ля Саль, г. Лорьян, Франция. Срок визита: 29.04.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: прохождение стажировки по темам: основы параллельного программирования; введение в организацию распределенных вычислений.

23. Ялчин ЭФЕНДИЕВ /Yalchin EFENDIEN, профессор Техасского университета, США; заведующий международной научно-исследовательской лабораторией Северо-восточного федерального университета им М. К. Амосова, г. Якутск, Р Ф. Срок визита: 24.06.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: участие в международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

24.4. Кенес ДЖАКУПОВ, главный научный сотрудник Института математики и математического моделирования, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 25.06.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: участие в международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

25. Казизат Такуадинович ИСКАКОВ, д.ф.-м.н., профессор Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан. Срок визита: 25.06.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: участие в международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

26. Сырым Еркинович КАСЕНОВ, старший преподаватель Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 25.06.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: участие в международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

27. Айгерим Мекемтасовна ТЛЕУЛЕСОВА, старший преподаватель Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 25.06.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: участие в международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

28.8. Нургуль УЗАККЫЗЫ, аспирантка Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева, факультет информационных технологий, кафедра вычислительной техники, г. Астана, Республика Казахстан. Срок визита: 25.06.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: участие в международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

29. Айсян ХУАН/Aixiang HUANG, профессор университета Цзяо Тун, г. Сиань, Китай. Срок визита: 28.06.2017 г. – 03.07.2017 г. Цель визита: участие в Российско-китайском семинаре "Вычислительная математика и научные вычисления", проводимом в рамках международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

30. Вэньцзюнь ИН/Wenjun YING, профессор университета Цзяо Тун, г. Шанхай, Китай. Срок визита: 28.06.2017 г. – 01.07.2017 г. Цель визита: участие в Российско-китайском семинаре "Вычислительная математика и научные вычисления", проводимом в рамках международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

31. Теган ЛЮ/Tiegang LIU, профессор Бэйханского университета, г. Пекин, Китай. Срок визита: 28.06.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: участие в Российско-китайском семинаре "Вычислительная математика и научные вычисления", проводимом в рамках международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

32. Шухуа ЧЖАН/Shuhua ZHANG, профессор университета финансов и экономики г. Тяньцзинь, Китай. Срок визита: 27.06.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: участие в Российско-китайском семинаре "Вычислительная математика и научные вычисления", проводимом в рамках международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

33. Хуэй ЧЖАН/Hui ZHANG, профессор университета г. Пекина, Китай. Срок визита: 28.06.2017 г. – 02.07.2017 г. Цель визита: участие в Российско-китайском семинаре "Вычислительная математика и научные вычисления", проводимом в рамках международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

34. Синвэй ЛЮ/Xinwei LIU, профессор университета г. Тяньцзинь, Китай. Срок визита: 28.06.2017 г. – 01.07.2017 г. Цель визита: участие в Российско-китайском семинаре "Вычислительная математика и научные вычисления", проводимом в рамках международной конференции "Марчуковские научные чтения – 2017".

35. Бекжан Бегматулы ДОСАНОВ, студент 3-го курса Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита:

03.07.2017 г. – 14.07.2017 г. Цель визита: участие в летней международной 29-й молодежной школе-конференции по параллельному программированию.

36. Нургали Казбекулы КАДЫРБЕК, студент 3-го курса Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 03.07.2017 г. – 14.07.2017 г. Цель визита: участие в летней международной 29-й молодежной школе-конференции по параллельному программированию.

37. Бакыджан Исабекулы БУКТУГАН, студент 3-го курса Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 03.07.2017 г. – 14.07.2017 г. Цель визита: участие в летней международной 29-й молодежной школе-конференции по параллельному программированию.

38. Максат Бейбитович МУСТАФИН, студент 4-го курса Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 03.07.2017 г. – 14.07.2017 г. Цель визита: участие в летней международной 29-й молодежной школе-конференции по параллельному программированию.

39. Ержан Галымжанулы КЕНЖЕБЕК, студент 4-го курса Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 03.07.2017 г. – 14.07.2017 г. Цель визита: участие в летней международной 29-й молодежной школе-конференции по параллельному программированию.

40. Нурислам Муратбекулы КАСЫМБЕК, студент 4-го курса Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 03.07.2017 г. – 14.07.2017 г. Цель визита: участие в летней международной 29-й молодежной школе-конференции по параллельному программированию.

41. Чокан Мейрамович ИСИН, магистрант 1-го курса Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 03.07.2017 г. – 14.07.2017 г. Цель визита: участие в летней международной 29-й молодежной школе-конференции по параллельному программированию.

42. Беимбет Серикович ДАРИБАЕВ, преподаватель кафедры информатики механико-математического факультета Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 03.07.2017 г. – 14.07.2017 г. Цель визита: участие в летней международной 29-й молодежной школе-конференции по параллельному программированию.

43. Данил Лебедев, докторант Казахского национального университета им. Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 03.07.2017 г. – 22.07.2017 г. Цель визита: участие в летней международной 29-й молодежной школе-конференции по параллельному программированию.

44. Дархан Жумаханович АХМЕД-ЗАКИ, директор департамента Министерства образования и науки Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 10.07.2017 г. – 14.07.2017 г. Цель визита: участие в летней международной 29-й молодежной школе-конференции по параллельному программированию.

45. Анета Недева КАРАИВАНОВА/Aneta Nedeva KARAIVANOVA, профессор Института информационных и коммуникационных технологий Болгарской Академии наук, г. София, Болгария. Срок визита: 10.09.2017 г. – 15.09.2017 г. Цель визита: проведение совместных научных исследований по теме: "Высокопроизводительные параллельные вычисления и методы Монте-Карло".

46. Тодор Василев ГЮРОВ/Todor Vassilev GUROV, профессор, Зам. директора Института информационных и коммуникационных технологий Болгарской Академии наук, г. София,

Болгария. Срок визита: 10.09.2017 г. – 15.09.2017 г. Цель визита: проведение совместных научных исследований по теме: "Высокопроизводительные параллельные вычисления и методы Монте-Карло".

47. Микеле ПАГАНО/Michele PAGANO, профессор университета г. Пизы, Италия. Срок визита: 09.09.2017 г. – 04.10.2017 г. Цель визита: участие в 13-й Международной Азиатской школе-семинаре "Проблемы оптимизации сложных систем".

48. Али ХАЗАР/Ali HAZAR, зав. кафедрой университета Сакарии, Турция. Срок визита: 19.09.2017 г. – 23.09.2017 г. Цель визита: участие в 13-й Международной Азиатской школе-семинаре "Проблемы оптимизации сложных систем".

49. Адылжан Бердыбенулы КАБАЛХАНОВ, инженер Института информационных и вычислительных технологий, г. Астана, Республика Казахстан. Срок визита: 17.09.2017 г. – 21.09.2017 г. Цель визита: участие в 13-й Международной Азиатской школе-семинаре "Проблемы оптимизации сложных систем".

50. Гульнур Абдыкадыркызы ТОЛЕБИ, аспирантка Казахско-британского технического университета, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 17.09.2017 г. – 21.09.2017 г. Цель визита: участие в 13-й Международной Азиатской школе-семинаре "Проблемы оптимизации сложных систем".

51. Дилмукамбет Самуратович ДЮСЕНБАЕВ, научный сотрудник Института информационных и вычислительных технологий Министерства образования и науки Республики Казахстан. Срок визита: 17.09.2017 г. – 21.09.2017 г. Цель визита: участие в 13-й Международной Азиатской школе-семинаре "Проблемы оптимизации сложных систем".

52. Ян ЧЖЕНЬ/Yang ZHEN, магистрант Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 03.10.2017 г. – 30.07.2019г. Цель визита: обучение в магистратуре НГУ по программе "Прикладная математика и информатика" на базе НГУ и ИВМиМГ СО РАН. Ответственный за курс первого семестра – в.н.с. лаборатории стохастических задач д.ф.-м.н. Пригарин С. М.

53. Асем ТУРАРБЕК/Assem TURARBEK, докторант Казахского национального университета им Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 09.10.2017 г. – 25.11.2017 г. Цель визита: Научная стажировка по программе докторантов по теме "Обратные задачи математической физики". Ответственная за стажировку н.с. лаборатории математических задач геофизики к.ф.-м.н. Криворотько О. И.

54. Гульзана АШИРОВА/Gulzana ASHIROVA, магистрант Казахского национального университета им Аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 23.10.2017 г. – 03.11.2017 г. Цель визита: обучение по магистерской программе механико-математического факультета НГУ по специализации "Обратные задачи математической физики". Ответственная за курс н.с. лаборатории математических задач геофизики к.ф.-м.н. Криворотько О. И.

55. Ли ФАНЬ/Li FAN, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 11.10.2017 г. – 11.10.2018г. Цель визита: обучение в магистратуре ММФ НГУ по специализации "Обратные задачи охраны окружающей среды и экологии". Ответственный за курс третьего семестра зав. лабораторией математического моделирования гидродинамических процессов в природной среде д.ф.-м.н. Пененко В. В.

56. Чжэн ЦЗЯНПЭН/Zhen TSZYANPEN, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 11.10.2017 г. – 11.10.2018 г. Цель визита: обучение в магистратуре ММФ НГУ по специализации "Обратные задачи охраны окружающей среды и экологии". Ответственный за курс третьего семестра зав.

лабораторией математического моделирования гидродинамических процессов в природной среде д.ф.-м.н. Пененко В. В.

57. Бо ЧЖАО/Во ЗНАО, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 09.10.2017 г. – 30.07.2019 г. Цель визита: обучение в магистратуре НГУ по программе "Прикладная математика и информатика". Ответственный за курс в.н.с. лаборатории стохастических задач д.ф.-м.н. Пригарин С. М.

58. Зарина Толеубековна ХАСЕНОВА, докторант Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан. Срок визита: 09.10.2017 г. – 30.07.2019г. Цель визита: работа по индивидуальной программе докторанта по теме "Разработка серверного приложения для усвоения данных химических концентраций в режиме реального времени"

59. Ли ЦЗИЮЙ / Li TSIUI, студентка Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 12.10.2017 г. – 30.06.2018г. Цель визита: обучение по магистерской программе ММФ НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН по направлению "Механика и математическое моделирование" со специализацией "Обратные задачи математической физики". Ответственная за курс н.с. лаборатории математических задач геофизики к.ф.-м.н. Криворотько О. И.

60. Венугопал ТХАЛЛАМ / Venugopal THALLAM, гражданин Индии, специалист по космическим технологиям и приложениям, приглашенный научный сотрудник для работы на физическом факультете НГУ. Срок визита: 03.11.2017 г. – 09.11.2017 г. Цель визита: выступление на семинарах лаборатории математического моделирования гидродинамических процессов в природной среде и лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере по темам "Введение в понимание процессов взаимодействия системы атмосфера – океан" и "Роль новых методов, техник и параметризаций в понимании динамики совместной системы: фокус на тропическом и Индийском регионах.

61. Пэнфэй ЧЖЕН/Pengfei ZHENG, студент Китайско-российского института Хэйлунцзянского университета, г. Харбин, Китай. Срок визита: 14.11.2017 г. – 30.07.2019 г. Цель визита: обучение по магистерской программе "Прикладная математика и информатика" ММФ НГУ на базе ИВМиМГ СО РАН по специальности "Вычислительная математика". Ответственный за курс первого семестра зав. лабораторией стохастических задач д.ф.-м.н. Каргин Б. А.

62. Жоламан БЕКТЕМЕСОВ, магистрант Казахского национального университета им. аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан. Срок визита: 05.12.2017 г. – 18.12.2017 г. Цель визита: научно-исследовательская работа по теме: "Разработка фрактальной структуры е-портфолио, обучающегося в контексте построения национальной квалификационной системы".

## Важнейшие результаты ИВМиМГ СО РАН в 2017 г.

### **Оптимальные, явно разрешимые математические модели для линейных параболических задач**

Академик РАН Коновалов А. Н.

Для линейных параболических задач математической физики построены и обоснованы явно разрешимые дискретные (сеточные) экономичные математические модели с контролируемым дисбалансом "тепловой энергии". Предложен подход для моделирования конкретного материала, который имеет различные агрегатные состояния. Предложен подход к построению согласованной с границей равномерной пространственной сетки. Обосновано выполнение условия сопряженно-согласованной аппроксимации.

### **Новые алгоритмы оценки флуктуаций эффективного коэффициента размножения частиц в случайной среде**

Член-корр. РАН Михайлов Г. А., к.ф.-м.н. Лотова Г. З., к.ф.-м.н. Амбос А. Ю.

Построен допускающий распараллеливание алгоритм метода Монте-Карло для оценки вероятностных моментов  $E_k$  и  $E_{k^2}$  спектрального радиуса оператора интегрального уравнения переноса частиц с размножением в случайной среде. С этой же целью разработан рандомизированный метод гомогенизации на основе теории малых возмущений и диффузионного приближения. Тестовые расчеты, проведенные для одногрупповой сферически-симметричной стохастической среды, показали удовлетворительное согласование результатов, полученных двумя моделями.

### **Экономичные разностные схемы для вычисления векторных потоков**

Д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М., к.ф.-м.н. Воронин К. В.

Разработан общий универсальный подход к конструированию экономичных разностных схем для нахождения векторных потоков в параболических задачах. Подход основан на восстановлении векторных схем из экономично реализуемых скалярных схем-преобразов. Установлен ряд априорных оценок, которые указывают путь к конструированию новых потоковых схем, обеспечивающих более высокую точность вычислений. Предложено обобщение данного подхода для гиперболических задач.

### **Многофункциональный комплекс моделей, методов и алгоритмов для решения прямых и обратных задач охраны окружающей среды в городских агломерациях**

Д.ф.-м.н. Пененко В. В., к.ф.-м.н. Пененко А. В., к.ф.-м.н. Пьянова Э. А., к.ф.-м.н. Цветова Е. А.

На примерах сибирских городов (Новосибирск, Красноярск, Чита) изучаются мезоклиматы и качество атмосферы городов и прилегающих регионов с учетом их специфических особенностей. Разработаны алгоритмы расчета полей концентраций многокомпонентных примесей и идентификации источников эмиссий. Специальные алгоритмы разработаны также для усвоения данных наблюдений за качеством атмосферы.

### **Корреляционный анализ статистической фациальной модели разломной зоны**

Д.ф.-м.н. Решетова Г. В.

Работа посвящена построению и анализу сейсмических изображений разломной зоны на основе исследования ее фациальной модели. Для ансамбля статистических реализаций выполнено сейсмическое моделирование и построены реальные и идеальные сейсмические

изображения. Предложенный метод позволяет установить точное соответствие между исходными фациальными моделями разломной зоны и построенными по ним сейсмическими изображениями.

### **Тематический интернет-ресурс для теоретических и экспериментальных исследований в активной сейсмологии**

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

Создан специализированный интернет-ресурс (<http://org.sscs.ru/>) для поддержки теоретических и экспериментальных исследований в области активной сейсмологии. Концептуальным базисом информационной модели портала знаний является онтология предметной области "Активная сейсмология". Онтология портала вводит формальные описания понятий предметной области в виде классов объектов и отношений между ними, тем самым задавая структуры для представления реальных информационных объектов и их связей. Содержательный доступ к систематизированным знаниям и информационным ресурсам обеспечивается с помощью предоставляемых порталом развитых средств навигации и поиска, функционирование которых также базируется на онтологии.

### **Двухуровневые итерационные методы наименьших квадратов в подпространствах Крылова**

Д.ф.-м.н. Ильин В. П.

Предложены и исследованы двухуровневые итерационные методы наименьших квадратов (МНК) для ускорения алгоритмов решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с рестартами в подпространствах Крылова. Применение предложенных подходов дает значительное увеличение скорости сходимости итерационных процессов.

### **Параллельные методы расчета показателей надежности сетей**

Д.т.н. Родионов А. С., к.ф.-м.н. Мигов Д. А.

Разработка параллельных алгоритмов точного и приближенного расчета показателей структурной надежности сетей, позволяющих их анализ и оптимизацию для широкого класса сетей реальной размерности (до сотен и тысяч узлов) за разумное время (до нескольких часов).

### **Методология разработки алгоритмического и программного обеспечения для высокопроизводительных суперЭВМ**

Д.т.н. Глинский Б. М., к.ф.-м.н. Черных И. Г., д.ф.-м.н. Куликов И. М., к.ф.-м.н. Снытников А. В., к.т.н. Винс Д. В, Сапетина А. Ф.

Предложена и реализована методика разработки алгоритмического и программного обеспечения для высокопроизводительных суперкомпьютеров, содержащая три связанных этапа: первый является расширенным определением со-дизайна, под которым понимается адаптация математического метода и вычислительного алгоритма к архитектуре суперкомпьютера на всех этапах решения задачи; на втором исследуется масштабируемость алгоритмов для наиболее перспективных суперЭВМ на основе имитационного моделирования; на третьем оценивается энергоэффективность алгоритма при реализации на различных архитектурах компьютеров.

**Секция "Вычислительная математика и численное моделирование физики атмосферы и гидросферы"****Математическая модель для расчета теплоотвода при импульсных тепловых нагрузках вблизи поверхности пластины дивертора из вольфрама**

Член-корр. РАН Лазарева Г. Г., Максимова А. Г.

Построена математическая модель для расчета теплоотвода при импульсных тепловых нагрузках вблизи поверхности пластины дивертора из вольфрама. Воспроизведены измеренные распределения температуры по поверхности, предсказаны характерные зависимости ослабления теплоотвода в зависимости от геометрии трещин. В аксиально-симметричной постановке получен график движения границы расплав – твердый вольфрам, абсолютно точно соответствующий натурным экспериментам при условии учета испарения.

**Численный анализ данных наземного и спутникового мониторинга загрязнения территорий атмосферными выбросами Искитимского цементного завода**

Д.ф.-м.н. Рапута В.Ф.

С использованием малопараметрических моделей реконструкции полей загрязнений и методов теории планирования экспериментов проведены экспериментальные и численные исследования процессов загрязнения территорий выбросами Искитимского цементного завода. Полученные зависимости позволяют, исходя из условий термодинамического равновесия ионного состава, проводить оценки риска нанесения вреда здоровью населения, степени защелачивания почв и водных объектов и контроль атмосферных выбросов завода.

**Разработка стохастической модели и алгоритма моделирования процессов аннигиляции электронов и дырок в неоднородных полупроводниковых материалах и исследование квантовой эффективности GaN полупроводников**

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

Дано объяснение степенного спада интенсивности фотолюминесценции, а также получена оценка квантовой эффективности светодиодных устройств. Данные исследования позволят более детально изучить квантовую эффективность различных полупроводниковых материалов и на основе этих фундаментальных знаний построить новые светодиодные устройства, такие как лазеры в определенных диапазонах длин волн и элементная база для оптоэлектроники.

**Построен новый универсальный весовой векторный алгоритм метода Монте-Карло для оценки линейных функционалов от решения системы линейных интегральных уравнений 2-го рода.**

К.ф.-м.н. Медведев И. Н.

Для стандартного весового алгоритма ограниченность дисперсии векторной оценки гарантируется, если спектральный радиус специального матрично-интегрального оператора меньше единицы. В отличие от стандартного весового алгоритма, дисперсия и трудоемкость построенного весового векторного алгоритма с ветвлением траектории цепи Маркова гарантированно ограничены, если ограничены базовые функционалы.

**Модификация комплекса программ AMIKS для численного анализа систем стохастических дифференциальных уравнений для суперкомпьютерного кластера НКС-1П**

Д.ф.-м.н. Марченко М.А., Иванов А.А., Смирнов Д.Д.

Разработанная для кластера НКС-1П модификация комплекса программ AMIKS позволяет реализовывать новые вычислительно трудоемкие модели стохастических осцилляторов с приложениями в естественных науках и технике, получать численные оценки их динамических характеристик и осуществлять параметрический анализ рассматриваемых моделей. В основе комплекса программ – переработанная под новые процессоры Intel Xeon Phi библиотека PARMONC.

### **Секция "Математическое моделирование и методы прикладной математики"**

#### **Получение устойчивого аналитического решения для волновых полей в шаре космических размеров. Уточнение модели строения Земли.**

Д.ф.-м.н. Фатьянов А. Г.

С помощью разработанного автором аналитического решения получено полное поле для одномерной реальной модели Земли. При этом обнаружено, что фокусировка волнового поля для Земли ( $L$ ) происходит и в области меньше 140 градусов. Это позволяет утверждать, что для объяснения возникновения на реальных данных предшественников можно использовать одномерную модель Земли. При этом на Западе, как правило, считается, что без введения в нижней мантии рассеивателей описать появление предшественников нельзя.

#### **Восстановление изображений по многоспектральным рентгеновским проекциям с применением условной минимизации полной вариации на линейных фрагментах**

Д.ф.-м.н. Казанцев И. Г.

Предложена модификация известного в томографии итерационного алгоритма ART-TV. Модификация позволила повысить качество реконструкции, уменьшить артефакты, уточнить границы объектов и сократить время расчетов.

#### **Связь цунамигенности подводных землетрясений с условиями осадконакопления на морском дне**

Д.ф.-м.н. Гусяков В. К.

Установлена тесная корреляция эффективности генерации цунами очагами подводных землетрясений с положением основных зон осадконакопления в Тихом океане, обусловленных наличием климатической и циркумконтинентальной зональности (в русле учения академика А. П. Лисицына об основных зонах океанического литогенеза).

### **Секция "Параллельные и распределенные вычисления"**

#### **Численное моделирование генерации электромагнитного излучения в режиме косо́й эмиссии при взаимодействии электронного пучка с плазмой**

К.ф.-м.н. Берендеев Е.А.

С помощью PIC моделирования исследован вопрос о возможности повышения эффективности генерации электромагнитного излучения в пучково-плазменной системе в режиме косо́й эмиссии, при котором плазма становится прозрачной для излучения вблизи плазменной частоты. Практическое применение данного исследования также направлено на решение задачи дистанционного зондирования объектов, передачи информации в терагерцовом диапазоне и обработки материалов с помощью мощного терагерцового излучения.

**Суперкомпьютерное моделирование фрагментации околозвездного диска с помощью метода сглаженных частиц (SPH) и сеточного метода вычисления гравитационного потенциала**

К.ф.-м.н. Снытников Н. В.

Проведены численные эксперименты по моделированию аккреции вещества диска на протозвезду (с использованием ресурсов ССКЦ): воспроизведено явление эпизодической аккреции, когда протозвезда набирает существенную часть своей массы за счет короткоживущих аккреционных процессов с очень высоким темпом. Одним из косвенных признаков существования планеты является эпизодическая аккреция – явление, когда протозвезда набирает существенную часть своей массы за счет короткоживущих аккреционных процессов с очень высоким темпом.

**Секция "Информационные системы"****Разработка и исследование алгоритма многовариантного эволюционного синтеза нелинейных моделей.**

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

Предложен алгоритм для решения проблемы построения нелинейных моделей (математических выражений, функций, алгоритмов, программ) на основе заданных экспериментальных данных, множества переменных, базовых функций и операций. Получены оценки эффективности предложенного алгоритма на параллельных суперкомпьютерных системах и показано существенное преимущество данного подхода по сравнению с известными алгоритмами как по времени поиска решения (более чем на порядок в большинстве случаев), так и по вероятности нахождения заданной функции (во многих случаях более чем в два раза).

## Лаборатория методов Монте-Карло

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

### Важнейшие достижения

#### **Новые алгоритмы оценки флуктуаций эффективного коэффициента размножения частиц в случайной среде.**

Построен допускающий распараллеливание алгоритм метода Монте-Карло для оценки вероятностных моментов  $E_k$  и  $E_k^2$  спектрального радиуса оператора интегрального уравнения переноса частиц с размножением в случайной среде. С этой же целью разработан рандомизированный метод гомогенизации на основе теории малых возмущений и диффузионного приближения. Тестовые расчёты, проведённые для однотупповой сферически-симметричной стохастической среды, показали удовлетворительное согласование результатов, полученных двумя моделями.

Член-корр. РАН Михайлов Г. А., к.ф.-м.н. Лотова Г. З., к.ф.-м.н. Амбос А. Ю.

#### **Построен новый универсальный весовой векторный алгоритм метода Монте-Карло для оценки линейных функционалов от решения системы линейных интегральных уравнений 2-го рода.**

Для стандартного весового алгоритма ограниченность дисперсии векторной оценки гарантируется, если спектральный радиус специального матрично-интегрального оператора меньше единицы. В отличие от стандартного весового алгоритма, дисперсия и трудоёмкость построенного весового векторного алгоритма с ветвлением траектории цепи Маркова гарантированно ограничены, если ограничены базовые функционалы.

К.ф.-м.н. Медведев И. Н.

### **Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2017 г. в соответствии с планом НИР института**

**Проект НИР "Разработка весовых параметрических алгоритмов статистического моделирования для суперкомпьютерного решения многомерных задач в естественных и технических науках".**

Номер государственной регистрации НИР 0315-2016-0002.

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

Построен алгоритм статистического моделирования для решения нелинейного кинетического уравнения Больцмана на основе адаптированного проекционного метода. В качестве ортонормированного базиса использовались функции Эрмита.

Для решения нелинейного кинетического уравнения коагуляции разработаны новые статистические алгоритмы, которые реализуют весовые оценки "по столкновениям". С помощью предложенных алгоритмов возможно одновременно вычислять линейные функционалы от решения исходного уравнения с различными значениями параметров, а также оценивать их параметрические производные, моделируя один набор траекторий марковской цепи.

По аналогии с методом Келлога построен допускающий распараллеливание итерационный алгоритм метода Монте-Карло для оценки вероятностных моментов параметра критичности. С этой же целью на основе теории малых возмущений и диффузионного приближения

разработан рандомизированный метод гомогенизации, причем в качестве весовой функции используется "функция ценности", что дает более точные результаты, чем с использованием весов, пропорциональных параметрическим производным. Расчёты, проведенные для одноразмерной сферически симметричной модели системы с кусочно-постоянной случайной плотностью, показали удовлетворительное согласование результатов, полученных указанными методами. Методом гомогенизации была построена оценка вероятности надкритичности процесса.

На основе рандомизированного проекционного метода разработаны и исследованы на многопроцессорной суперЭВМ численные алгоритмы статистического моделирования для оценки функциональных характеристик падающего на рассеивающую и поглощающую среду поляризованного излучения; проведены расчеты углового распределения интенсивности и степени поляризации рассеянного излучения в осесимметричной геометрии.

Разработаны алгоритмы метода Монте-Карло для исследования двумерных пространственно-угловых характеристик компонент вектор-параметра Стокса рассеянного излучения, основанные на рандомизированном проекционном методе с использованием полусферических базисных функций.

Рассматривалась "граничная" задача переноса излучения через плоский горизонтально (но не вертикально) однородный слой с оптической толщиной  $\tau$ . Это специальная постановка задачи. Здесь, в отличие от стандартной задачи переноса излучения, ставится задача найти лишь распределение по направлениям интенсивности излучения, выходящего через границы слоя, не вычисляя распределение излучения во внутренних точках слоя. Такая постановка задачи впервые была предложена В. А. Амбарцумяном для однородного слоя. В работе определено однопараметрическое (с параметром  $\tau$ ) семейство операторов, которые имеют вид матрицы  $2 \times 2$  с компонентами-операторами, образованными из "граничных" операторов отражения и пропускания излучения слоя. Доказана теорема "сложения слоев" о выполнении полугруппового свойства матриц-операторов рассматриваемого параметрического семейства. Приведено краткое и простое доказательство "формулы сложения", основанное на наглядных геометрических соображениях. Формула позволяет быстро решать "граничную" задачу переноса излучения через слой, составленный из "простых", т. е. однородных, слоев.

**Программа Президиума РАН I.33П** "Суперкомпьютерное статистическое моделирование переноса излучения с учетом различных трехмерных и, в том числе, стохастических функциональных характеристик радиационной модели среды".

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

По аналогии с методом Келлога построен допускающий распараллеливание алгоритм метода Монте-Карло для оценки вероятностных моментов параметра критичности процесса переноса частиц с размножением в случайной среде. С этой же целью разработан рандомизированный метод гомогенизации с помощью теории малых возмущений и диффузионного приближения. На этой основе была построена оценка вероятности надкритичности процесса.

Построен новый комбинированный алгоритм статистического моделирования переноса поляризованного излучения с ограниченной дисперсией статистических оценок интенсивности как для скалярного, так и для векторного вариантов радиационной модели, таким образом, эффективный для оценки влияния поляризации на интенсивность излучения. Разработан новый, основанный на адаптированном ортогональном разложении плотности

алгоритм метода Монте-Карло для исследования пространственно-углового распределения поляризованных характеристик рассеянного средой излучения.

Построены весовые алгоритмы метода Монте-Карло для решения интегральных стационарного и нестационарного уравнений переноса излучения в среде со случайно-неоднородной преломляющей границей. Рассмотренные алгоритмы позволяют в полной мере учесть эффекты затенения и переотражения излучения элементами поверхности, а также учесть наличие пены, возникающей на поверхности при сильном ветровом волнении. Численно изучено влияние ветрового волнения на пространственно-угловую структуру поля оптического излучения, рассеянного верхним слоем океана.

Построен алгоритм статистического моделирования для решения нелинейного кинетического уравнения Больцмана на основе адаптированного проекционного метода. В качестве ортонормированного базиса использовались функции Эрмита.

Разработана новая технология распараллеливания алгоритмов численного статистического моделирования траекторий ветвящихся процессов на гибридных вычислительных системах на основе распределительного способа получения псевдослучайных чисел.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 15-01-00894а** "Разработка комплекса эффективно реализуемых на многопроцессорных суперЭВМ алгоритмов статистического моделирования процессов переноса частиц различной природы с учетом стохастичности среды, поляризации и влияния внешнего силового поля".

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

Для задач теории переноса излучения с учетом поляризации построена новая универсальная весовая векторная оценка с ветвлением траектории только в случае, когда точная верхняя грань нормы "накопленного" матричного веса больше единицы. Построенная оценка обладает заведомо ограниченной дисперсией, что позволяет в одном расчете получить оценку погрешности между первой компонентой вектора Стокса и ее приближенной скалярной оценкой.

Разработаны алгоритмы метода Монте-Карло для исследования двумерных пространственно-угловых характеристик компонент вектор-параметра Стокса рассеянного излучения, основанные на рандомизированном проекционном методе с использованием полусферических базисных функций.

На основе рандомизированного проекционного метода разработаны и исследованы на многопроцессорной суперЭВМ численные алгоритмы статистического моделирования для оценки функциональных характеристик падающего на рассеивающую и поглощающую среду поляризованного излучения; проведены расчеты углового распределения интенсивности и степени поляризации рассеянного излучения в осесимметричной геометрии

Алгоритм метода прямого статистического моделирования (ПСМ) модернизирован для моделирования истечения смеси водорода с метаном через цилиндрический канал в вакуум с учетом гетерогенных и газофазных реакций. Для этих целей в алгоритм добавлены возможности моделирования диссоциации молекулярного водорода и рекомбинации атомарного водорода на поверхности канала, а также моделирования разложения метана на метил и атомарный водород и обратной реакции восстановления метана из метила. Основной целью исследования на данном этапе было определение степени диссоциации метана на выходе из канала. В ходе численных экспериментов установлены зависимости изменения степени

диссоциации метана в широком диапазоне изменения длины канала и степени разреженности. Показана определяющая роль наличия атомарного водорода на скорость разложения метана.

**Проект РФФИ № 16-01-00530а** "Разработка параллельно реализуемых эффективных весовых алгоритмов статистического моделирования для численного исследования течений химически реагирующих газов, включая процессы образования наночастиц".

Руководитель – д.ф.-м.н. Рогозинский С. В.

Построена оригинальная универсальная методика обоснования ограниченности дисперсии весовой оценки с произвольным ветвлением траектории цепи Маркова на основе обоснования ограниченности второго момента полного числа столкновений в ветвящейся цепи.

Рассмотрено нелинейное уравнение Смолуховского, которое часто возникает при описании процессов коагуляции частиц в различных физических и химических системах. Для численной оценки линейных функционалов от решения уравнения с линейными коэффициентами коагуляции, зависящими от размера взаимодействующих частиц, строится "модельная" эволюция "физического" многочастичного ансамбля с помощью соответствующих марковских цепей. В рамках "весового" статистического моделирования разработаны новые оценки "по столкновениям" для численного решения рассматриваемого кинетического уравнения и оценки его параметрических производных.

Построен алгоритм статистического моделирования для решения нелинейного кинетического уравнения Больцмана на основе адаптированного проекционного метода. В качестве ортонормированного базиса использовались функции Эрмита.

Алгоритм метода прямого статистического моделирования (ПСМ) был модернизирован для моделирования течения смеси водорода с метаном в цилиндрическом канале с учетом гетерогенных и газофазных реакций. Для этих целей в алгоритм добавлена возможность моделирования следующих гетерогенных реакций на поверхности канала: диссоциация молекулярного водорода и рекомбинация атомарного водорода  $H_2=H+H$ . Также в алгоритм добавлена возможность моделирования следующих газофазных реакций обмена: разложение метана на метил и атомарный водород и обратная реакция восстановления метана из метила  $H+CH_4=CH_3+H_2$ . Было проведено моделирование истечения исходной смеси, состоящей из молекулярного водорода и метана, через нагретую до 2400 К вольфрамовую трубку в вакуум. Выполнено численное исследование изменения исходного состава смеси вследствие газофазных и гетерогенных реакций при течении смеси различной степени разреженности (определяемой по диаметру канала) и по каналам различной длины. Основной целью исследования на данном этапе было определение степени диссоциации метана на выходе из канала. Установлены зависимости изменения степени диссоциации метана при изменении длины канала в диапазоне от 2 до 32 калибров, при изменении степени разреженности в режимах от свободномолекулярного до переходного (число Кнудсена  $Kn=0.1$ ).

**Проект РФФИ № 17-01-00823а** "Численное статистическое моделирование переноса поляризованного излучения в рассеивающих средах и решение обратных задач".

Руководитель – д.ф.-м.н. Ухинов С. А.

Построены и численно исследованы новые параллельно реализуемые весовые алгоритмы метода Монте-Карло для расчета углового распределения интенсивности и степени поляризации излучения, проходящего и отраженного оптически толстым рассеивающим слоем, основанные на разложении по системе базисных полусферических функций. С помощью

статистического моделирования получены оценки отклонения данного углового распределения от ламбертовского, а также изучено влияние на него поляризации и оптических параметров среды. Для оценки линейных функционалов от решения системы интегральных уравнений 2-го рода построена универсальная модификация весовой векторной оценки по столкновениям с ветвлением траектории цепи соответственно элементам матричного веса. Доказано, что трудоемкость построенного алгоритма ограничена, если ограничены базовые функционалы. Представлены результаты численных расчетов с использованием модифицированной весовой оценки для некоторых задач теории переноса излучения с учетом поляризации. Поставлена задача восстановления матрицы аэрозольного рассеяния атмосферы по наблюдениям поляризованного излучения в альмукантарате Солнца. Предложены итерационные алгоритмы, основанные на измерениях первых трех компонент вектора Стокса и численном статистическом моделировании переноса поляризованного излучения. Для обоснования сходимости методов разработан алгоритм расчета матриц Якоби операторов перехода итерационных методов. Проведены тестовые расчеты, показывающие сходимость методов при определенных параметрах среды. Численно исследовано влияние ошибки начальных данных на восстановление компонент матрицы рассеяния.

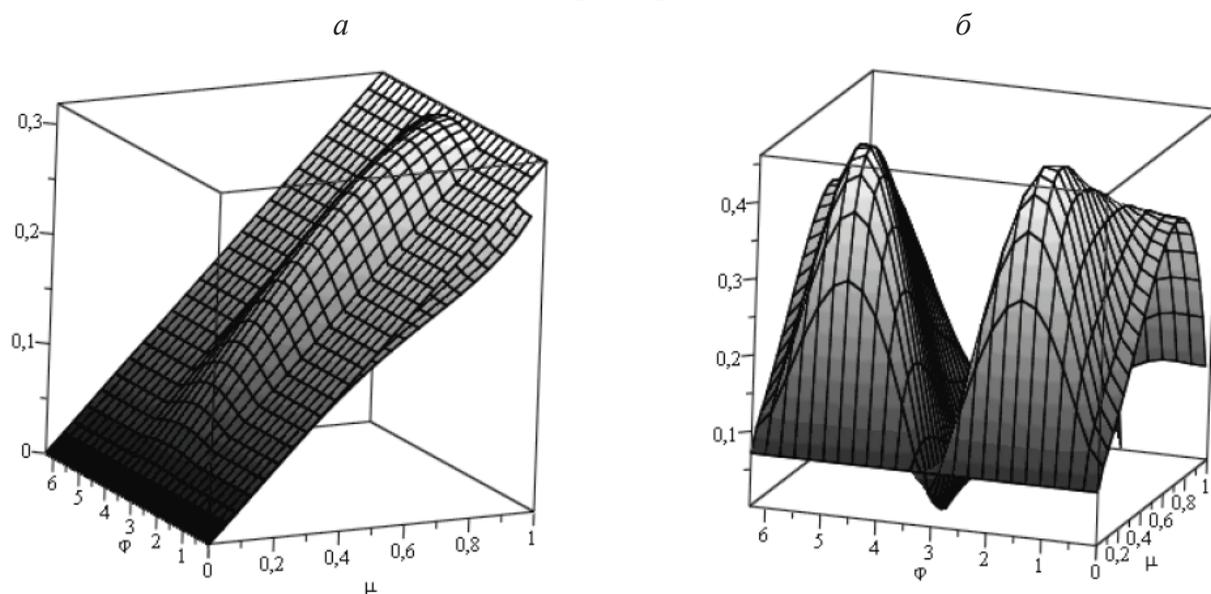


Рис. 1. Отраженное излучение. Молекулярная матрица. Угол падения  $45^\circ$ ,  $N = 5$  (а); отраженное излучение. Молекулярная матрица. Угол падения  $45^\circ$ ,  $N = 5$  (б)

Для оценки линейных функционалов от решения системы интегральных уравнений 2-го рода построена универсальная модификация весовой векторной оценки по столкновениям с ветвлением траектории цепи соответственно элементам матричного веса. Доказано, что трудоемкость построенного алгоритма ограничена, если ограничены базовые функционалы. Представлены результаты расчетов с использованием модифицированной весовой оценки для некоторых задач теории переноса излучения с учетом поляризации.

Построены и численно исследованы новые параллельно реализуемые весовые алгоритмы метода Монте-Карло для расчета углового распределения интенсивности и степени поляризации излучения, проходящего и отраженного оптически толстым рассеивающим слоем, основанные на разложении по системе базисных полусферических функций. С помощью статистического моделирования получены оценки отклонения данного углового распределения от ламбертовского, а также изучено влияние на него поляризации и оптических

параметров среды. Предложен новый алгоритм для определения параметров временной асимптотики на основе разложения по системе полиномов Лагерра.

**Проект РФФИ № 16-31-00123** "Разработка методов и алгоритмов численного стохастического моделирования для решения задач атмосферной оптики и статистической метеорологии".

Руководитель – к.ф.-м.н. Трачева Н. В.

Выполнен ряд работ по построению новых численных алгоритмов нахождения двунаправленных характеристик излучения, проходящего и отраженного оптически толстым слоем вещества, с учетом поляризации. На основе двух видов полусферических базисных функций разработаны эффективно распараллеливающиеся алгоритмы метода Монте-Карло для численного исследования пространственно-угловых распределений поляризационных характеристик рассеянного средой излучения. С помощью численного моделирования получены угловые распределения интенсивности и степени поляризации излучения в рассеивающей и поглощающей среде. Предложен новый алгоритм определения параметров временной асимптотики на основе ортогонального разложения по системе полиномов Лагерра.

**Проект РФФИ № 15-01-08988** "Разработка и качественный анализ методов численного статистического моделирования случайных процессов и полей, исследование погрешности алгоритмов, их эффективная параллельная реализация на суперкомпьютерах с целью решения ряда актуальных естественнонаучных задач".

Руководитель – д.ф.-м.н. Марченко М. А.

Газоструйное осаждение – один из широко используемых в настоящее время методов газофазного осаждения тонких пленок на различные поверхности. Один из способов реализации данного подхода заключается в использовании горячих цилиндрических каналов для активации исходных газов. Для детального изучения процесса активации газа при течении через цилиндрический канал разработан алгоритм метода прямого статистического моделирования (ПСМ) для моделирования течения смеси водорода с метаном в цилиндрическом канале с учетом гетерогенных и газофазных реакций. Для этих целей в алгоритм добавлена возможность моделирования диссоциации молекулярного водорода и рекомбинации атомарного водорода на поверхности канала. Также в алгоритм добавлена возможность моделирования следующих газофазных реакций обмена: разложение метана на метил и атомарный водород и обратная реакция восстановления метана из метила. Установлены зависимости изменения степени диссоциации метана при изменении длины канала и степени разреженности.

Рассматривался процесс переноса нейтронов в случайной среде. Используемые ранее методы вычисления критических параметров размножения нейтронов плохо распараллеливаются. В данной работе построен алгоритм, использующий метод двойной рандомизации, допускающий распараллеливание на суперЭВМ. Были подобраны параметры алгоритма для повышения точности результатов. Проведено численное сравнение с результатами опубликованных ранее работ и с методом гомогенизации.

### Публикации

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Andrey Yu. Ambos, Guennady Mikhailov, and Galiya Lotova, New Monte Carlo algorithms for investigation of criticality fluctuations in the particle scattering process with multiplication in

stochastic media // *Rus. J. of Num. Analysis and Math. Modelling*. 2017. Vol. 32, N 3. P. 165–172. DOI: 10.1515/rnam-2017-0014.

2. Medvedev I. N. Vector algorithms of the Monte Carlo method with finite computation cost // *Rus. J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2017. Vol. 32, N 6. P. 359–370. DOI: 10.1515/rnam-2017-0034.

3. Mikhailov G. A., Prigarin S. M., Rozhenko S. A. Modifications of the standard vector Monte Carlo estimate for characteristics analysis of scattered polarized radiation // *Dokl. Math.* 2017. Vol. 96, N 2. P. 461–464. DOI: 10.1134/S1064562417050143.

4. Rogazinsky S. V. Statistical modelling algorithm for solving the nonlinear Boltzmann equation based on the projection method // *Rus. J. of Num. Analysis and Math. Modelling*. 2017. V. 32, N 3. P. 197–202. DOI: 10.1515/rnam-2017-0017.

5. Tracheva N. V., Ukhinov S. A. Numerical statistical study of the angular distribution of the polarized radiation scattered by medium // *Ibid.* Vol. 32, N 2. P. 135–146. DOI: 10.1515/rnam-2017-0012.

6. Plotnikov M. Yu., Shkarupa E. V. Numerical estimation of heterogeneous reaction constants in the flow of rarefied gas through a cylindrical channel // *J. of Appl. Mech. and Techn. Phys.* 2017. Vol. 58, iss. 3. P. 402–409. DOI: 10.1134/S002189441703004X.

7. Prigarin S. M., Kablukova E. G., Rozhenko S. A., Zakovryashin A. V. Monte Carlo simulation of halos, glories, coronas and multiple scattering of light // *Proc. SPIE, 23rd Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 2017. Vol. 10466, paper 104661K. 30 November 2017. DOI: 10.1117/12.2287239.

#### **Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus**

1. Antyufeev V. Short proof of formula for composed layer // *J. of Math. Sci. (United States)*. 2017. Vol. 221, iss. 6. P. 772–777. DOI: 10.1007/s10958-017-3265-z.

#### **Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Рогазинский С. В. Статистическое моделирование на основе проекционного метода для решения нелинейного уравнения Больцмана // *Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПМ'17" в рамках "Марчуковских научных чтений"*, Новосибирск, 25 июня – 14 июля [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 728–733.

2. Трачева Н. В., Ухинов С. А. Проекционные оценки метода Монте-Карло для исследования угловых характеристик поляризованного излучения // *Там же*. С. 911–916.

3. Ухинов С. А., Корда А. С. Восстановление матрицы аэрозольного рассеяния по наземным наблюдениям поляризованного излучения // *Там же*. С. 412–418

4. Михайлов Г. А., Лотова Г. З. Новые алгоритмы метода Монте-Карло для исследования флуктуаций критичности процесса рассеяния частиц с размножением в случайных средах // *Там же*. С. 620–626.

5. Антюфеев В. С. Оценка числа обусловленности большой плохо обусловленной матрицы методом Монте-Карло // *Там же*. С. 34–39.

6. Бурмистров А. В., Коротченко М. А. Использование оценки по столкновениям при решении уравнения Смолуховского методом Монте-Карло // *Там же*. С. 126–132.

7. Медведев И. Н. Векторные алгоритмы метода Монте-Карло с конечной трудоемкостью // *Там же*. С. 606–613.

8. Трачева Н. В. Исследование угловых характеристик поляризованного излучения на основе численного статистического моделирования // *Труды конф. молодых ученых ИВМиМГ СО РАН*. С. 93–104. [Электрон. ресурс]. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_28411409\\_73355080.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_28411409_73355080.pdf) 2017.

### Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 – 10 докладов, в том числе 1 пленарный (Коротченко М. А., Медведев И. Н., Шкарупа Е. В., Трачева Н. В., Корда А. С., Лотова Г. З., Михайлов Г. А., Антюфеев В. С., Амбос А. Ю., Роженко С. А.).
2. Конференция молодых ученых ИВМиМГ СО РАН. Новосибирск, 24–25 апреля 2017 г.– 1 доклад (Трачева Н. В.).
3. International Conference on Monte Carlo Methods and Applications, MCM 2017, Montreal, Canada, July 3–7, 2017. – 1 доклад (Трачева Н. В., Ухинов С. А.).
4. Международная конференция "Математика в современном мире". Новосибирск, 14 – 19 августа 2017 г. – 4 доклада (Лотова Г. З., Ухинов С. А., Антюфеев В. С., Рогазинский С. В.).
5. Четвертый семинар по проблемам химического осаждения из газовой фазы, Новосибирск, 1–3 февраля 2017 г. – 1 доклад (Шкарупа Е. В.).
6. 23-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Иркутск, 3–7 июля 2017 г. – 1 доклад (Роженко С. А.).

### Участие в оргкомитетах конференций

1. Медведев И. Н. – член оргкомитета международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017.
2. Усов А. Г. – член оргкомитета международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.
3. Михайлов Г. А. – член Программного комитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

### Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 7  
 Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 1  
 Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 16  
 Докладов на конференциях – 18, в том числе 1 пленарный.  
 Участников оргкомитетов конференций – 3

### Кадровый состав

1. Рогазинский С. В.	зав. лаб.	д.ф.-м.н.
2. Михайлов Г. А.	советник РАН	чл.-корр. РАН
3. Антюфеев В. С.	с.н.с.	д.ф.-м.н.
4. Ухинов С. А.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
5. Лотова Г. З.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
6. Шкарупа Е. В.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
7. Медведев И. Н.	н.с.	к.ф.-м.н.
8. Коротченко М. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
9. Трачева Н. В. 0.5	н.с.	к.ф.-м.н.
10. Роженко С. А. 0.25	н.с.	к.ф.-м.н.
11. Корда А. С. 0.7	м.н.с.	к.ф.-м.н.

12. Амбос А. Ю. 0.25 м.н.с. к.ф.-м.н.

13. Усов А. Г. 0.1 ведущ. программист

Амбос А. Ю., Роженко С. А., Коротченко М. А., Корда А. С., Трачева Н. В. – молодые научные сотрудники

### **Педагогическая деятельность**

Михайлов Г. А. – профессор НГУ;

Рогазинский С. В. – профессор НГУ;

Ухинов С. А. – профессор НГУ, зам.декана ММФ;

Антюфеев В. С. – профессор НГУ, ВКИ НГУ и СУНЦ НГУ;

Медведев И. Н. – доцент НГУ;

Лотова Г. З. – старший преподаватель НГУ;

Усов А. Г. – старший преподаватель НГУ, зам. декана ММФ;

Трачева Н. В. – старший преподаватель НГУ.

### **Руководство аспирантами**

1. Зайцева А. А. – 2-й год, ММФ НГУ, руководитель Лотова Г. З.

### **Руководство студентами**

1. Андреева К. А. – 5-й курс ММФ НГУ, руководитель Медведев И. Н.

2. Николаев А. К. – 4 курс ММФ НГУ, руководитель Рогазинский С. В.

3. Колчунов А. П. – 4 курс ММФ НГУ, руководитель Рогазинский С. В.

4. Володин А. С. – 4 курс ММФ НГУ, руководитель Рогазинский С. В.

## **Лаборатория численного анализа стохастических дифференциальных уравнений**

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Марченко М. А.

### **Важнейшие достижения**

**Модификация комплекса программ AMIKS для численного анализа систем стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) для суперкомпьютерного кластера НКС-1П.**

Д.ф.-м.н. Марченко М. А., Иванов А. А., Смирнов Д. Д.

Разработанная для кластера НКС-1П модификация комплекса программ AMIKS позволяет реализовывать новые вычислительно трудоемкие модели стохастических осцилляторов с приложениями в естественных науках и технике, получать численные оценки их динамических характеристик и осуществлять параметрический анализ рассматриваемых моделей. В основе комплекса программ – переработанная под новые процессоры Intel Xeon Phi библиотека PARMONC.

### **Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершающимся в 2017 г. в соответствии с планом НИР института**

**Проект НИР 1.2.1.2 "Разработка весовых параметрических алгоритмов статистического моделирования для суперкомпьютерного решения многомерных задач в естественных и технических науках".**

Номер государственной регистрации НИР 0315-2016-0002.

Научный руководитель – чл.-корр. РАН Михайлов Г. А.

Выполнен численный анализ различных стохастических моделей химических реакций, движения частиц и зарядов в электромагнитном поле, движения ракет и спутников.

Разработан новый подход к решению задачи прогнозирования для стохастических систем диффузионно-скачкообразного типа. На основе численных методов решения стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) и алгоритмов моделирования пуассоновских потоков разработаны алгоритмы решения стохастических систем диффузионно-скачкообразного типа.

Разработаны новые алгоритмы метода Монте-Карло для решения задач, описываемых кинетическими уравнениями типа Больцмана. Соответствующие модели при этом основаны на использовании многочастичной модели газа, динамика в которой описывается уравнением Колмогорова. В частности, предложенные для решения задач коагуляции методы были адаптированы для изучения процесса ценообразования на бирже в стохастической кинетической модели больцмановского типа.

На основе методов Эйлера и блуждания по движущимся сферам разработан комбинированный алгоритм решения задач теплообмена в теплозащитных конструкциях сотового типа.

Проведены исследования в области численного анализа решений стохастических дифференциальных уравнений в частных производных (СДУЧП). Для проведения численного анализа решений СДУЧП разработаны и реализованы следующие статистические и частотные характеристики: частотный портрет решения (ЧПР), статистический портрет решения

(СПР), частотное временное сечение (ЧВС). С помощью разработанных характеристик были численно исследованы уравнения диффузии, Хопфа, Бюргерса, переноса. При исследовании стохастических уравнений в частных производных  $\sin$ -Гордона и Кортевега – де Фриза показано, что при определенных начальных условиях и значениях параметров решение каждого из этих уравнений является солитоном.

Разработаны новые методы численного статистического моделирования на пространственно адаптивных сетках с динамическим распределением вычислительной нагрузки на гибридных суперкомпьютерах – малой на отдельных ядрах и большой на графических картах для вычислений. Проведен численный анализ потери мощности солитонных импульсов RZ формата. Исследованы методы компенсации потерь пиковых мощностей и влияние управляемой дисперсии солитонов на случайные вариации задержки в оптическом приемнике.

Разработаны численные методы решения СДУ в частных производных. Методом статистического моделирования проведен численный анализ стохастических уравнений переноса и теплопроводности, разработаны параллельные алгоритмы статистического моделирования, реализованные в виде комплекса программ.

С помощью статистического моделирования проведен численный анализ осциллирующих решений систем СДУ, содержащих винеровскую и пуассоновскую составляющие. Для линейного осциллятора и осциллятора Ван-дер-Поля исследована точность оценок функционалов от численных решений СДУ, полученных обобщенным явным методом Эйлера. Для линейного осциллятора полученные точные аналитические выражения первых моментов решения СДУ позволяют исследовать зависимость точности их оценок от значений параметров СДУ, размеров шага интегрирования и ансамбля моделируемых траекторий решения. Для осциллятора Ван-дер-Поля исследована зависимость частоты и скорости затухания колебаний первых моментов решения СДУ от значений параметров пуассоновской составляющей.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 17-01-00698-а** "Разработка высокопроизводительных параллельных алгоритмов для численного анализа стохастических дифференциальных уравнений в частных производных в физике методом Монте-Карло".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Артемьев С. С.

В 2017 г. в ходе выполнения проекта получены следующие результаты.

В рамках работы над проектом доработан комплекс программ AMIKS для численного анализа стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) больших размерностей.

Наработан программный комплекс SPARDE1D, предназначенный для численного анализа решений стохастических дифференциальных уравнений в частных производных (СДУЧП) на базе комплекса программ AMIKS. Основным отличием является внедрение новых характеристик предназначенных для численного анализа решений СДУЧП: частотный портрет решения (ЧПР), статистический портрет решения (СПР), частотное временное сечение (ЧВС).

С помощью SPARDE1D проведено исследование СДУЧП Бюргерса, Хопфа, диффузии. В рамках работы внедрены новые инструменты анализа СДУЧП – ЧПР и ЧВС. Полученные результаты показали степень воздействия случайных внешних и внутренних возмущений на рассматриваемые стохастические уравнения.

Изучена модель движения заряженной частицы в магнитном поле космических объектов под воздействием внешних возмущений. Внешние возмущения могут быть интерпретированы как солнечный ветер, интенсивность и последствия воздействия которого не изучены до сих пор в полной мере. Показан характер движения заряженной частицы в магнитной ловушке в зависимости от интенсивности внешнего воздействия.

Базовыми моделями теории колебаний, на которых демонстрируется эффект синхронизации осцилляторов, являются связанные осцилляторы Ван-Дер-Поля и Дуффинга. Описание моделей кабельных вибраций, различных электрических цепей, балок с нелинейной жесткостью и напряжением в плоскости, а также многих других систем можно свести к уравнению Дуффинга. Если рассмотреть уравнение Дуффинга как самостоятельное, то с его помощью изучается эффект перемежаемости. Проведено исследование влияния случайных внутренних и внешних шумов различной интенсивности на синхронизацию осцилляторов Дуффинга. Данные наблюдений за влиянием случайных шумов на осцилляторы Дуффинга могут быть использованы в рамках изучения СДУЧП, таких как уравнения  $\sin$ -Гордона и Кортевега – де Фриза, поскольку при некоторых начальных данных и специальных параметрах уравнений решение представляется как солитон (волна, осциллятор).

Проведены исследования в области изучения уравнений Ван-дер-Поля и аттрактора Лоренца. На примере уравнения Ван-дер-Поля выполнено сравнение влияния мультипликативного шума и аддитивного шума разной интенсивности. Для аттрактора Лоренца проведен параметрический анализ, позволивший выявить граничное значение внешнего шума, при котором пропадает бифуркация.

Разработаны новые методы численного статистического моделирования распространения и взаимодействия световых импульсов (солитонов) в волоконно-оптических линиях связи под действием модуляционной неустойчивости, описываемых нелинейным уравнением Шредингера, с использованием адаптивных пространственных сеток – малых в момент взаимодействия солитонов и больших до и после взаимодействия.

Разработан параллельный комбинированный алгоритм на основе методов Эйлера и блуждания по движущимся сферам для решения задач теплообмена в теплозащитных конструкциях сотового типа, применяемых в авиации. Проведены расчеты теплового состояния обшивки самолета, содержащей сотовые теплозащитные панели. При этом в расчетах были использованы физические характеристики, полученные в результате летных испытаний. Расчеты показали 5–6-кратное уменьшение вычислительных затрат при использовании комбинированного метода по сравнению с методом Эйлера.

Разработаны новые алгоритмы метода Монте-Карло для решения ряда задач, описываемых кинетическими уравнениями типа Больцмана. Для решения нелинейного кинетического уравнения Смолуховского построены новые алгоритмы, реализующие весовые оценки "по столкновениям", которые позволяют одновременно вычислять решения для разных значений параметров, а также параметрические производные от решения. Построенные алгоритмы возможно применять в задачах интерполяции, а также для рандомизированного ветвления траекторий ансамбля взаимодействующих частиц.

Рассмотрена задача численной оценки функционалов от решения системы нелинейных уравнений типа Больцмана, которая возникает в стохастической кинетической модели формирования цены актива. Актуальность изучения данного вопроса связана с постоянным увеличением объема высокочастотной торговли на финансовых рынках. Это приводит к необходимости улучшения торговых алгоритмов с учетом случайности параметров ценового ряда, таких как коэффициент роста и волатильность, и поведения продавцов и покупателей

во время торговой сессии. Для исходной вероятностной модели цены авторами построено интегральное уравнение второго рода, связанное с линейной многочастичной моделью динамики поведения множества продавцов и покупателей на бирже. Для оценки функционалов от решения полученного уравнения предложено использовать аппарат весовых алгоритмов метода Монте-Карло.

**Проект РФФИ № 15-01-08988-а** "Разработка и качественный анализ методов численного статистического моделирования случайных процессов и полей, исследование погрешности алгоритмов, их эффективная параллельная реализация на суперкомпьютерах с целью решения ряда актуальных естественнонаучных задач".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Марченко М. А.

В 2017 г. в ходе выполнения проекта получены следующие результаты.

Разработан параллельный алгоритм распределенного численного статистического моделирования для параметрического анализа вероятностных моделей, связанных с ветвящимися процессами. Предложен новый параллельный алгоритм численного статистического моделирования для исследования задач переноса заряженных частиц с учетом взаимодействия частиц с образующимися ионами.

Построен параллельный алгоритм численного статистического моделирования для решения нелинейного уравнения коагуляции с учетом химических реакций. Создан параллельный алгоритм рандомизированного проекционного метода для глобальной оценки решения нелинейного кинетического уравнения Больцмана. Разработан параллельный алгоритм метода прямого статистического моделирования степени диссоциации метана вследствие газофазных реакций при течении разреженной смеси водорода и метана через цилиндрический канал.

Предложены новые алгоритмы численного статистического моделирования для расчета характеристик аномальных метеорологических явлений на суперкомпьютере, а также параллельные алгоритмы для оценки этих характеристик по модельным выборкам. Получены численные результаты исследования точности алгоритмов моделирования полей на сетках большого разрешения и построены стохастические численные модели полей сумм осадков на таких сетках, необходимые для решения задач гидрологии по оценке характеристик стока рек.

Разработана модификация библиотеки PARMONC для использования процессоров Intel Xeon Phi 7290 KNL, которая была установлена на кластере НКС-1П в ЦКП ССКЦ СО РАН. На основе этой модификации создан новый вариант комплекса программ AMIKS для численного анализа стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) больших размерностей.

**Проект РФФИ № 15-01-05052-а** "Численная диагностика и прогноз наноструктур в нанокompозитах, содержащих зерна карбида кремния".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Змиевская Г. И. (ИПМ РАН)

В 2017 г. в ходе выполнения проекта получены следующие результаты.

Начальная флуктуационная стадия фазового перехода первого рода представлена моделью процесса конденсации, описанной СДУ с винеровской и пуассоновской составляющими. Устойчивые алгоритмы решения СДУ для непрерывной компоненты процесса дополнены алгоритмами моделирования неоднородной пуассоновской меры. Кластеризация зародышей жидкой фазы в форме капель происходит с учетом релеевской неустойчивости заряженных капель. Расчеты зарядового диспергирования капель расплава карбида кремния

иллюстрируют формирование их бимодального распределения по размерам в процессе получения порошка.

### Публикации

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Марченко М. А., Иванов А. А., Смирнов Д. Д. Комплекс программ AMIKS для численного решения СДУ методом Монте-Карло на суперкомпьютерах // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22, № 3. С. 61–70. (RSCI)

2. Аверина Т. А., Рыбаков К. А. Приближенное решение задачи прогнозирования для стохастических систем диффузионно-скачкообразного типа // СибЖВМ. 2017. Т. 20, № 1. С. 1–13.

[Averina T. A., Rybakov K. A. Solving approximately a prediction problem for stochastic jump-diffusion systems // Num. Analysis and Appl. 2017. Т. 10, iss. 1. P. 1–10]. DOI: 10.1134/S1995423917010013.

3. Gusev S. A., Nikolaev V. N. Optimization parameters of air-conditioning and heat insulation systems of a pressurized cabins of long-distance airplanes // IOP Conf. Ser. Materials Sci. and Engineering. 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012042.

4. Gusev S. A., Nikolaev V. N. Estimation of the thermal process in the honeycomb panel by a Monte Carlo method // IOP Conf. Ser. Materials Sci. and Engineering. 2017. Vol. 302, conf. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012045.

5. Lopatnikova J. A., Alshevskaya A. A., Krugleeva O. L., Nepomnyschih V. M., Gladkikh V. S., Lukinov V. L., Karaulov A. V., Sennikov S. V. Expression of TNF $\alpha$  receptors on immunocompetent cells is increased in atopic dermatitis // Intern. Archives of Allergy and Immunology. 2017. Vol. 174. N 3–4. P. 151–160. DOI: 10.1159/000481135.

6. Alshevskaya A. A., Lopatnikova J., Shkaruba N., Chumasova O., Sizikov A., Lukinov V., Moskalev A., Sennikov S. Expression density of receptors to TNF-alpha is associated with DAS-28 score in rheumatoid arthritis // Annals of the rheumatic diseases. 2017. Vol. 76. P. 1056. DOI: 10.1136/annrheumdis-2017-eular.2643.

7. Averina T., Karachanskaya E, Rybakov R. Statistical modeling of random processes with invariants // Proc. of the 2017 Intern. multi-conf. on engineering, comput. and inform. sci. "SIBIRCON", Novosibirsk, Sept. 18–22, 2017. P. 34–37. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109832.

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Артемьев С. С., Якунин М. А. Параметрический анализ осциллирующих решений СДУ с винеровской и пуассоновской составляющими методом Монте-Карло // Сиб. журн. индустриальной математики. 2017. Т. 20, № 2. С. 3–14.

[Artem'ev S. S., Yakunin M. A. Parametric analysis of the oscillatory solutions to stochastic differential equations with the wiener and poisson components by the Monte Carlo method // J. of Appl. and Industrial Mathematics. 2017. Vol. 11, N 2. P. 157–167. DOI: 10.1134/S1990478917020016.

2. Иванов А. А. Анализ стохастического движения заряженной частицы в магнитном поле методом Монте-Карло на суперкомпьютерах // СибЖИМ. Новосибирск, 2017. № 3. С. 31–38. DOI: 10.1134/S1990478917030073.

3. Chernyavsky A. M., Kurguzov A. V., Lukinov V. L. Evaluation of aspirin usage safety in coronary bypass surgery // Russ. J. of Cardiology. 2017. N 8 (148). P. 96–101. DOI: 10.15829/1560-4071-2017-8-96-101.

**Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Марченко М. А., Сушкевич Т. А. О параллельном моделировании кинетических процессов методом Монте-Карло (посвящается памяти главного теоретика космонавтики акад. М. В. Келдыша) // Выч. методы и программирование. 2017. Т. 18, вып. 4. С. 434–446.
2. Аверина Т. А., Рыбаков К. А. Статистические алгоритмы прогнозирования для нелинейных стохастических систем диффузионно-скачкообразного типа // Диф. уравнения и процессы упр. 2017. № 2. С. 130–152.
3. Аверина Т. А., Змиевская Г. И. Неравновесная стадия фазового перехода первого рода: стохастические модели и алгоритмы решения // Препр. ИПМ им. М. В. Келдыша. 2017. № 103. С. 1–33.
4. Николаев В. Н., Гусев С. А. Экспериментально-теоретические исследования негерметизированного отсека летательного аппарата с сотовыми конструкциями обшивки // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 9. С. 10–19.
5. Николаев В. Н., Гусев С. А. Математическое моделирование теплового состояния отсеков и систем самолета с сотовыми конструкциями обшивки // Полет. 2017. № 5. С. 3–11.
6. Гусев С. А., Николаев В. Н. Численно-статистический метод для решения задач теплообмена в теплозащитных конструкциях сотового типа. // Сиб. журн. науки и технологий. 2017. № 4.
7. Марченко М. А. Распределенное численное статистическое моделирование ветвящихся процессов с учетом архитектуры суперЭВМ // Труды Междунар. конф. по вычислительной и прикладной математике (ВПП'17) в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 588–594.
8. Аверина Т. А., Рыбаков К. А. Статистические алгоритмы прогнозирования для нелинейных стохастических систем с пуассоновской составляющей // Там же. С. 69–75.
9. Аверина Т. А. Аналитические и численные решения трех систем стохастических дифференциальных уравнений с инвариантами // Материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. "Аналитические и численные методы моделирования естественно-научных и социальных проблем", Пенза, 4–6 дек. 2017 г.
10. Бурмистров А. В., Новиков А. В. Стохастическая кинетическая модель формирования цены // Междунар. науч.-исслед. журн. 2017. № 7–3 (61). С. 107–112.
11. Новиков А. В., Бурмистров А. В. Моделирование ценового ряда в рамках стохастической дифференциальной модели // Символ науки. 2017. Т. 2. № 4. С. 17–21.
12. Бурмистров А. В., Новиков А. В. Усовершенствование стохастической дифференциальной модели ценового ряда // Труды Междунар. конф. по вычислительной и прикладной математике "ВПП'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 654–658.
13. Бурмистров А. В., Коротченко М. А. Использование оценки по столкновениям при решении уравнения Смолуховского методом Монте-Карло // Там же. С. 126–132.
14. Артемьев С. С., Иванов А. А. Анализ решений стохастического уравнения Бюргерса методом Монте-Карло // Там же. С. 45–50.
15. Гусев С. А., Николаев В. Н. Применение метода случайного блуждания по сферам в сочетании с методом Эйлера для расчета теплового состояния сотовых теплозащитных конструкций // Там же. С. 244–249.
16. Якунин М. А. Анализ стохастических осцилляторов методом статистического моделирования // Там же. С. 1033–1038.

17. Аверина Т. А., Карачанская Е. В., Рыбаков К. А. Моделирование траекторий стохастических динамических систем на заданном многообразии // Материалы 20-й Междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС'2017), Алушта, 24–31 мая 2017 г. С. 28–31.

### **Свидетельства о регистрации в Роспатенте**

1. Лебедева М. Н., Иванова А. А., Лукинов В. Л. Способ прогнозирования интраоперационной кровопотери у больных с идиопатическим сколиозом. Св-во о регистрации программы для ЭВМ № 2016146065/15.

### **Сдано в печать**

1. Иванов А.А. Анализ влияния случайных шумов на синхронизацию в связанных осцилляторах Дуффинга.

2. Артемьев С.С., Иванов А.А. Анализ решений стохастического уравнения Бюргерса методом Монте-Карло.

3. Ivanov A.A. Analysis of the influence of random noise upon the properties of stochastic oscillators by the Monte Carlo method using supercomputers.

### **Участие в конференциях и совещаниях**

1. 13-я Международная Азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем", в рамках международной мультikonференции IEEE SIBIRCON, Новосибирск, 18–22 сент. 2017 г. – 1 доклад (Аверина Т. А.).

2. Международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород Московской обл., 13–17 февр. 2017 г – 1 доклад (Аверина Т. А.).

3. Международная конференция "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ'17), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 9 докладов (Артемьев С. С., Аверина Т. А., Бурмистров А. В., Гусев С. А., Иванов А. А., Лукинов В. Л., Марченко М. А., Смирнов Д. Д., Якунин М. А.).

4. 11-я Международная молодежная школа–конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 2017 – 2 доклада (Марченко М. А., Смирнов Д. Д., Иванов А. А.).

5. Optimization parameters of air-conditioning and heat insulation systems of a pressurized cabins of long-distance airplanes // Intern. conf. on aerospace technology, communications and energy systems, Samara, Sept. 28–30, 2017 – 2 доклада (Гусев С. А.).

6. 21-я Международная научно-практическая конференция "Решетневские чтения – 2017", Красноярск, 8–11 нояб. 2017 г. – 1 доклад (Гусев С. А.).

7. 22-я Международная конференция по прикладной математике "АМАТН '17", Рим (Италия), 15–17 дек. 2017 г. – 1 доклад (Лукинов В. Л.).

8. Международная конференция "Математика в современном мире", Новосибирск, 14–19 авг. 2017 г. – 2 доклада (Аверина Т. А., Смирнов Д. Д.).

9. 20-я Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС'2017), Алушта, 24–31 мая 2017 г. С. 28–31. (Аверина Т. А.) – 1 доклад.

10. Международная конференция "Суперкомпьютерные дни в России", Москва, 25–26 сент. 2017 г. – 1 доклад (Марченко М. А.).

11. The 5th Russian-Chinese workshop on numerical mathematics and scientific computing, Novosibirsk, Jun. 29–30, 2017 – 1 доклад (Марченко М. А.).

**Итоговые данные по лаборатории**

Публикаций, индексируемых в базе данных Wos – 7  
Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 9  
Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 27  
Свидетельств о регистрации программ и баз данных в Роспатенте – 1  
Докладов на конференциях – 21

**Кадровый состав**

1. Марченко М. А. зав. лаб., д.ф.-м.н.
2. Артемьев С. С. г.н.с., д.ф.-м.н.
3. Аверина Т. А. с.н.с., к.ф.-м.н.
4. Гусев С. А. с.н.с., д.ф.-м.н.
5. Бурмистров А. В. н.с., к.ф.-м.н.
6. Иванов А. А. м.н.с.
7. Лукинов В. Л. с.н.с., к.ф.-м.н.
8. Махоткин О. А. н.с., к.ф.-м.н.
9. Смирнов Д. Д. м.н.с.
10. Якунин М. А. с.н.с., к.ф.-м.н.

Иванов А. А., Лукинов В. Л., Смирнов Д. Д. – молодые научные сотрудники.

**Педагогическая деятельность**

Марченко М. А. – доцент НГУ  
Артемьев С. С. – профессор НГУ  
Аверина Т. А. – доцент НГУ  
Гусев С. А. – профессор НГТУ  
Махоткин О. А. – доцент НГУ  
Лукинов В. Л. – ассистент НГУ  
Бурмистров А. В. – ст. преподаватель НГУ

**Руководство аспирантами**

Евсеева В. М. – 2-й год, ИВМиМГ, руководитель Артемьев С. С.

**Руководство студентами**

Самойлов Н. В. – 2-й курс магистратуры, ММФ НГУ, руководитель Артемьев С. С.

## Лаборатория стохастических задач

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

### Важнейшие достижения

#### **Разработка стохастической модели и алгоритма моделирования процессов аннигиляции электронов и дырок в неоднородных полупроводниковых материалах и исследование квантовой эффективности GaN полупроводников.**

Дано объяснение степенного спада интенсивности фотолюминесценции, а также получена оценка квантовой эффективности светодиодных устройств. Данные исследования позволят более детально изучить квантовую эффективность различных полупроводниковых материалов и на основе этих фундаментальных знаний построить новые светодиодные устройства, такие как лазеры в определенных диапазонах длин волн и элементная база для оптоэлектроники.

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

#### **Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершаемым в 2017 г. в соответствии с планом НИР института**

**Проект НИР 1.2.1.2 "Разработка весовых параметрических алгоритмов статистического моделирования для суперкомпьютерного решения многомерных задач в естественных и технических науках".**

Номер государственной регистрации НИР 0315-2016-0002.

Научный руководитель – чл.-корр. РАН Михайлов Г. А.

1. Построены новые нестационарные алгоритмы блуждания по сферам для вычисления потоков решений при общих граничных условиях типа Робена.

Разработан векторный стохастический алгоритм для вычисления итераций матриц и матричных градиентов, которые оказываются особенно эффективными при нахождении главного собственного вектора стохастической матрицы, в частности, при решении задачи PageRank, используемой в поисковых системах Google.

2. Проведен анализ рандомизированных алгоритмов численного приближения решения интегрального уравнения Фредгольма второго рода с точки зрения их применения для практически важных задач математической физики. Среди этих алгоритмов выделены проекционные, сеточные и проекционно-сеточные методы. Показаны определенные преимущества проекционных и проекционно-сеточных методов, позволяющие использовать их при численном решении уравнений с интегрируемыми особенностями в ядрах и свободных членах. Рассмотрены проблемы условной оптимизации изучаемых функциональных алгоритмов.

3. Выполнено численное моделирование методом Монте-Карло радиационного режима в системе атмосфера – водная среда для широкого набора оптических параметров атмосферы и водной среды. Стохастическая структура ветрового волнения водоема моделировалась с помощью факетной модели. Изучено влияние перистой и слоистой облачности, присутствующих в атмосфере, на угловые распределения видимого излучения в водных средах. Исследованы освещенность, потоки и угловые распределения излучения на различных уровнях в облачном слое и водной толще при различных отражающих свойствах подстилающей поверхности и силе ветра. Показано, что за счет перераспределения направлений

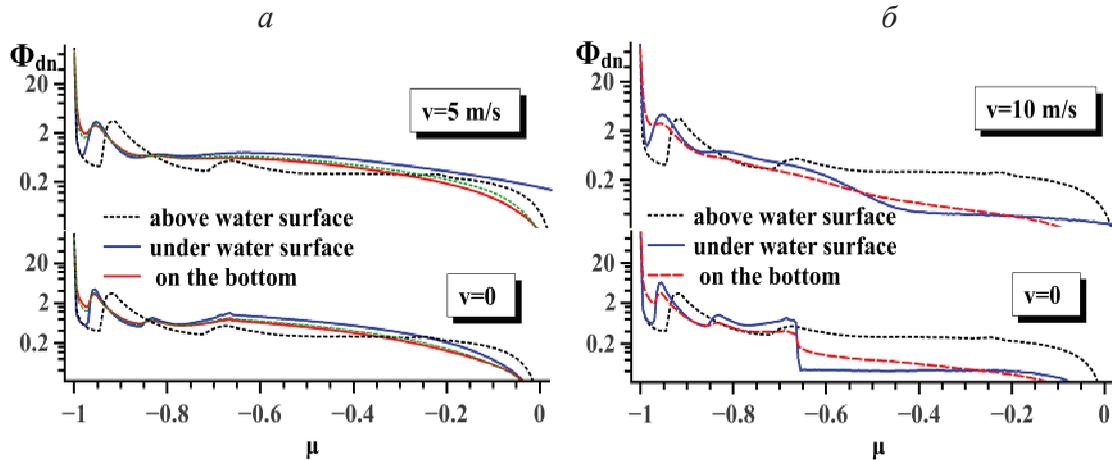


Рис. 1 Зависимость углового распределения интенсивности излучения от косинуса зенитного угла  $\mu$  в нижнюю полусферу для плоской ( $v=0$ ) и случайной взволнованной поверхности ( $v=5, 10$  м/с) в присутствии кристаллического облака (с оптической толщиной 0.5) в атмосфере для случаев, когда альbedo подстилающей поверхности  $Q=0.5$  (слева) и  $Q=0$  (справа).

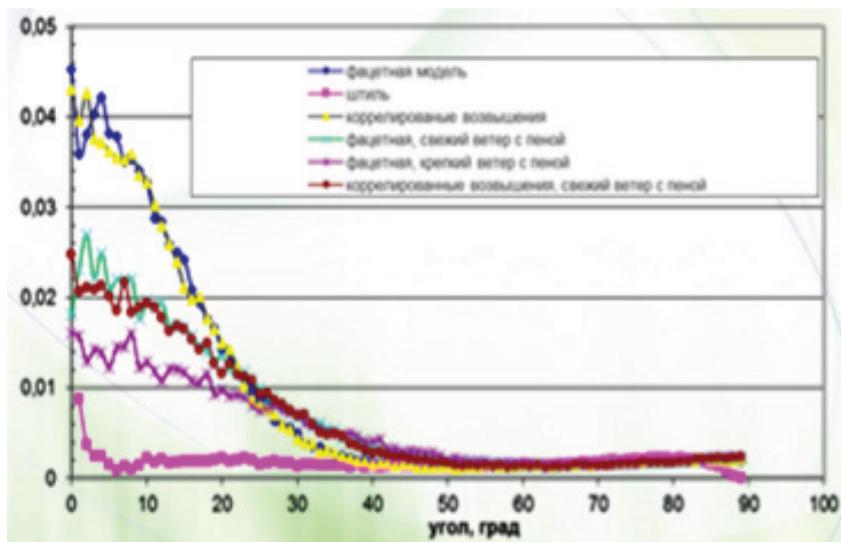


Рис. 2. Угловое распределение средней интенсивности излучения, отраженного верхним слоем океана в атмосферу в зависимости от скорости ветра для двух моделей ветрового волнения с учетом и без учета пены

излучения облаками и особенностей отражения и преломления на границе раздела вода – воздух в угловом распределении интенсивности излучения появляются локальные максимумы. Показано, что увеличение дисперсий наклонов волн приводит к сглаживанию угловых распределений интенсивности излучения.

4. Проведена оценка статистических характеристик полей облачности, восстановленных по результатам наземных и самолетных наблюдений. Оценены одномерные распределения и корреляционные функции полей перистой и слоистой облачности. На основе полученных данных построена численная стохастическая модель полей оптических толщин перистого и слоистого облачных слоев. Гауссовские поля, необходимые для реализации данного алгоритма, моделируются на основе представления корреляционной матрицы поля в виде прямого произведения корреляционных матриц по координатным осям так называемым

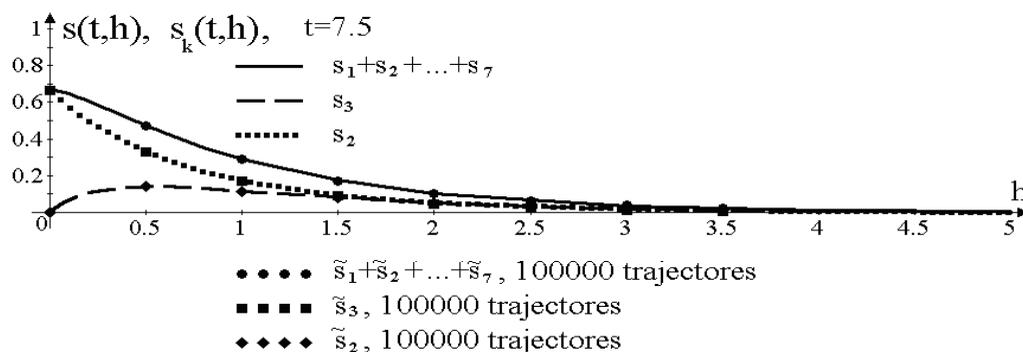


Рис. 3. Ковариационная функция  $s(t,h)=s_1(t,h)+\dots+s_7(t,h)$  кусочно-линейного процесса на пуассоновском потоке с независимыми одинаково распределенными величинами в точках потока: сплошная линия – теоретическая, точки— функции, вычисленные по модельным траекториям

методом по строкам и столбцам. Для восстановления одномерного распределения поля оптических толщин применяется метод обратной функции распределения.

5. Исследованы свойства корреляционной функции кусочно-линейного случайного процесса, построенного на пуассоновских потоках с независимыми одинаково распределенными величинами в пуассоновских точках. Получены точные выражения для корреляционной функции процесса. На основе этих выражений численно показано, что корреляционная функция этого процесса, в отличие от кусочно-линейных процессов, имеет точку перегиба. Выявлены условия, определяющие наличие перегиба в корреляционной функции. Численно показано, что функция распределения процесса также имеет точку перегиба.

Продолжены исследования приближенных моделей гауссовских периодически коррелированных процессов на основе спектрального представления и на основе векторной модели авторегрессии на примере моделирования временных рядов температуры воздуха с учетом суточного хода. Численно показано, что второй алгоритм более точно воспроизводит корреляционную структуру реальных процессов, поскольку учитывает перекрестные корреляции. Рассматриваются подходы к учету перекрестных корреляций в спектральных моделях периодически коррелированных процессов.

Предложена стохастическая модель совместных нестационарных временных рядов: рядов индикаторов суточных осадков, минимальной и максимальной суточной температуры приземного воздуха на годовом интервале на основе специального преобразования латентных гауссовских рядов. Получены аналитические выражения, связывающие корреляционные функции латентного гауссовского и индикаторного рядов, позволяющие существенно сократить время вычисления значений корреляционной функции латентного ряда при заданных значениях корреляционной функции индикаторного ряда. Предложены соответствующие алгоритмы моделирования.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ 16-31-00038-мол-а** "Разработка и качественный анализ алгоритмов численного стохастического моделирования случайных процессов и полей".

Руководитель – канд. физ.-мат. наук Каргаполова Н. А.

Разработаны и исследованы эффективные алгоритмы моделирования однородных случайных полей, а также алгоритмы моделирования периодически коррелированных

случайных процессов на основе их спектрального представления. Построенные алгоритмы применены для разработки и реализации численной стохастической модели совместных временных рядов приземной температуры и относительной влажности воздуха с использованием данных реальных наблюдений, пространственно-временной модели полей осадков и модели нестационарных совместных рядов индикаторов выпадения осадков, суточной минимальной и максимальной приземной температуры воздуха. Кроме того, построены новые комбинированные алгоритмы статистического моделирования переноса поляризованного излучения. Эффективность одного из них исследована на задаче о переносе излучения через облачный слой.

**Проект РФФИ № 16-01-00145** "Методы статистического моделирования для решения задач активного и пассивного дистанционного зондирования облачной атмосферы".

Руководитель – д.ф.-м.н. Пригарин С. М.

На протяжении второго года работы над проектом разработаны и реализованы новые методы и алгоритмы статистического моделирования для решения ряда задач атмосферной оптики, дистанционного зондирования, а также для исследования радиационного баланса и процессов переноса излучения в океане и облачной атмосфере. Основные результаты за отчетный период получены по следующим направлениям:

– Исследование влияния многократного рассеяния излучения на формирование лидарных эхо-сигналов. Изучение особенностей распространения зондирующих лазерных импульсов в атмосферной облачности и водных средах.

– Разработка новых весовых методов Монте-Карло для моделирования процессов переноса поляризованного излучения. Исследование методом Монте-Карло радиационных полей в океане и атмосфере с различными типами облачности. Изучение влияния отражения и преломления света на границе раздела вода – воздух на интегральные и угловые характеристики радиационных полей.

– Разработка и исследование новых методов моделирования случайных функций для решения прикладных задач оптики атмосферы и океана, в которых необходимо использовать адекватные модели природных процессов и полей. Создание численных моделей стохастической структуры слоистой и перистой облачностей на основе наземных и самолетных наблюдений.

За отчетный период опубликовано и принято к печати 8 работ, в том числе включая 5 статей в зарубежных и российских рецензируемых журналах. Результаты исследований были представлены в виде 6 докладов на международных и двух – на региональной конференциях.

**Проект РФФИ № 15-01-00977** "Стохастические краевые задачи и их приложения в задачах математической физики и физхимии: модели и методы Монте-Карло на основе случайных блужданий".

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

В 2017 г. получены следующие результаты: развиты новые подходы и алгоритмы стохастического моделирования для решения нестационарных краевых задач со случайными входными данными; разработаны градиентные стохастические алгоритмы рандомизированного вычисления итераций матричных операторов высокой размерности. Построенные алгоритмы будут полезны при исследовании эволюции Марковских цепей с очень большим числом состояний и вычислении стационарного распределения таких Марковских процессов.

**Проект РФФИ №15-01-01458** "Разработка и исследование численных стохастических моделей случайных процессов и полей для решения задач статистической метеорологии, гидрологии, океанологии и геофизики"

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

На протяжении третьего года работы над проектом получены следующие основные результаты:

– Разработаны методы оценки параметров и входных характеристик приближенных спектральных моделей гауссовских периодически коррелированных процессов по реальным данным. Построена модель периодически коррелированных рядов температуры воздуха и относительной влажности приземного воздуха на основе метода нормализации данных и векторной модели авторегрессии.

– По выборкам малого объема проведено исследование статистической структуры случайного поля среднесуточной приземной температуры воздуха на территории Новосибирской области. Построены соответствующие аппроксимации эмпирических функций распределения смесью нормальных распределений. На основе специально разработанного критерия оценена степень неоднородности поля по корреляциям. Показано, что поле близко к однородному.

– Построена и верифицирована стохастическая численная модель совместных временных рядов минимальной и максимальной температуры воздуха и индикаторов выпадения осадков на годовом интервале времени с учетом годового хода параметров распределения по данным реальных наблюдений.

– Разработан приближенный алгоритм моделирования негауссовских условных полей сумм осадков на основе алгоритмов моделирования условных гауссовских полей и метода обратных функций распределения. Для реализации этого метода используется приближение, в соответствии с которым отсутствие осадков отождествляется с нулевым количеством осадков. Предложен специальный прием пересчета корреляций негауссовского поля в корреляции гауссовского поля. Предложены специальные алгоритмы нормализации данных об осадках, содержащих нулевые значения, для которых стандартный метод нормализации неприменим. На основе численной условной пространственно-временной модели методом прямого моделирования вычисляются поля вероятностей попадания осадков в заданные интервалы при фиксированных значениях на станциях в предшествующие сутки.

– Получены достаточные условия сходимости рандомизированных и нерандомизированных моделей морской поверхности с аномально высокими волнами в пространствах интегрируемых и непрерывно дифференцируемых функций.

– С помощью подсеточного моделирования вычислены эффективные коэффициенты для квазистационарных уравнений Максвелла в многомасштабной анизотропной трехмерной среде. Сравнение теоретических результатов с результатами, полученными прямым численным моделированием трехмерной задачи, показало эффективность предложенного подхода.

### Результаты работ по президентским проектам

**Проект МК-659.2017.1** "Имитационное стохастическое моделирование метеорологических процессов: разработка и исследование эффективных алгоритмов моделирования случайных полей, построение моделей и вероятностный анализ экстремальных метеорологических явлений".

Руководитель – канд. физ.-мат. наук Каргаполова Н. А.

В рамках проекта на основе реальных данных разработан ряд стохастических моделей комплексов нестационарных метеорологических и гидрометеорологических процессов, учитывающих нестационарность по времени и неоднородность по пространству реальных метеорологических процессов. Модели применены для вероятностного анализа экстремальных и аномальных метеособытий. На основе модельных реализаций проведено исследование поведения речного стока как функции от осадков, в частности в условиях экстремальных режимов выпадения осадков.

### Результаты работ по проектам РНФ

**Проект РНФ № 14-11-00083** "Стохастические и клеточно-автоматные модели и алгоритмы для систем нелинейных интегро-дифференциальных уравнений и их применение к моделированию бимолекулярных реакций и процессов аннигиляции электронов и дырок в нановискерах".

**Этап 2017–2018 гг.**

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

В 2017 г. получены следующие научные результаты:

1. Реализованы разработанные нами стохастические и конечно-автоматные алгоритмы для практических расчетов решения интегро-дифференциальной системы уравнений для бимолекулярных реакций, описывающих кинетику аннигиляции электронов и дырок в неоднородных проводниках. В совместных исследованиях с группой физиков-экспериментаторов из Института твердотельной электроники им. Пауля Друде (Берлин) дано объяснение степенного спада интенсивности фотолюминесценции, а также получена оценка квантовой эффективности светодиодных устройств на основе Ga-полярных (In,Ga)N.GaN квантовых ям, проведен детальный сравнительный анализ рекомбинации носителей заряда, их флуктуирующей диффузии и радиационной эффективности. Опубликована совместная статья в журнале *Physical Review Applied* (импакт-фактор 5.8, входит в первый квартиль (Q1) реферативной базы *Web of Science*). В этой работе удалось показать с помощью расчетов и подтвердить экспериментально, что даже в случае доминирования нерадиационной рекомбинации степенной закон спада интенсивности фотолюминесценции для (In,Ga)N.GaN квантовых ям и дисков сохраняется. Кроме двумерных, построена и реализована трехмерная модель аннигиляции электронов и дырок, расчеты по которой показывают, что менее выраженная сегрегация электронов и дырок также приводит к степенному спаду интенсивности фотолюминесценции. Результаты опубликованы в журнале *Journal of Computational Electronics*.

При исследовании влияния флуктуаций начального пространственного распределения электронов и дырок применялось не только прямое стохастическое моделирование, фактически это идея кинетического метода Монте-Карло, но был разработан специальный метод полиномиального разложения хаоса в вероятностном функциональном пространстве. Данные исследования опубликованы в журнале *Monte Carlo Methods and Applications*. Предложенный метод дает возможность более непосредственно решать обратную задачу об оценке коэффициента диффузии электронов по кривым интенсивности фотолюминесценции. Результаты использования данной методики применительно к диффузионному транспорту частиц изложены в работе, опубликованной в журнале *Journal of Inverse and Ill-posed problems*.

2. Разработаны стохастический метод и параллельный алгоритм моделирования процесса окисления, протекающего в пористом углероде. С помощью разработанной техники

моделирования проведены численные расчеты для двумерной модели. Сравнения были проведены на реальных экспериментах по электрохимическому окислению пористого углерода совместно с группой химиков из Института катализа им. Борескова СО РАН. О результатах работы было доложено на Международной конференции "14th International Conference on parallel computing technologies". Доклад, опубликованный в журнале *Lecture Notes in Computer Science*, получил приз "Best paper award".

3. В 2017 г. разработана стохастическая компьютерная модель эпитаксиального роста нановискеров, которая позволяет учесть коалесценцию нановискеров и моделировать процесс роста, а также поддерживать нужное соотношение концентраций поступающих атомов галлия и азота. Результаты этой работы опубликованы в журнале *Journal of computational materials science*, входящем в первый квартиль (Q1) *Web of Sci*. В данной работе проведено детальное исследование процесса эпитаксиального роста GaN нановискеров на основе расширенной модели, учитывающей их коалесценцию; концентрации атомов галлия и азота автоматически поддерживались в нужной пропорции, и происходило зарождение новых нановискеров на подложке. Компьютерное моделирование позволило исследовать различные режимы роста, и уточнить ряд параметров, полученных ранее в экспериментальных работах. В частности, моделирование показало, что в нашей работе, опубликованной в журнале *Nano Letters* в 2016 г., степень коалесценции была значительно завышена. Отметим, что наша расширенная модель 2017 г. достаточно точно описала кинетику роста и другие параметры, такие как покрытие, распределение нановискеров по высоте и диаметрам, полученные экспериментально в данной работе.

4. Построена математическая модель взаимодействия экситонов и дислокаций, которая применяется к решению задачи об интенсивности катодолюминесценции и тока, индуцированного электронным пучком, используемая экспериментаторами в методах измерения сигналов взаимодействия экситонов и дислокации. Созданы высокоэффективные и достаточно универсальные стохастические алгоритмы моделирования транспорта экситонов в полупроводниковых материалах и расчета интенсивности катодолюминесценции (CL) и тока, индуцированного электронным пучком (EBIC). Данные физические методы измерения используются при визуализации дислокаций в полупроводниковых материалах на основе построения контрастных карт, а также других дефектов в кристаллах. Работы проводились совместно с группой физиков-экспериментаторов из Института твердотельной электроники им. П. Друде (Берлин). В совместной работе, опубликованной в журнале *Journal of Physics D: Applied Physics*, получено полное аналитическое решение задачи о катодолюминесценции для случая проникающей дислокации с произвольными коэффициентами рекомбинации экситонов на поверхности дислокации и на поверхности полупроводника. Для обоснования решения руководителем данного проекта доказана теорема взаимности. Аналитические решения хорошо описывают экспериментальные кривые интенсивности катодолюминесценции, что показано в упомянутой совместной работе.

Для численных и экспериментальных исследований нового эффекта, обнаруженного нами в работах по данному проекту в 2016 г., связанного с влиянием упругих сил в окрестности дислокации на появление дрейфовых скоростей экситонов, в 2017 г. осуществлены работы по оценке влияния поля скоростей дрейфа на кривые катодолюминесценции. Эта задача требует больших вычислительных ресурсов, поэтому компьютерная реализация производилась с помощью распараллеливания в Сибирском суперкомпьютерном центре. Результаты исследования опубликованы в журнале *Communications in Computer and Information Science*. Отметим два наиболее важных результата, полученных в результате расчетов: 1) влияние

дрифта сказывается прежде всего в появлении асимметрии сигнала катодолюминесценции; 2) дрейф увеличивает контраст. Эти исследования показали также, что детальное разрешение по времени сигнала катодолюминесценции от мгновенного импульса может дать точный и эффективный способ измерения плотности дислокаций в полупроводниках. В связи с этим был развит стохастический алгоритм решения нестационарных задач транспорта экситонов при наличии дрейфа, диффузии и аннигиляции. Достоинство данного метода, являющегося нестационарным аналогом алгоритма блуждания по сферам, разработанного руководителем данного проекта в 2016 г., – точное моделирование движения экситонов с учетом времени распространения.

В 2017 г. по результатам работ подготовлено 12 статей, опубликованных в журналах, цитируемых в Web of Science, три из них – в журналах из первого квартиля (Q1). Результаты исследования были представлены в 9 докладах на международных конференциях, одна из работ получила приз "Best paper award".

### Публикации

#### Монографии, главы в монографиях

1. Войтишек А. В. Рандомизированные итерационные численные модели и алгоритмы. LAP LAMBERT Academic Publishing RU, 2017. 208 с. ISBN: 978-3-330-05338-0.

2. Kargapolova N. A. "Stochastic "weather generators". Introduction to stochastic simulation of meteorological processes: lecture course" // Novosibirsk St. Univ. Novosibirsk: PPC NSU, 2017. ISBN 978-5-4437-0678-8-5.

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Михайлов Г. А., Пригарин С. М., Роженко С. А. Модификации стандартной векторной оценки метода Монте-Карло для исследования характеристик рассеянного поляризованного излучения // Доклады Академии наук. Сер.: Математика. 2017. Т. 476, № 3. С. 264–268. DOI: 10.7868/S0869565217270044.

2. Prigarin S. M. Monte Carlo simulation of the effects caused by multiple scattering of ground-based and spaceborne lidar pulses in clouds // Atmospheric and Oceanic Optics. 2017. Vol. 30, N 1. P. 79–83. DOI: 10.1134/S102485601701011.

3. Sabelfeld K. K. Random walk on spheres algorithm for solving transient drift-diffusion-reaction problems // Monte Carlo Methods and Applications. 2017. Vol. 23, iss. 3. P. 189–212. DOI: 10.1515/mcma-2017-0113.

4. Sabelfeld K. K. A Random walk on spheres based kinetic Monte Carlo method for simulation of the fluctuation-limited bimolecular reactions // Mathematics and Computers in Simulation. 2018. Vol. 143. P. 46–56. DOI: /10.1016/j.matcom.2016.03.011.

5. Sabelfeld, K. K. A mesh free floating random walk method for solving diffusion imaging problems // Statistics and Probability Letters. 2017. Vol. 121. P. 6–11. DOI: 10.1016/j.spl.2016.10.006.

6. Sabelfeld K., Kaganer V., Pfueller C., Brandt O. Dislocation contrast in cathodoluminescence and electron-beam induced current maps on GaN(0001) // J. of Physics. D: Applied Physics. 2017. Vol. 50. 405101 (11 pp). DOI: 10.1088/1361-6463/aa85c8.

7. Feix F., Flissikowski T., Sabelfeld K. K., Kaganer V. M., Wölz M., Geelhaar L., Grahn H. T., Brandt O. Ga-polar (In,Ga)N/GaN quantum wells versus N-polar (In,Ga)N quantum disks in GaN nanowires: A comparative analysis of carrier recombination, diffusion, and radiative efficiency // Phys. Rev. Appl. 8. 2017. 014032. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.8.014032.

8. Sabelfeld K. K., Kireeva A. E. Stochastic simulation of bimolecular reactions in vicinity of traps and applications to electron–hole recombination in 2D and 3D inhomogeneous semiconductors // *J. of Comput. Electronics*. 2017. Vol. 16, N 2. P. 325–339. DOI: 10.1007/s10825-017-0961-3.
9. Sabelfeld K. K., Kablukova E. G. Stochastic simulation of nanowire growth and coalescence in plasma-assisted molecular beam epitaxy // *Comput. Materials Sci.* 2018. Vol. 141. P. 341–352. Published online Oct. 4, 2017. DOI: 10.1016/j.commatsci.2017.09.046.
10. Sabelfeld K. K. Stochastic projection methods and applications to some nonlinear inverse problems of phase retrieving // *Math. and Comput. in Simulation*. 2018. Vol. 143. P. 169–175. DOI: 10.1016/j.matcom.2016.08.001.
11. Sabelfeld K., Kireeva A. Stochastic simulation of electron-hole recombination in two-dimensional and three-dimensional inhomogeneous semiconductors. P. 1. Stochastic model and algorithms // *Optoelectron., Instrumentation and Data Proc.* 2017. Vol. 53(1). P. 96–102. DOI: 10.3103/S8756699017010149.
12. Sabelfeld K., Kireeva A. Stochastic simulation of electron-hole recombination in two-dimensional and three-dimensional inhomogeneous semiconductors. P. 2. Simulation results // *Optoelectron., Instrumentation and Data Proc.* 2017. Vol. 53(2). P. 197–202. DOI: 10.3103/S8756699017020145.
13. Sabelfeld K. K., Kablukova E. G. A stochastic model of nanowire growth by molecular beam epitaxy // *Num. Analysis and Appl.* 2017. Vol. 10(2). P. 149–163. DOI: 10.1134/S1995423917020069.
14. Shalimova I. A., Sabelfeld K. K., Dulzon O. Uncertainty quantification and stochastic polynomial chaos expansion for recovering random data in Darcy and diffusion equations // *J. of Inverse and Ill-posed Problems*. 2017. Vol. 25. N 6. P. 733–746. DOI: 10.1515/jiip-2016-0037.
15. Shalimova I. A., Sabelfeld K. K. Stochastic polynomial chaos expansion method for random Darcy equation // *Monte Carlo Meth. and Appl.* 2017. Vol. 23, N 2. P. 101–110. DOI: 10.1515/mcma-2017-0109.
16. Shalimova I. A., Sabelfeld K. K. Solving a stochastic Darcy equation by the polynomial chaos expansion // *Num. Analysis and Appl.* 2017. Vol. 10, N 3. P. 259–271. DOI: 10.1134/S1995423917030077.
17. Kablukova E. G., Prigarin S. M. Monte Carlo simulation of specific features of radiation regime in water layer caused by clouds and roughness of the water surface // *Proc. SPIE 10466, 104661L*. 2017. DOI: 10.1117/12.2287306.
18. Prigarin S. M., Kablukova E. G., Rozhenko S. A., Zakovryashin A. V. Monte Carlo simulation of halos, glories, coronas and multiple scattering of light // *Proc. SPIE 10466, 104661K*. 2017. DOI: 10.1117/12.2287239.
19. Сабельфельд К. К., Каблукова Е. Г. Стохастическая модель роста нановискеров методами молекулярно-лучевой эпитаксии // *СибЖВМ*. 2017. Т. 20, № 2. С. 181–199. DOI: 10.15372/SJNM20170206.
20. Шалимова И. А., Сабельфельд К. К. Решение стохастического уравнения Дарси на основе полиномиального разложения хаоса // *СибЖВМ*. 2017. № 3. С. 313–327. DOI: 10.15372/SJNM20170307.
21. Kargin B. A., Kargin A. B., Prigarin S. M. A statistical model for optical radiation transfer in the ocean-atmosphere system // *Proc. SPIE, 22nd Intern. Symp. on atmospheric and ocean optics – atmospheric physics, Tomsk, Jun. 30 – Jul. 3, 2016, V. 10035*. Paper 100352S. DOI: 10.1117/12.2249502.

**Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus**

1. Kablukova E. G., Prigarin S. M. Monte Carlo simulation of specific features of radiation regime in water layer caused by clouds and roughness of the water surface // Proc. SPIE 10466, 23rd Intern. symp. on atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics, 104661L. 2017. DOI: 10.1117/12.2287306.

Kargapolova N. A. Monte Carlo simulation of daily precipitation and river flow conditional spatio-temporal fields // Proc. of the Europ. simulation and modelling conf., Lisbon (Portugal), Oct. 25–27, 2017. P. 311–315.

2. Kargapolova N. Stochastic simulation of non-stationary meteorological time-series daily precipitation indicators, maximum and minimum air temperature simulation using latent and transformed Gaussian processes // Proc. of the 7th Intern. conf. on simulation and modeling methodologies, technol. and appl., Madrid (Spain), July 26–28, 2017. P. 173–179. DOI: 10.5220/0006358801730179.

3. Сабельфельд К. К., Киреева А. Е. Стохастическое моделирование рекомбинации электронов и дырок в 2D и 3D неоднородных полупроводниках. Ч. 1, 2 // Автометрия. 2017. Т. 53, № 1. С. 117–124. DOI: 10.15372/AUT20170114.

4. Kireeva A. E., Sabelfeld K. K., Maltseva N. V., Gribov E. N. Parallel implementation of cellular automaton model of the carbon corrosion under the influence of the electrochemical oxidation // Lecture Notes in Computer Science (LNCS). 2017. Vol. 10421. P. 205–214. DOI: 10.1007/978-3-319-62932-2\_19.

**Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Войтишек А. В., Прасол Д. А. О выборе плотностей распределения узлов адаптивных сеток в стохастических алгоритмах многомерного интегрирования и приближения функций // Выч. технол. 2017. Т. 22, № 1. С. 3–16.

2. Сабельфельд К. К., Киреева А. Е. Параллельная реализация стохастической клеточно-автоматной модели рекомбинации электронов и дырок в 2D и 3D неоднородных полупроводниках // Вестн. ЮУрГУ. Сер.: Выч. матем. и информ. 2017. Т. 16, № 1. С. 87–103.

3. Бабичева Г. А., Каргаполова Н. А. Исследование двух алгоритмов моделирования однородных случайных полей с четырехпараметрической экспоненциальной корреляционной функцией // Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПМ'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 78–83.

4. Каблукова Е. Г., Пригарин С. М. Статистическое моделирование особенностей переноса солнечного излучения в атмосферной облачности и водной среде, обусловленных многократным рассеянием // Там же. С. 373–381

5. Voytishchek A. V., Shipilov N. M. On randomized algorithms for numerical solution of applied Fredholm integral equations of the second kind // AIP Conf. Proc. 1907, 030015. 2017.

6. Войтишек А. В. Рандомизированные итерационные численные модели и алгоритмы // Материалы 6-й Междун. конф. "Математика, ее приложения и математическое образование". Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2017. С. 129–134.

7. Войтишек А. В. Использование псевдо- и квазислучайных чисел в многомерных задачах численного интегрирования // Там же. С. 134–139.

8. Войтишек А. В. Замечания по практическому использованию метода зависимых испытаний // Тезисы 8-й Междунар. конф. по математическому моделированию. Якутск: СВФУ, 2017. С. 79.

9. Войтишек А. В. Особенности построения и оптимизации рандомизированных проекционных функциональных алгоритмов // *Материалы 16-й Междунар. конф. "Информационные технологии и математическое моделирование"*, Казань, 29 сент. – 3 окт. 2017 г. Томск: Изд-во НТЛ, 2017. Ч. 2. С. 267–275.
10. Каблукова Е. Г., Пригарин С. М. Статистическое моделирование особенностей переноса солнечного излучения в атмосфере и водной среде с учетом морского волнения, облачности и подстилающей поверхности // *Материалы 23-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы"*, Иркутск, 3–7 июля 2017 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2017. [Электрон. ресурс]. С. В35–В38.
11. Каргин Б. А., Каргин А. Б., Пригарин С. М. Решение методом Монте-Карло задач аэрокосмического оптического зондирования океана // *Труды Междунар. конф. по вычислительной и прикладной математике "ВПМ'17" в рамках "Марчуковских научных чтений"*, Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 394–400.
12. Каргаполова Н. А., Огородников В. А. Моделирование комплекса метеорологических параметров с учетом их годовой нестационарности // *Там же*. С. 388–393.
13. Медвяцкая А. М., Огородников В. А. Численные стохастические модели временных рядов температуры с периодическими свойствами // *Там же*. С. 614–619.
14. Огородников В. А., Сересева О. В. Исследование статистической структуры кусочно-линейных процессов на пуассоновских точечных потоках // *Там же*. С. 803–808.
15. Скворцов С. С., Каргаполова Н. А., Сересева О. В. Оценки статистических характеристик неоднородных метеорологических полей по выборкам малого объема // *Там же*. С. 814–820.
16. Ухинова О. С. Статистическое моделирование трансспектральных процессов взаимодействия света с водной средой с учетом волнения водной поверхности // *Там же*. С. 889–895.
17. Шалимова И. А., Сабельфельд К. К. Определение свойств гидравлической проницаемости пористой среды по корреляционной функции потенциала на основе стохастического метода коллокаций // *Там же*. С. 968–974.
18. Kargapolova N. A., Ogorodnikov V. A. Conditional stochastic model of daily precipitation and river flow joint spatial field // *Proc. of the Intern. workshop "Applied methods of statistical analysis. Nonparametric methods in cybernetics and system analysis (AMSA'2017)"*, Новосибирск, 18–22 сент. 2017 г. С. 298–302.
19. Ogorodnikov V. A., Sereseva O. V. Correlation structure of the piecewise linear process on the Poisson flow // *Там же*. С. 292–297.
20. Sereseva O. V., Medvyatskaya A. M. Applied method of statistical analysis numerical stochastic model of the joint periodically correlated process of air temperature and relative humidity // *Там же*. С. 285–291.
21. Каргаполова Н. А., Огородников В. А. Статистическая структура совместных рядов индикаторов выпадения осадков, суточной минимальной и максимальной приземной температуры воздуха // *Сб. материалов 13-го Междунар. науч. конгр. и выставки "Интерэкспо "Гео-Сибирь"*, Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. Т. 4. № 1. С. 111–115.
22. Сересева О. В. Нестационарные и асимптотически стационарные кусочно-линейные процессы на пуассоновских потоках и некоторые их свойства // *Труды конф. молодых ученых ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, 24 апр. 2017 г.* С. 83–92.

23. Sabelfeld K., Kireeva A. E. Parallel implementation of a Monte Carlo algorithm for simulation of cathodoluminescence contrast maps // Proc. of the 11th Annual international scientific conference "Parallel Computational Technologies" (PCT 2017). Communications in Computer and Information Science. Springer, Cham. 2017. Vol. 753. P. 233–246.

24. Пригарин С. М., Каблукова Е. Г., Роженко С. А. Статистическое моделирование гало, глорий и венцов с учетом многократного рассеяния света // Материалы 23-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Иркутск, 3–7 июля 2017 г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2017. [Электрон. ресурс]. С. В31–В34.

25. Алдохин А. С., Войтишек А. В. Условная оптимизация двухпараметрических стохастических численных моделей // Труды 13-й Международной школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 18–22 сент. 2017 г. [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/opcs2017/ru/proceedings> С. 9–17.

### Прочие издания

1. Kargapolova N., Ogorodnikov V., Sereseva O. Stochastic simulation of joint fields of daily precipitation and river flow // Abst. for the 10th Intern. conf. on extreme value analysis, Delft (Netherlands), June 26–30, 2017. P. 43.

2. Kargapolova N.A. Stochastic model of precipitation indicators, daily maximum and minimum air temperature non-stationary time-series" // Intern. conf. "Data science and environment", Brest (France), July 4–6, 2017. [Electron. resource]. <http://conferences.telecom-bretagne.eu/dse2017/posters/>.

### Участие в конференциях и совещаниях

1. Конференция молодых ученых Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, 24–26 апр. 2017 г. – 2 секционных доклада (Сересева О. В., Медвяцкая А. М., Дульзон О. В.).

2. Всероссийская конференция Благотворительного фонда В. Потанина "Как университетам стать центрами инновационного развития регионов: роль магистратуры", Томск, 24–26 апр. 2017 г. – 1 секционный доклад (Каргаполова Н. А.).

3. Международная конференция по вычислительной и прикладной математике "ВПМ'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. – 2 пленарных, 13 секционных и 2 стендовых доклада (Каргин Б. А., Каргин А. Б., Пригарин С. М., Сабельфельд К. К., Бабичева Г. А., Каргаполова Н. А., Войтишек А. В., Прасол Д. А., Каблукова Е. Г., Огородников В. А., Литвенко К. В., Медвяцкая А. М., Сересева О. В., Киреева А. Е., Скворцов С. С., Ухинова О. С., Шалимова И. А., Левыкин А. И.).

4. Международная научная конференция "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология" в рамках 13-го Международного научного конгресса и выставки "ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ-2017", Новосибирск, 19–21 апр. 2017 г. – 2 секционных доклада (Огородников В. А., Сересева О. В., Каргаполова Н. А.).

5. 5th International workshop "Applied methods of statistical analysis. Nonparametric methods in cybernetics and system analysis" (AMSA'2017), Красноярск, 18–22 сент. 2017 г. – 1 секционный доклад (Каргаполова Н. А.).

6. 10th International conference on extreme value analysis, Делфт (Нидерланды), 25–30 июня 2017 г. – 1 секционный доклад (Каргаполова Н. А.).

7. International workshop on data science & environment, Брест (Франция), 3–7 июля 2017 г. – 1 стендовый доклад (Каргаполова Н. А.).

8. 7th International conference on simulation and modeling methodologies, technologies and applications, Мадрид (Испания), 26–29 июля 2017 г. – 1 секционный доклад (Каргаполова Н. А.).

9. European simulation and modelling conference, Лиссабон (Португалия), 24–28 октября 2017 г. – 1 секционный доклад (Каргаполова Н. А.).

10. Международная конференция "Математика в современном мире", посвященная 60-летию Института математики им. С. Л.Соболева, Новосибирск, 14–19 августа 2017 г. – 2 приглашенных и 3 секционных доклада (Войтишек А. В., Сабельфельд К. К., Каргин Б. А., Левыкин А. И., Сабельфельд К. К.).

11. 13-я Международная Азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 18–22 сент. 2017 г. – 1 секционный доклад (Войтишек А. В.).

12. 16-я Международная конференция им. А. Ф. Терпугова "Информационные технологии и математическое моделирование"; Казань, 29 сентября – 3 октября 2017 г. – 1 секционный доклад (Войтишек А. В.).

13. Crystal growth and assembly. from atomic to hierarchical assemblies in crystal growth, Biddeford (USA), June 25–30, 2017 – 1 секционный доклад (Sabelfeld K. K.).

14. "Compound semiconductor week", Berlin, May, 14–18, 2017 – 1 секционный доклад (Sabelfeld K. K.).

15. Международная научная конференция "Параллельные вычислительные технологии 2017", Казань, 3–7 апр. 2017 г. – 1 секционный доклад (Сабельфельд К. К., Киреева А. Е.).

16. Международная научная конференция "The 14th International conference on parallel computing technologies", Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г. – 1 секционный доклад (Киреева А. Е., Сабельфельд К. К., Мальцева Н. В., Грибов Е. Н.).

17. Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники "Фотоника 2017", Новосибирск, 11–15 сентября 2017 г. – 2 секционных доклада (Сабельфельд К. К.).

18. Международная научная конференция "The Fifth Russian-Chinese workshop on numerical mathematics and scientific computing" within the "Marchuk Scientific Readings", Новосибирск, 29–30 июня 2017 г. – 1 приглашенный доклад (Сабельфельд К. К.).

19. 23-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Иркутск, 3–7 июля 2017 г. – 2 секционных доклада (Пригарин С. М., Каблукова Е. Г., Заковряшин А. В.).

20. Международный симпозиум "Атмосферная радиация и динамика" (МСАРД–2017), Санкт-Петербург, 27–30 июня 2017 г. – 1 секционный доклад (Пригарин С. М., Миронова Д. Э., Хохлова Ю. В.).

21. 24-я Рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 28 ноября – 1 декабря 2017 г. – 3 секционных доклада (Пригарин С. М., Хохлова Ю. В., Каблукова Е. Г., Огородников В. А., Сересева О. В., Никушкин Н. Ю.).

22. Национальная научно-техническая конференция "Компьютерное моделирование" (КОМОД–2017), Санкт-Петербург, 3–4 июля 2017 г. – 1 секционный доклад (Новиков А. Е., Новиков Е. А., Левыкин А. И.).

23. Международная конференция "Applied methods of statistical analysis. nonparametric methods in cybernetics and system analysis" (AMSA'2017), Красноярск, 18–22 сентября 2017 г. – 3 секционных доклада (Огородников В. А., Сересева О. В., Каргаполова Н. А., Медвяцкая А. М.).

### Участие в оргкомитетах конференций

1. Войтишек А. В.:
  - член оргкомитета конференции молодых ученых Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, 24 – 26 апреля 2017 г.;
  - член экспертного совета секции "Математика" 55-й Международной студенческой научной конференции "Студент и научно-технический прогресс", Новосибирск, 16–20 апреля 2017 г.
2. Каргин Б. А. – член программного комитета Международной конференции "Марчуковские чтения – 2017", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г.
3. Сабельфельд К. К.:
  - член программного комитета Международной конференции "Марчуковские чтения – 2017", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г.
  - член программного комитета 8-й Конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 26 июня – 2 июля 2017 г.
4. Огородников В. А. – член программного комитета Международной конференции "Applied methods of statistical analysis. nonparametric methods in cybernetics and system analysis" (AMSA'2017), Красноярск, 18–22 сентября 2017 г.

### Итоговые данные по лаборатории

- Публикации, индексируемые в базе данных Web of Science – 21  
 Публикации, индексируемые в базе данных Scopus – 4  
 Публикации, индексируемые в базе данных РИНЦ – 48  
 Монографии, главы в монографиях – 2  
 Докладов на конференциях – 52, в том числе: 5 – пленарных, 43 – секционных, 3 – стендовых докладов  
 Участие в оргкомитетах конференций – 6.

### Кадровый состав

1. Каргин Б. А.	зав. лаб.	д.ф.-м.н.
2. Войтишек А. В.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
3. Сабельфельд К.К.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
4. Огородников В. А.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
5. Пригарин С. М.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
6. Шалимова И. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
7. Левыкин А. И.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
8. Ухинова О. С.	н.с.	к.ф.-м.н.
9. Каблукова Е. Г.	н.с.	к.ф.-м.н.
10. Каргаполова Н. А.	н.с.	к.ф.-м.н.
11. Киреева А. Е.	н.с.	к.ф.-м.н.
12. Сересева О. В.	м.н.с. (0,5),	к.ф.-м.н.
13. Каргин А.Б.	ведущий инженер	

Сересева О. В., Киреева А. Е., Каргаполова Н. А. – молодые научные сотрудники

**Педагогическая деятельность**

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

**Руководство аспирантами**

1. Анисова М. А. – 4-й год, ИВМиМГ, руководитель Войтишек А. В.
2. Дульзон О. В. – 2-й год, НГУ, руководитель Шалимова И. А.
3. Еремеев Г. В. – 2-й год, НГУ, руководитель Сабельфельд К. К.
4. Андорный Е. Н. – 1-й год, руководитель Сабельфельд К. К.
5. Прасол Д. А. – 1-й год, ИВМиМГ, руководитель Сабельфельд К. К.
6. Алешина Т. В. – 4-й год, НГУ, руководитель Пригарин С. М.
7. Заковряшин А. В. – 1-й год, НГУ, руководитель Пригарин С. М.
8. Миронова Д. Э. – 1-й год ИВМиМГ, руководитель Пригарин С. М.
9. Рыбдылова Г. С. – 1-й год ИВМиМГ, руководитель Пригарин С. М.
10. Бабичева Г. А. – 1-й год ИВМиМГ, руководитель Огородников В. А.
11. Медвяцкая А. М. – 2-й год ИВМиМГ, руководитель Огородников В. А.
12. Сагоякова Е. Р. – 2-й год ИВМиМГ, руководитель Огородников В. А.
13. Скворцов С. С. – 3-й год ИВМиМГ, руководитель Огородников В. А.

**Руководство студентами**

1. Чжэн Пэнфэй – магистрант, 1-й год ММФ НГУ, руководитель Каргин Б. А.
2. Абдразакова А. Р. – магистрант, 1-й год ММФ НГУ, руководитель Войтишек А. В.
3. Алдохин А. С. – магистрант, 2-й год, ММФ НГУ, руководитель Войтишек А. В.
4. Шипилов Н. М. – магистрант, 2-й год, ММФ НГУ, руководитель Войтишек А. В.
5. Кочетков С. А. – 4-й курс, ВКИ НГУ, руководитель Ухинова О. С.
6. Му Цюань – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пригарин С. М.
7. Джао Бо – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пригарин С. М.
8. Хохлова Ю. В. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пригарин С. М.
9. Ян Чжень – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Пригарин С. М.
10. Сазонов М. А. – 4 курс ММФ НГУ, руководитель Пригарин С. М.
11. Гребенников Д. И. – магистрант, 1-й год ММФ НГУ, руководитель Огородников В. А.
12. Титова Е. В. – магистрант, 2-й год ММФ НГУ, руководитель Огородников В. А.

## Лаборатория вычислительной физики

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Свешников В. М.

### Важнейшие достижения

#### **Двухуровневые итерационные методы наименьших квадратов в подпространствах Крылова.**

Предложены и исследованы двухуровневые итерационные методы наименьших квадратов (МНК) для ускорения алгоритмов для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с рестартами в подпространствах Крылова. Применение предложенных подходов дает значительное увеличение скорости сходимости итерационных процессов.

Д.ф.-м.н. Ильин В. П.

#### **Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2017 г. в соответствии с планом НИР института**

**Проект НИР 1.4.1.2 "Математическое моделирование комплексных многомерных процессов естествознания на супер-ЭВМ".**

Номер государственной регистрации НИР 0315-2016-0008.

Руководители: д.ф.-м.н. Вшивков В. А., д.ф.-м.н. Свешников В. М.

Разработаны алгоритмы и технологии моделирования задач электронной оптики с сильными неоднородностями, состоящих в расчете движения плотных пучков заряженных частиц в электростатических полях на неструктурированных тетраэдральных сетках. Сетки строятся при помощи известного сеточного генератора NetGen. Разработаны экономичные алгоритмы распределения объемного заряда на неструктурированных сетках. Для верификации предложенных подходов проведены численные расчеты тестовых задач.

Для исследования процессов в бесстолкновительной плазме зачастую применяются гибридные (комбинированные) модели, в которых движение ионов описывается кинетическим уравнением Власова, а для описания движения электронов используются уравнения магнитной гидродинамики (МГД). Исследования на основе гибридного приближения существенно снижают требования к вычислительным ресурсам по сравнению с использованием полностью кинетических моделей и в настоящее время являются наиболее перспективными с точки зрения вычислительного эксперимента. Для реализации этих моделей требуется применение метода частиц-в-ячейках и практика решения задач, основанных на алгоритмах параллельных вычислений.

На основе двумерной гибридной численной модели проведена серия вычислительных экспериментов по исследованию структуры бесстолкновительных ударных волн в плазме и ускорению ионов на их фронте. При моделировании ударная волна формируется следующими способами: 1) отражение сверхзвукового потока от границы области и последующее взаимодействие между входящим и отражающимся потоками плазмы; 2) взаимодействие потока плазмы с неподвижным фоном. Одним из важных преимуществ созданной гибридной модели является возможность изучения плазменных неустойчивостей на ионно-временных масштабах без учета электронных высокочастотных мод. Проведенные расчеты показали большую зависимость устойчивости схемы от вычислительных параметров, поэтому была предложена новая вычислительная схема для реализации созданной математической модели.

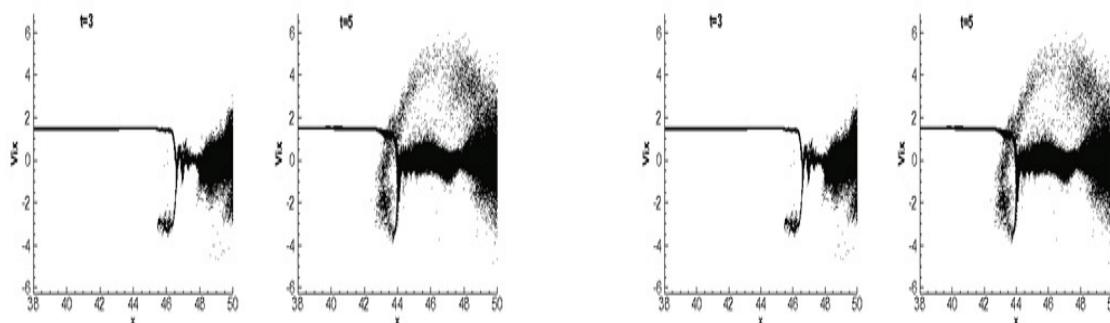


Рис. 1. Фазовые плоскости в моменты времени  $t = 3; 5$ . Начальная скорость частиц  $v_0 = 1,5$ , число Маха  $Ma = 2,8$ . Отражение ионов ударной волной с вращением по ларморовскому радиусу и образованием квазистационарной структуры, связанной с непрерывным отражением набегающего потока плазмы ударной волной и его вращением во внешнем магнитном поле

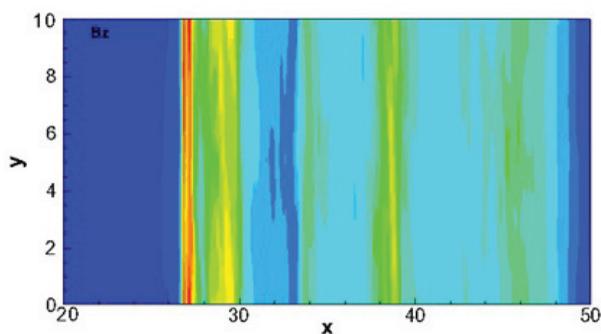


Рис. 2. Магнитное поле  $B_z$

Тестовые расчеты (рис. 1, 2) показали адекватные физические результаты, позволяющие исследовать структуру бесстолкновительной ударной волны и механизм ускорения ионов на ее фронте в зависимости от напряженности магнитного поля и температуры. Созданные вычислительные алгоритмы и коды могут найти применение при решении ряда других задач астрофизики и физики высокотемпературной плазмы.

Предложен новый итерационный алгоритм решения внешней краевой задачи для уравнения Гельмгольца на основе декомпозиции расчетной области на две пересекающиеся подобласти, конечную и бесконечную, и последовательного решения внутренней и внешней краевых задач в каждой из этих подобластей. Исследованы условия сходимости предложенного алгоритма для уравнений Гельмгольца, имеющих вещественные решения. Выполнена численная реализация алгоритма на широком классе модельных задач.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 16-29-15122 офи-м** "Вычислительные методы и параллельные технологии предсказательного моделирования процессов в нефтегазовой отрасли".

Руководитель – д.ф.-м.н. Ильин В. П.

В отчетный период проводились исследования по трем фундаментальным направлениям, связанным с высокопроизводительным решением междисциплинарных задач математического моделирования технологических и промышленных процессов нефтегазовой отрасли:

1) Построение аппроксимационных методов конечных объемов (МКО) и многомасштабных разрывных методов Галеркина (РМГ) высокого порядка точности для решения характерных многомерных начально-краевых задач многофазной фильтрации, внутривещного горения и тепломассопереноса в расчетных областях со сложной геометрией кусочно-гладких границ и контрастными материальными свойствами пористых сред на адаптивных неструктурированных сетках со специальными локальными сгущениями.

2) Разработка и исследование параллельных методов декомпозиции областей для решения возникающих больших систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с симметричными и несимметричными разреженными матрицами со специальной блочной структурой, обусловленной применяемыми схемами высокого порядка, на основе двухуровневых предобусловленных алгоритмов в блочных подпространствах Крылова, реализуемых средствами гибридного программирования (MPI, OpenMP, векторизация операций) на многопроцессорных вычислительных системах (МВС) с распределенной и иерархической общей памятью.

3) Разработка архитектуры, структуры данных и базовых программных компонент интегрированной системы моделирования: библиотеки DELAUNAY, CHEBYSHEV и KRYLOV для построения адаптивных неструктурированных сеток, конечно-элементных аппроксимаций и алгебраических решателей соответственно – в рамках которых реализуются и экспериментально исследуются новые параллельные численные методы и технологии.

**Проект РФФИ № 16-01-00168** "Разработка алгоритмов и технологий численного моделирования задач электрофизики в сложных областях на квазиструктурированных несогласованных сетках".

Руководитель – д.ф.-м.н. Свешников В. М.

Для ускорения решения трехмерных краевых задач на квазиструктурированных сетках с помощью варианта метода декомпозиции, разработанного авторами проекта, создан многосеточный предобуславливатель внешнего итерационного процесса по подобластям. Была предложена и исследована локальная модификация двумерной квазиструктурированной сетки на границе между подобластями (интерфейсе), что привело к разработке специальных алгоритмов модификации интерфейса и производных, входящих в уравнение Пуанкаре – Стеклова. Разработаны сеточные структуры данных и исследован важный вопрос о балансировке загрузки современных вычислительных систем при проведении расчетов на трехмерных адаптивных квазиструктурированных сетках в областях со сложной конфигурацией внешних границ. Были разработаны численно-аналитические алгоритмы интегрирования уравнений движения заряженных частиц в двумерных электрических полях, дающие точное решение в случае линейно изменяющегося поля по одной координате и постоянного – по другой, что повышает точность расчета протяженных пучков заряженных частиц. Проведено доказательство свойств дифференциальных операторов, действующих на интерфейсе, при решении трехмерных внешних краевых задач для уравнения Лапласа, что внесло существенный вклад в теоретическое обоснование предложенного ранее подхода.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 14-11-00485** "Высокопроизводительные методы и технологии моделирования электрофизических процессов и устройств".

Руководитель – д.ф.-м.н. Ильин В. П.

В отчетном году достигнуты следующие результаты разработки и исследования вычислительных методов и технологий, реализуемых в рамках базовой системы моделирования (БСМ) и актуальных для математического моделирования электрофизических процессов и устройств на современных МВС.

1. Разработан и экспериментально исследован ряд новых высокопроизводительных итерационных методов для решения больших систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с разреженными матрицами, возникающими из аппроксимаций многомерных краевых задач на адаптивных квазиструктурированных сетках, а также параллельных технологий их программных реализаций на многопроцессорных вычислительных системах.

Технологическая основа алгоритмов – предобусловленные итерационные методы декомпозиции областей с параметризованным пересечением подобластей и варьируемыми интерфейсными условиями на смежных внутренних границах, являющиеся в алгебраическом плане блочными двухуровневыми методами Шварца – Якоби в подпространствах Крылова.

В 2017 г. предложены, программно реализованы и исследованы методы грубосеточной коррекции с базисными функциями 0, 1 и 2-го порядков на макросетке на основе дефляционно-проективного и вариационного принципов. Вторая идея, предложенная для ускорения итерационных процессов – это применение "невных", или блочных, методов наименьших квадратов (МНК) в подпространствах Крылова, наиболее эффективно применяемых при решении несимметричных СЛАУ. Использование МНК в данном случае осуществляется на двух уровнях: первый – "улучшение" внутренних итераций между рестартами путем сохранения некоторого числа промежуточных векторов, образующих подпространство для минимизации невязки; второй – корректировка самих рестартовых приближений путем вычисления их оптимальных линейных комбинаций. Данная процедура значительно сокращает общее число итераций, экономично реализуется и хорошо распараллеливается.

Производительность двухуровневых итерационных методов декомпозиции областей в подпространствах Крылова обеспечивается средствами гибридного программирования. На верхнем уровне итерации по подобластям реализуются в распределенном MPI варианте. На нижнем уровне синхронное решение вспомогательных СЛАУ выполняется через многопоточковые вычисления. Для дополнительного ускорения используется векторизация арифметических операций. Разработана модификация популярного CSR формата хранения разреженных матриц – формат Vector Compressed Sparse Row (VSR), на основе которого реализовано умножение вектора на разреженную матрицу, что осуществляется системами команд типа AVX и AVX2.

В отчетном году также разработаны, программно реализованы в системе CUDA и экспериментально исследованы на графических ускорителях быстрые невяные методы переменных направлений для решения СЛАУ с постоянными коэффициентами. Все разработанные алгоритмы и технологии ориентированы на работу в составе библиотеки KRYLOV, являющейся интегрированным вычислительным окружением для высокопроизводительного решения широкого класса задач вычислительной алгебры на МВС.

2. Проведена работа по аппроксимации многомерных краевых задач на квазиструктурированных сетках с использованием различных типов подсеток в подобластях. Разработаны программы для аппроксимации задач методами конечных объемов и разрывных алгоритмов Галеркина. Реализованы универсальные подходы с использованием кусочно-линейных базисных функций на адаптивных квазиструктурированных сетках с тетраэдральными конеч-

ными элементами в трехмерных расчетных областях со сложной геометрией и контрастными материальными свойствами сред в подобластях.

3. В 2017 г. разработано математическое и программное обеспечение для решения трехмерных краевых задач для уравнений Пуассона и Гельмгольца в неограниченных расчетных областях со сложной геометрией граничных кусочно-гладких поверхностей и с контрастными свойствами материальных сред при задании условия излучения Зоммерфельда на бесконечности. Такие постановки зачастую возникают при моделировании антенных устройств или в задачах СВЧ-электроники, геоэлектроразведки и электромагнитного рассеивания.

Рассматривается также применение итерационного метода декомпозиции области на подобласти, одна из которых является неограниченной и представляет собой внешность достаточно большой сферы с однородными электрофизическими свойствами. Для этой внешней подобласти решение выражается с помощью интегрального представления, а в остальных подобластях решения ищутся из внутренних краевых задач с помощью метода конечных объемов на квазиструктурированной сетке. С целью сокращения числа итераций по подобластям, подобласти конструируются с параметризованным пересечением и заданием различных типов интерфейсных краевых условий на внутренних границах смежных подобластей. Вспомогательные СЛАУ в ограниченных подобластях решаются синхронно с помощью прямых методов или с помощью итерационных процессов в подпространствах Крылова. Фактически, в общем случае применяется двухуровневый блочный итерационный процесс типа Шварца – Якоби, который можно также интерпретировать как метод решения специального операторного уравнения типа Пуанкаре – Стеклова, но на дискретном уровне.

4. Проведены работы по моделированию интенсивных пучков заряженных частиц в трехмерных электрических полях для исследования процессов в электрофизических приборах. Такие пучки являются рабочим элементом в электронно- и ионно-оптических системах, которые находят широкое практическое применение. При этом решается нелинейная самосогласованная задача, включающая в стационарном случае уравнения движения заряженных частиц, уравнение Пуассона для потенциала электрического поля, уравнение неразрывности потока зарядов и состоящая из следующих вычислительных задач: 1) интегрирование уравнений движения заряженных частиц; 2) вычисление потенциала и напряженности электрического поля; 3) расчет распределения объемного заряда.

Для третьей подзадачи предложен, теоретически и экспериментально обоснован метод расчета объемного заряда второго порядка. Он основывается на методе Р. Хокни, Дж. Иствуда распределения точечного заряда. В нашем случае рассмотрен отрезок траектории заряженной частицы. Важным достоинством предложенного подхода является то, что доказано повышение порядка точности не только для объемного заряда, но и для расчета потенциала электрического поля, создаваемого объемным зарядом. Доказаны теоремы о том, что разработанные алгоритмы имеют второй порядок точности, что подтверждается результатами численных экспериментов.

Выполнен расчет сложной практической задачи в трехмерной постановке, а именно парциальной электронной пушки с 15 катодами и 15 соосными анодами. Расчет проводился на сетке, включающей более 2 млн узлов. Пучок с каждого катода моделировался 200 трубками тока. Всего рассчитывалось около 3000 траекторий. Результаты расчетов подтверждают эффективность реализованных методов. Предложенные алгоритмы и структуры данных подготовлены к интеграции в разрабатываемый перспективный комплекс прикладных программ ЭРА-3Д для моделирования широкого класса физических процессов сильноточной

СВЧ-электроники на современных высокопроизводительных параллельных вычислительных системах.

5. Проведен цикл работ по разработке и исследованию вычислительных методов и технологий для решения актуальных задач электромагнитного рассеяния. Ставилась цель, с одной стороны, создания и апробации алгоритмов высокого (до четвертого) порядка для моделирования динамических процессов, описываемых одномерным уравнением Шредингера, а с другой – проведение экспериментов по решению трехмерного уравнения Гельмгольца в широком диапазоне частот, включая решение обратных задач идентификации параметров модели в концепции библиотеки KANTOROVICH на основе применения алгоритмов условной минимизации целевого функционала, определяемого из решений вспомогательных прямых параметризованных краевых задач. По обоим направлениям исследований, описываемых одномерными и трехмерными моделями, проведены предварительные методические расчеты.

6. Начат цикл работ по интеграции модуля геометрического и функционального моделирования VORONOI из ядра базовой системы моделирования БСМ с интегрированной инженерной программной платформой ГЕРБАРИЙ, являющийся основой для создания современных САПР и разработанной по заказу фонда перспективных исследований на основе отечественного Ядра 3Д, содержащего развитые средства работы с геометрическими объектами. Целью создания системы VORONOI является обеспечение программных интерфейсов между вычислительными модулями ядра БСМ и САПР-инструментами для обеспечения дружественного графического контакта с пользователями из различных отраслей.

### Публикации

#### Монографии и главы в монографиях

1. Ильин В. П., Лаврова А. К. (ответ. ред.) Наш Марчук. 2-е изд. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 460 с.
2. Ильин В. П. Математическое моделирование. Ч. 1. Непрерывные и дискретные модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 428 с.

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Savchenko A. O. Matrix of moments of the Legendre polynomials and its application to problems of electrostatics // *Comput. Math. And Math. Phys.* 2017. V. 57, iss. 1. P. 175–187. DOI: 10.1134/S0965542517010134.
2. Lopatnikova Ju. A., Alshevskaya A. A., Krugleeva O. L., Nepomnyschih V. M., Gladkikh V. S., Lukinov V. L., Karaulov A. V., Sennikov S. V. Expression of TNF $\alpha$  receptors on immunocompetent cells is increased in atopic dermatitis // *International Archives of Allergy and Immunology.* 2017. V. 174, iss. 3–4. P. 151–160. DOI: 10.1159/000481135.

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Skopin I. N. Management of program projects in conditions of unstable development teams // In book: *Management of Information Systems* // InTechOpen. ISBN 978-953-51-5748-9. DOI: 10.5772/3208.
2. Il'in V. P. Multi-preconditioned domain decomposition methods in the Krylov subspaces // *Lect. Notes in Comput. Sci.* Vol. 10187. Springer. 2017. P. 95–106. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0\_9.
3. Il'in V. P. On the parallel strategies in mathematical modeling // *Revised Selected Papers of the 11th Intern. conf. on parallel computational technologies PCT 2017, Kazan, April 3–7, 2017.* P. 73-85. DOI: 10.1007/978-3-319-67035-5\_6.

4. Il'in V. P. On the parallel least square approaches in the Krylov subspaces // Revised selected papers of the 3rd Russian supercomputing days (RuSCDays), Moscow, Sept. 25–26, 2017. P. 168–178. DOI: 10.1007/978-3-319-71255-0\_13.
5. Il'in V. P. Iterative processes in the Krylov – Sonneveld subspaces // J. of Math. Sci. 2017. Vol. 224, iss. 6. P. 890–899. DOI: DOI 10.1007/s10958-017-3459-4.
6. Il'in V. P. Least squares methods in Krylov subspaces // Ibid. Vol. 224, iss. 6. P. 900–910. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-017-3460-y>.
7. Savchenko A., Petukhov A. An overlapping domain decomposition method for the Helmholtz exterior problem // Num. Analysis and Its Appl. 2016; Lect. Notes in Comput. Sci. Vol. 10187. P. 591–598. Springer, Cham, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0\_67.
8. Gurieva Y. L., Ilin V. P., Perevozkin D. V. Deflated Krylov iterations in domain decomposition methods // Lect. Notes in Comput. Sci. and Engineering. 2017. Vol. 116. P. 345–352. DOI: 10.1007/978-3-319-52389-7\_35.
9. Alshevskaya A. A., Kireev F. D., Laushkina Z. A., Karaulov A. V., Sennikov S. V. Enhanced expression of TNF- $\alpha$  type-1 receptors by immune cells in active pulmonary tuberculosis // Intern. J. of Tuberculosis and Lung Disease. 2018. V. 22, iss. 2. P. 212–220. DOI: <https://doi.org/10.5588/ijtld.17.0404>.
10. Astrelin V. T., Kandaurov I. V., Kurkuchekov V. V., Sveshnikov V. M., Trunev Y. A. The effect of angular divergence and space charge on transmission of an electron beam through a magnetic mirror // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 830, iss. 1. Art. num. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/012002.
11. Vshivkova L., Dudnikova G. Hybrid model of particle acceleration on a shock wave front // Lect. Notes in Comput. Sci. V. 10187. Springer, 2016. P. 737–743. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0\_85.

### **Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Ильин В. П. Параллельные методы и технологии решения задач нефтегазовой отрасли // Вестн. кибернетики. 2017. № 1. С. 92–107.
2. Козырев А. Н., Свешников В. М. О построении двумерных локально-модифицированных квазиструктурированных сеток и решении на них краевых задач в областях с криволинейной границей // Вестн. ЮУрГУ. Сер.: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6, № 2. С. 5–21.
3. Москалев А. В., Gladkikh V. S., Ogiyenko A. G., Adamova T. P., Gladkikh O. L. Химико-фармакологическое исследование препаратов на основе висмута трикалия дицитрата // Эффективная фармакотерапия. 2016. № 34. С. 34–47.
4. Gur'yeva Y., Il'in V. P. Architecture solutions for DDM numerical environment // Сб. трудов 11-й Междунар. конф. "ПАВТ-2017", Казань. Казань: Изд-во ЮУрГУ, 2017. С. 110–119.
5. Антипова Е. А., Крылова А. И., Перевозкин Д. В. Численное моделирование неустановившегося движения речного потока дельты р. Лены // Сб. статей по материалам Международного научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь". 2017. Т. 4. № 1. С. 131–135.
6. Gladkikh V. S., Ильин В. П. Базовая система моделирования (БСМ): концепция, архитектура и методология // Сб. трудов конф. "Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений 2017" (СПММОИиПВ-2017), Ростов-на-Дону, 2017 г. Т. 1. С. 151–158.
7. Gladkikh V. S., Петухов А. В. Численное моделирование нестационарных тепловых полей с учетом фазовых переходов // Сборник трудов 17-й Конференции школы молодых

исследователей "Современные проблемы математического моделирования", Ростов-на-Дону, 2017. С. 41–47.

8. Гладких В. С., Свешников В. М., Козырев А. Н. Сеточные структуры данных обеспечивающие балансировку нагрузки современных вычислительных систем // Там же. С. 48–55

9. Гладких В. С., Пудов С. Г. Использование векторизованного формата хранения разреженных матриц для увеличения скорости матрично-векторного умножения // Сб. статей 9-й Сиб. конф. по параллельным и высокопроизводительным вычислениям, Томск, 2017. С. 28–34.

### **Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ**

1. Программа вычисления силы притяжения эллипсоида вращения FORCELL : свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017616782 от 17 ноября 2017 г. / Савченко А. О.

2. Программа вычисления потенциала эллипсоида вращения POTELL : свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017616778 от 17 ноября 2017 г. / Савченко А. О.

### **Участие в конференциях и совещаниях**

1. Научно-практическая конференция "Информатика и прикладная математика", Алматы (Казахстан), 27–30 сентября 2017 г. – 1 доклад (Скопин И. Н.).

2. Международная конференция "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 8 докладов (Гладких В. С., Гурьева Я. Л., Ильин В. П., Петухов А. В., Скопин И. Н., Вшивкова Л. В., Свешников В. М., Козырев А. Н.).

3. 24-я Международная летняя молодежная школа-конференция по параллельному программированию, Новосибирск, 3–14 июля 2017 г. – 1 доклад (Скопин И. Н.).

4. "Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений", Геленджик, 5–10 сентября 2017 г. – 1 доклад (Гладких В. С., Ильин В. П.).

5. Международная конференция "Многомасштабные методы и высокопроизводительные научные вычисления", Якутск, 30 июля – 4 августа 2017 г. – 1 доклад (Ильин В. П.).

6. Международная конференция "Математика в современном мире", Новосибирск, 14–19 августа 2017 г. – 1 доклад (Ильин В. П.).

7. Международная конференция "Дни геометрии в Новосибирске", Новосибирск, 20–23 августа 2017 г. – 1 доклад (Ильин В. П.).

8. Russian-Chinese Workshop, Новосибирск, 4–26 августа 2017 г. – 1 доклад (Ильин В. П.).

9. Международная научная конференция "Параллельные вычислительные технологии 2017" (ПАВТ-2017), Казань, 3–7 апреля 2017 г. – 2 доклада (Гурьева Я. Л., Ильин В. П.).

10. International conference "Russian Supercomputing Days", Moscow, September 26–27, 2017 – 1 доклад (Ильин В. П.).

11. "Finite element Rodeo", Houston (USA), March 3–4, 2017 – 1 доклад (Ильин В. П., Петухов А. В., Савченко А. О., Свешников В. М.).

12. 9-я Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям, Томск, 10–12 октября 2017 г. – 3 доклада (Гладких В. С., Ильин В. П., Петухов А. В.).

13. 17-я Всероссийская конференция-школа молодых исследователей “Современные проблемы математического моделирования”, Абрау-Дюрсо, 11–15 сентября 2017 г. – 5 докладов (Вшивкова Л. В., Гладких В. С., Горбенко Н. И., Ильин В. П., Козырев А. Н., Петухов А. В., Свешников В. М.).

14. 13-я Международная конференция "Забабахинские научные чтения", Снежинск, 20–24 марта 2017 г. – 1 доклад (Вшивкова Л. В.)

15. 13-я Международная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения акад. М. Ф. Жукова, Новосибирск, 5–7 сентября 2017 г. – 1 доклад (Вшивкова Л. В.)

### **Участие в оргкомитетах конференций**

1. Ильин В. П.:

– член программного комитета конференции "Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений", Геленджик, 5–10 сентября 2017 г.;

– член программного комитета Russian-Chinese Workshop, Novosibirsk, 28 июня 2017 г.;

– член программного комитета Международной научной конференции “Параллельные вычислительные технологии 2017” (ПАВТ-2017), Казань, 3–7 апреля 2017 г.;

– член программного комитета "Марчуковских научных чтений – 2017", Новосибирск, 25–29 июня 2017 г.;

– член программного комитета 17-й Всероссийской конференции-школы молодых исследователей “Современные проблемы математического моделирования”, Абрау-Дюрсо, 11–15 сентября 2017 г.

2. Скопин И. Н. – член программного комитета 29-й Международной летней молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 3–14 июля 2017 г.

3. Вшивкова Л. В. – ученый секретарь организационного комитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

4. Петухов А. В. – член организационного комитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

5. Перевозкин Д. В. – член организационного комитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

6. Свешников В. М. – член программного комитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

7. Гладких В.С. – член организационного комитета "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25–29 июня 2017 г.

### **Итоговые данные по лаборатории**

Монографий и глав в монографиях – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 13

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 22

Докладов на конференциях – 30, в том числе 10 пленарных.  
Участников оргкомитетов конференций – 7

### Кадровый состав

1. Свешников В. М.	зав. лаб.	д.ф.-м.н.
2. Ильин В. П.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
3. Забиняко Г.Э.	в.н.с.	к.ф.-м.н.
3. Гурьева Я. Л.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
4. Савченко А. О.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
5. Скопин И. Н.	с.н.с. 0,5 ст.	к.ф.-м.н.
6. Горбенко Н. И.	н.с. 0,6 ст.	к.ф.-м.н.
7. Вшивкова Л. В.	н.с.	к.ф.-м.н.
9. Петухов А. В.	м.н.с.	
10. Перевозкин Д. В.	м.н.с. 0,4 ст.	
11. Козырев А. Н.	м.н.с. 0,25 ст.	
13. Ицкович Е. А.	ведущ. программист	
14. Умирзакова Ф.	инженер	
15. Гладких В. С.	инженер 1-й категории 0,6 ст.	

Козырев А. Н., Перевозкин Д. В. – молодые научные сотрудники:

### Педагогическая деятельность

Ильин В. П.	– профессор НГУ
Свешников В. М.	– профессор НГУ
Скопин И. Н.	– доцент НГУ
Горбенко Н.И.	– доцент СИУ РАНХиГС

### Руководство аспирантами

1. Горшунов В. С. – 2-й год, ИВМиМГ, руководитель Ильин В. П.
2. Эрдышев Э. Б. – 2-й год, ИВМиМГ, руководитель Ильин В. П.
3. Климонов И. В. – 1-й год, НГУ, руководитель Свешников В. М.

### Руководство студентами

1. Третьяков А. С. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Свешников В. М.
2. Ван Сы Ху Эй – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Ильин В. П.
3. Крылов А. М. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Скопин И. Н.
4. Патрола В. А. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Скопин И. Н.
5. Осипов Н. А. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Скопин И. Н.

## Лаборатория математических задач химии

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

### Важнейшие достижения

#### Экономичные разностные схемы для вычисления векторных потоков.

Д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М., к.ф.-м.н. Воронин К. В.

Разработан общий универсальный подход к конструированию экономичных разностных схем для нахождения векторных потоков в параболических задачах, основанный на восстановлении векторных схем из экономично реализуемых скалярных схем-преобразов. Установлен ряд априорных оценок, которые указывают путь к конструированию новых потоковых схем, обеспечивающих более высокую точность вычислений. Предложено обобщение данного подхода для гиперболических задач.

#### Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2017 г. в соответствии с планом НИР института

**Проект НИР № 0315-2016-0001** "Сеточные методы для высокопроизводительных ЭВМ и их применение в задачах естествознания".

Номер государственной регистрации НИР 01201370231.

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

В отчетном году разработан алгоритм поиска наилучших кубатурных формул на сфере, инвариантных относительно высшей группы пространственной симметрии – группы вращений икосаэдра с инверсией. С помощью этого алгоритма были проведены многочисленные расчеты с использованием вычислительной техники Сибирского суперкомпьютерного центра. В результате получены все наилучшие кубатурные формулы данного вида симметрии до 79-го алгебраического порядка точности. Также разработан алгоритм поиска кубатур для сферы, наилучших среди всех групп симметрии правильных многогранников. В результате выполненных расчетов получены все наилучшие формулы данного типа до 35-го порядка точности. Поиск оптимальных кубатурных формул различных порядков точности опирается на общую теорию, заложенную в работах С. Л. Соболева. При построении систем нелинейных алгебраических уравнений использовалась техника, впервые предложенная В. И. Лебедевым для группы вращений октаэдра с инверсией (см. раздел "Важнейшие достижения").

Проведено исследование сеточных аппроксимаций двумерного волнового уравнения на неравномерных сетках. В случае скачка шага сетки при проходе волны через этот разрыв возникает нефизичная отраженная волна. Пример такой отраженной волны приведен на рис. 1.

Установлена зависимость относительных значений амплитуды такой отраженной волны от значений скачка шага пространственной сетки. Исследованы одномерные и двумерные круговые волны. Предложена неоднородная модификация разностной схемы, повышающая точность на скачке шага. На рис. 2 приведены значения амплитуды отраженной волны в зависимости от скачка шага сетки для различных сеточных шаблонов пространственных операторов.

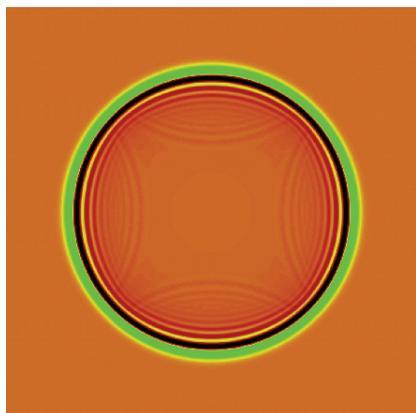


Рис. 1. Отраженная волна при скачке шага в 8 раз

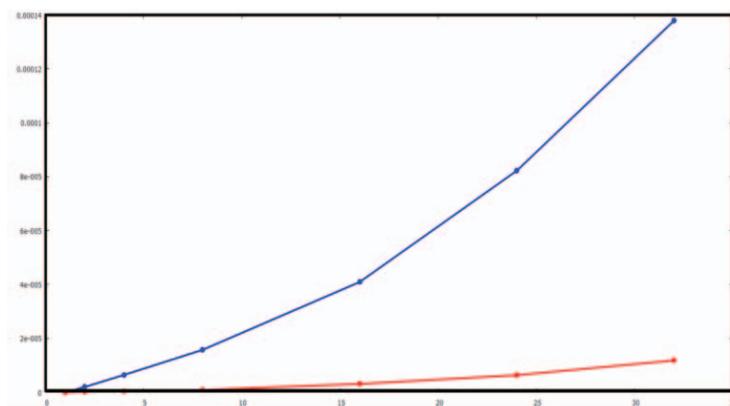


Рис. 2. Стандартная 5-точечная схема (синяя линия) и модифицированная схема (красная линия)

В 2017 г. проводились работы по развитию теории и алгоритмов метода конечных элементов. В частности, рассматривался вариант разрывного метода Галеркина, являющийся "прямоугольным вариантом" метода, предложенного Ю.А. Кузнецовым. Особенностью этого метода является отсутствие в схеме штрафных параметров. Далее, рассмотрен так называемый анизотропный смешанный (или частично смешанный) метод конечных элементов, в котором разделение переменных сопровождается разной гладкостью по разным переменным и разными способами перехода к обобщенной постановке. Такая формулировка может быть полезна для задач с анизотропными включениями, например для учета скважин в трехмерной постановке. При этом вдоль скважины формулируется прямая обобщенная задача, а в поперечных направлениях – смешанная.

### Результаты работ по проектам РАН

**Проект Президиума РАН П.2П/Г.3-1 "Методы решения задач фильтрационного горения газа на высокопроизводительных вычислительных системах".**

Отв. исполнитель – д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

В 2017 г. получены новые результаты в разработке параллельного алгоритма для двумерной задачи фильтрационного горения газа. Ранее в рамках проекта был исследован параллельный алгоритм, основанный на явной разностной схеме выполнения сеточных законов сохранения, описывающих фильтрационное горение газов. Алгоритм, рассмотренный в отчетном году, основан на неявной разностной схеме и методе расщепления. Для разработанного алгоритма были реализованы два способа распараллеливания: с помощью директив OpenMP на общей памяти и с помощью технологии MPI на распределенной памяти. Проанализировано время работы программы при одних и тех же параметрах для разных способов обмена данными между процессами. Установлено, что правильный выбор функций для пересылок между процессами существенным образом повышает производительность вычислений (ускорение в 4 раза на 16 процессах). Все вычисления проводились на кластере НКС-30Т ЦКП "Сибирский суперкомпьютерный центр" ИВМиМГ СО РАН.

**Проект ОМН РАН П.2П/Г.3-3 "Новое поколение параллельных алгоритмов для суперЭВМ на примере решения задач геологии и геофизики".**

Отв. исполнитель – д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М.

Продолжена разработка трехмерной вычислительной модели динамики теплового поля при формировании Таймыр-Североземельского орогена в конце палеозоя. Алгоритмической основой модели являются новые экономичные схемы для вычисления теплового потока в рамках смешанного метода конечных элементов. В свою очередь, основой для построения упомянутых вычислительных схем являются экономичные схемы-прообразы типа предиктор-корректор, применяемые к сеточной дивергенции теплового потока. В настоящее время идет подготовка публикации по данной тематике.

### Результаты работ по проекту РНФ

**Проект РНФ №15-11-10024** "Новые вычислительные модели разработки нефтяных месторождений Крайнего Севера и Арктики и создание на их основе высокопроизводительного программного обеспечения на суперЭВМ для задач фильтрации многофазной жидкости в трещиновато-пористых средах".

Руководитель – д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М. (приведенные результаты получены только сотрудниками лаборатории МЗХ, включенными в состав НГ 15-11-10024).

Разработаны программные коды для двух моделей вытеснения нефти водой в трещиновато-пористых средах: для модели с сильно гетерогенной проницаемостью и для модели двойной пористости. Математической основой модели является смешанная формулировка для определения суммарной скорости и давления, а также недивергентная форма нестационарного уравнения для водонасыщенности. Возникающая при этом система линейных алгебраических уравнений с седловой матрицей решается прямым методом. Аппроксимация уравнения для водонасыщенности строится с использованием чисто неявной схемы с искусственной вязкостью для устранения численных осцилляций. Программный код для 3D модели двойной пористости также основан на смешанной формулировке, но в отличие от упомянутого выше кода использует дивергентную форму для водонасыщенностей. Соответствующая система алгебраических уравнений для пары суммарных сеточных скоростей и пары сеточных давлений решается итерационным методом сопряженных градиентов после исключения сеточных скоростей. Для аппроксимации по времени рассмотрены различные алгоритмы, как явные (типа IMPES), так и явно-неявные. Кроме того, разработан и протестирован программный код для учета скважин с заданными интегральными дебитами как на нагнетательных, так и на эксплуатационных скважинах. Математической основой заложенных в программы алгоритмов является некоторый вариант метода фиктивных областей в рамках смешанной постановки, для которой разработан код, о котором речь шла выше. Отметим, что все указанные здесь программные коды реализованы на кластерах НКС-30Т ЦКП "Сибирский суперкомпьютерный центр" при ИВМиМГ СО РАН и "Ариан Кузьмин" СВФУ.

Предложена новая модель двойной пористости, совмещающая различные типы массообмена между трещинами и поровой матрицей, позволяющая учитывать анизотропные характеристики среды. Рассмотрена гибридная функция перетока, являющаяся суммой двух слагаемых с весами: первое слагаемое соответствует классической функции перетока, заданной как разность давлений в трещинах и в поровых блоках, второе определяется через разность градиентов давлений или, в соответствии с законом Дарси, через разность скоростей. При этом в градиентную часть функции перетока входит так называемая эффективная нормаль, зависящая, вообще говоря, от пространственных координат. Рассмотрено течение однофазной слабо сжимаемой жидкости в трещиновато-пористой среде в рамках модели с такой гибридной функцией перетока. Теоретическое исследование показало, что в случае переменной эффективной нормали возможно развитие неустойчивости и стабилизирующим

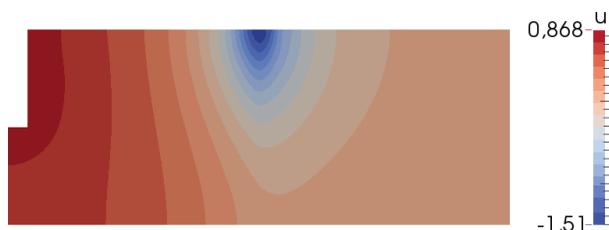


Рис. 3. Пример неустойчивости модели двойной пористости

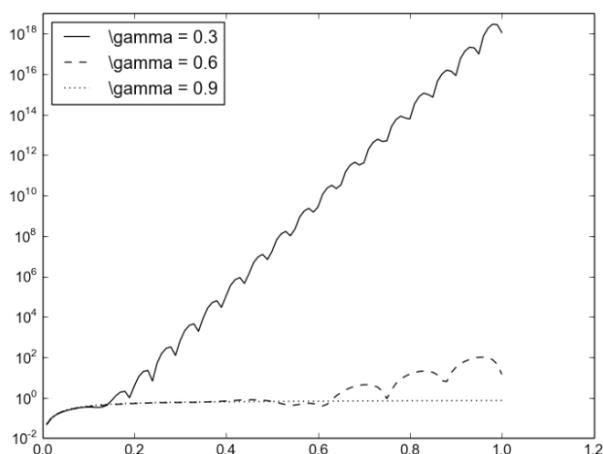


Рис. 4. Среднеквадратичная норма решения для разных весовых коэффициентов (иллюстрация развития неустойчивости)

фактором является наличие классического слагаемого в функции перетока. Установлено условие на весовой параметр, гарантирующее устойчивость течения. Фактически, данное условие обеспечивает однозначную разрешимость сформулированной краевой задачи. Для данной модели разработан программный код в 2D и 3D случаях. В соответствии с теорией определен набор параметров, для которых неустойчивый режим получен в ходе вычислительных экспериментов. Выявлен осциллирующий характер потери устойчивости. По данному исследованию подготовлена и сдана в печать работа. На рис. 3 приведена иллюстрация к вопросу о неустойчивости модели.

Для реализации многомерной модели фильтрационного горения газа в двухтемпературной постановке построены новые экономичные неявные и явно-неявные алгоритмы. При этом проведен ряд методических исследований для одномерной модели с различными способами аппроксимации теплообмена между химически инертным каркасом и горючей газовой смесью. Были рассмотрены следующие варианты: температуры каркаса и газа берутся с явного слоя, с неявного слоя и с использованием явно-неявной аппроксимации, когда в уравнении для каркаса температура каркаса берется неявно, а температура газа явно, а в уравнении для газа температура каркаса берется с явного слоя, а температура газа неявно. В первом случае схема теряет свойство абсолютной устойчивости, что приводит к существенному уменьшению шага интегрирования по времени и, как следствие, увеличению расчетного времени. Во втором случае существенно усложняется алгоритм, поскольку для его реализации требуется матричная прогонка. И, наконец, третий вариант обеспечивает абсолютную устойчивость схемы в сочетании с простой реализацией. Возможное нарушение баланса энергии в этом случае легко компенсируется введением эффективной теплоемкости газа, хотя в расчетах этого не потребовалось. Еще одним методическим результатом явился вывод о возможности пренебрежения кондуктивной теплопроводностью в газе при сохранении диффузионного слагаемого в уравнении баланса массы. Результатом таких "одномерных" исследований явился весьма эффективный, как по точности, так и по производительности, алгоритм, реализующий многомерную модель фильтрационного горения газа. В основе алгоритма лежит метод расщепления, сводящий процесс вычислений к решению набора одномерных задач с учетом результатов, о которых сказано выше. Наконец, осуществлено 3D моделирование процесса фильтрационного горения газа с использованием библиотек Gmsh и FEniCS, зафиксировано качественно верное поведение волны горения.

## Результаты работ по проекту РФФИ

**Проект РФФИ № 16-29-15122офи-м** "Вычислительные методы и параллельные технологии предсказательного моделирования процессов в нефтегазовой отрасли".

Исполнители: д.ф.-м.н. Лаевский Ю. М., к.ф.-м.н. Литвиненко С. А., Носова Т. А.

В 2017 г. реализованы новые параллельные алгоритмы решения двумерной задачи фильтрационного горения газа на многопроцессорном кластере НКС-30Т ССКЦ ИВМиМГ СО РАН с использованием технологии MPI. Распараллеливание осуществлялось на 16 MPI-процессах. В результате для двумерной задачи производительность увеличилась примерно в четыре раза по сравнению с последовательной версией. Кроме того, в 2017 г. разработана математическая модель процесса таяния льда в криолитозоне на основе двухтемпературного представления процессов в многолетнемерзлых грунтах.

## Публикации

### Идания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Voronin K., Laevsky Y. A new approach to constructing vector splitting schemes in mixed finite element method for parabolic problems // J. of Num. Math. 2017. V. 25, iss. 1. P. 17–34. DOI: 10.1515/jnma-2015-0076.

2. Voronin K. V., Grigoriev A. V., Laevsky Yu. M. On an approach to the modeling of oil wells // Num. Analysis and Appl. 2017. Vol. 10, iss. 2. P. 120–128. DOI: 10.1134/S1995423917020033.

3. Laevsky Yu. M., Nosova T. A. Computational models of filtration gas combustion // Rus. J. of Num. Analysis and Math. Modelling. 2017. Vol. 32, iss. 2. P. 115–125. DOI: 10.1515/rnam-2017-0010.

4. Voronin K., Laevsky Yu. M. A flux predictor-corrector scheme for solving 3D heat transfer problem // Num. Analysis and Appl. 2017. Vol. 10, iss. 4. P. 287–298. DOI: 10.15372/SJNM20170401.

5. Popov A. S. Cubature formulas on a sphere invariant under the symmetry groups of regular polyhedrons // Sib. Electron. Math. Rep. 2017. Vol. 14. P. 190–198. DOI: 10.17377/semi.2017.14.019.

6. Popov A. S. Cubature formulas invariant under the icosahedral group of rotations with inversion on a sphere // Num. Analysis and Appl. 2017. Vol. 10, iss. 4. P. 339–346. DOI: 10.1134/S199542391704005X.

### Идания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Vasil'ev V. I., Vasil'eva M. V., Laevsky Y. M., Timofeeva T. S. Numerical simulation of the two-phase fluid filtration in heterogeneous media // J. of Appl. and Indust. Math. 2017. Vol. 11, iss. 2. P. 289–295. DOI: 10.1134/S1990478917020156.

## Участие в конференциях и совещаниях

1. International Conference of computational methods in sciences and engineering (ICCMSE 2017), Thessaloniki (Greece), April 21–25, 2017 – 1 доклад (Лаевский Ю. М., Носова Т. А.).

2. Международная конференция по вычислительной и прикладной математике (ВПМ'17), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 5 докладов, из них 1 пленарный (Лаевский Ю. М., Воронин К. В., Попов А. С., Носова Т. А., Анисимова А. С.).

3. The 5th Russian-Chinese Workshop on numerical mathematics and scientific computing, Novosibirsk, June 29–30, 2017 – 2 приглашенных доклада (Носова Т. А., Воронин К. В.).

4. Международная конференция "Многомасштабные методы и высокопроизводительные научные вычисления", Якутск, 30 июля – 4 августа 2017 г.– 1 доклад (Григорьев А. В., Лаевский Ю. М.).

5. Международная конференция "Математика в современном мире", посвященная 60-летию Института математики им. С. Л. Соболева, Новосибирск, 14–19 августа 2017 г.– 2 доклада (Лаевский Ю. М., Попов А. С.).

6. 17-я Всероссийская конференция-школа молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования", пос. Дюрсо, 11–16 сентября 2017 г. – 1 пленарный доклад (Лаевский Ю. М.).

### Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 6

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 7

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 5

Докладов на конференциях – 12

### Кадровый состав

1. Лаевский В. М. – зав. лаб. д.ф.-м.н.

2. Калинин А. А. – с.н.с., 0,1 ст. к.ф.-м.н.

3. Кремер И. А. – с.н.с., 0,4 ст. к.ф.-м.н.

4. Попов А. С. – с.н.с. к.ф.-м.н.

5. Голубева Л. А. – н.с., 0,5 ст. к.ф.-м.н.

6. Литвиненко С. А. – н.с. к.ф.-м.н.

7. Воронин К. В. – м.н.с., 0,1 ст. к.ф.-м.н.

8. Иванов М. И. – м.н.с., 0,9 ст.

9. Носова Т. А. – м.н.с.

10. Сандер И. А. – ведущ. программист

11. Юматова Л. А. – программист 1-й кат., 0.5 ст.

Воронин К. В., Носова Т. А. – молодые научные сотрудники.

Сотрудники, временно включенные в 2017 г. в состав НГ 15-11-10024 для выполнения работ по проекту РФФ № 15-11-10024:

1. Григорьев А. В. – с.н.с. к.ф.-м.н.

2. Яковлев П. Г. – с.н.с. к.ф.-м.н.

### Педагогическая деятельность

Лаевский Ю. М. – профессор НГУ (зав. кафедрой вычислительной математики)

Голубева Л. А. – доцент НГУ

Калинин А. А. – доцент НГУ (зам. декана ММФ)

Воронин К. В. – ст. преподаватель НГУ

Литвиненко С. А. – ассистент НГУ

### Руководство аспирантами

1. Первунин А. С. – 2-й курс аспирантуры ММФ НГУ, руководитель Лаевский Ю. М.

2. Анисимова А.С. – 1-й курс аспирантуры ММФ НГУ, руководитель Лаевский Ю. М.

### Руководство студентами

1. Стуколова А. С. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Лаевский Ю. М.

2. Ли Цюли – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Лаевский Ю. М.

3. Пань Яжу – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Лаевский Ю. М.

## **Лаборатория математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере**

И. о. зав. лабораторией д.ф.-м.н. Платов Г. А.

### **Важнейшие достижения**

#### **Численный анализ данных наземного и спутникового мониторинга загрязнения территорий атмосферными выбросами Искитимского цементного завода.**

С использованием малопараметрических моделей реконструкции полей загрязнений и методов теории планирования экспериментов проведены экспериментальные и численные исследования процессов загрязнения территорий выбросами Искитимского цементного завода. Полученные зависимости позволяют, исходя из условий термодинамического равновесия ионного состава, проводить оценки риска нанесения вреда здоровью населения, степени защелачивания почв и водных объектов и контроль атмосферных выбросов завода  
Д.ф.-м.н. Рапуга В. Ф.

#### **Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2017 г. в соответствии с планом НИР института**

#### **Проект НИР 1.4.1.2 "Развитие методов математического моделирования для задач физики атмосферы, гидросферы и охраны окружающей среды".**

Номер государственной регистрации НИР 0315-2016-0004.

Руководители: д.ф.-м.н. Пененко В. В., д.ф.-м.н. Кузин В. И.

Развитие методов математического моделирования для задач физики атмосферы, гидросферы и охраны окружающей среды осуществлялось в нескольких направлениях.

Для исследований климата и взаимодействия атмосферы и океана на масштабах десятилетий и столетий разработана совместная модель динамики атмосферы и океана, получившая название PlaSim-ICMMG-1.0, построенная на основе модели PlaSim и модели циркуляции океана и льда, созданной ранее в лаборатории. Новая версия климатической модели удовлетворительно воспроизводит основные характеристики климатической системы Земли и может быть использована в дальнейшем для ее исследования.

Современное быстрое потепление в Арктике вызывает серьезные проблемы, связанные с пониманием механизмов, регулирующих динамику погоды в средних широтах. Новая модель земной системы промежуточной сложности PlaSim-ICMMG-1.0 может использоваться для решения этих задач. В частности, в ходе анализа атмосферных динамических полей, полученных с помощью разрабатываемой модели, выяснено, что совместная модель значительно лучше оригинальной версии модели PlaSim воспроизводит годовой ход температуры и крупномасштабные особенности распределения осадков (рис. 1).

Запущен тестовый вариант модели WRF на данных, полученных по климатической модели Земли PlaSim-ICMMG-1.0, что позволяет в дальнейшем проводить региональную локализацию климатических изменений.

В ходе работы над проектом исследовалось также влияние климатических изменений на полярные мезоциклоны. Известно, что экстремальные погодные условия в полярных широтах чаще всего связаны с выносом холодного воздуха на морскую поверхность. С помощью модели общей циркуляции промежуточной сложности PlaSim была исследована частота

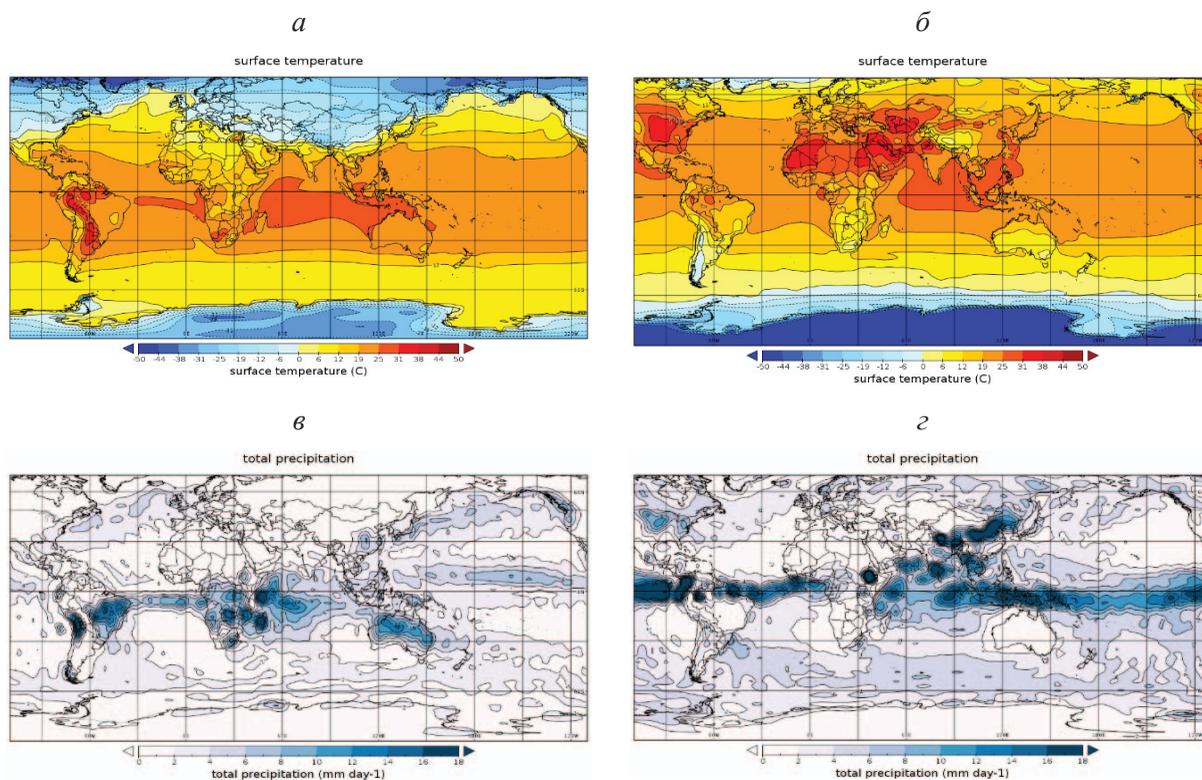


Рис. 1. Климатические характеристики, осредненные за последнее десятилетие столетнего предварительного эксперимента: температура поверхности (*a* – январь; *б* – июль); среднее количество осадков (*в* – январь; *г* – июль)

возникновения этих условий при различных климатических режимах. Для решения этой задачи проведен анализ чувствительности модели PlaSim к параметризации радиационных процессов.

Численная модель океана совершенствовалась в направлении увеличения горизонтального разрешения и большей детализации описываемых процессов. Первым шагом в этом направлении было создание параллельной версии модели с использованием декомпозиции по подобластям, что позволяет значительно увеличивать размер сеточной области при увеличении разрешения. В результате построена новая версия модели Северного Ледовитого океана (СЛО) и Северной Атлантики с разрешением 0.25 градусов на широтах ниже 60N и до 7–8 км в приполярных районах. Достигнута большая детализация структуры проливов Канадского арктического архипелага. В отличие от предшествующей версии модели с разрешением 0.5 градусов, в новой версии удалось явным образом включить в область решения Средиземное море.

С помощью построенной модели была продолжена серия численных экспериментов по изучению роли изменчивости скорости таяния Гренландского ледникового щита в формировании термохалинной структуры вод морей Северной Атлантики. В предшествовавшей серии экспериментов было показано, что при модельном разрешении 0.5 градусов скорость распространения талых вод в район Гренландского моря оказалась заниженной в основном из-за недостаточного учета вихревого переноса. Новую версию модели можно отнести к разряду "вихредопускающих", поэтому с ее помощью удалось достичь реального прогресса в описании вихревого переноса в регионе. На рис. 2 представлена схема распространения вод гренландского стока. Через пять лет после старта модели (рис. 2,*a*) практически вся

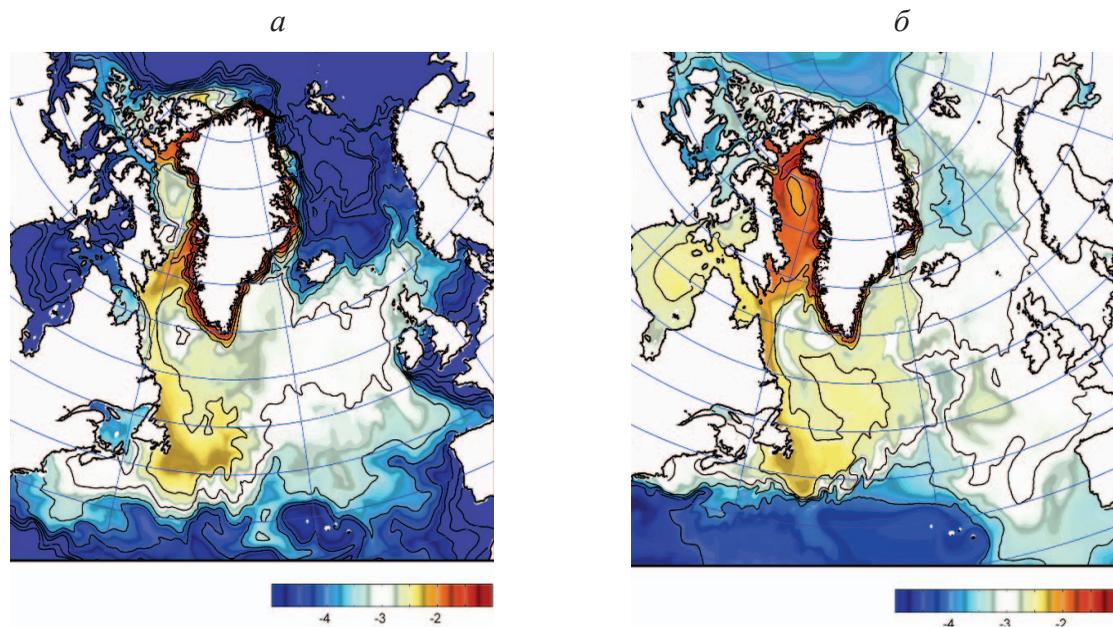


Рис. 2. Распространение трассера талых вод Гренландии в поверхностном слое Северной Атлантики (значения изолиний представляют концентрацию гренландских вод в логарифмической шкале (по основанию 10), шаг изолиний 0,5):

*a* – через 5 лет после старта; *б* – через 20 лет

акватория к северу от Гольфстрима и до широты Исландии заполнена трассером с концентрацией примерно  $10^{-3}$ , тогда как раньше на это уходило примерно 8 лет. Через 20 лет область Гренландского моря также оказалась подвержена воздействию гренландских вод с концентрацией во внутренней части бассейна примерно  $3 \times 10^{-4}$  (рис. 2б). В предшествовавшей версии модели концентрация была на 1–2 порядка ниже, так что создавалось впечатление, что эта область недостижима для этих вод. Как показывает анализ, решающую роль в процессе распространения во внутреннюю область Гренландского моря играет вихревой перенос.

С целью достижения более полного описания процессов, протекающих в шельфовых районах океана, в рамках крупномасштабной модели предпринята попытка модификации основной версии модели океана путем применения комбинированной численной сетки по вертикали. В глубинных районах океана, характеризующихся резкими наклонами дна, предполагается использовать *z*-систему вертикальных физических координат, а шельфовая часть океана и переход на материковый склон рассматриваются в  $\sigma$ -системе координат, в которой первый вертикальный горизонт соответствует горизонту для *z*-системы, а остальные координатные линии следуют топографии дна. С помощью данного подхода можно: описывать потоки, поступающие в поверхностный слой, с одинаковой степенью детализации для всех районов океана; уточнять распределение гидрологических характеристик шельфовой области; описывать процессы обмена вод шельфовой зоны и глубокого океана в области материкового склона.

В результате подготовлена модифицированная версия модели с включением  $\sigma$ -подхода при расчете вертикальной координаты в шельфовой зоне. Были преобразованы и протестированы основные блоки, определяющие циркуляцию вод: блок расчета уравнений движения и блок переноса тепла и соли.

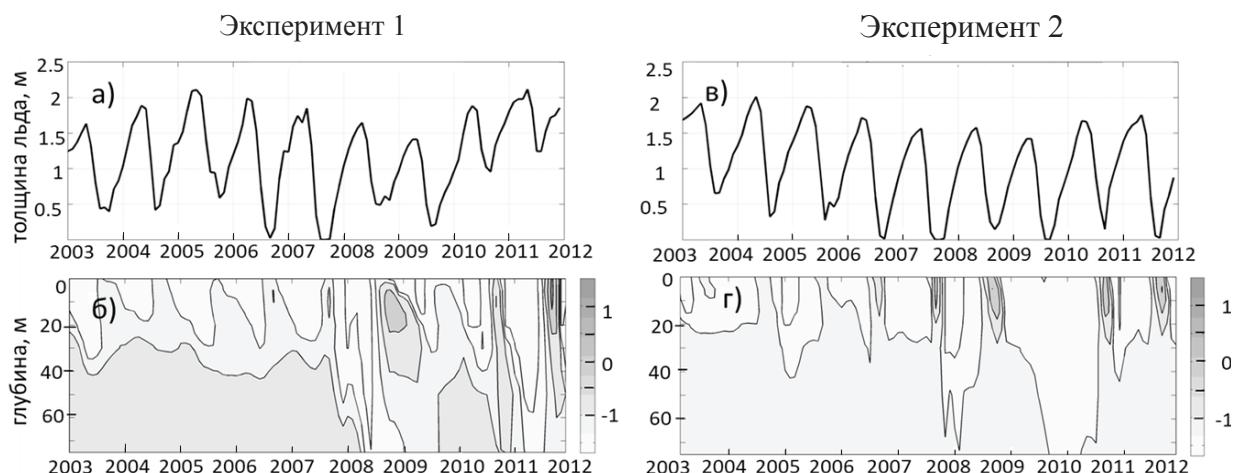


Рис 3. Временной ход толщины льда (*а, в*) и температуры (*б, г*) для периода 2003–2011 гг.: эксперимент 1 с проникающей солнечной радиацией на основе подхода с экспоненциальным убыванием (*а, б*); эксперимент 2, в котором вся поступающая радиация поглощается в верхнем 2,5-метровом слое океана (*в, г*)

С помощью численного моделирования с использованием совместной модели океана и льда продолжено изучение особенностей циркуляции и механизмов формирования термохалинной структуры СЛО. Исследованы вопросы формирования подповерхностного максимума температуры (ПТМ) в водах Северного Ледовитого океана. Наличие ПТМ создает условия для сохранения тепла, полученного с солнечной радиацией в течение лета под перемешанным слоем. Выяснилось, что часть тепла, проникшая достаточно глубоко, способна сохраниться в течение зимы.

Проведена серия сравнительных численных экспериментов, в ходе которых либо задавалось, что вся радиация поглощается в верхнем 2,5-метровом слое, либо количество поглощаемой радиации предполагалось убывающим экспоненциально с ростом глубины. Результаты численных экспериментов показали, что поглощение радиации в верхнем слое приводит к исчезновению ПТМ, сглаживанию вертикальных профилей температуры, а также к сокращению толщины льда (рис. 3). При этом расчеты модели без учета проникающей радиации показывают более интенсивное таяние льда весной, а также усиленное нарастание осенью. Это обусловлено усиленными тепловыми потоками от океана ко льду в весенне-летний период, ослабевающими в осенне-зимний период.

Трехмерная региональная численная модель Северного Ледовитого океана и Северной и экваториальной Атлантики, разработанная в ИВМиМГ СО РАН, использовалась для проведения прогностических расчетов и анализа возможной изменчивости распределения термохалинных характеристик Северного Ледовитого океана в условиях развития сценария антропогенного воздействия на климатическую систему. Для оценки предполагаемых изменений до конца 21 века во второй части численного эксперимента с 2006 до 2100 гг. потоки на границе атмосфера – лед – океан оценивались на основе среднемесячных данных с использованием атмосферных полей, полученных в результате расчета по климатической модели CNRM-CM5 (Франция) в предположении развития наиболее агрессивного климатического сценария антропогенного воздействия RCP8.5. Устойчивый положительный тренд температуры атмосферы полярных широт, полученный в результате работы модели климатической системы, приводит к появлению положительных аномалий температуры и в поверхностном слое СЛО. Результаты численного эксперимента показывают, что начиная со второй половины

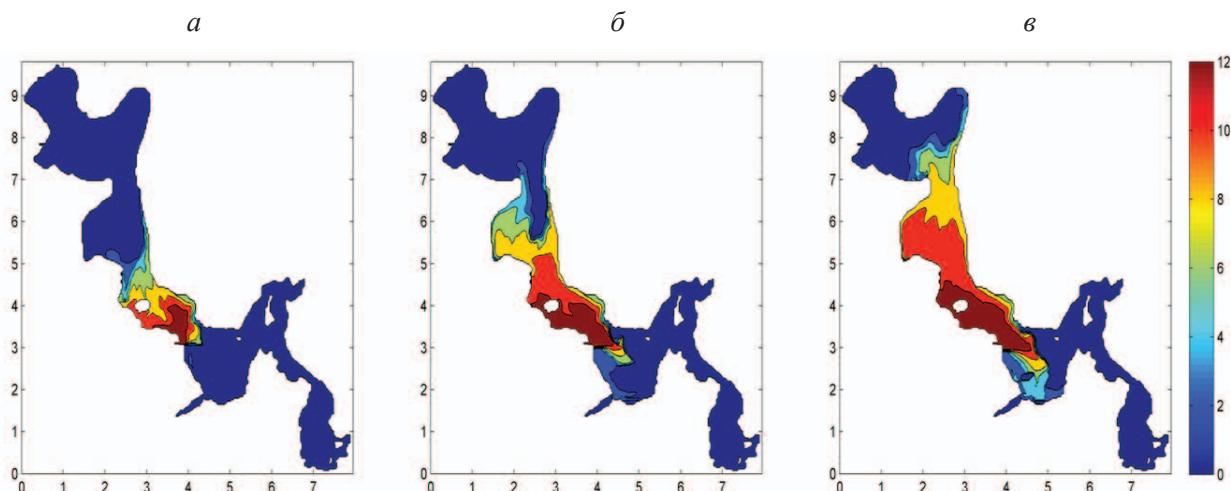


Рис. 4. Распространение теплового сигнала при двух (*а*), четырех (*б*) и шести (*в*) работающих агрегатах в зимний период, при южном ветре. По осям координат отложено расстояние в километрах от левого нижнего угла. Цветовая шкала соответствует температуре в градусах Цельсия

21 века происходит исчезновение летнего ледового покрова, повышение температуры поверхностных вод и постепенное проникновение тепла в нижележащие слои, способствующее установлению положительной придонной температуры в области мелководного шельфа. В области глубокого шельфа, выходящей к материковому склону, в дополнение к поверхностному сигналу в этот же период происходит значительное повышение температуры в придонном слое, что связано с интенсификацией поступления теплых атлантических вод и затоком их в шельфовую область.

Одна из модификаций модели динамики океана была адаптирована для моделирования внутренних водоемов: озер, водохранилищ и водоемов охладителей. В частности, для изучения процессов теплового загрязнения Беловского водохранилища разработана гидродинамическая модель этого водоема охладителя. Основой модели является система трехмерных нелинейных уравнений движения, записанных с использованием приближений гидростатики и Буссинеска. Термодинамический блок модели позволяет рассчитывать трехмерное распределение температуры водоема на основе решения уравнения адвекции-диффузии. Параметризация интенсивного вертикального перемешивания в осенне-зимний период производится на основе оценки устойчивости стратификации водоема. Для формирования потоков тепла и импульса на поверхности водоема используются данные наблюдений о состоянии атмосферы. Проведена оценка влияния тепловых сбросов Беловской ГРЭС на термический и динамический режимы водохранилища при двух, четырех и шести работающих агрегатах (рис. 4).

Для проведения тестов в рамках численной модели определения плоской циркуляции для Новосибирского водохранилища на основе двумерного нелинейного уравнения вихря построен модельный ветер с переменным профилем по данным от ГМО Обская (скорость и направление ветра, частота обновления данных – 3 ч). На основе тестов можно сделать вывод, что скорость основного течения формируется за счет притока из реки Обь и стока через Новосибирскую ГЭС. Влияние ветра наиболее заметно в случае продолжительного воздействия в направлении, перпендикулярном к ориентации основной области течения (рис. 5). В этих условиях происходит смещение картины течений и его интенсификация в районе островов.

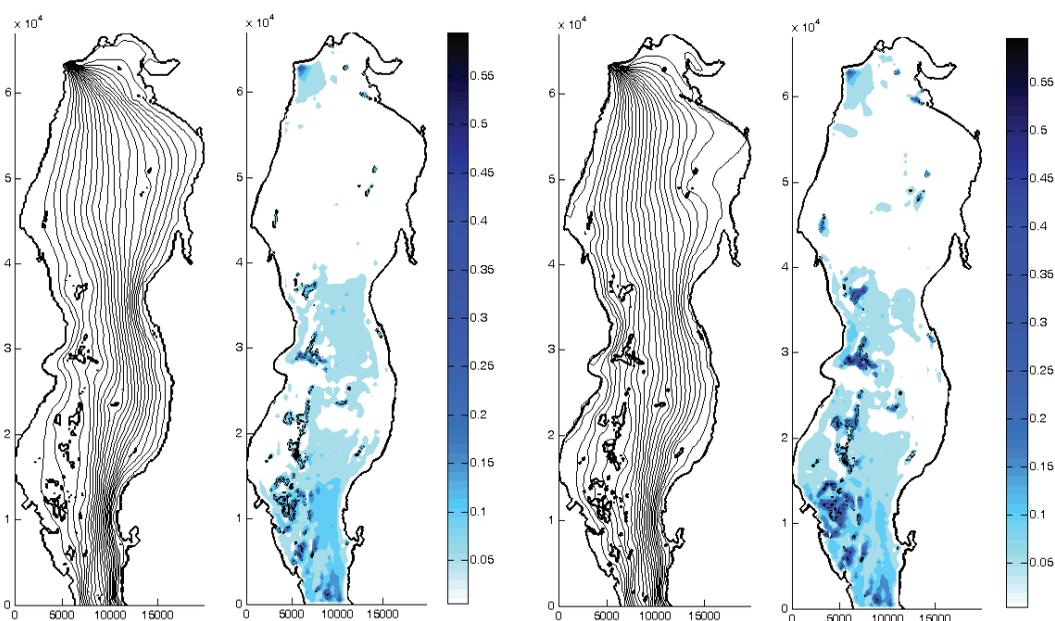


Рис. 5. Изменение изолиний функции тока и распределения модуля скорости (м/с) под действием преимущественно юго-восточного ветра со скоростью 3–6 м/с в течение 14 ч

В направлении развития методов математического моделирования для задач охраны окружающей среды было продолжено совершенствование модели термофизических процессов в донных отложениях океана для последующего анализа состояния субаквальной мерзлоты с учетом изменчивости термохалинной структуры арктических морей.

Для исследования динамики субаквальной криолитозоны арктических шельфов был разработан палеогеографический сценарий для четырех климатических ледниковых циклов (последние 400 тыс. лет). Используется подход, в котором учитывается представление об изменении уровня океана и положения береговой линии. Предполагается, что подводная мерзлота сформировалась на суше в холодную эпоху в период понижения уровня океана и осушения шельфа. Основное предположение при этом: область шельфа с глубинами до 100–120 м в ледниковые периоды была сушей. На ней в результате промерзания под воздействием низкой температуры атмосферы сформировалась мерзлота, в структуру которой метан мог включаться в форме газовых гидратов. В процессе расчета теплового поля в донных отложениях температура на верхней границе соответствовала значениям температуры воздуха либо температуры придонной воды в зависимости от того, в каких условиях находится область шельфа.

На основе разработанного сценария проведен анализ характеристик многолетнемерзлых пород (ММП) и зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) для последних четырех циклов плейстоцена с использованием модели термофизических процессов в донных отложениях. Показано, что при типичном для большей части шельфа значении интенсивности геотермического потока тепла  $G = 60 \text{ Вт/м}^2$  для мелкого (современная глубина не более 50 м) шельфа продолжительность межледниковий и соответствующих периодов трансгрессии океана недостаточна для полной деградации мерзлоты и разрушения газогидратов. Для более глубокого шельфа, однако, возможно понижение верхней границы и даже полное исчезновение ЗСГГ во время межледниковий. Несмотря на значительные вариации уровня моря в ледниковых циклах плейстоцена, основную роль в формировании отклика ЗСГГ играет изменение температуры поверхности донных отложений в этих циклах (рис. 6).

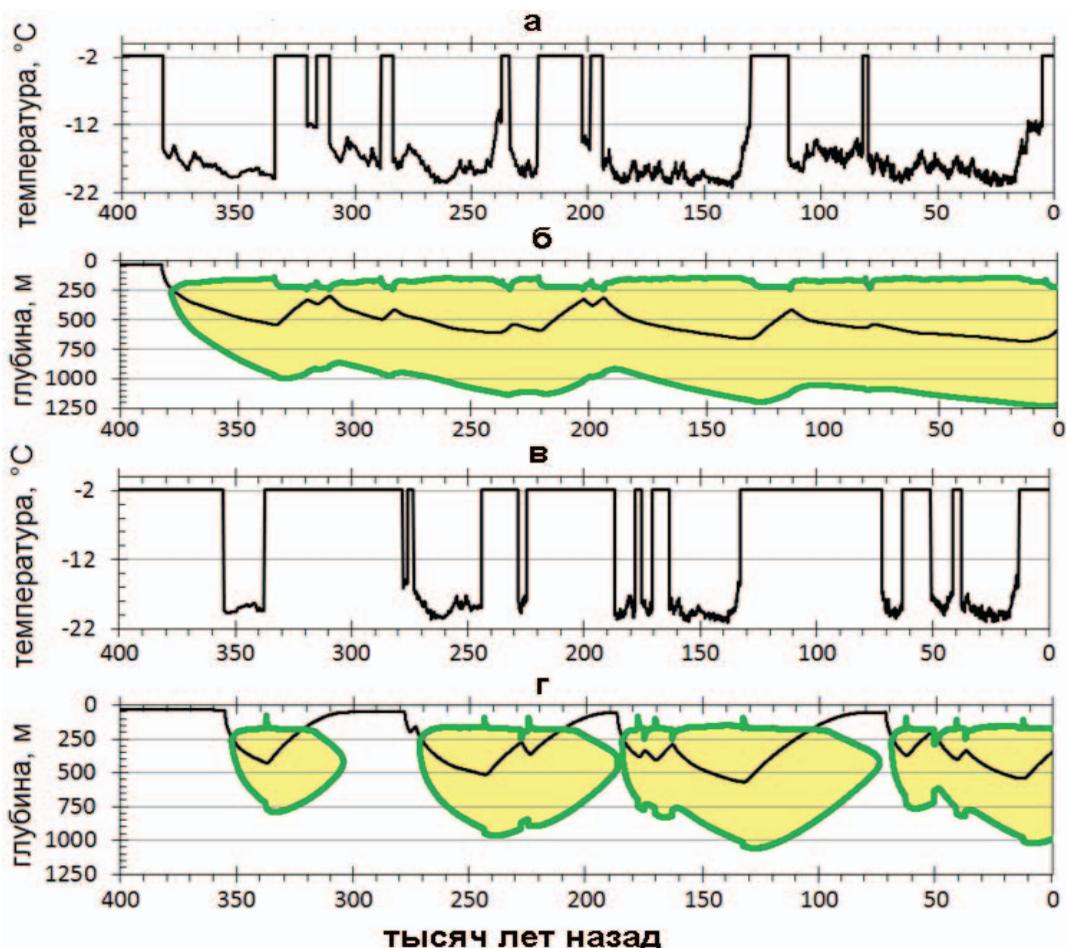


Рис. 6. Изменения по времени: *а* – температуры на верхней границе расчетной области для шельфа с глубиной 20 м; *б* – нижней границы многолетнемерзлых пород (ММП, черная линия) и зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) для шельфа с глубиной 20 м; *в* – температуры на верхней границе расчетной области для шельфа с глубиной 70 м; *г* – нижней границы ММП (черная линия) и ЗСГГ для шельфа с глубиной 70 м

Для оценивания длительного регионального загрязнения местности стационарным источником атмосферных примесей разработана модель, построенная с использованием уравнения баланса примеси в цилиндрических координатах и обобщенной интегральной теоремы о среднем. Проведен численный анализ результатов мониторинга загрязнения взвешенными веществами атмосферного воздуха и снежного покрова на стационарных гидрометеорологических постах г. Кемерово. С использованием зимних спутниковых снимков, полученных в панхроматическом диапазоне, в соответствии с дискретной шкалой оттенков серого цвета, проиндексирована плотность тона изображения очагов загрязнения (рис. 7*а*). Для ряда зимних сезонов проведено сопоставление результатов компьютерной обработки космоснимков с результатами наземного мониторинга загрязнения снежного покрова. Установлено наличие значимых корреляционных связей между оттенками серого цвета и содержанием твердых осадков в пробах снеготалой воды (рис. 7*б,в*).

Показано, что для рассмотренных зимних сезонов существует определенная стабильность размещения и функционирования основных источников выбросов взвешенных веществ в атмосферу города. Проведенное исследование подтвердило возможность создания дополнительных систем мониторинга и получения на их основе более детальной оценки

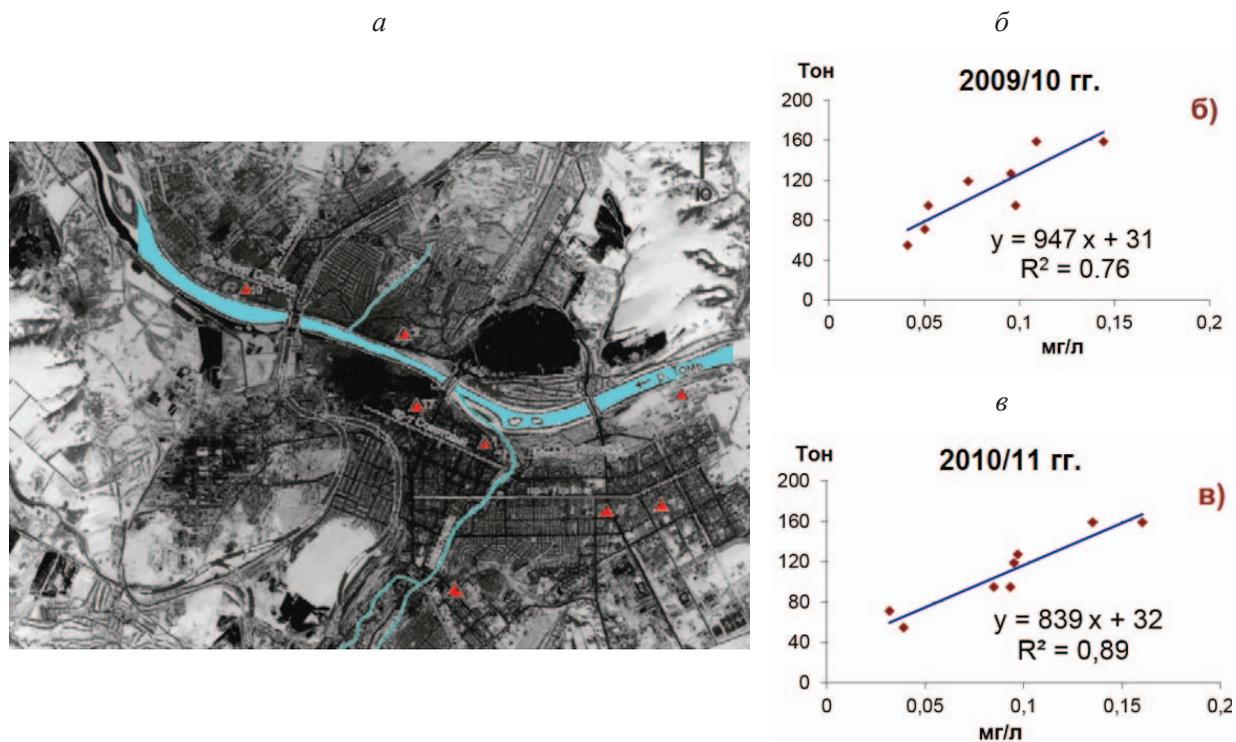


Рис. 7. Оцифрованный в тонах серого цвета спутниковый снимок Кемерова от 26.03.2006 г. со схемой размещения постов контроля атмосферного воздуха:  
 а – линейные корреляционные зависимости между оттенками серого цвета на снимке и твердыми осадками в пробах снега для зимних сезонов в 2009–2010 гг. (б) и 2010–2011 гг. (в)

состояния длительного загрязнения снежного покрова города. Использование результатов сопряженных исследований межсредового загрязнения атмосферного воздуха и снежного покрова на постах Росгидромета в Кемерове позволит проводить оценки содержания в атмосфере взвешенных веществ по спутниковым снимкам и, соответственно, определять ингаляционные риски нанесения вреда здоровью городского населения.

**Проект НИР "Прогнозирование катастроф для природной среды России: математическое моделирование сейсмоопасных зон, цунамириска, загрязнений окружающей среды и изменений климата".**

Номер государственной регистрации НИР 0315-2015-0016.

Руководители: чл.-корр. РАН Кабанихин С. И., д.т.н. Ковалевский В. В, д.т.н. Гусяков В. К.

Проведены расчеты по исследованию возможных изменений стока Сибирских рек в 21 в. Исходными данными являются результаты расчетов по десяти моделям программы проекта СМIP-5 программы IPCC. В расчеты включены модели INM (Россия), CNRM (Франция), GFDL (США) и MIROC (Япония), HadGEM (Великобритания), MPI (Германия), CMCC (Италия), MRI (Япония), GISS (США) и CSIRO (Австралия). Расчеты показали, что межгодовая изменчивость речного стока в 21 в. имеет общие положительные тенденции в различных моделях при значимых вариациях в притоке пресной воды в Северный Ледовитый океан (рис. 8). Анализ гидрологических составляющих показал, что наибольший вклад в увеличение гидрологических характеристик дают сезоны зима и осень при умеренном росте весной. Летний период характеризуется отрицательным трендом. Эти характеристики определяют общий положительный тренд речного стока в 21 в. при значимых различиях в

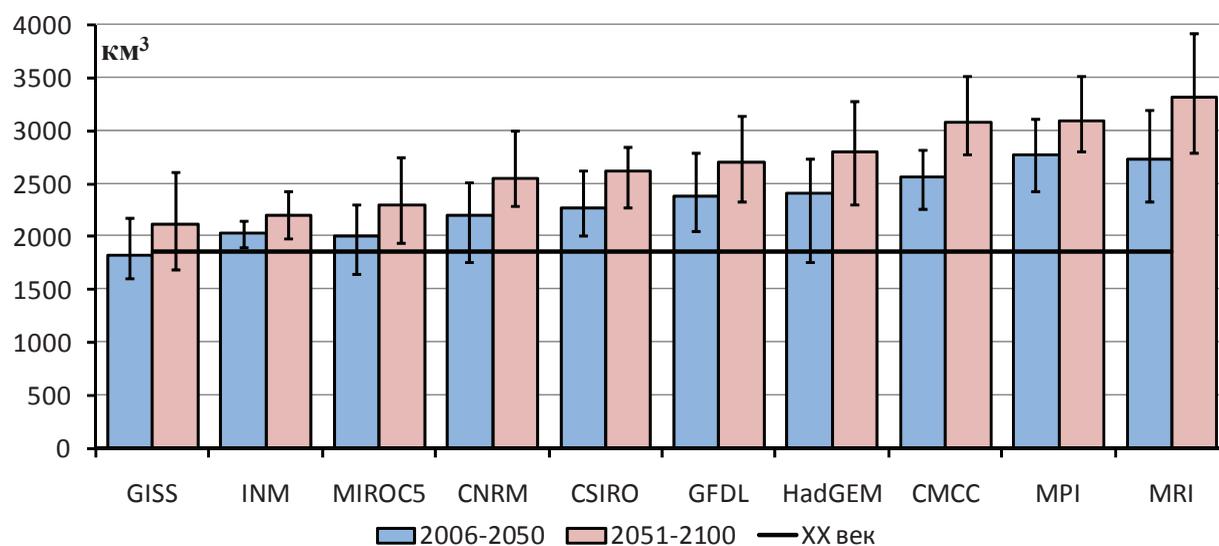


Рис. 8. Гистограммы суммарного объема годового стока сибирских рек в Северный Ледовитый океан, рассчитанного по данным десяти моделей и осредненного за периоды 2006–2050 и 2051–2100 гг. Горизонтальная линия представляет осредненные данные измерений в 20 в. Вертикальными линиями обозначена амплитуда межгодовых колебаний в указанные периоды

притоке пресной воды в Карское море и моря Восточной Арктики. В последние десятилетия сток сибирских рек увеличился, что явилось откликом на увеличение осадков при изменении климата Сибири. Расход пресной воды из Северного Ледовитого океана происходит через пролив Фрама и проливы Канадского Архипелага. Эта вода, будучи вынесена в виде льда или потока воды пониженной солености за пределы Северного Ледовитого океана в северные моря Атлантики, является существенным регулятором формирования термохалинной структуры и меридиональной циркуляции не только Северной Атлантики, но и всего Мирового океана.

В направлении изучения тенденций климатических характеристик в Арктическом регионе, возникающих вследствие глобального потепления, исследованы характеристики нижней атмосферы, полученные в результате реанализа CORE-2. С помощью ЕОФ разложения удалось выявить шесть основных циркуляционных мод в нижней атмосфере Арктики (рис. 9). При этом наиболее значимой модой после исключения сезонных колебаний оказалась мода Арктической осцилляции. Выявлены основные тенденции временного хода амплитуд осцилляций. Проведены численные эксперименты по выявлению роли каждой из мод в формировании термодинамических структур Северного Ледовитого океана.

Решалась задача реконструкции загрязнения местности мгновенными источниками на основе постановок обратных задач переноса полидисперсных примесей в атмосфере. В частности, разработана модель реконструкции осевой части следа, образованного выбросом грубодисперсной примеси от мгновенного точечного источника, и предложен алгоритм оценивания параметров модели по данным наблюдений. Исследована возможность оценивания характеристик дисперсного состава примесей с использованием информации о текущих метеорологических условиях, характеристиках источника. Апробация модели проведена на данных радиационного мониторинга загрязнения местности в окрестностях Сибирского химического комбината и АЭС "Фукусима-1". Проанализирована информативность различных схем размещения точек измерений.

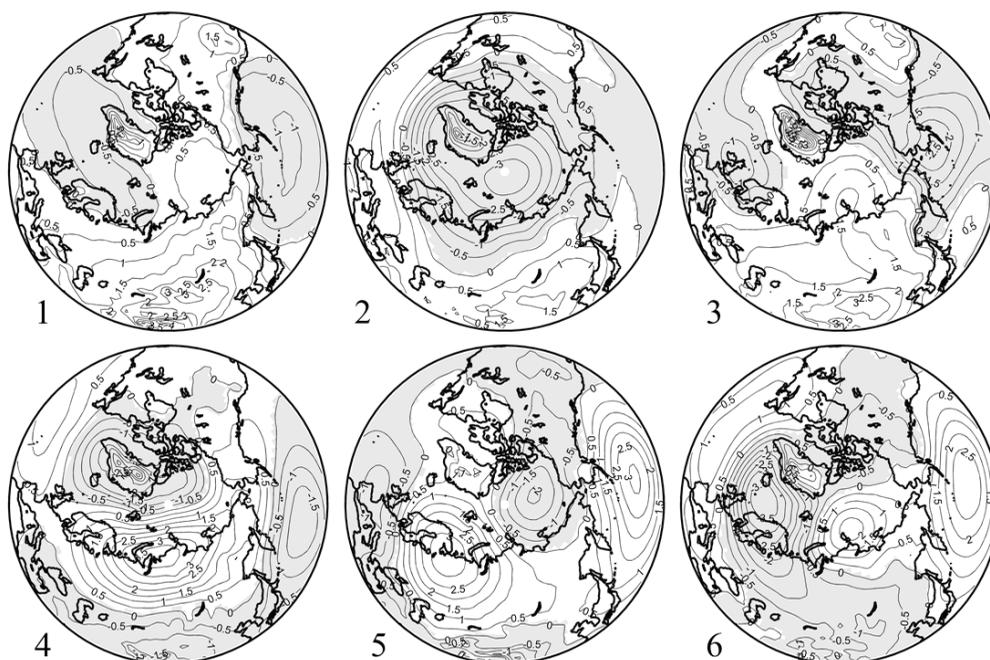


Рис. 9. Аномалии поля давления на поверхности. Шесть первых мод ЕОФ разложения приповерхностных характеристик атмосферы в период с 1948 по 2009 гг.

В качестве другого приложения развитого подхода на рис. 10,*а* приведен результат численной реконструкции поля загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  по данным аэрогамма-спектральной съемки 1993 г. в северном направлении от Сибирского химического комбината. Протяженность следа составила более 50 км. С использованием полученных оценок параметров, связанных с дисперсным составом выброшенной в атмосферу примеси, и закона радиоактивного распада для  $^{137}\text{Cs}$  проведено прогнозное восстановление современного состояния следа (рис. 10,*б*).

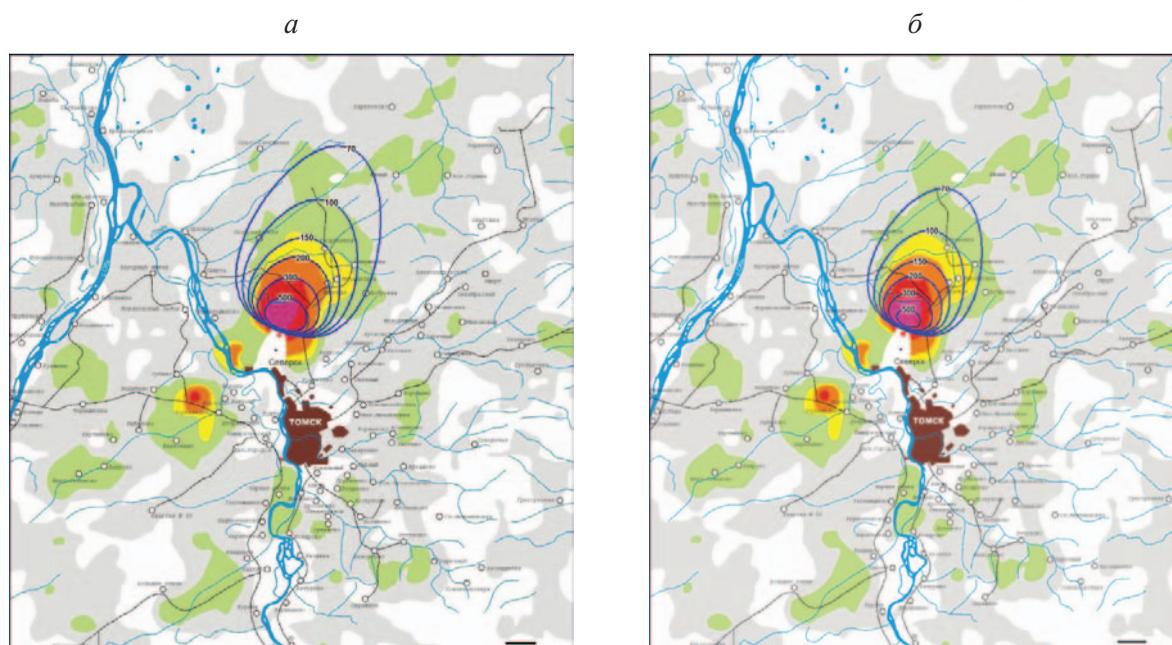


Рис. 10. Восстановленное поле загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  (мКюри/км<sup>2</sup>) на 1993 г. (*а*). Прогнозное поле плотности загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  (мКюри/км<sup>2</sup>) к северу от Сибирского химического комбината к настоящему времени (*б*)

С использованием информации о параметрах источника и текущих метеорологических условиях разработаны методы косвенной оценки характеристик дисперсного состава выпавших примесей по данным измерений концентраций на маршрутах отбора проб.

На примере анализа концентраций бенз(а)пирена, формальдегида, ацетона и ацетальдегида, полученных в результате отбора и анализа проб на автомагистралях Красноярска, показаны особенности загрязнения воздуха и предложены решения для оценки соотношения вкладов различных источников в загрязнение атмосферы города.

На основе принципа суперпозиции проведена разработка моделей численного восстановления полей концентраций слабо оседающих примесей в окрестностях площадных источников. Рассмотрены различные варианты режимов пыления поверхности.

На данных экспериментальных исследований снежного покрова проведено численное восстановление полей выпадений взвешенных веществ в окрестностях Новосибирского электродного завода и Искитимского цементного завода. На их основе выполнен сравнительный анализ наземных и спутниковых наблюдений полей загрязнения. Установлены функциональные связи между полями выпадений взвешенных веществ и тонами серого цвета на оцифрованных спутниковых снимках.

**Проект НИР № 0315-2015-0017** "Современные вычислительные технологии решения больших задач естествознания, геофизики, физики атмосферы и океана и охраны окружающей среды, в том числе в интересах освоения Арктики и Сибири".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2015-0017.

Руководители: акад. РАН Коновалов А. Н., чл.-корр. РАН Михайлов Г. А., д.м.-м.н. Пененко В. В.

На основе предшествующей последовательной версии модели океана создана версия, использующая параллельные вычисления. Алгоритм параллелизации основан на методе декомпозиции области решения, использовании явных численных схем с обменом данными в районе сшивки подобластей, предусматривающей варианты региональной модели и модели Мирового океана с периодичными условиями по долготе и специальными условиями в трехполярной системе координат в районе Арктики. С помощью новой версии проведены тестовые расчеты, моделирующие глобальный совместный климат Земли (см. рис. 1), и региональные расчеты с повышенным разрешением для исследования распространения распресненных вод тающих ледников Гренландии (см. рис. 2).

Разработана специальная схема оптимизации расчетов и обмена данными между компонентами модели климатической системы Земли: модулями атмосферы, океана, льда и суши. Предметом оптимизации являлось время ожидания каждого из модулей проведения необходимых расчетов, осуществляемых специальным модулем взаимодействия. В результате оптимизации большая часть необходимых вычислений осуществляется перед получением от компонент модели соответствующего запроса и немедленно после отправки текущего результата. Кроме того, шаги по времени каждой из компонент организованы таким образом, чтобы избежать одновременного запроса данных со стороны двух и более модулей. На основе тестов было получено ускорение счета по сравнению с предыдущими вариантами в 2–3 раза.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 17-05-00382-а** "Анализ прошлых и прогноз возможных изменений циркуляции Арктических морей России в условиях глобального потепления".

Руководитель – д.ф.-м.н. Платов Г.А.

Проведен анализ климатических изменений последнего столетия, исходя из данных многолетних наблюдений и исследований, применительно к арктическому региону. Наиболее важными климатическими тенденциями, проявляющимися в Арктике, являются:

- изменчивость атмосферной циркуляции и связанные с ней осцилляции (Арктическая, Северо-Атлантическая, Тихоокеанская декадная);
- сокращение площади и объема льда и связанные с этим изменения альbedo, таяние Гренландского и других ледниковых щитов;
- атлантические вторжения, волны потепления, усиление влияния тихоокеанских вод;
- изменчивость речного стока и баланса пресной воды;
- интенсификация обменов между шельфовой зоной и открытым океаном

В ходе работы над проектом проведена серия численных экспериментов с совместной моделью общей циркуляции Северного Ледовитого океана и Северной Атлантики и арктического льда. Выбраны оптимальные наборы параметров модели для различных пространственных разрешений, позволяющие достигать наибольшего соответствия результатов моделирования с имеющимися наблюдениями. Проанализирована изменчивость циркуляции для арктических морей России.

Построен ряд сеточных областей с учетом специфических особенностей для более подробного описания окраинных морей, а именно: Баренцева, Карского, Берингова, Охотского и моря Лаптевых. Подготовлен набор данных и проведены соответствующие настройки модели шельфовой циркуляции.

Для проведения тестовых и сценарных расчетов на 21 век подготовлена совместная климатическая модель PlaSim-ICMGG-1.0, описанная выше.

**Проект РФФИ № 17-05-00396-а "Отклик газогидратов донных отложений океана на естественные и антропогенные изменения климата".**

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

На основе региональной модели Северный Ледовитый океан (СЛО) – Северная Атлантика (СА), разработанной в ИВМиМГ СО РАН, проведены расчеты по моделированию состояния водных масс СЛО на период 1948–2015 гг. и далее до 2100 г. и влиянию их изменений на динамику зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ). Результаты численного моделирования современного состояния вод СЛО показывают повышение придонной температуры Арктических шельфовых морей. Влияние атлантических вод прослеживается в Баренцевом и Карском морях и вдоль материкового склона моря Лаптевых. В ходе численного эксперимента были выявлены несколько теплых импульсов, поступающих в Северный Ледовитый океан через пролив Фрама и Баренцево море. Последствием аномально теплого притока атлантических вод явилось повышение температуры придонного слоя вод вдоль побережья Скандинавского полуострова и в Баренцевом море на  $0.5\text{--}1.5^\circ$  в период с середины 1980-х гг. до настоящего времени. Для исследования влияния будущих изменений климата на термохалинную структуру СЛО, его ледовый покров, состояние зоны стабильности газовых гидратов были поведены сценарные расчеты на основе региональной модели СЛО-СА с учетом атмосферного воздействия по результатам расчетов с моделями ансамбля CMIP5 (сценарий антропогенного воздействия RCP 8.5).

На основе анализа термобарических условий дна и донных отложений проведен расчет мощности ЗСГГ метана в СЛО. Выполнена оценка зоны стабильности метангидратов и ее чувствительности к климатическим изменениям за прошедшие несколько десятилетий и далее до конца 21 в. для всей области СЛО, включая как глубоководные области, так и

мелководные шельфы (шельфы Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского морей и моря Лаптевых). По результатам проведенных расчетов метаногидраты, присутствующие на морских глубинах 250–500 м, наиболее подвержены тепловому воздействию. Потепление в слое атлантических водных масс будет оказывать основное влияние на состояние арктических газовых гидратов. По нашим оценкам, повышение температуры придонной воды в этих областях привело к сокращению ЗСГГ на 20–40 м в период 1990–2015 гг. и может привести к дальнейшей диссоциации газовых гидратов в верхнем 100-метровом слое донных отложений до конца 21 века. Опускание верхней границы ЗСГГ метана и возможная деградация газовых гидратов сверху может приводить к накоплению свободного метана в слоях донных отложений.

По результатам численных расчетов газогидраты мелководных шельфов, существующие в условиях субаквальных многолетнемерзлых толщ, реагируют на изменение температуры придонной воды медленнее.

**Проект РФФИ № 17-47-540342-р\_а** "Модели и геоинформационные технологии анализа данных наземного и спутникового мониторинга процессов атмосферного загрязнения территорий Новосибирской области".

Руководитель – д.ф.-м.н. Рапута В. Ф.

Разработаны модели оценивания полей разового и длительного загрязнения в окрестностях линейного источника. Предложены алгоритмы оптимизации размещения сети наземного мониторинга. Выполнен численный анализ полей многокомпонентного загрязнения в зоне влияния выбросов крупной автомагистрали г. Новосибирска. На основе анализа спутниковой информации и данных наземных наблюдений проведено оценивание и картографирование зимнего загрязнения территорий Новосибирска и Искитима взвешенными веществами, сажей, бенз(а)пиреном. Создана геоинформационная система для численного анализа данных мониторинга газового и аэрозольного загрязнения от точечного источника.

**Проект РФФИ № 16-05-00558-а** "Исследование взаимодействия динамики атмосферы Арктического региона и средних широт при изменении климата на основе диагноза и численного моделирования".

Руководитель – д.ф.-м.н. Крупчатников В. Н.

В 2017 г. завершена разработка первой версии Модели Земной Системы PlaSim-ICMMG-1.0 как модульной структуры, позволяющей создавать спектр моделей земной системы промежуточной сложности выбирая различные варианты компонентов климатической системы и углеродного цикла. Модель PlaSim-INMMG-1.0 способна моделировать ключевые многомасштабные пространственно-временные процессы климатической системы. Структура предназначена для модульной работы, что облегчает включение более сложных составных модулей по мере увеличения вычислительной мощности:

1. Динамика атмосферы в модели PlaSim решается с использованием метода спектрального преобразования, сформулированного для температуры, удельной влажности, логарифма поверхностного давления, дивергенции и вихря (подробное описание см. в Lunkeit et al. (2007)). Модель PlaSim содержит модули океана и морского льда, качество которых не соответствует сложности решаемых задач и требует их замены модулями, которые являются физически более строгими.

2. В качестве основы для описания океанического блока климатической системы взята модель Арктики и Северной Атлантики ИВМиМГ СО РАН. Интегрирование океа-

нического модуля осуществляется в сочетании с моделью термодинамики эластичного вязкопластического льда SICSE 3.1

3. Модель климатической системы представляет собой набор параллельно работающих и взаимодействующих модулей, отвечающих за моделирование различных компонентов климатической системы. Пакет программного обеспечения включает отдельный модуль под названием *coupler*, который обеспечивает синхронизацию и взаимодействие компонентов

Одной из особенностей динамики атмосферы Арктики являются мезомасштабные полярные циклоны (ПЦ). Исследование направлено на изучение динамики атмосферных условий, благоприятных для формирования ПЦ. Недавнее быстрое потепление в Арктике вызывает изменение атмосферных условий и, следовательно, может также существенно влиять на интенсивность и частоту формирования мезомасштабных циклонов. Существует несколько предпосылок мезомасштабного циклогенеза. В работе Rasmussen and Turner, опубликованной в 2003 г., внимание сфокусировано на вариации вследствие глобальных климатических изменений атмосферных условий, благоприятных для формирования ПЦ. Цель исследования – оценить возможный отклик благоприятных для формирования ПЦ атмосферных условий на экстремально сильные глобальные климатические изменения.

**Проект РФФИ № 16-35-00439 мол-а "Оценка влияния атлантических вод на состояние ледового покрова Северного Ледовитого океана".**

Руководитель – Якшина Д. Ф.

Сокращение летней площади ледового покрова Северного Ледовитого океана (СЛО) является следствием происходящих климатических изменений. Определяющим фактором в этом процессе считают состояние атмосферы, а влияние океана отводят на второй план. Однако в последние два десятилетия был неоднократно зафиксирован поток аномально теплых атлантических вод (АВ), поступающих в регион, что заставляет обратить особое внимание на состояние водных масс и циркуляцию вод СЛО, так как они являются дополнительными компонентами теплообмена в климатической системе.

В ходе выполнения проекта проведено изучение зависимости состояния ледового покрова СЛО от потоков тепла, поступающих в Арктику с атлантическими водами через пролив Фрама и Баренцево море. Исследования проводились с применением усовершенствованной численной модели океан – лед, разработанной в ИВМиМГ СО РАН, и с использованием данных реанализа атмосферы.

При анализе результатов экспериментов рассчитаны потоки тепла, подходящие от океана к нижней границе ледового покрова (потоки океан – лед), а также тепловые потоки через сечения в проливе Фрама и Баренцевом море. В ходе проведения расчетов установлено, что корреляционная зависимость между потоками тепла океан – лед и объемом льда наиболее высока в регионах, прилегающих к проливу Фрама, что может говорить о влиянии тепла атлантических вод на состояние ледового покрова в этом регионе. Проанализировав тепловые потоки через сечения в проливе Фрама и Баренцевом море и их связь с потоками тепла океан – лед, мы установили, что увеличение интенсивности поступления АВ в Арктику не всегда является единственной причиной увеличения потока тепла океан – лед в некоторых регионах Евразийского бассейна. В качестве других возможных причин, оказывающих влияние на состояние ледового покрова, указано остающееся существенным температурное влияние атмосферы, а также предполагаемое усиление передачи тепла от АВ к поверхности под воздействием механизмов турбулентного или конвективного перемешивания.

## Публикации

### Монографии

Национальный атлас Арктики. Раздел 7: Океан. Моря. М.: Роскартография, 2017. 496 с. Гл. ред. Н. С. Касимов. ISBN: 978-5-9523-0386-7.

### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Malakhova V. V., Eliseev A. V. The role of heat transfer time scale in the evolution of the subsea permafrost and associated methane hydrates stability zone during glacial cycles // *Global and Planet. Change*. 2017. Vol. 157. P. 18–25. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2017.08.007.

2. Mikhailuta S. V., Lezhenin A. A., Pitt A., Taseiko O. V. Urban wind fields: Phenomena in transformation // *Urban Climate*. 2017. Vol. 19. P. 122–140. DOI: 10.1016/j.uclim.2016.12.005.

3. Iakshina D. F., Golubeva E. N. Influence of the vertical mixing parameterization on the modeling results of the Arctic Ocean hydrology // *Proc. of the 23rd Intern. symp. atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics*. 2017. SPIE 0277-786X. V. 10466. 10466-81. DOI: 10.1117/12.2285723.

4. Kuzin V. I., Lapteva N. A. The research into the hydrology of Siberia based on the of information-computing system // *Proc. SPIE 10466*. 1046667, Nov. 30, 2017. DOI: 10.1117/12.2287605.

5. Malakhova V. V., Golubeva E. N., Iakshina D. F. Sensitivity of the Arctic Ocean gas hydrate to climate changes in the period of 1948-2015 // *Proc. of the 23rd Intern. symp. atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics*. 2017. SPIE V. 10466, 1046656. DOI: 10.1117/12.2285524.

6. Platov G., Krupchatnikov V, Martynova Yu., Borovko I., Golubeva E. The new earth system model of intermediate complexity PlaSim-ICMMG-1.0. Description and performance // *IOPS, IOP Conf. Series: Earth and environmental science* 96. 2017. 012005. doi :10.1088/1755-1315/96/1/012005.

7. Simonenkov D. V., Raputa V. F., Yaroslavtseva T. V., Belan B. D., Antochina O. J. Maintaining data of route observations of emission plumes from Norilsk mining and metallurgical plant // *Proc. of the 23rd Intern. symp. atmospheric and ocean optics: Atmospheric physics*. 2017. SPIE V. 10466–218. DOI: 10.1117/12.2288128.

### Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Михайлюта С. В., Кучеренко А. В., Леженин А. А. Проблемы оценки структуры выбросов в системе промышленные предприятия – автотранспорт // *Экология и промышленность России*. 2017. Т. 21. № 4. С. 54–58. DOI: 0.18412/1816-0395-2017-4-54-58.

### Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Голубева Е. Н., Малахова В. В., Платов Г. А., Крайнева М. В., Якшина Д. Ф. Динамика и тенденции изменения состояния вод и криолитозоны моря Лаптевых в XX–XXI в. // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. № 6. С. 529–535.

2. Зуев В. В., Крупчатников В. Н., Боровко И. В. Влияние сильных извержений тропических вулканов на климат внетропических широт // *Там же*. № 5. С. 404–408.

3. Рапута В. Ф., Попова С. А., Макаров В. И., Ярославцева Т. В. Определение связей органического и элементного углерода по секторам выноса атмосферных примесей // *Там же*. № 10. С. 878–882.

4. Якшина Д. Ф., Голубева Е. Н. Исследование механизмов формирования подповерхностного максимума температуры в Канадском бассейне Северного Ледовитого океана // *Там же*. Т. 30. № 11. С. 980–985.

5. Антипова Е. А., Крылова А. И., Перевозкин Д. В. Численное моделирование неустановившегося движения речного потока дельты р. Лены // Сб. материалов "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017", Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. Новосибирск: СГГА, 2017. Т. 4. № 1. С. 131–135.
6. Платов Г. А. Формирование аномалии распресненных вод в районе круговорота Бофорта в Северном Ледовитом океане по результатам численного моделирования // Там же. С. 74–77.
7. Платов Г.А. Оценка чувствительности модели циркуляции океана и льда северной Атлантики и Северного Ледовитого океана к вариациям солнечной радиации // Там же. С. 78–81.
8. Боровко И. В., Зуев В. В., Крупчатников В. Н. Исследование неравновесной реакции климата на извержения тропических вулканов // Там же. С. 126–130.
9. Голубева Е. Н. Моделирование гидрологического режима Восточно-Сибирского моря // Там же. С. 121–125.
10. Кабанихин С. И., Голубева Е. Н., Крупчатников В. Н., Леженин А. А., Пененко А. В., Пененко В. В., Платов Г. А. Цифровая интеллектуальная Сибирь и Арктика // Там же. С. 37–48.
11. Коковкин В. В., Рапуга В. Ф. Мониторинг многокомпонентного загрязнения окрестностей Новосибирского электродного завода // Там же. С. 116–120.
12. Крайнева М. В., Голубева Е. Н., Леженин А. А., Климов О. В. Исследование гидро-термического режима водоема-охладителя Беловской ГРЭС с помощью численной модели // Там же. С. 106–110.
13. Кузин В. И., Лаптева Н. А. Разработка информационно-вычислительной системы для исследования гидрологии Сибири // Там же. С. 52–57.
14. Кузин В. И., Никифоровская В. С., Воеводин А. Ф., Лаптева Н. А. Численное моделирование водного и термического режима в речных системах // Там же. С. 47–51.
15. Кузин В. И. PV-вектор диагностических расчетов течений в океане // Там же. С. 58–63.
16. Малахова В. В. Влияние покровного оледенения на состояние зоны стабильности газовых гидратов // Там же. С. 64–69.
17. Михайлюта С. В. Леженин А. А., Тасейко О. В. Исследование распространения промышленных выбросов г. Красноярска // Там же. С. 100–105.
18. Якшина Д. Ф., Голубева Е. Н. Изучение влияния ветровой циркуляции над норвежским и гренландским морями на морской лед в Арктике // Там же. С. 151–155.
19. Ярославцева Т.В., Попова С.А., Рапуга В.Ф., Макаров В.И. Оценка влияния региональных источников на содержание органического и элементного углерода в атмосферном воздухе п. Ключи Новосибирской области // Там же. С. 160–165.
20. Рапуга В.Ф., Ярославцева Т.В. Наземный и спутниковый мониторинг загрязнения снежного покрова города в оценке состояния здоровья населения // Там же. С. 32–36.
21. Рапуга В.Ф., Симоненков Д.В., Ярославцева Т.В., Белан Б.Д. Численный анализ процессов дальнего переноса и трансформации примесей в шлейфе выбросов промышленного района // Там же. С. 88–93.
22. Попова С.А., Рапуга В.Ф., Ярославцева Т.В., Макаров В.И. Оценка источников поступления органического и элементного углерода в составе аэрозолей в центральную часть г. Новосибирска в зимний и весенний периоды // Там же. С. 202–207.
23. Ярославцева Т.В., Рапуга В.Ф. Восстановление полей длительного загрязнения атмосферного воздуха промышленного города по спутниковым наблюдениям состояния снежного покрова // Там же. Т. 4. № 2. С. 13–17.

24. Леженин А. А., Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В. Анализ распространения выбросов в атмосферу от цементного завода в долине реки Бердь // *Материалы Международной конференции "Экологически безопасные технологии природообустройства и водопользования: теория и практика"*, Новосибирск, 19–20 июня 2017 г. Новосибирск: НГАСУ, 2017.

25. Малахова В. В., Елисеев А. В. Динамика субаквальной криолитозоны и зоны стабильности метангидратов арктического шельфа: результаты численного моделирования // *Материалы 22-й Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии*. Т. 2. М.: ИО РАН, 2017. С. 60–64.

26. Мартынова Ю. В., Харюткина Е. В., Крупчатников В. Н. Влияние аномалий осеннего снежного покрова на атмосферную динамику последующей зимой в Сибири // *Международная конференция и школа молодых ученых по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2017"*, Таруса; Звенигород, 28 авг. – 7 сент. 2017 г. С. 131–134.

27. Крылова А. И., Антипова Е. А. Численное моделирование неустановившегося движения воды в дельте р. Лены // *Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПМ'17" в рамках "Марчуковских научных чтений"*, Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 470–476.

28. Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В. Модели реконструкции полей выпадений радионуклидов от ядерных взрывов и аварий // *Там же*. С. 723–727.

29. Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В. Анализ радиоактивного загрязнения и онкозаболеваемости населения поселков Томской области в зоне влияния выбросов Сибирского химического комбината // *Там же*. С. 718–722.

30. Ярославцева Т. В., Рапута В. Ф. Закономерности региональных выпадений аэрозольных примесей по наземным и спутниковым наблюдениям // *Там же*. С. 1046–1050.

31. Iakshina D. F., Golubeva E. N. Studying the influence of the wind circulation above the Norwegian and the Greenland seas on the Arctic sea ice // *Bull. NCC. Ser.: Numerical Model. in Atmosp., Ocean and Environ. Studies*. 2017. Vol. 16. P. 1–11.

32. Krylova A., Antipova E., Perevozkin D. The derivation of the Saint-Venant equations // *Ibid.* P. 21–35.

33. Krylova A., Antipova E., Perevozkin D. The solution of the one-dimensional unsteady flow problem in the Lena river delta // *Ibid.* P. 37–47.

34. Raputa V.F., Yaroslavtseva T.V. Numerical analysis of experimental studies of atmosphere deposition of contaminants in the vicinity of the Novosibirsk city // *Ibid.* P. 57–65.

35. Yaroslavtseva T.V., Raputa V.F. Numerical interpretation of land and satellite monitoring data of the snow cover pollution in the Omsk CHP-5 neighborhood // *Ibid.* P. 67–76.

45. Кузин В. И., Лаптева Н. А. Исследование гидрологии Сибири на основе информационно-вычислительной системы // *Материалы 23-го Междунар. симп. "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы"*, Иркутск, 3–7 июля 2017 г. С. D17–D20.

## **В печати**

1. Golubeva Elena, Gennady Platov, Valentina Malakhova, Marina Kraineva, Dina Iakshina Modeling the long-term and interannual variability in the laptev sea hydrography and subsea permafrost state // *Polarforschung*. 2017.

## **Участие в конференциях и совещаниях**

1. Международный научный конгресс "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017", Новосибирск, 19–21 апреля 2017 г. – 22 доклада (1 пленарный) (Платов Г. А. (пленарный), Леженин А. А.,

Крайнева М. В., Якшина Д. Ф., Малахова В. В., Голубева Е. Н., Кравченко В. В., Боровко И. В., Зуев В. В., Крупчатников В. Н., Рапута В. Ф., Кузин В. И., Лаптева Н. А., Крылова А. И., Антипова Е. А.).

2. Международная конференция по вычислительной и прикладной математике (ВПМ'17), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 11 докладов (Крайнева М. В., Малахова В. В., Голубева Е. Н., Платов Г. А., Крупчатников В. Н., Мартынова Ю. В., Боровко И. В., Леженин А. А., Рапута В. Ф., Кузин В. И., Лаптева Н. А., Крылова А. И., Антипова Е. А.).

3. 3-я Всероссийская научная конференция с международным участием "Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии", Барнаул, 28 августа – 1 сентября 2017 г. – 6 докладов (Леженин А. А., Голубева Е. Н., Крайнева М. В., Рапута В. Ф., Лаптева Н. А., Кузин В. И.).

4. 23-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Иркутск, 3–7 июля 2017 г. – 5 докладов (Якшина Д. Ф., Голубева Е. Н., Малахова В. В., Боровко И. В., Зуев В. В., Крупчатников В. Н., Рапута В. Ф., Лаптева Н. А., Кузин В. И.).

5. 12-е Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу, Томск, 17–20 октября 2017 г. – 6 докладов (Малахова В. В., Рапута В. Ф.).

6. 4th International Conference on Earth System Modelling "4ICESM–2017", Hamburg (Germany), Aug. 28 – Sept. 1, 2017 – 1 доклад (Малахова В. В.).

7. 22-я Международная научная конференция (школа) по морской геологии "Геология морей и океанов", Москва, 20–24 ноября 2017 г. – 1 доклад (Малахова В. В.).

8. "Природные процессы в полярных регионах Земли в эпоху глобального потепления", Сочи 9–11 октября 2017 г. – 2 доклада (Малахова В. В., Голубева Е. Н., Платов Г. А., Крайнева М. В.).

9. "Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития", Санкт-Петербург, 19–20 декабря 2017 г. – 1 доклад (Голубева Е. Н., Малахова В. В., Платов Г. А., Крайнева М. В.).

10. Международная конференция под эгидой ЮНЕСКО "Экологически безопасные технологии природообустройства и водопользования: теория и практика", посвященная 25-летию программы ЮНИТВИН/ЮНЕСКО, Новосибирск, 19–20 июня 2017 г. – 4 доклада (Леженин А. А., Рапута В. Ф., Кузин В. И., Лаптева Н. А., Платов Г. А.).

11. 24-я Рабочая группа "Аэрозоли Сибири", Томск, 28 ноября – 1 декабря 2017 г. – 7 докладов (Леженин А. А., Рапута В. Ф., Кузин В. И., Лаптева Н. А., Крылова А. И., Антипова Е. А.).

12. Международная конференция "Аналитика России", Москва, 12–15 октября 2017 г. – 1 доклад (Рапута В. Ф.).

13. 15-я Всероссийская конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, 13–16 ноября 2017 г. – 2 доклада (Рапута В. Ф.).

14. Конференция-семинар "Актуальные проблемы геофизической гидродинамики", посвященная 80-летию профессора Ф. В. Должанского, Москва, 23 ноября 2017 г. – 1 доклад (Платов Г. А., Крупчатников В. Н., Голубева Е. Н., Мартынова Ю. В., Боровко И. В.).

15. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2017", Таруса; Звенигород, 28 августа – 7 сентября 2017 г. – 1 пленарный доклад (Крупчатников В. Н.).

16. Международная конференция "Математика в современном мире", посвященная 60-летию Института математика им. С. Л. Соболева, Новосибирск, 14–19 августа 2017 г. – 1 доклад (Крылова А. И., Антипова Е. А.).

17. Научно-образовательный семинар "Суперкомпьютерное моделирование климатической системы", Москва, 22 ноября 2017 г. – 1 доклад (Крупчатников В. Н., Платов Г. А., Боровко И. В.).

### Участие в оргкомитетах конференций

1. Крайнева М. В. член организационного комитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.;

2. Кузин В. И.:

– член программного комитета 13-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017", Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.; секретарь секции Международной научной конференции "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология";

– член программного комитета Международной конференции по вычислительной и прикладной математике (ВПМ'17), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.;

– Леженин А. А. – член рабочего оргкомитета 13-го Международного научного конгресса "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017", Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.; секретарь секции Международной научной конференции "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология";

4. Крупчатников В. Н.:

– член рабочего оргкомитета 9-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", посвященной 85-летию со дня рождения академика М. М. Лаврентьева, Новосибирск, 26 июня – 2 июля 2017 г.;

– член программного комитета Международной конференции по вычислительной и прикладной математике (ВПМ'17), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

### Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Wos of Science – 7

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 1

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 53

Докладов на конференциях – 73, в том числе 2 пленарных.

Участников оргкомитетов конференций – 4

### Кадровый состав

1. Кузин В. И.	зав. лаб.	д.ф.-м.н.
2. Платов Г. А.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
3. Рапуга В. Ф.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
4. Голубева Е. Н.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
6. Фоменко А. А.	с.н.с. 0.1 ст.	д.ф.-м.н.
7. Леженин А. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
8. Крылова А. И.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
9. Малахова В. В.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
10. Боровко И. В.	н.с.	к.ф.-м.н.
11. Кравченко В. В.	м.н.с.	0.6 ст.
12. Якшина Д. Ф.	м.н.с.	

13. Крайнева М. В. м.н.с. 0.2 ст.
  14. Лаптева Н. А. м.н.с. 0.5 ст.
  15. Лобанов А. Н. м.н.с. 0.1 ст.
  16. Яковенко Г. Т. программист 0.55 ст.
  17. Антипова Е. А. инженер-0.25 ст
- Якшина Д. Ф., Крайнева М. В., Антипова Е. А. — молодые сотрудники.

### **Педагогическая деятельность**

- Кузин В. И. – профессор ММФ НГУ, профессор СГУГиТ  
Голубева Е. Н. – доцент ММФ НГУ  
Крылова А. И. – ст. преподаватель ММФ НГУ  
Платов Г. А. – доцент ММФ НГУ  
Леженин А. А. – доцент СИУ  
Боровко И. В. – доцент СГУПС

### **Руководство студентами**

1. Амикишева Р. А. – 4-й курс ФИТ НГУ, руководитель Рапуга В. Ф.
2. Юртина Ю. Ю. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Рапуга В. Ф.
3. Тарханова М. А. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Голубева Е. Н.
4. Чубарцева О. С. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Голубева Е. Н.
5. Сон А. С. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Голубева Е. Н.
6. Коробов О. – 2-й курс аспирантуры ММФ НГУ, руководитель Платов Г. А.
7. Тарачакова А. Р. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Платов Г. А.
8. Антипова Е. А. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Крылова А. И.
9. Чмеленко О. С. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Крылова А. И.

## Лаборатория математического моделирования гидротермодинамических процессов в природной среде

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

### Важнейшие достижения

#### **Многофункциональный комплекс моделей, методов и алгоритмов для решения прямых и обратных задач охраны окружающей среды в городских агломерациях.**

На примерах сибирских городов (Новосибирск, Красноярск, Чита) изучаются мезоклиматы и качество атмосферы городов и прилегающих регионов с учетом их специфических особенностей. Разработаны алгоритмы расчета полей концентраций многокомпонентных примесей и идентификации источников эмиссий. Специальные алгоритмы разработаны также для усвоения данных наблюдений за качеством атмосферы.

Д.ф.-м.н. Пененко В. В., к.ф.-м.н. Пененко А. В., к.ф.-м.н. Пьянова Э. А., к.ф.-м.н. Цветова Е. А.

#### **Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2017 г. в соответствии с планом НИР института**

#### **Проект НИР № I.3.1.2 "Исследование процессов в атмосфере, гидросфере и окружающей среде методами математического моделирования".**

Номер государственной регистрации НИР 01201370227.

Руководители: д.ф.-м.н. Кузин В. И., д.ф.-м.н. Пененко В. В.

#### **Раздел 2. "Развитие моделей и методов для оценок экологической перспективы".**

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

При использовании развиваемого нами вариационного подхода к построению математических моделей геофизической гидротермодинамики (атмосфера, водные объекты) и моделей переноса и трансформации газо-аэрозольных субстанций рассчитываются следующие характеристики исследуемых процессов в предложенной нами технологии моделирования: функции состояния процессов; сопряженные функции, объединяющие в рамках вариационного принципа все объекты системы (модели, данные мониторинга, целевые функционалы); функции управления качеством природной среды по заданным целевым критериям экологической безопасности; операторы и функции чувствительности моделей и целевых функционалов к вариациям параметров моделей и источников воздействий и начальных данных; функции неопределенностей, выражающие диагностические оценки качества системы моделирования и оценку степени ее предсказуемости по имеющимся данным. Это пять основных классов фундаментальных объектов при прогнозировании климато-экологических процессов. Они рассчитываются в режиме прямого/обратного моделирования и согласованы в рамках основного функционала вариационного принципа, порождающего все алгоритмические конструкции. Вопрос в том, как оптимально использовать все эти конструкции при решении конкретных задач природоохранного прогнозирования и проектирования.

Для этой цели нами разработаны специальные методы спектральной ортогональной декомпозиции фазовых пространств мультивариантных и разномасштабных функций, которые адаптируются для конкретных моделей и позволяют выделять главные факторы, центры действия и находить критические параметры, ответственные за поведение системы.

Разработана явно разрешимая алгебраическая модель для напряжений Рейнольдса и вектора турбулентного потока тепла (концентрации). Она использована для численного исследования нейтрального атмосферного турбулентного пограничного слоя Экмана над однородной шероховатой поверхностью для разных значений безразмерного поверхностного числа Россби.

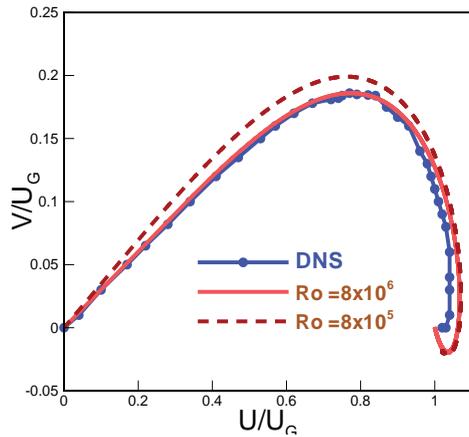


Рис. 1. Годографы спиралей Экмана для трех вариантов расчетов

Вычисленные зависимости полного угла поворота ветра от числа Россби, вертикальные профили средней скорости, турбулентных напряжений, турбулентной кинетической энергии, поверхностной скорости трения, высоты пограничного слоя удовлетворительно согласуются с данными наблюдений и DNS-расчетом. На рис. 1 приведена спираль Экмана для двух значений числа Россби:  $R_0 = 8 \cdot 10^5$  (шероховатость поверхности  $z_0 = 0,1$  м) и  $R_0 = 8 \cdot 10^6$  ( $z_0 = 0,01$  м) через 12 ч. интегрирования от начального момента. На рис. 1 рассчитанный полный угол поворота ветра при  $\alpha = 16,7^\circ$  ( $z_0 = 0,01$  м) показан сплошной линией, при  $\alpha = 18,8^\circ$  ( $z_0 = 0,1$  м) – штриховой. Величина угла поворота ветра уменьшается с увеличением числа Россби, при этом профили скорости ветра прижима-

ются ближе к поверхности Земли.

Характеристики нейтрально стратифицированного пограничного слоя предполагается использовать в качестве входных данных при численном исследовании эволюции структуры устойчиво стратифицированного пограничного слоя атмосферы с изменяющейся температурой поверхности.

Разработаны новые модификации вариационных алгоритмов усвоения данных, основанные на итеративной регуляризации. Проведены численные эксперименты по оценке чувствительности алгоритмов к числу измерений.

Исследовано влияние негидростатических эффектов стратификации и инверсии на важнейшие метеорологические характеристики приземного струйного гравитационного течения (холодного фронта) в атмосфере. Модели основаны на системе уравнений Навье – Стокса в приближении Буссинеска и сформулированы в виде гиперболической системы уравнений.

Сравнение результатов расчетов показывает, что при устойчивой стратификации, в отличие от нейтральной, перед течением возникает скачок давления гораздо раньше, чем поток холодного воздуха доходит до точки наблюдения. Этот эффект усиливается при наличии инверсионного слоя.

Подобное явление наблюдается в природе. После прохождения передней кромкой течения пункта наблюдения в приземном давлении возникают колебания. Период этих колебаний по данным наблюдений оценивается в 10–15 мин. Это близко к расчетным данным.

В развитие работ по созданию методики оценок экологических перспектив и рисков для районов интенсивного освоения природно-ресурсной базы Сибири на ССКЦ СО РАН выполнена серия сценарных расчетов с использованием комплекса мезомасштабных моделей в негидростатическом приближении для территории Забайкалья. На рис. 2 проиллюстрирован численный расчет для зимних условий, описывающий один из вариантов формирования локальных циркуляций и рассеивания загрязняющих примесей в районе г. Читы. В рамках моделируемого численного сценария в дневное и ночное время в Читино-Ингодинской

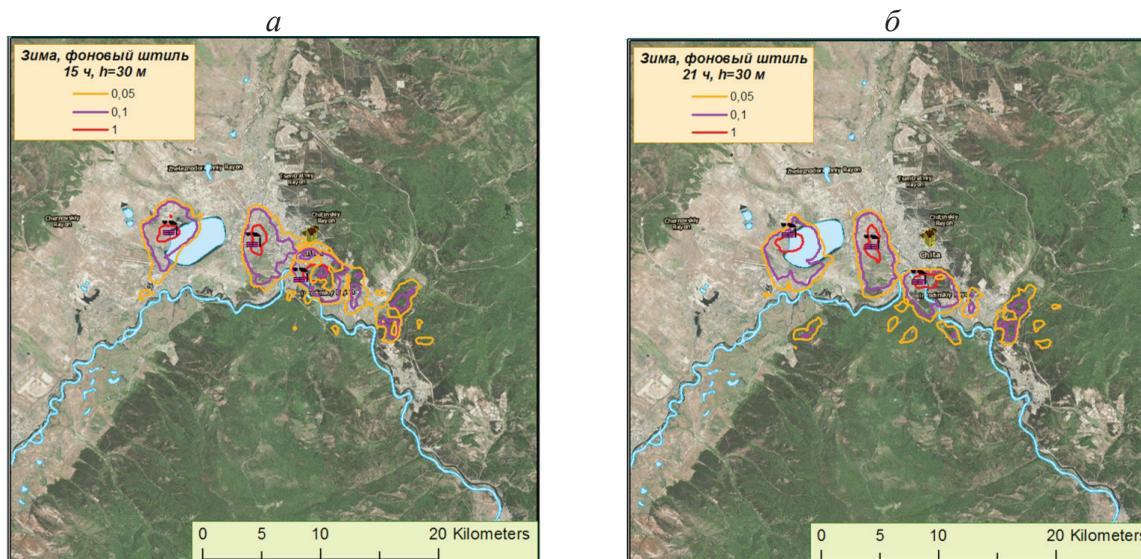


Рис. 2. Изолинии концентраций пассивных примесей (усл. ед.) на высоте 30 м над поверхностью: *а* – 15 ч; *б* – 21 ч местного времени

долине, в которой располагается город Чита, формировались приземные и приподнятые инверсии, затрудняющие вертикальное перемешивание между нижними и верхними слоями атмосферы и способствующие накоплению загрязняющих примесей в долине.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 17-01-00137 "Вариационный подход для решения задач охраны окружающей среды городских агломераций".**

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

Разработана общая структура многофункционального комплекса моделей и методов для решения прямых и обратных задач охраны окружающей среды в городских агломерациях. Сформированы базовые модели гидротермодинамики и переноса примесей с учетом специфики физико-географических и климатических условий исследуемых регионов на примере агломерации Красноярска. Выполнена серия сценарных расчетов на ССКЦ СО РАН по моделированию зимних условий распространения примесей в Красноярске в условиях сформировавшейся инверсии (рис. 3).

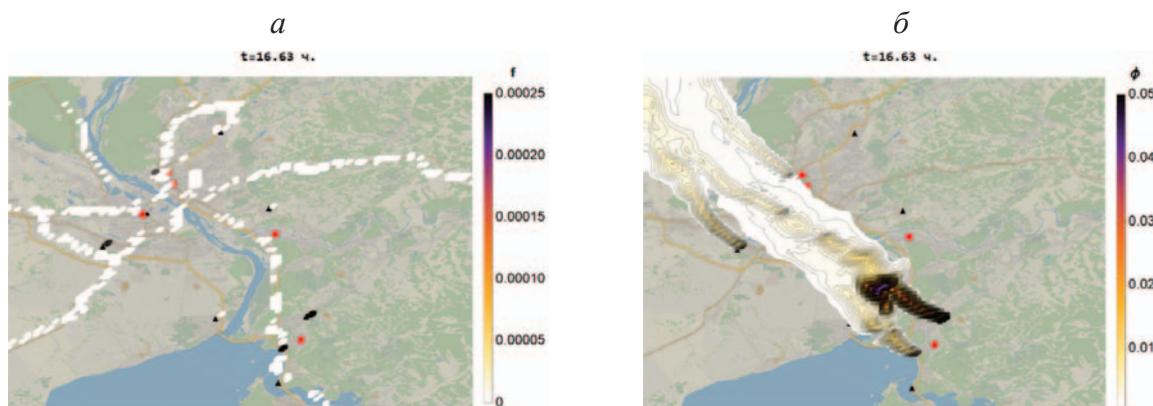


Рис. 3. Восстановленная по реальным данным функция источников  $\text{SO}_2$  (*а*); поле распределения концентраций, полученных моделью WRF-Chem на основе найденной функции источников (*б*)

**Проект РФФИ № 17-41-543309** "Применение методов усвоения данных мониторинга и решения обратных задач для моделирования изменений химического состава атмосферного воздуха в Новосибирской городской агломерации".

Руководитель к.ф.-м.н. Пененко А. В.

Проанализирована эффективность системы прогноза состава атмосферного воздуха в городских условиях на примере города Новосибирска с восполнением недостающей информации об источниках выбросов посредством решения обратной задачи для данных городской сети мониторинга. При решении обратной задачи используется априорная информация о расположении и интенсивности источников. Для моделирования распределения концентраций используется модель WRF-Chem, а для решения обратной задачи – упрощенная модель переноса примесей.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ-17-71-10184** "Методы анализа и интерпретации изображений на основе решения обратных задач и задач усвоения данных с использованием систем основных и сопряженных уравнений моделей наблюдаемых процессов"

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

Из набора решений сопряженных уравнений построены операторы чувствительности для обратных задач идентификации источников с моделями продукции-деструкции и данными типа временных рядов.

### Прочие гранты

**Грант Президента РФ МК-8214.2016.1** "Вариационные методы усвоения данных мониторинга химического состава атмосферы для целей диагностики и прогнозирования".

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

Реализована схема усвоения данных, состоящая в решении обратных задач идентификации источников на каждом шаге по времени для расщепленной по физическим процессам модели переноса и трансформации атмосферной примеси. На стадии переноса используются прямые алгоритмы вариационного усвоения данных, на стадии трансформации – итерационные градиентные алгоритмы. Для стадии трансформации построены согласованные в смысле тождества Лагранжа дискретно-аналитические схемы для прямых и сопряженных задач, позволяющие избежать дополнительных ошибок при вычислении градиента целевого функционала. С целью исследования обратной задачи идентификации источников на стадии трансформации построены согласованные дискретно-аналитические схемы для модели продукции-деструкции. Разработан алгоритм определения областей генерации и стока субстанций по данным профилей концентраций, полученных при самолетном зондировании атмосферы. Алгоритм использован в ходе исследования особенностей озонового цикла в условиях Сибирского региона.

На рис. 4 представлено вещество  $\text{NO}_2$ , которое не выбрасывается источниками, а является продуктом трансформации в озоновом цикле. Его концентрации не усваиваются в сценарии усвоения данных профилей самолетного зондирования.

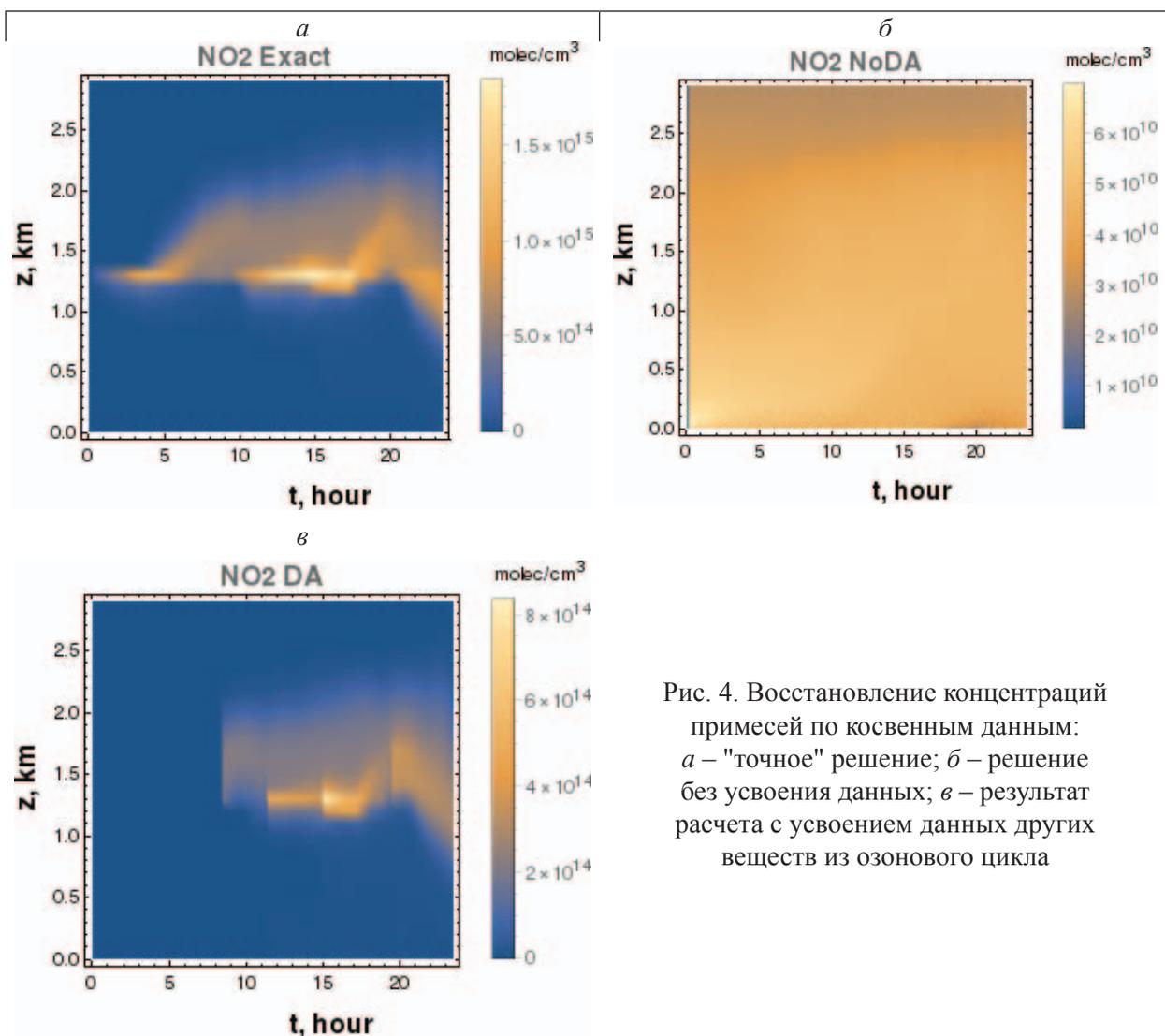


Рис. 4. Восстановление концентраций примесей по косвенным данным: *a* – "точное" решение; *b* – решение без усвоения данных; *c* – результат расчета с усвоением данных других веществ из озонового цикла

**Результаты работ по научно-исследовательским программам, проектам Президиума РАН, ОМН РАН и Сибирского отделения РАН**

**Программа Президиума РАН, проект 0315-2015-0016** "Прогнозирование катастроф для природной среды России: математическое моделирование сейсмоопасных зон, цунамири-ска, загрязнений окружающей среды и изменений климата"

**Подпроект** "Прямые и обратные задачи для изучения изменений качества окружающей сре-ды в Сибирских регионах".

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

Выполнены сценарные расчеты по оценке областей загрязнения атмосферы Байкальского региона от лесных пожаров. Для этой цели разработана специальная версия 4D мезо-региональной модели ИВМиМГ СО РАН, предназначенная для моделирования процессов гидротермодинамики и переноса примесей в областях со сложным рельефом. Для проведе-ния сценарных расчетов совместно с А. В. Гочаковым (ФБГУ СибНИГМИ) разработан алго-ритм настройки моделей для включения информации о начальных условиях, полученных на основе данных наблюдений, которая необходима для моделей мезорегионального масштаба

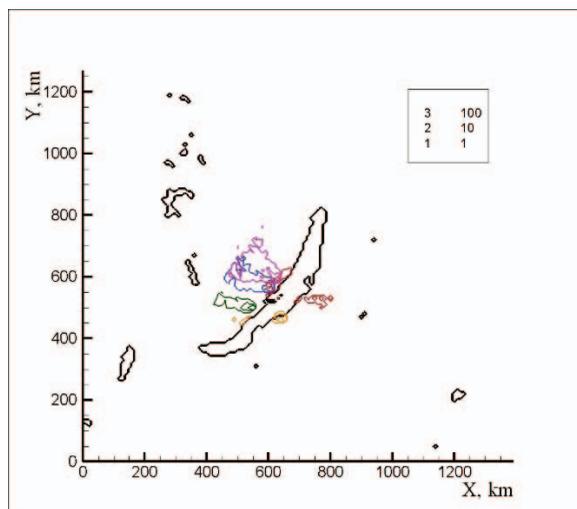


Рис. 5. Концентрации примесей в дымовом шлейфе от пяти источников

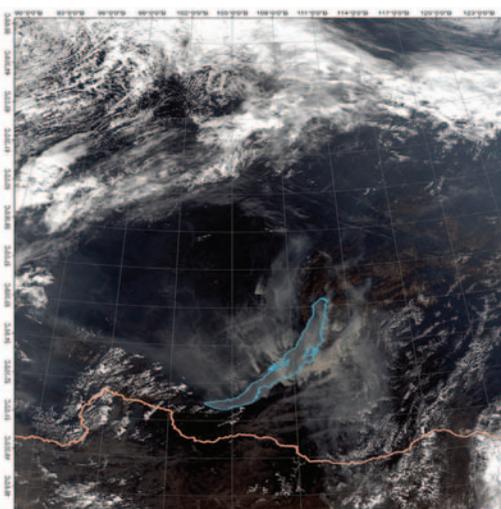


Рис 6. Данные дистанционного зондирования с аппарата Suomi NPP (США) на 20.08.2015

на ограниченных территориях с высоким разрешением. В качестве глобальной модели использовалась модель NCEP FNL ("Final" analysis). Версия модели ИВМиМГ реализована на ССКЦ СО РАН.

На рис. 5 представлен результат сценарного расчета по моделированию дымовых шлейфов в регионе оз. Байкал от пяти агрегированных источников мощностью 1 усл. ед./сек каждый. Источники расположены на высоте 100 м над поверхностью Земли. Рисунок относится к 9.00 ВСУ 21.08.2015. Концентрации примесей в дымовом шлейфе от пяти источников выделены разными цветами. Для каждого из них приведено по три изолинии: внешние концентрации имеют единичную величину, средние – 10, внутренние – 100 усл. ед. Информация дана на 9 час. ВСУ 21.08.2015. На рис. 6 приведено спутниковое изображение ситуации, полученное с аппарата Suomi NPP (США).

Создана вариационная версия модели параметризации турбулентности подсеточных масштабов (кинетическая энергия и диссипация), которая применима для различных типов стратификации атмосферы в условиях естественных и антропогенных воздействий [1], а также численные алгоритмы для ее реализации в составе объединенной модели гидротермодинамики и химии атмосферы. Принципиально важным и новым элементом является создание алгоритмов, в которых автоматически выполняются условия монотонности численных схем. При разработке применена концепция сопряженных интегрирующих множителей с локально аналитическими решениями, которые обладают однородными схемами реализации при различных типах стратификации атмосферы.

**Программа ОМН РАН, проект 0315-2015-0017** "Современные вычислительные технологии решения больших задач естествознания, геофизики, физики атмосферы и океана и охраны окружающей среды, в том числе в интересах освоения Арктики и Сибири".

**Подпроект** "Вариационные методы решения обратных задач для исследования динамики и качества атмосферы".

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

Разработан метод построения корректных алгоритмов для прямых, сопряженных и условно корректных обратных задач. Для практических применений концепция интегрирующих множителей объединяется с техникой конечных элементов/объемов в рамках методов расщепления.

Для построения корректных методов используются вариационные принципы со строгими и слабыми ограничениями. При их формулировке мы исходим из того, что математические модели и данные мониторинга представляют описание одних и тех же исследуемых объектов, но разными средствами. Вариационные принципы предоставляют универсальный инструмент для согласования пространственно-временных масштабов изучаемых процессов и объединения всех компонентов технологии моделирования. Для построения численных моделей используется концепция сопряженных интегрирующих множителей в сочетании с методами расщепления операторов моделей процессов и декомпозиции функционалов вариационного принципа. В результате получается так называемая "бесшовная" технология математического моделирования, согласовывающая алгоритмы решения прямых, сопряженных и обратных задач. Эффекты регуляризации и корректность этих алгоритмов обеспечиваются свойствами безусловной корректности сопряженных задач, полученных с использованием интегрирующих множителей. Особую роль в этой технологии играют прямые безытерационные алгоритмы последовательного усвоения доступных данных наблюдений с оценкой неопределенностей.

Для изучения гидро-геохимических процессов, протекающих в оз. Байкал, разрабатывается комплекс нестационарных трехмерных математических моделей гидротермодинамики, переноса и трансформации примесей, находящихся в различных фазовых состояниях. Для его численной реализации и построения согласованных алгоритмов используется вариационный подход, в соответствии с которым для всей системы строится интегральное тождество, которое затем аппроксимируется с использованием схем расщепления. На основе концепции сопряженных интегрирующих множителей для операторов типа конвекции-диффузии-реакции разработаны дискретно-аналитические схемы, обладающие свойствами безусловной монотонности.

В одном из сценарных расчетов предполагается, что подводный выход газа происходит в условиях стратифицированной водной толщи с реальным вертикальным распределением температур, соответствующим данным за апрель на одном из разрезов в Южном Байкале. На рис. 7 представлено двухмерное сечение в вертикальной плоскости, проходящее через

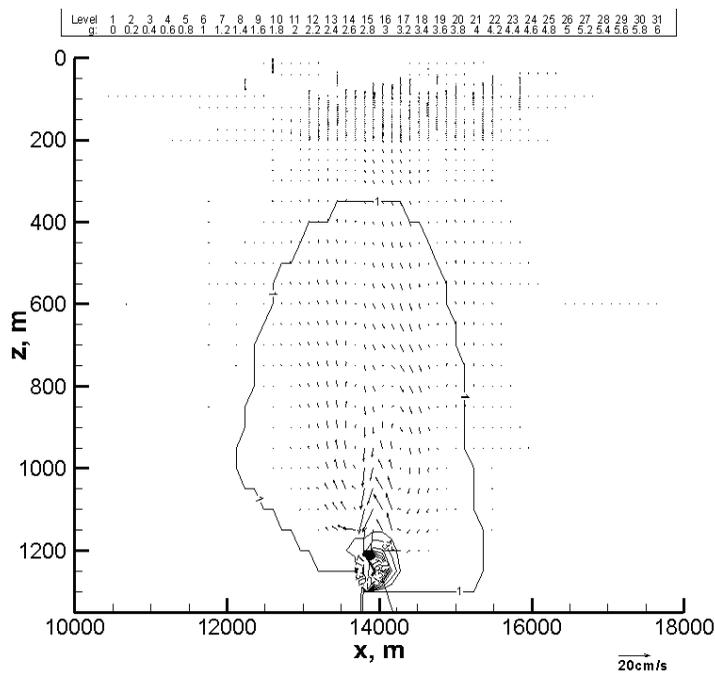


Рис. 7. Концентрации (усл. ед.) газовой фазы и система течений в окрестности источника

источник постоянного выхода газа. Газовый факел поднимается с глубины 1100 м и растворяется (газ переходит в раствор) на глубине примерно 380 м.

**Программа Президиума РАН И33П, проект 0315-2015-0012, подпроект "Разработка методов математического моделирования и вычислительных технологий для решения взаимосвязанных задач экологии и климата с использованием данных наземного и спутникового мониторинга"**

Руководители: д.ф.-м.н. Пененко В. В., д.т.н. Пяткин В. П.

Разработаны новые методы оперативной оценки ситуаций с использованием ортогональных базисных пространств и последовательного усвоения данных мониторинга в моделях динамики и химии атмосферы. В том числе разработаны алгоритмы усвоения данных для моделей продукции-деструкции, основанные на использовании усеченного сингулярного разложения оператора чувствительности, соответствующего задаче идентификации источников по данным точечных измерений, полученных на сетях мониторинга.

### Публикации

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Wos

1. Penenko V. V., Penenko A. V., Tsvetova E. A. Variational approach to the study of processes of geophysical hydro-thermodynamics with assimilation of observation data // J. of Appl. Mech. and Tech. Phys. 2017. Vol. 58, N 5. P. 771–778. DOI: 10.1134/S0021894417050029.
2. Kurbatskii A. F., Kurbatskaya L. I. An explicit algebraic model of the planetary boundary layer turbulence: test computation of the neutrally stratified atmospheric boundary layer // Thermophysics and Aeromechanics. 2017. Vol. 24, N 5. P. 705–717. DOI: 10.1134/S0869864317050067.
3. Kurbatskii A., Kurbatskaya L. Numerical modeling of the Ekman boundary layer using explicit algebraic turbulence model // AIP Conference Proceedings 1893, 030096 2017. DOI: 10.1063/1.5007554.
4. Penenko A., Penenko V., Mukatova Zh. Direct data assimilation algorithms for advection-diffusion models with the increased smoothness of the uncertainty functions // Proc. of the Intern. multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON) 2017. P: 126–130. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109853.
5. Grishina A. A., Penenko A. V. On a comparison of two schemes in sequential data assimilation // Proc. of the 8th Intern. conf. on mathematical modeling (ICMM-2017). AIP Conference proceedings. V. 1907. Art. num. UNSP 030013. DOI: 10.1063/1.5012635 2017.
6. Yudin M. S. Inversion effects on wind and surface pressure in atmospheric front propagation simulation with a hyperbolic model // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 96 (2017) 012002. DOI: 10.1088/1755-1315/96/1/012002.

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Penenko V. V. Variational methods for predicting climate-environmental processes with assimilation of observational data // Proc. SPIE 10466, 104665Q. Nov. 30, 2017. DOI: 10.1117/12.2287115.
2. Ryanova E. A., Penenko V. V., Faleychik L. M. Simulation of winter mesoclimates in Krasnoyarsk urban agglomeration // Proc. SPIE 10466, 104666J. Nov. 30, 2017. DOI: 10.1117/12.2287754.
3. Antokhin P. N., Antokhina O. Yu., Belan B. D., Simonenkov D. V., Penenko A. V., Kolker A. B., Gochakov A. V. Simulation of spread and transformation of emissions from Norilsk industrial

zone with the WRF-CHEM model: comparison with experimental data of airborne sensing // Proc. SPIE 10466, 104665S. Nov. 30, 2017. DOI: 10.1117/12.2287128.

4. Penenko A., Antokhin P., Grishina A. Variational data assimilation of airborne sensing profiles to the transport and transformation model of atmospheric chemistry // Proc. SPIE 10466, 1046674. Nov. 30, 2017. DOI: 10.1117/12.2288830.

5. Tsvetova E. A. Simulation of gas outlets in the Selenga shallow waters of Lake Baikal // Proc. SPIE 10466, 104664P. Nov. 30, 2017. DOI: 10.1117/12.2287110.

6. Kurbatskiy A., Kurbatskaya L. Numerical modeling of atmospheric turbulent Ekman flow // Proc. SPIE 10466, 104664W. Nov. 30, 2017. DOI: 10.1117/12. 111

7. Yudin M. S. Numerical simulation of idealized front motion in neutral and stratified atmosphere with a hyperbolic system of equations // Proc. SPIE 10466, 104666O. Nov. 30, 2017. DOI: 10.1117/12.2288168.

### **Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Пененко В. В., Цветова Е. А. Математическое моделирование климато-экологических процессов урбанизированных территорий // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 6. С. 509–514. DOI: 10.15372/АОО20170610.

2. Курбацкая Л. И., Курбацкий А. Ф. Вычислительно эффективная модель турбулентности для моделирования рассеяния загрязнений // Там же. № 5. С. 524–528. DOI: 10.15372/АОО20170612.

3. Гришина А. А., Пененко А. В. Моделирование кинетики химических реакций с использованием схем вариационного усвоения данных // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22, № S1. С. 27–43.

4. Пененко В. В. Развитие концепции природоохранного прогнозирования для оперативного анализа и прогноза критических ситуаций в городских агломерациях // Сб. материалов 13-го Междунар. науч. конгр. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017", Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. С. 70–73.

5. Кабанихин С. И., Голубева Е. Н., Крупчатников В. Н., Леженин А. А., Пененко А. В., Пененко В. В., Платов Г. А. Цифровая интеллектуальная Сибирь и Арктика // Там же. С. 37–48.

6. Пененко А. В., Гришина А. А. Численное исследование алгоритмов оценки источников для модели трансформации примесей в атмосфере // Сб. материалов 13-го Междунар. науч. конгр. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017", Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. С. 136–140.

7. Пьянова Э. А., Пененко В. В., Фалейчик Л. М. Численное исследование процессов атмосферного переноса примеси над территорией городской агломерации в условиях сложной орографии // Там же. С. 82–87.

8. Цветова Е. А. Моделирование пузырькового выхода газа в условиях стратифицированной среды водоема // Там же. С. 146–150.

9. Курбацкая Л. И., Курбацкий А. Ф. Численное моделирование нейтрально стратифицированного атмосферного пограничного слоя с явной алгебраической моделью турбулентности // Там же. С. 94–99.

10. Юдин М. С. Численное моделирование гравитационного атмосферного течения с помощью гиперболической системы уравнений // Там же. С. 156–159.

11. Кирилова И. А., Подорожная В. Т., Шаркеев Ю. П., Николаев С. В., Пененко А. В., Уваркин П. В., Ратушняк П. В., Чебодаева В. В., Анастасиева Е. А., Голушко С. К., Корель А. В. Свойства деминерализованного костного матрикса для биоинженерии тканей // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2017. Т. 6, № 3. С. 25–36. DOI: 10.17802/2306-1278-2017-6-3-25-36.

12. Пьянова Э. А., Фалейчик А. А., Фалейчик Л. М. Использование математического моделирования для оценки экологических последствий реиндустриализации экономики региона // Вестн. Забайкальского гос. ун-та. 2017. Т. 23, № 12. С. 41–50. DOI: 10.21209/2227-9245-2017-23-12-41-50

13. Baklanov A. A., Mahura A. G., Arnold S. R., Spracklen D. V., Makkonen R., Petäjä T., Kerminen V. M., Lappalainen H. K., Jochum M., Nuterman R. B., Nielsen S. B., Esau I., Zhang W., Penenko A. V., Gordov E. P., Zilitinkevich S. S., Kulmala M. PEEEX modelling platform for seamless multi-dimensional environmental prediction // Proc. of the 3rd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 7th PEEEX Meeting 2017. P. 37–39.

14. Пененко В. В. Вариационная организация корректных методов для прямых, сопряженных и обратных задач // Труды Междунар. конф. по вычислительной и прикладной математике "ВПП'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 680–683.

15. Цветова Е. А. дискретно-аналитические аппроксимации для реализации модели многофазной системы гидротермодинамики озера Байкал // Там же. С. 957–960.

16. Курбацкая Л. И., Курбацкий А. Ф. Численное моделирование пограничного слоя Экмана с использованием явной алгебраической модели турбулентности // Там же. С. 484–490.

17. Курбацкая Л. И., Курбацкий А. Ф. Численное моделирование проникающей турбулентной конвекции от поверхностного источника тепла в устойчивой атмосфере // Там же. С. 491–497.

17. Пьянова Э. А., Фалейчик Л. М., Фалейчик А. А. Моделирование загрязнения воздушного бассейна городского поселения, расположенного в горной котловине (на примере г. Читы) // Там же. С. 711–717.

18. Yudin M. S. Numerical simulation of gravity flows past steep obstacles in a stratified atmosphere with inversion // Там же. С. 1018–1022.

19. Курбацкий А. Ф., Курбацкая Л. И. Физическое и численное моделирование термической циркуляции воздуха над урбанизированной поверхностью // Труды Междунар. молодежной школы и конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES '2017", Таруса; Звенигород, 28 авг. – 7 сент. 2017 г. С. 9–12.

20. Yudin M. S. Simulation of the evolution of an atmospheric front in a stratified atmosphere // Там же. С. 20–22.

21. Цветова Е. А. Численное исследование выходов газа в районе Селенгинского мелководья // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2017. Т. 1. № 2. С. 93–97.

22. Пененко В. В. Моделирование качества атмосферы в городских агломерациях // Там же. С. 89–92.

23. Kurbatskii A., Kurbatskaya L. Numerical modeling of the boundary layer Ekman using explicit algebraic turbulence model // Proc. of the 25th Conf. on high-energy processes in condensed matter (HEPCM 2017) dedicated to the 60th anniversary of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS [Electron. resource]. AIP Conference Proceedings. 2017. P. 030096.

### Участие в конференциях и совещаниях

1. Large-Scale Scientific Computations, Sozopol (Bulgaria), June 5–9, 2017 – 1 доклад (Пененко А. В., Пененко В. В., Цветова Е. А.).

2. The 3rd Pan-Eurasian experiment (PEEX) conference and the 7th PEEEX Meeting, Moscow, Sept. 19–22, 2017 – 2 доклада (Пененко А. В., Пененко В. В., Цветова Е. А.).

3. Международная конференция "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 12 докладов, из них 1 пленарный (Пененко В. В., Пененко А. В., Цветова Е. А., Пьянова Э. А., Курбацкая Л. И., Юдин М. С.).

4. 23-й Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы", Иркутск, 3–7 июля 2017 г. – 8 докладов, из них 1 приглашенный (Пененко В. В., Пененко А. В., Цветова Е. А., Пьянова Э. А., Курбацкая Л. И., Юдин М. С.).

5. 35-я Всероссийская конференция с международным участием "Высокоэнергетические процессы в механике сплошной среды", посвященная 60-летию Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, 5–9 июня 2017 г. – 1 доклад (Курбацкая Л. И.).

6. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES-2017", Таруса; Звенигород, 28 августа – 7 сентября 2017 г. – 2 доклада (Курбацкая Л. И., Юдин М. С.).

7. 24-я Рабочая группа "Аэрозоли Сибири", 28 ноября – 1 декабря 2017 г. – 5 докладов (Пененко В. В., Цветова Е. А., Пененко А. В., Пьянова Э. А., Курбацкая Л. И., Юдин М. С.).

8. 9-я Международная молодежная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", посвященная 85-летию со дня рождения акад. М. М. Лаврентьева – 4 доклада (Пененко В. В., Пененко А. В., Цветова Е. А.).

9. Международная конференция "Экология мегаполисов", Новосибирск, 23–24 июня 2017 г. – 1 доклад (Пененко А. В., Пьянова Э. А.).

10. 13-я Международная Азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках Международной мультikonференции IEEE SIBIRCON 2017, Новосибирск, 18–22 сентября 2017 г. – 1 доклад (Пененко А. В.).

11. 8-я Международная конференция по математическому моделированию, Якутск, 4–8 июля 2017 г. – 1 доклад (Пененко А. В., Гришина А. А.).

12. Международная конференция "Математика в современном мире", посвященная 60-летию Института математики им. С. Л. Соболева, Новосибирск, 14–19 августа 2017 г. – 3 доклада, из них 1 приглашенный (Пененко В. В., Пененко А. В., Цветова Е. А.).

13. 16-я Всероссийская конференция "Современные проблемы математического моделирования", Дюрсо, 11–16 сентября 2017 г. – 2 пленарных доклада (Пененко В. В., Цветова Е. А.).

14. The 5th Russian-Chinese workshop on numerical mathematics and scientific computing, Novosibirsk, June 29–30, 2017 – 1 доклад (Пененко В. В.).

### **Участие в оргкомитетах российских и международных конференций**

1. Пененко В. В.:

– член Оргкомитета конференции молодых ученых ИВМиМГ, Новосибирск, 24–26 апреля 2017 г.;

– член Программного комитета Международной конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде "CITES 2017", Звенигород, 3–7 сентября 2017 г.;

– член Программного комитета 9-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 26 июня – 6 июля 2017 г.;

– член Программного комитета 16-й Всероссийской конференции "Современные проблемы математического моделирования", Дюрсо, 11–16 сентября 2017 г.

2. Пененко А. В.:

– член Оргкомитета "ВПМ 2017", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.;

– член Программного и Организационного комитетов 9-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 26 июня – 2 июля 2017 г.;

3. Пьянова Э. А.:

– член Оргкомитета "ВПМ 2017", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.;

– член Оргкомитета 9-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач" Новосибирск, 26 июня – 2 июля 2017 г.

4. Гришина А. А. – член Оргкомитета 9-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 26 июня – 2 июля 2017 г.

5. Юдин М. С. – член Оргкомитета "ВПМ 2017", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

### **Международные научные связи**

1. В рамках некоммерческого партнерства лаборатория ММГППС участвует в междисциплинарном проекте РЕЕХ (Pan Eurasium Experiment – Пан-Евразийский Эксперимент) институтов Европы, России, Китая.

2. В соответствии с договором о сотрудничестве с Восточно-Казахстанским техническим университетом им. Д. Серикбаева продолжались работы по созданию информационно-аналитической системы "Эко-мониторинг" в г. Усть-Каменогорске.

### **Итоговые данные по лаборатории**

Публикации, индексируемые в базе данных Web of Science – 6

Публикации, индексируемые в базе данных Scopus – 13

Публикации, индексируемые в базе данных РИНЦ – 36

Докладов на конференциях – 44, в том числе 5 пленарных и приглашенных.

Участников оргкомитетов конференций – 11

### **Кадровый состав**

1. Пененко В. В. зав. лаб. д.ф.-м.н.

2. Цветова Е. А. в.н.с. к.ф.-м.н.

3. Юдин М. С. с.н.с.

4. Курбацкая Л. И. с.н.с.

5. Пененко А. В. с.н.с. к.ф.-м.н.

6. Пьянова Э. А. н.с. к.ф.-м.н.

7. Иванова Г. И. техник (0,75)

Пененко А. В. – молодой научный сотрудник.

### **Педагогическая деятельность**

Пененко В. В. – профессор НГУ

Пененко А. В. – почасовик НГУ

### **Руководство студентами**

Гришина А. А. – НГУ, 2-й курс магистратуры, руководители Пененко А. В., Пененко В. В.

Цзянпэн Чжен – НГУ, 2-й курс магистратуры, руководители Пененко А. В., Пененко В. В.

Фань Ли – НГУ, 2-й курс магистратуры, руководители Пененко А. В., Пененко В. В.

Ермишина В. Е. – НГУ, 1-й курс магистратуры, руководители Пененко А. В., Пененко В. В.

Блем А. А. – НГУ, 4-й курс, руководители Пененко А. В., Пененко В. В.

Мукатова Ж. С. – НГУ, 4-й курс, руководители Пененко А. В., Пененко В. В.

**Руководство аспирантами**

Ханхасаева П. Н. – НГУ, руководитель Пененко В. В.

**Защита дипломов**

Ермишина В. Е. – бакалавр ММФ НГУ, руководители Пененко В. В., Пененко А. В.

## Лаборатория численного анализа и машинной графики

И.о. зав. лабораторией д.т.н. Дебелов В. А.

### Важнейшие достижения

#### **Оптимальные, явно разрешимые математические модели для линейных параболических задач.**

Для линейных параболических задач математической физики построены и обоснованы явно разрешимые дискретные (сеточные) экономичные математические модели с контролируемым дисбалансом "тепловой энергии". Предложены подходы к моделированию конкретного материала, имеющего различные агрегатные состояния, и к построению согласованной с границей равномерной пространственной сетки. Обосновано выполнение условия сопряженно-согласованной аппроксимации.

Акад. РАН Коновалов А. Н.

#### **Математическая модель для расчета теплоотвода при импульсных тепловых нагрузках вблизи поверхности пластины дивертора из вольфрама.**

Построена математическая модель для расчета теплоотвода при импульсных тепловых нагрузках вблизи поверхности пластины дивертора из вольфрама. Воспроизведены измеренные распределения температуры по поверхности, предсказаны характерные зависимости ослабления теплоотвода в зависимости от геометрии трещин. В аксиально-симметричной постановке получен график движения границы расплав – твердый вольфрам, абсолютно точно соответствующий натурным экспериментам при условии учета испарения.

Член-корр. РАН Лазарева Г. Г., Максимова А. Г.

### **Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2017 г. | в соответствии с планом НИР института**

**Проект "Сеточные методы для высокопроизводительных ЭВМ и их применение в задачах естествознания, в том числе при построении многомерных вычислительных моделей для задач динамической теории упругости и тепломассопереноса в сильно неоднородных средах".**

Номер государственной регистрации НИР 0315-2016-0001.

Руководитель – д.т.н. Дебелов В. А.

Разработаны алгоритмы построения теоретических сейсмограмм для трехмерных задач динамики в сложно построенных средах (упругость, вязкоупругость). Построены и обоснованы экономичные явно разрешимые математические модели для линейных параболических задач. Рассмотрена начально-краевая параболическая задача, с которой, например, связан реальный физический процесс распространения тепла в ограниченном фазовом объеме. Заданными параметрами изучаемого физического процесса являются скалярные функции: плотность, теплоемкость, теплопроводность и удельная плотность внутренних источников (стоков) тепла. Искомые параметры: скалярная функция температуры, вектор потока, а также вектор плотности потока. Связь между искомыми параметрами изучаемого процесса задается законом сохранения количества тепла, уравнением состояния и определяющим соотношением. Предложены подходы к моделированию конкретного материала, имеющего

различные агрегатные состояния, и к построению согласованной с границей равномерной пространственной сетки. Обосновано выполнение условия сопряженно-согласованной аппроксимации. Построенные модели позволяют сравнить классический стандартный подход, основанный на законах сохранения, с различными приближенными моделями распространения тепла в тонких пленках.

Построение дискретных аналогов сопряженно-операторных моделей в криволинейных координатах. При численной реализации математических моделей для описания геометрии тел специальной формы часто используют криволинейные системы координат. Главное преимущество такого подхода состоит в том, что в надлежащем образом выбранной системе координат исходному телу соответствует параллелепипед. Следствием этого является возможность просто строить регулярные прямоугольные сетки.

Упрощение описания области влечет за собой усложнение записи действия в криволинейных координатах, присутствующих в модели дифференциальных операторов. В случае задачи теплопроводности при реализации постановки "в температурах" в общем случае это приводит к дифференциальному оператору второго порядка со смешанными производными и переменными коэффициентами. Аппроксимация столь сложного дифференциального оператора на неравномерной сетке с сохранением свойств, присущих исходному дифференциальному оператору (симметричность и положительная определенность), представляет определенные трудности.

В отчетный период в полярных координатах построен дискретный аналог сопряженно-операторной модели задачи теплопроводности, сохраняющий структуру исходной модели. Аппроксимация проводится методом опорных операторов с выбором градиента в качестве опорного оператора. Такой выбор обусловлен двумя причинами. Во-первых, тем, что в любой криволинейной системе координат действие градиента на скалярную функцию записывается в виде разложения по кобазису (взаимному базису) с помощью частных производных. Построение его аппроксимации на прямоугольной сетке не представляет труда, так как аппроксимируется со вторым порядком точности в центре каждой прямоугольной ячейки неравномерной сетки посредством полусуммы центральных разностей по соответствующему координатному направлению. Тем самым все компоненты дискретного аналога векторной величины (градиент) задаются в одних и тех же узлах сетки. Это позволяет корректно определить действие дискретного аналога тензора теплопроводности на дискретный аналог градиента температуры и, по сути, наряду со способом аппроксимации градиента определяет второй порядок сходимости схемы. Во-вторых, это позволяет избежать непосредственной аппроксимации операции ковариантного дифференцирования контравариантных компонент вектора потока тепла, содержащихся в операторе дивергенции вектора.

Произведенные построения не зависят от конкретной системы координат. Для другой системы координат в соответствующих местах следует использовать необходимую конкретику: метрический тензор, скалярное произведение и т. д.

Разработан подход к построению и обоснованию экономичных явно-разрешимых алгоритмов решения задач механики сжимаемых сред.

Для адекватной работы пластин дивертора они должны отводить тепло с поверхности вглубь материала к охлаждающим трубкам. Основной опасностью, которая может помешать этому процессу, является потеря теплопроводности в результате распространения трещин параллельно облучаемой поверхности. Подобное явление было обнаружено *post-mortem* анализом в ряде экспериментальных работ, хотя численное моделирование возможного перегрева поверхности из-за этих трещин не было проведено. На созданном в ИЯФ СО РАН

экспериментальном стенде ВЕТА были получены in-situ результаты нагрева вольфрамовой мишени мощным субмиллисекундным пучком электронов. Эти данные свидетельствуют о корреляции перегрева поверхности образца и наличия подповерхностных трещин в материале. Экспериментально обнаружено, что образуются не только перпендикулярные, но и параллельные поверхности трещины. Последние могут существенно ухудшать теплоотвод от поверхности облученного материала. Проведен расчет теплоотвода при импульсных тепловых нагрузках вблизи параллельной поверхности материала трещины. Воспроизведены измеренные распределения температуры по поверхности и предсказаны характерные зависимости ослабления теплоотвода в зависимости от геометрии трещин. Разработан первый этап алгоритма для трехмерных задач динамической термоупругости в сложно-построенных средах. В алгоритм введены теплофизические характеристики тугоплавких металлов, которые определяют фазовые переходы. Для учета процессов плавления и испарения в алгоритм введены энтальпия фазового перехода и потеря мощности. Проведены вычислительные эксперименты для анализа данных, полученных в ходе измерений. Параметры расчета: длительность воздействия пучка 186 мкс, момент измерения 100 мкс (рис. 1,а) и 200 мкс (рис. 1,б) от начала пучка, длительность экспозиции 10 мкс, глубина и длина трещины примерно 0.25 мм и 0.5 мм. Расчеты подтвердили гипотезу о том, что неоднородности температуры поверхности вольфрама связаны с наличием подповерхностных трещин.

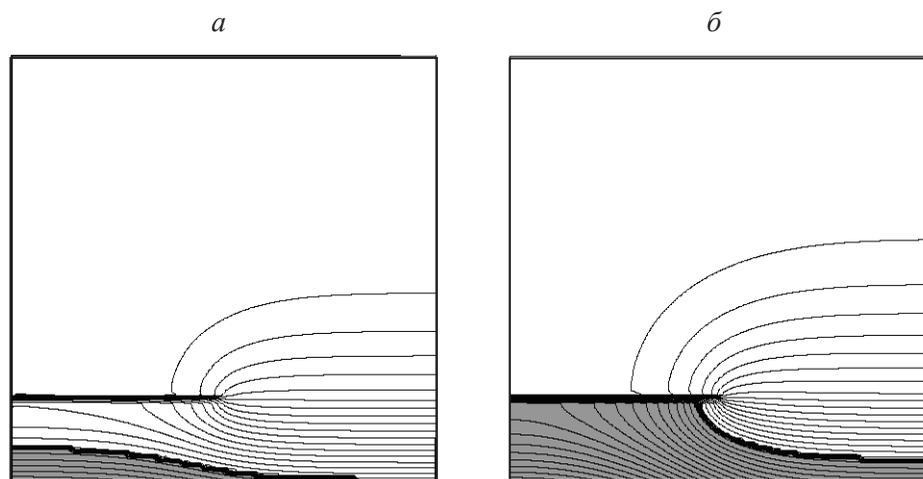


Рис. 1. Распределение температуры на поперечном срезе с выделением зоны расплава

Были продолжены исследования технологий параллельных алгоритмов и решения трехмерных краевых задач на квазиструктурированных параллелепипедальных сетках методом декомпозиции расчетной области на подобласти, сопрягаемые без наложения. В основе подхода к методу декомпозиции лежат следующие принципы. Расчетная область погружается в параллелепипед, в котором строится параллелепипедальная структурированная макросетка. Тем самым проводится декомпозиция расчетной области на подобласти, каждая из которых является макроэлементом макросетки. В каждой подобласти строится параллелепипедальная структурированная подсетка. На границе сопряжения подобластей (интерфейсе), которая состоит из граней, ребер и макроузлов макросетки, строится своя подсетка. На подсетках в подобластях каким-либо из методов аппроксимируются и решаются краевые подзадачи, на которые разбивается исходная краевая задача. Подсетка на интерфейсе состоит из подмножества узлов подсеток в подобластях. Сшивка решений в подобластях осуществляется путем решения уравнения Пуанкаре – Стеклова на интерфейсе.

При проведении итерационного процесса решаются краевые подзадачи в подобластях, что составляет наиболее трудоемкую часть решения всей задачи. Поэтому по возможности необходимо уменьшить число итераций данного, назовем его внешним, итерационного процесса. Именно на это направлена данная работа. Для ускорения итерационного процесса по подобластям предлагается следующий алгоритм. Предлагается использовать многосеточный подход, который заключается в следующем. Предварительно на макросетке аппроксимируется и решается исходная краевая задача во всей расчетной области. Полученное грубое решение (решение в узлах макросетки) интерполируется в узлы сетки на интерфейсе и используется в качестве начального приближения для внешнего итерационного процесса по подобластям, при помощи которого находится окончательное решение поставленной задачи. Внешний итерационный процесс распараллеливается на CPU средствами MPI. Распараллеливание решения краевых подзадач в подобластях, которое является наиболее трудоемкой составляющей, проводится на графических ускорителях GPU средствами CUDA.

Проведено экспериментальное исследование данного итерационного процесса на различных тестовых функциях и при различных способах интерполяции. Результатом работы является следующее. Линейные и квадратичные задачи решаются за одну внешнюю итерацию. В то время как для решения этих задач без применения данного метода необходимо несколько десятков внешних итераций. Для более сложных задач применение предлагаемого подхода до двух раз сокращает число внешних итераций, что означает приблизительно такое же уменьшение времени решения всей задачи в целом.

Разработан алгоритм фотореалистического рендеринга сцен, состоящих из прозрачных оптически изотропных и анизотропных (одноосных и двуосных) кристаллов с учетом поляризации и интерференции света. Для физически корректного рендеринга (расчета изображения) явления интерференции в 3D сцене на основе метода трассировки лучей в алгоритме вычисляется поляризация лучей и фаза электромагнитных колебаний. При встрече нескольких поляризованных лучей в исследуемой точке сцены (пикселе) необходимо выяснять когерентность света, переносимого этими лучами. Основой для исследований и разработок этапа 2017 г. послужили следующие результаты, полученные ранее:

- Математическая модель и алгоритм расчета взаимодействия лучей неполяризованного, частично поляризованного и поляризованного света с границей двух изотропных и анизотропных прозрачных сред, т. е. определения направления и оптических характеристик порожденных (отраженных и преломленных) лучей. Лучи считаются некогерентными, фаза электромагнитных колебаний не подсчитывается;

- Алгоритм для расчета интерференционных картин для сцен с оптически изотропными прозрачными объектами. Исследуется когерентность света, приносимого лучами;

- Обобщенная модель луча поляризованного света, разработанная для случая расчета ортоскопических изображений интерференционных картин. В структуру данных луча добавлены данные о текущей фазе электромагнитной волны и признак источника, позволяющий определить когерентность различных лучей света.

Разработка алгоритма выполнена как модификация существующего алгоритма взаимодействия лучей света с границей двух изотропных и анизотропных прозрачных сред. Для всех трассируемых лучей добавлен подсчет оптического пути, что позволяет определить значение фазы электромагнитного колебания – света, переносимого лучом. Рендеринг осуществляется на основе обратной рекурсивной трассировки лучей.

## Результаты работ по научно-исследовательским программам, проектам Президиума РАН, ОМН РАН и Сибирского отделения РАН

**Программа РАН П.2П/Л.2-1** "Математическое моделирование многомерных задач механики сплошной среды, динамические задачи линейной теории упругости, задачи многофазовой газовой динамики, задачи физики плазмы на многопроцессорных суперЭВМ".

**Проект** "Математическое моделирование многомерных задач механики сплошной среды, динамические задачи линейной теории упругости, задачи многофазовой газовой динамики, задачи физики плазмы на многопроцессорных суперЭВМ".

**Этап 2017 г.** "Исследование свойств оптимальных, явно разрешимых дискретных (сеточных) моделей, построенных и обоснованных для линейных гиперболических систем. Расширение разработанных подходов на случай систем линейных уравнений параболического типа. Построение и обоснование для систем уравнений параболического типа оптимальных, явно разрешимых дискретных (сеточных) моделей. Развитие построенных дискретных моделей в приложениях к задачам линейной теории упругости, многофазной газовой динамики и физики плазмы".

Руководитель – акад. РАН Коновалов А. Н.

Продолжены работы по созданию научно-исследовательского программного обеспечения для проведения вычислительного эксперимента в задачах построения "теоретических сейсмограмм" при вибровоздействиях и сейсмостойкости наземных сооружений при проведении подземных горных работ. На основе разработанных дискретных моделей начата работа по созданию модели термоупругости для тугоплавких металлов, используемых в диверторной зоне прототипа токамака-реактора ИТЕР. Компоненты первой стенки и пластины дивертора будут подвергаться мощной тепловой нагрузке во время разряда. Этот поток тепла будет состоять из стационарной компоненты в результате истечения плазмы вдоль сепаратрисы магнитного поля (до 20 МВт/м<sup>2</sup>), а также из быстрой импульсной нагрузки в виде ЭЛМов 1-го типа, срывов и др., которые могут иметь энерговыделение до 80 МДж/м<sup>2</sup> примерно за 1 мс. Действующие плазменные ловушки с магнитным удержанием не могут воспроизвести подобные условия, поэтому для их моделирования используются специализированные стенды: квазистационарные плазменные ускорители, электронные пучки и лазеры. Полученные экспериментальные данные по эрозии материалов ложатся в основу расчетных моделей рабочих режимов токамака.

Мишень из ИТЕР-сертифицированного вольфрама разогревалась до температур выше порога плавления в течении 87 мкс (рис. 2). Энергетическая нагрузка составляла 90–110 Дж/м<sup>2</sup>с<sup>0.5</sup> в центре области радиусом 6 мм, что соответствует размеру пятна излучения лазера. Полученные с помощью CCD-камеры изображения (рис. 3) демонстрируют изменения поверхности образца. В процессе разогрева мелкозернистая поверхность образца становится однородной с ярко выраженной ячеистой структурой. Видна яркая граница теплового излучения, которая свидетельствует о наличии фазового перехода. Ширина линии фазового перехода обусловлена временем экспозиции камеры. Для расчета динамики расплавленного слоя вольфрама на этапе охлаждения рассматривается весь процесс нагрева образца, плавления и затем остывания после окончания воздействия импульсной нагрузки. Неоднородный осесимметричный поток тепла действует в течение 87 мкс на всю поверхность образца. Динамика процесса обусловлена в первую очередь распространением тепла с поверхности вглубь.

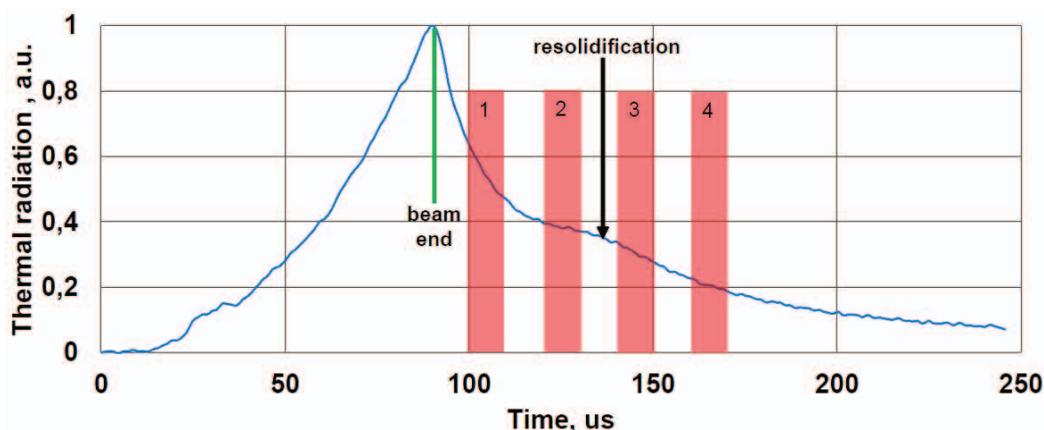


Рис. 2. Экспериментальный график зависимости теплового излучения от времени с указанием времени окончания импульсной нагрузки (зеленый) и моментов времени, в которые сделаны снимки теплового излучения на поверхности вольфрамового образца (красный). Ширина красных прямоугольников соответствует длительности экспозиции камеры

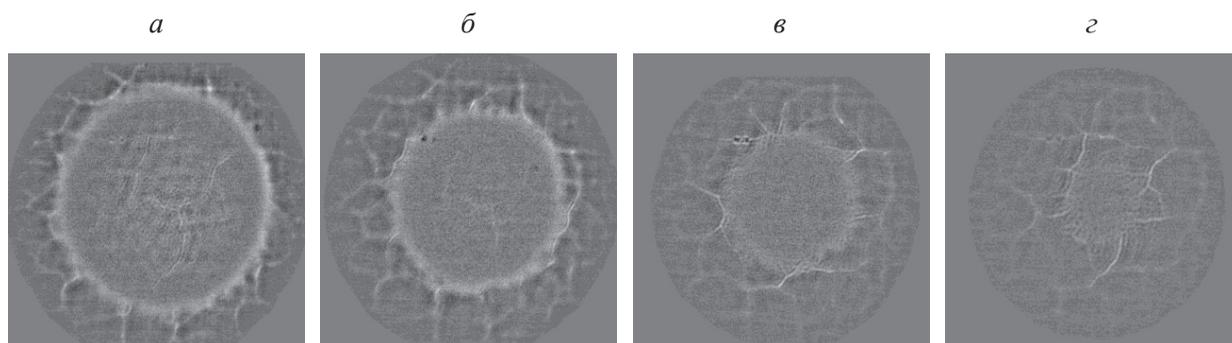


Рис. 3. Снимки теплового излучения на поверхности вольфрамового образца, сделанные при помощи электронного микроскопа в разные моменты времени: 100–110 мкс (*а*); 120–130 мкс (*б*); 140–150 (*в*); 160–170 мкс (*г*)

В основу модели положен закон сохранения вида  $\text{div } F = 0$ . Для задачи распространения тепла в ограниченном объеме построена модель с контролируемым дисбалансом закона сохранения тепла вследствие как диффузионных процессов, так и конвективного переноса тепла. Получено изменение радиуса зоны расплава в процессе остывания, полностью соответствующее экспериментальным данным. Расчеты подтвердили гипотезу, что процесс испарения при высоких температурах становится определяющим. Расширение модели предполагает включение термодинамически согласованных уравнений сохранения для твердой, жидкой и газовой фаз вещества для подбора адекватных уравнений состояния.

Проведены вычислительные эксперименты на тестовых задачах для сравнительного исследования кинетически согласованных разностных схем, схем решения квазигазодинамических систем уравнений, схем Годунова и других схем для реализации системы газодинамических уравнений и уравнений акустики. Рассмотрены и протестированы различные модификации дискретных кинетических моделей, описывающих одночастичную функцию распределения. Выполнено сравнение тестовых решений с решениями, полученными с помощью явных методов решения уравнений газовой динамики. Приведен контрпример, показывающий необходимость учета последовательности вывода уравнений используемого метода.

**Программа ОМН РАН II.2П/I.3-3, подпроект "Построение и численное обоснование сходимости дискретного аналога сопряженно-операторной модели стационарной задачи теплопроводности в криволинейных координатах с применением аппроксимации повышенного порядка точности для опорного оператора".**

Руководитель – акад. РАН Коновалов А. Н.

В полярных координатах построен дискретный аналог сопряженно-операторной модели задачи теплопроводности, сохраняющий структуру исходной модели:

– компоненты приближенных векторных величин задаются в одних и тех же узлах сетки;

– для случая, когда область является кольцом, схема второго порядка точности построена на произвольной неравномерной сетке и для анизотропной среды (смешанные производные);

– со вторым порядком сходятся не только скалярные сеточные функции (приближения к температуре), но сеточные вектор-функции (приближения к потоку тепла);

– произведенные в работе построения не зависят от конкретной системы координат. Для другой системы координат надо в соответствующих местах использовать необходимую конкретику: метрический тензор, скалярное произведение и т. д.;

– схема позволяет реализовывать на дискретном уровне постановки "в температурах" и "в потоках";

– в случае, когда возможно разделение переменных, для постановки "в температурах" предложен экономичный метод обращения оператора задачи.

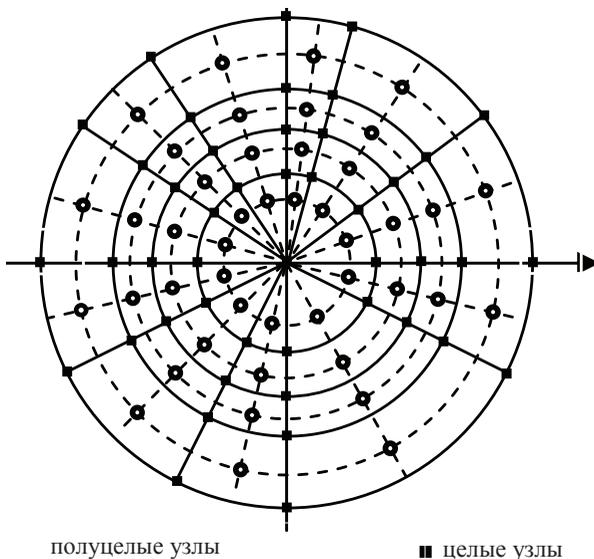


Рис. 4

## Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 16-07-00762 "Исследование и разработка моделей, методов и алгоритмов взаимодействия света с кристаллами для расчета реалистических интерференционных картин".**

Руководитель – д.т.н. Дебелов В. А.

Коноскопические и ортоскопические интерференционные картины при взаимодействии света с кристаллами наблюдаются в поляризационном микроскопе. В 2017 г. разработан алгоритм расчета коноскопических изображений тонких срезов прозрачных одноосных кристаллов на основе обратной рекурсивной трассировки лучей для использования при расчете изображений для 3D сцены, моделирующей простейший поляризационный микроскоп: поляризатор – конденсор (линза) – образец минерала – объектив (линза) – картинная плоскость. Без первой или второй линзы это модель полярископа, широко применяемого для наблюдения коноскопических картин минералов.

Для реализации алгоритма проведены разработка и программная реализация компьютерной модели линзы из изотропного прозрачного материала, которая корректно обрабатывает

лучи линейно поляризованного света. Судя по литературе, такая компьютерная модель разработана впервые.

### Публикации

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Sorokin S. B. A difference scheme for a conjugate-operator model of a heat conduction problem in polar coordinates // Num. Analysis and Appl. 2017. Vol. 10, iss. 3. P. 244–258. DOI: 10.1134/S1995423917030065.

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Lazareva G. G., Arakcheev A. S., Kandaurov I. V., Kasatov A. A., Kurkuchekov V. V., Maksimova A. G., Popov V. A., Shoshin A. A., Snytnikov A. V., Trunев Yu. A., Vasilyev A. A., Vyacheslavov L. N. Calculation of heat sink around cracks formed under pulsed heat load // IOP Conf. Ser.: Journal of Physics: Conf. Ser. 894, 2017, 012120. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012120.

#### Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Лазарева Г. Г., Максимова А. Г. Сравнительный анализ кинетически-согласованных разностных схем с рядом сеточных методов решения газодинамических уравнений // Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПМ'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. С. 509–513.

2. Лазарева Г. Г., Шишленин М. А., Идиятуллин Р. А., Федоров Е. А., Заволжский В. Б., Хлестов И. В. Прямая и обратная задача комплексного воздействия на пласт с применением технологии ТГХВ БС // Там же. С. 514–520.

3. Лазарева Г. Г., Аракчеев А. С., Васильев А. А., Вячеславов Л. Н., Касатов А. А., Кандауров И. В., Куркучеков В. В., Попов В. А., Трунев Ю. А., Шошин А. А. Расчет теплоотвода рядом с трещинами, образовавшимися при импульсной тепловой нагрузке // Там же. С. 504–508.

4. Сорокин С. Б. Экономичный метод решения задачи Коши для уравнения Лапласа // Там же. С. 841–844.

5. Дебелов В. А., Кушнер К. Г. Модель линзы для трассировки лучей с учетом поляризации // Там же. С. 256–261.

6. Дебелов В. А., Кушнер К. Г. Программная модель линзы для обработки лучей линейно поляризованного света // Материалы 27-й Международной конференции по компьютерной графике и машинному зрению ГРАФИКОН'2017, Пермь, 24–28 сент. 2017 г. С. 58–62.

7. Lazareva G. G., Maksimova A. G. A comparative analysis of kinetically consistent schemes with several grid methods for solving gas-dynamic problems // Bull. NCC. Ser.: Num. Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies. 2017. № 16. P. 49–55.

### Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Математика в современном мире", Новосибирск, Академгородок, 14–19 августа 2017 г. – 3 доклада (Роженко А. И., Коновалов А. Н. Максимова А. Г., Лазарева Г. Г.).

2. Международная конференция "Вычислительная и прикладная математика 2017", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 7 докладов (Роженко А. И., Лазарева Г. Г., Максимова А. Г., Васильева Л. Ф., Дебелов В. А., Кушнер К. Г., Корнеев В. Д., Сорокин С. Б.).

3. Всероссийская конференция с международным участием "Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва", посвященная 60-летию Института

гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, 4–8 сентября 2017 г. – 1 доклад (Лазарева Г. Г., Максимова А. Г.).

4. The 8th International conference on differential and functional differential equations, Moscow, August 13–20, 2017 – 1 доклад (Лазарева Г. Г.).

5. 17-я Всероссийская конференция-школа молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования", Новороссийск, 11–16 сентября 2017 г. – 2 доклада (Лазарева Г. Г., Сорокин С. Б.).

6. 27-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению "ГРАФИКОН'2017", Пермь, 24–28 сентября 2017 г. – 1 доклад (Дебелов В. А., Кушнер К. Г.).

7. 55-я Международная научная студенческая конференция "МНСК-2017", Новосибирск, 16–20 апреля 2017 г. – 2 доклада (Максимова А. Г., Кушнер К. Г.).

### Участие в оргкомитетах конференций

1. Коновалов А. Н. – сопредседатель программного комитета международной конференции по вычислительной и прикладной математике (ВПМ'17) в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

2. Дебелов В. А.:

– член программного комитета The 12th International joint conference on computer vision, imaging and computer graphics theory and applications (GRAPP 2017), Porto (Portugal), February 27 – March 1, 2017;

– член программного комитета 27-й Международной конференции "ГРАФИКОН'2017", Пермь, 24–28 сентября 2017 г.;

– член программного комитета 11th International conference on computer graphics, visualization, computer vision and image processing, Lisbon (Portugal), July, 21–23, 2017.

3. Лазарева Г. Г. – член программного комитета международной конференции по вычислительной и прикладной математике ("ВПМ'17") в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

4. Сорокин С. Б. – член программного комитета 17-й Всероссийской конференции-школы молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования", Новороссийск, 9–17 сентября 2017 г.

### Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 1

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 9

Докладов на конференциях – 17, в том числе 3 пленарных

Участников оргкомитетов конференций – 4

### Кадровый состав

1. Дебелов В. А.	и.о. зав. лаб.	д.т.н.
2. Коновалов А. Н.	советник РАН	академик РАН
3. Лазарева Г. Г.	с.н.с.	член-корр. РАН
4. Сорокин С. Б.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
5. Корнеев В. Д.	с.н.с.	к.т.н.

6. Васильева Л.Ф. с.н.с. 0.1 ст. к.ф.-м.н.
  7. Роженко А.И. с.н.с. 0,1 ст. д.ф.-м.н.
  8. Хорсова Г.Е. ведущий программист
  9. Максимова А.Г. инженер 0.5 ст.
- Максимова А. Г. – молодой научный сотрудник.

### **Педагогическая деятельность**

- Коновалов А. Н. – профессор НГУ  
Сорокин С. Б. – профессор НГУ, ВКИ  
Дебелов В. А. – профессор НГУ  
Лазарева Г. Г. – профессор НГУ, НГТУ

### **Руководство студентами**

1. Ядренников Л. О. – 1-й год аспирантуры ИВМиМГ, руководитель Роженко А. И.
2. Ключинский Д. В. – 1-й год аспирантуры НГУ, руководитель Лазарева Г. Г.
3. Максимова А. Г. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Лазарева Г. Г.
4. Серова Н. А. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Лазарева Г. Г.
5. Каргапольцева Е. С. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Лазарева Г. Г.

**Лаборатория математических задач геофизики**

И.о. зав. лабораторией д.ф.-м.н. Имомназаров Х. Х.

**Важнейшие достижения****Корреляционный анализ статистической фациальной модели разломной зоны.**

Работа посвящена построению и анализу сейсмических изображений разломной зоны на основе исследования ее фациальной модели. Для ансамбля статистических реализаций выполнено сейсмическое моделирование и построены реальные и идеальные сейсмические изображения. Предложенный метод позволяет установить точное соответствие между исходными фациальными моделями разломной зоны и построенными по ним сейсмическими изображениями.

Д.ф.-м.н. Решетова Г. В.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершаемым в 2017 г.  
в соответствии с планом НИР института**

**Проект НИР 1.3.1.3** "Методы создания, исследования и идентификации математических моделей в науках о Земле".

Номер государственной регистрации НИР 01201370229.

Руководитель – чл.-корр. РАН Кабанихин С. И.

Рассмотрена возможность адаптации дифференциальных уравнений Максвелла – Паркера – Моффата к наблюдаемым на Земле электромагнитным полям. Исследуются пределы применимости названных уравнений в зависимости от тех или иных значений критерия подобия, дается объяснение некоторых эффектов, наблюдаемых в электромагнитном поле Земли. Проанализирована электродинамика прикладного геомагнетизма. Выявлена глубинная преемственность названных выше электродинамик при объяснении эффектов, наблюдаемых в магнитном поле атмосферы Земли. Приведены примеры систем электрических токов в ионосфере и зоне F жидкого ядра Земли. Объяснено отклонение геомагнитной оси от оси вращения Земли, происходящее вследствие своеобразной фокусировки несильным магнитным полем магнитного поля тороидальных токов в зоне F жидкого ядра.

Продолжены исследования по поиску дифференциальных законов сохранения для семейства произвольных пространственных гладких кривых и для семейства произвольных гладких поверхностей. Получены новые явные выражения для гауссовой кривизны поверхности. Продолжены исследования по определению новых дифференциальных законов сохранения в трехмерном случае для решений уравнения эйконала (для поля времен в трехмерной кинематической сейсмике (геометрической оптике)) и для решений гидродинамических уравнений Эйлера. Продолжено систематическое исследование 10-параметрической группы Ли, являющейся группой эквивалентности трехмерного уравнения эйконала, уравнения акустики и других классических уравнений математической физики, одновременно являющейся расширением группы конформных преобразований трехмерного пространства на пространство шести переменных.

Полученные результаты имеют ярко выраженный междисциплинарный характер, поскольку в данном направлении взаимодействуют и проникают друг в друга различные направления математики (дифференциальная геометрия, векторный анализ и групповой анализ

в рамках теории групп Ли), математической физики и геофизики (сейсмика, геометрическая оптика, гидродинамика).

Построено фундаментальное решение для стационарной переопределенной системы, возникающей в двухфазной среде с равновесием фаз по давлению. Показано влияние насыщенностей фаз и вязкостей подсистем, а также предельный переход к фундаментальному решению для стационарной системы уравнений гидродинамики.

В отчетный период реализован алгоритм расчета полей напряжений (по данным о направлении действия главных напряжений в очагах землетрясений) и их визуализация на карте и в разрезе. Метод при комплексировании его результатов с данными анализа трехмерного распределения скоростных полей Sv-волн, а также наряду с исследованием статистики временной взаимосвязи крупных землетрясений, позволил выявить региональные геодинамические структуры глубокого заложения в Азиатском регионе, в частности  $\Omega$ -образную Южно-Азиатскую геодинамическую структуру (рис. 1) (Результаты по проекту Президиума РАН: программа ФНИ ГАН. 1.3. П.2П/3-2). Выявлен новый морфологический тип ударных структур треугольной формы, выраженной в рельефе, ударное происхождение которых показано на примере кратера Варзик-Мраморный по комплексу морфоструктурных, геофизических и минералогических признаков (см. результаты по проекту Президиума РАН: программа ФНИ ГАН. 1.3. П.2П/3-1).

В астрофизике несилловые электромагнитные поля являются неперенным участником самогенерации магнитных полей. Исследование самогенерации магнитных полей в астрофизике имеет непосредственное отношение к проблеме неустойчивости плазмы в термоядерных реакциях в "бублике" токамака, где самогенерация тороидальных и полоидальных

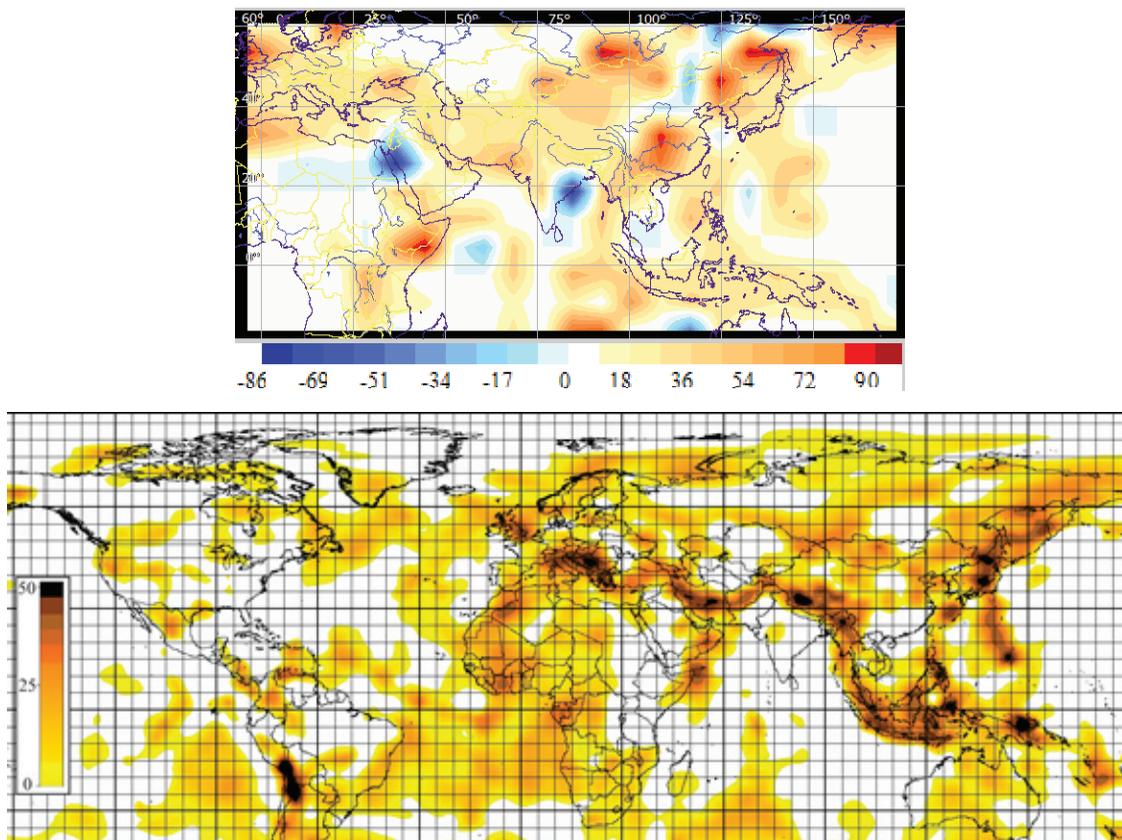


Рис. 1. Поля напряжений и суммарного SV-поля (по томографическим слоям ниже подошвы литосферы:  $225 \leq H \leq 700$  км) Южно-Азиатской  $\Omega$ -образной геодинамической структуры

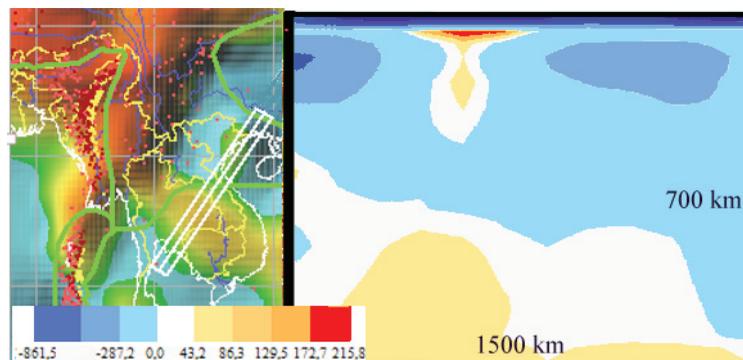


Рис. 2. Типичный томографический разрез проникающей ударной структуры в области полуострова Индокитай

магнитных полей способствует хаотизации частиц плазмы и устремлению частиц к стенкам токамака.

Реализован новый вычислительный метод линеаментных построений с учетом физики процесса (за счет привязки к дуге большого круга Земли и учета взаимодействия полей напряжений) для выявления геотектонических структур глобального масштаба. Метод позволил получить важные, актуальные для прогноза сейсмоопасных зон результаты по геодинамике Центрально-Азиатского и Дальневосточного регионов (см. результаты по проекту Президиума РАН: программа ФНИ ГАН. 1.3. П.2П/3-2). Разработана новая экспертно-информационная методика восстановления по особенностям рельефа и аномалиям различных геофизических полей (силы тяжести, теплового потока, скоростей Sv-волн) эродированных и погребенных ударных структур крупного размера: по фрагментам кратерного вала и центрального поднятия, резким изменениям русел рек и др. (см. результаты по проекту Президиума РАН: программа ФНИ ГАН. 1.3. П.2П/3-1).

Рассмотрена краевая задача для стационарной переопределенной системы двухскоростной гидродинамики с одним давлением. Решение данной системы сводится к последовательному решению двух краевых задач: задачи Стокса для одной скорости и давления и переопределенной системы для другой скорости. Показана корректность обобщенной постановки этих задач на основе метода регуляризации.

В 2017 г. была продолжена начатая годом ранее разработка нового алгоритма решения задачи численного моделирования процесса распространения сейсмических волн в трехмерных неоднородных изотропных средах. Эта задача представляет практический интерес при интерпретации данных полевых измерений в сейсмологии и сейсморазведке, например при решении обратной кинематической задачи сейсмологии методом нелинейной лучевой сейсмотомографии, в методе пространственно-временной миграции Кирхгофа и др. К настоящему времени существует несколько подходов к решению данной задачи: методы, основанные на решении двухточечной краевой задачи; метод волновых фронтов; разностные методы решения уравнения эйконала и др. Каждый из методов имеет свою область применения. Например, метод, основанный на решении двухточечной краевой задачи, может быть использован только в том случае, когда волна порождена действием точечного источника, а в случае задания начального положения фронта в виде поверхности данный подход невозможен, поскольку источник неизвестен. Метод волновых фронтов требует громоздких построений трехмерных пространственных сеток, что приводит к усложнению программы и значительным вычислительным затратам. Также метод недостаточно точен, поскольку внутри ячеек время вычисляется путем интерполяции.

Разрабатываемый новый метод трехмерной лучевой пристрелки относится к методам лучевого трассирования, как и методы, основанные на решении двухточечной краевой задачи. Основой подхода является итерационный метод Ньютона – Канторовича. Алгоритм 3D пристрелки прост в реализации и допускает "почти" линейное распараллеливание. Вопросы сходимости метода Ньютона в применении к поставленной задаче пока не рассматривались, как и возможность применения метода при наличии в среде каустик, зон тени и отражающих горизонтов. Это планируется сделать в дальнейшем.

К полученным новым результатам можно отнести вывод необходимых дифференциальных уравнений для расчета лучей и начальных данных к ним, реализацию самого алгоритма лучевой пристрелки для аналитически заданных моделей сред и поверхностей наблюдения, в отсутствие отражающих горизонтов. Составлены расчетные программы и проведен ряд численных экспериментов на модельных данных.

*Результаты по дифференциальной геометрии.* Найдены дифференциальные законы сохранения (дивергентные тождества вида  $\operatorname{div} \mathbf{F} = 0$ ) для семейства произвольных пространственных гладких кривых и законы сохранения для семейства произвольных гладких поверхностей. Соленоидальное векторное поле  $\mathbf{F}$  выражается, соответственно, через классические характеристики кривых: базис Френе (касательный орт, главную нормаль и бинормаль), кривизну и кручение – и через классические характеристики поверхностей: нормаль, главные направления, главные кривизны, гауссову и среднюю кривизны.

Результаты по геометрии векторных полей. Найдено явное выражение векторного поля  $\mathbf{P}$ , входящего в первую форму Аминова для гауссовой кривизны поверхностей (полной кривизны второго рода), в виде ротора вектора, выражающегося в терминах характеристик ортогональных к ним кривых. Это позволяет дать некоторые новые формулы для гауссовой кривизны. Найден новый геометрический смысл векторного поля, входящего во вторую форму Аминова, как суммы трех векторов кривизны трех кривых, определяемых векторными линиями поля нормалей к поверхностям.

*Результаты по уравнениям математической физики и групповому анализу.* С помощью этих общих формул дифференциальной геометрии и векторного анализа получены новые дифференциальные законы сохранения в трехмерном случае для решений уравнения эйконала (для поля времен в трехмерной кинематической сейсмике (геометрической оптике)) и для решений гидродинамических уравнений Эйлера. Продолжено систематическое исследование группы Ли, являющейся расширением группы конформных преобразований трехмерного пространства на пространство шести переменных и одновременно – группой эквивалентности трехмерного уравнения эйконала и других уравнений математической физики. Найдены и исследованы новые групповые преобразования для гидродинамических уравнений Эйлера – группа преобразований эквивалентности для стационарных движений идеальной жидкости, определяемых потенциальной функцией.

Полученные результаты имеют ярко выраженный междисциплинарный характер, поскольку в данном направлении взаимодействуют и проникают друг в друга различные направления математики (дифференциальная геометрия, векторный анализ и групповой анализ в рамках теории групп Ли), математической физики и геофизики (сейсмика, геометрическая оптика, гидродинамика).

Создано научно-исследовательское параллельное программное обеспечение для моделирования реалистичных моделей карбонатных резервуаров с коридорами трещиноватости на основе сеток с локальным измельчением по пространству и по времени. Изучение проявлений коридоров трещиноватости в сейсмических волновых полях выполнено на

тестовой цифровой трехмерной модели Юрубчено-Тахомского нефтяного месторождения в Восточной Сибири. В эту модель была внедрена система трещин – коридоров трещиноватости, построенная на основе статистического анализа. Были изучены особенности формирования рассеянных волновых полей для флюидозаполненных и минерализованных трещин.

Создан комплекс программ, позволяющий решать коэффициентные двумерные обратные задачи для гиперболических уравнений.

Создан метод восстановления сейсмических параметров среды на основе метода Гельфанда – Левитана.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 16-31-00382 мол-а** "Разработка численных алгоритмов решения прямых и обратных задач в биологии и медицине".

Руководитель – Воронов Д. А.

Разработан численный алгоритм решения обратных задач для линейных систем дифференциальных уравнений в фармакокинетике. Получен явный вид градиента для такого класса задач. Данный подход реализован в качестве удобного программного приложения. В программе предусмотрены следующие функции: задание точности решения и временного интервала; возможность фиксации фармакокинетических параметров и ограничения определяемых параметров интервалом допустимых значений; задание правых частей системы в виде экспонент, что соответствует фармакокинетическим задачам. Приведен обзор принципов построения физиологически обоснованных фармакокинетических моделей, более точно отвечающих физиологической и анатомической структуре организма. Разработан итерационный алгоритм решения обратных задач для физиологически обоснованных фармакокинетических моделей без использования явного вида градиента функционала, основанный на линеаризации, дискретизации и решении СЛАУ. Применено сингулярное разложение, показывающее степень некорректности конкретной задачи. Проведенный сравнительный анализ разработанных алгоритмов показал, что в случае наличия априорной информации о процессе метод, основанный на линеаризации, сходится за небольшое число итераций (10–50 итераций в зависимости от постановки задачи), в то время как градиентный метод сходится значительно медленней (2000–10000 итераций). Решена обратная задача для фармакокинетической модели секреции и кинетики С-пептида, а также одного радиофармацевтического соединения для печеночной функции. Показано, что использование достоверной информации о характере ошибки прибора улучшает качество оценки фармакокинетических параметров. Для каждой рассмотренной постановки задачи (более десяти постановок) было проведено свыше 100 экспериментов для определения оптимального алгоритма определения фармакокинетических параметров.

**Проект РФФИ № 15-01-09230** "Построение и исследование аналогов уравнений И. М. Гельфанда, Б. М. Левитана, М. Г. Крейна и численных методов их решения в применении к многомерным обратным задачам акустики, электродинамики и теории упругости".

Руководитель – чл.-корр. РАН Кабанихин С. И.

Разработаны и исследованы суперкомпьютерные алгоритмы распределенного численного статистического моделирования для параметрического анализа вероятностных моделей с целью решения задач акустики. Исследована гидродинамическая вычислительная модель тканей человека в формулировке решения прямой и обратной (сопряженной) задачи

поиска инородных включений; создан программный код для исследования тканей человека на предмет инородных включений; выполнено исследование уравнения состояния и механизма распространения волн в гидродинамической среде с инородными включениями.

Разработаны и перенесены на параллельные архитектуры алгоритмы численного решения совмещенной обратной задачи для нелинейных уравнений мелкой воды по измерениям отклонения водной поверхности от состояния покоя в конечном числе точек и в фиксированный момент времени с учетом параметров землетрясения, породившего волну цунами, и введением случайных ошибок в измерения.

Полученные алгоритмы будут адаптированы к условиям, близким к реальным, а именно: для реального рельефа дна и историческим измерениям цунами будут получены формы и местоположения источников возмущений, рассчитаны карты затоплений прибрежных регионов от возможного цунами. На основе проекционного метода построен численный метод решения задачи определения скорости и плотности акустической среды в цилиндрической и сферической системах координат. Получены новые аналоги уравнений Гельфанда – Левитана – Крейна для задач определения параметров Ламе (модули упругости) и плотности изотропной упругой среды, зависящих от всех трех пространственных переменных. Построены и обоснованы численные алгоритмы решения аналогов уравнений Гельфанда – Левитана – Крейна для многомерных обратных задач акустики, электродинамики и теории упругости. Разработанные алгоритмы апробированы на примере обратных задач акустической томографии, подповерхностной радиолокации и других приложений обратных задач для волновых процессов. Реализованы численные методы параллельного решения прямых и обратных задач для уравнений акустики, электродинамики и теории упругости.

**Проект РФФИ № 16-29-15120 офи\_м "Разработка алгоритмического и программного обеспечения многомасштабного моделирования месторождений углеводородов с использованием суперкомпьютеров".**

Руководитель – чл.-корр. РАН Кабанихин С. И.

Важным научным результатом стало создание вычислительной модели решения уравнений гидродинамики и теории упругости для описания геологических течений. Построенная модель является значимым результатом для вычислительной математики, математического моделирования, вычислительной гидродинамики, геологии, информатики. Разработаны численные методы решения одномерных задач газовой динамики на основе подвижных сеток, реализованных за счет перехода в лагранжевы координаты для плоского и сферически симметричного случаев на основе метода Годунова. Решены соответствующие задачи Римана и разработаны разностные схемы для обоих случаев. Проведены численные эксперименты для тестовой задачи при помощи разработанного программного обеспечения. Аналогичный подход к построению подвижных сеток может также применяться при решении задач гидродинамики и упругости. Разработан способ дополнения паспорта прочности параметрами дисперсии свойств за счет новой методики моделирования, использующей экспериментальные данные о структуре ядра, а также данные из различных видов скважинного каротажа. Данная методика позволяет учитывать влияние трещин различных масштабов на упруго-прочностные свойства исследуемого образца.

Разработана методика применения подвижных сеток к задаче об одномерном/двумерном течении жидкости в тонкой плоской щели (трещина ГРП). Данная методика реализовывалась при моделировании процесса ГРП, а именно hammer-эффекта. В такой постановке течение жидкости можно описать уравнением Бюргерса. Важно отметить, что при решении

задачи ГРП в нашей постановке, задача об одномерной/двумерной фильтрации решалась совместно. Перестроение сетки (ПС) происходило на фронте течения, где присутствовали большие перепады давления/концентрации, таким образом, что плотность узлов расчетной сетки возрастала в области больших градиентов и, соответственно, разрежалась в области с небольшими градиентами решения так, чтобы общее число узлов оставалось неизменным.

Решение при помощи ПС сравнивалось с решением в коммерческом пакете tNavigator, расчеты на модельных задачах ускорились в 2–3 раза. Для сингулярно возмущенного уравнения Бюргера созданы и алгоритмически реализованы подвижные сетки, учитывающие внутренние фронты реакции. Разработанные алгоритмы позволили реализовать сетки, не зависящие от возмущения. Доказано, что линеаризованная постановка коэффициентной обратной задачи является неустойчивой.

Исследованы дискретные аналоги одно- и двумерных линейных обратных задач порупругости определения граничных условий по измерениям, сделанным внутри скважин. Методом сингулярного разложения исследована степень некорректности задачи и предложен регуляризирующий алгоритм, связывающий число сингулярных чисел с уровнем ошибки в данных. Полученные результаты чрезвычайно важны для развития междисциплинарных направлений геофизики, математики и программирования. По сути, коммерческие пакеты программ для таких задач устарели в методическом плане и функциональных возможностях, не используют современные достижения в области математического аппарата и практически не используют возможности высокопроизводительных вычислительных систем. Разрабатываемые участниками проекта алгоритмы и программное обеспечение могут быть в последующем внедрены в геофизическую отрасль.

**Проект РФФИ № 17-51-540004 Вьет\_а** "Обоснование существующих и разработка новых численных методов решения обратных и некорректных задач для эллиптических и параболических уравнений".

Руководитель – чл.-корр. РАН Кабанихин С. И.

Разработан алгоритм численного решения задач определения источников для параболических уравнений и систем с данными в дискретном наборе точек внутри рассматриваемой области.

Разработан метод численного решения определения коэффициентов для параболических уравнений.

**Проект РФФИ № 16-01-00729** "Математическое моделирование фильтрации минерализованных растворов в вязкоупругих средах".

Руководитель – д.ф.-м.н. Имомназаров Х. Х.

В рамках проекта за отчетный период получены следующие результаты. Разработаны алгоритмы и методы для получения общего решения одного частного случая плоской задачи для системы уравнений Монжа – Ампера на основе метода обобщенного разделения переменных. Исследованы групповые свойства одномерной системы уравнений двухжидкостных сред с равновесием фаз по давлению. Разработаны алгоритмы и созданы на их основе программы для численного решения уравнений насыщенных минерализованной жидкостью пористых сред без учета касательных напряжений. Установлены соотношения деформации – напряжений с учетом порового давления и химических потенциалов в модели движения минерализованной жидкости в пористой среде. Проведены серии численных расчетов прямой двумерной задачи для линейной системы уравнений порупругости с различными источниками возбуждения (вертикальная, горизонтальная сила, центр давления).

**Проект РФФИ № 17-01-20243 Г** Проект организации Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика – 2017".

Руководитель – чл.-корр. РАН Кабанихин С. И.

В рамках конференции по вычислительной и прикладной математике состоялось 36 пленарных докладов, охватывавших все научные направления конференции. В рамках конференции состоялся круглый стол по теме "Супервычисления и прорывные технологии". В работе круглого стола приняли участие заместитель председателя СО РАН акад. В. М. Фомин, чл.-корр. РАН В. Н. Лыкосов, д.ф.-м.н. В. В. Пененко, чл.-корр. РАН В. В. Шайдуров, проректор НГУ проф. С. К. Голушко, д.ф.-м.н. С. В. Головин, замдиректора компании "UniPro" Ю. Э. Данилова, чл.-корр. РАН Ю. В. Васильевский, чл.-корр. РАН С. И. Кабанихин, Советник председателя СОРАН д.ф.-м.н. Г. А. Сапожников и др. Участники круглого стола обсудили широкий круг проблем, при решении которых использовались прорывные технологии математического моделирования.

Тематика обратных и некорректных задач традиционно достаточно широка, в связи с чем была проведена школа для молодых ученых по обратным и некорректным задачам. Различные аспекты решения обратных и некорректных задач были изложены в пленарных докладах Филатова В. В., Савчука А. М., Бандман О. Л., Марчука А. Г., Каргина Б. А. и Карчевского А. Л. В последующие дни состоялись доклады молодых ученых. Тематика докладов: математические вопросы устойчивости и аппроксимации численных методов решения обратных и некорректных задач, прикладные проблемы медицины, наук о Земле, задач освоения Арктики.

На российско-китайском семинаре состоялось 23 доклада.

**Проект РФФИ № 16-31-00189 мол-а** "Развитие параллельных алгоритмов численного решения прямых и обратных задач распространения волн в системе гидросфера – литосфера".

Руководитель – к.ф.-м.н. Криворотько О. И.

Сформулирован и разработан алгоритм и численно исследована задача распространения длинных волн для нелинейных уравнений мелкой воды в глубокой воде и на побережье (задача наката волн на берег). Численно исследована устойчивость решения линейризованной совмещенной обратной задачи, показано, что оператор совмещенной обратной задачи является компактным, и совмещение данных увеличивает устойчивость решения обратной задачи. Разработан численный оптимизационный алгоритм решения совмещенной обратной задачи для уравнений мелкой воды по измерениям отклонения водной поверхности от состояния покоя в конечном числе точек и в фиксированный момент времени. Основу алгоритма составляет метод сопряженных градиентов. К некорректной обратной задаче применена итерационная регуляризация, сглаживающие фильтры волнового решения, оптимизация и регуляризация оператора посредством ограничения спектра. Разработан эффективный численный алгоритм определения амплитуды переднего фронта волны как альтернативный вариант мгновенного определения амплитуды источника возмущений. Алгоритмы численного решения прямой и сопряженных задач перенесены на параллельные архитектуры, что значительно ускорило их работу.

**Проект РФФИ № 16-01-00755** "Разработка численных методов продолжения решений с части границы уравнений математической физики".

Руководитель – к.ф.-м.н. Шишленин М. А.

Изложены результаты работы за 2017 г.:

- получена оценка сильной сходимости итерационного процесса для решения задачи продолжения для общего эллиптического уравнения с данными на части границы и оценка условной устойчивости;
- разработаны численные методы решения задачи продолжения теплового поля с части границы и проведен сравнительный анализ разработанных численных методов;
- разработан проекционный метод решения задачи продолжения для уравнения упругости в предположении линейной зависимости скоростей;
- разработанные алгоритмы апробированы на гибридных суперЭВМ.

## Публикации

### Монографии

1. Аксенов В. В., Шорников Ю. В. Расчет индукционных датчиков. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. 172 с.
2. Бердышев А. С., Имомназаров Х. Х. Прямые и обратные задачи для системы уравнений теории двухскоростного континуума. Алматы, 2017. 153 с.
3. Имомназаров Х. Х., Холмуродов А. Э. Моделирование и исследование прямых и обратных динамических задач пороупругости. Ташкент: Изд-во Нац. ун-та Узбекистана, 2017. 120 с.

### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Вишневский Д. М., Колюхин Д. Р., Лисица В. В., Протасов М. И., Решетова Г. В., Чеверда В. А., Ку Д., Тверангер Я. Корреляционный анализ статистической фациальной модели разломной зоны // Доклады РАН. 2017. Т. 473. № 6. С. 719–723. DOI: 10.7868/S0869565217120209.
2. Урев М. В., Имомназаров Х. Х., Жиан-Ган Тан. Краевая задача для одной переопределенной стационарной системы, возникающей в двухскоростной гидродинамике // СибЖВМ. 2017. Т. 20, №. 4. С. 425–437. DOI: 10.15372/SJNM20170406.
3. Aksenov V. V. Adaptation of Maxwell–Parker–Moffat electrodynamics to electromagnetic fields observed in the Earth's atmosphere // Russ. Phys. J. 2017. Vol. 60, N 3. P. 389–398. DOI: 10.1007/s11182-017-1088-5.
4. Kaldybekova B. K., Reshetova G. V. A numerical solution of the membrane eigenproblem by the model order reduction // Sib. electronic mathem. rep. 2017. Vol. 14. P. 1088–1099. DOI: 10.17377/semi.2017.14.092.
5. Kolyukhin D. R., Lisitsa V. V., Protasov M. I., Qu D., Reshetova G. V., Tveranger J., Tcheverda V. A., Vishnevsky D. M. Seismic imaging and statistical analysis of fault facies models // Interpretation. 2017. T. 5. N 4. P. 1–47. DOI: 10.1190/INT-2016-0202.1.
6. Bazaikin Y., Gurevich B., Iglauer S., Khachkova T., Kolyukhin D., Lebedev M., Lisitsa V., Reshetova G. Effect of CT image size and resolution on the accuracy of rock property estimates // J. of Geophys. Research: Solid Earth. 2017. T. 122. N 5. P. 3635–3647. DOI: 10.1002/2016JB013575.
7. Kostin V., Lisitsa V., Reshetova G., Tcheverda V. Parallel algorithm with modulus structure for simulation of seismic wave propagation in 3D multiscale multiphysics media // Proc. of the 14th Intern. conf. "Parallel comput. technol" (PaCT 2017), Nizhny Novgorod, Sept. 4–8, 2017. [Lecture Notes in Computer Science. V. 10421]. 2017. P. 42–57. [Electron. resource]. <http://ssd.ssc.ru/conference/pact2017/proceedings>. DOI: 10.1007/978-3-319-62932-2\_4.

8. Vasiliev G., Imomnazarov Kh., Kalimoldayev M., Mamasoliyev B. J. Cauchy problem for system of the Burgers equations arising in the two-velocity hydrodynamics // *Math. Model. Nat. Phenom.* 2017. Vol. 12, N 3. P. 134–138. DOI: 10.1051/mmnp/201712313.
9. Voskoboynikova G., Imomnazarov Kh., Mikhailov A., Tang J.-G. Influence of snow cover on the seismic waves propagation // *Lect. Notes in Comput. Sci. including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics. The Proceedings in Springer-V.* Vol. 10187. 2017. P. 697–703. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0\_84.
10. Podkolodnaya O. A., Tverdokhlebl N. N., Podkolodnyy N. L. Computational modeling of the cellautonomous mammalian circadian oscillator // *BMC Systems Biol.* 2017. 11 (Suppl. 1):18. DOI: 10.1186/s12918-016-0379-8.

### **Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus**

1. Аксенов В. В. Адаптация электродинамики Максвелла – Паркера – Моффата к электромагнитным полям, наблюдаемым в атмосфере Земли // *Изв. вузов. Сер.: Физика.* 2017. Т. 60. № 3. С. 11–18. DOI: 10.18411/sr-10-06-2018-01.
2. Aksenov V. V. Problems of Maxwell's equations in natural electromagnetic field // *Slovak Intern. Sci. J.* 2017. N 3. P. 76–80. DOI: 10.3103/5002713491506003X.
3. Aksenov V. V. About three of electrodynamics on the Earth and in Cosmos // *The Way of Science.* 2017. N 8. P. 65–71. DOI: 17212/2307-68-79-2016-1-69-75.
4. Belonosov A., Shishlenin M. Regularization methods of the continuation problem for the parabolic equation // *Lect. Notes in Comp. Sci.* 2017. V. 10187. LNCS. P. 220–226. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0\_22.
5. Galaktionova A., Belonosov A. Computation of seismic wave field kinematics in a three-dimensional heterogeneous isotropic medium // *AIP conf. proc.* 2017. Vol. 1895, iss. 1, 120004. DOI: 10.1063/1.5007421 .
6. Tcheverda V., Kostin V., Reshetova G., Lisitsa V. Simulation of seismic waves propagation in multiscale media: Impact of cavernous/fractured reservoirs // *Commun. in comput. and inform. sci.* 2017. Vol. 793. P. 183–193. DOI: 10.1007/978-3-319-71255-0\_14.
7. Vazhenin A. P. The software using digital databases and GIS interface for detecting geodynamic structures // *Proc. of the Intern. conf. on new trends in intelligent software methodologies, tools and techniques.* IOS Press, 2017. P. 576–592. DOI: 10.3233/978-1-61499-800-6-576.
8. Podkolodnyy N. L., Tverdokhlebl N. N., Podkolodnaya O. A. Analysis of circadian rhythm of biological processes in mouse liver and kidney // *Вавиловский журн. генетики и селекции.* 2017. Т. 21. Вып. 8. DOI: 10.18699/VJ17.311 .
9. Bibik A., Gadylyshin K., Khachkova T., Kolesov V., Kolyukhin D., Lisitsa V. V., Merzlikina A., Pozdnyakov V., Protasov M., Reshetova G., Shilikov V., Tcheverda V. Detection of highly cavernous sub-seismic zones in carbonate reservoirs by scattered waves // *Ext. abst. of the 79th EAGE conference and exhibition 2017.* P. 1–4. DOI: 10.3997/2214-4609.201701245.
10. Protasov M., Tcheverda V., Lisitsa V., Gadylyshin K., Kolyukhin D., Khachkova T., Reshetova G., Bibik A., Kolesov V., Merzlikina A., Shilikov V. Detection of highly cavernous subseismic zones in carbonate reservoirs by scattered waves // *Ext. abst. of SEG Intern. Exposition and 87th Annual Meeting, Houston (USA), Sept. 24–29, 2017.* P.1001–1005. DOI: <https://doi.org/10.1190/segam2017-17589769.1>
11. Lisitsa V., Bazaikin Y., Khachkova T., Kolyukhin D., Reshetova G., Gurevich B., Lebedev M. A two-scale geostatistical approach for elastic properties estimation // *Ibid.* P. 3706–3710. DOI: <https://doi.org/10.1190/segam2017-17762866.1>.

**Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Протасов М. И., Чеверда В. А., Решетова Г. В. Построение трехмерных дифракционных сейсмических изображений по данным 3D-сейморазведки на основе асимметричного суммирования и спектральной фильтрации // Геофизика. 2017. № 2. С. 14–21.

2. Гадыльшин К. Г., Колюхин Д. Р., Лисица В. В., Протасов М. И., Решетова Г. В., Хачкова Т. С., Чеверда В. А., Козяев А. А., Колесов В. А., Мерзликина А. С., Шиликов В. В. Оценка возможности выделения тонких кавернозных прослоев по рассеянным волнам в трещиноватом разрезе Юрубчено-Тохомского месторождения // Технологии сейморазведки. 2017. № 1. С. 56–62.

3. Решетова Г. В., Хачкова Т. С. Численный метод оценки эффективных упругих характеристик горной породы по двумерным и трехмерным цифровым изображениям керна // Вычислительные методы и программирование. 2017. Т. 18. С. 416–433.

4. Имомназаров Х. Х., Имомназаров Ш. Х. Об одной начально-краевой задаче для уравнений двухскоростной гидродинамики // 11-й Междунар. науч. конгр. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017", Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. Т. 1. С. 196–200.

5. Имомназаров Х. Х., Михайлов А. А. Численное моделирование двумерных динамических задач насыщенных минерализованной жидкостью пористых сред // Там же. С. 181–185.

6. Имомназаров Х. Х. Система уравнений Монжа-Ампера возникающая в двухжидкостной среде // Там же. С. 176–180.

7. Имомназаров Х. Х. Об одном методе исследований течений несжимаемых вязких жидкостей // Там же. С. 191–195.

8. Имомназаров Х. Х., Черных Е. Г. Фундаментальное решение стационарной системы уравнений двухскоростной гидродинамики с равновесием фаз по давлению // Там же. С. 171–175.

9. Урев М. В., Имомназаров Х. Х. Краевая задача для одной переопределенной стационарной системы, возникающей в двухжидкостной среде // Труды Междунар. конф. "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВММ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. С. 176–177.

10. Имомназаров Х. Х., Урев М. В. Краевая задача для одной переопределенной стационарной системы, возникающей в двухжидкостной среде // Там же. С. 336–342

11. Михеева А. В. Изучение глобальных геотектонических структур в среде GIS-ENDDDB по данным сейсмичности и томографии // Материалы 12-й Междунар. сейсмол. школы "Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных, Обнинск. С. 227–231.

12. Михеева А. В. Экспертная система GIS-ENDDDB и задачи исследования глубинной тектоники // Сб. докладов 13-й Междунар. науч.-практ. конф. "Новые идеи в науках о Земле", Москва. М.: МГРИ-РГГРУ, 2017. Т. 1. С. 12–13.

13. Перепечко Ю. В., Михеева А. В., Сорокин К. Э., Шарапов В. Н. Динамика конвективного теплопереноса в проницаемых частях сейсмофокальных зон Камчатского региона и сопряженных вулканических дуг // Там же. С. 14–15.

14. Протасов М. И., Неклюдов Д. А., Хайдуков В. Г., Чеверда В. А., Ланда Е. И., Решетова Г. В. Повышение отношения сигнал/помеха сейсмических данных в транзитных зонах при наличии ледового покрова // Материалы науч.-практ. конф. "Сейсмические технологии-2017". С. 97–101.

15. Чеверда В. А., Гадыльшин К. Г., Колюхин Д. Р., Лисица В. В., Протасов М. И., Хачкова Т. С., Решетова Г. В., Колесов В. А., Мерзликина А. С., Шиликов В. В. Оценка воз-

возможности выделения тонких кавернозных прослоев по рассеянным волнам в трещиноватом разрезе Юрубчено-Тохомского месторождения // *Материалы науч.-практ. конф. "Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение"* 2017. С. 12–17.

16. Хачкова Т. С., Базайкин Я. В., Колюхин Д. Р., Костин В. И., Лисица В. В., Решетова Г. В. Двухмасштабный численный метод оценки упругих свойств горной породы по цифровым изображениям керна // *Сб. материалов 13-й Междунар. науч. конгр. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017"*, Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. Т. 4. С. 118–122.

17. Чеверда В. А., Гадильшин К. Г., Колюхин Д. Р., Лисица В. В., Протасов М. И., Хачкова Т. С., Решетова Г. В., Колесов В. А., Мерзликина А. С., Шиликов В. В. Оценка возможности выделения тонких кавернозных прослоев по рассеянным волнам в трещиноватом разрезе Юрубчено-Тохомского месторождения // *Материалы 7-й науч.-практ. конф. "Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение"*, Москва, 16–17 февр. 2017 г. С. 12–17.

18. Imomnazarov Kh. Kh., Imomnazarov Sh. Kh., Mamatqulov M. M. Non-existence of the global solution of initial boundary value problem for the incompressible two-velocity medium equation // *Bull. NCC. Ser.: Num. Model. in Atmosph. etc.* 2017. N 16. P. 13–19.

19. Imomnazarov B., Imomnazarov Kh. On a problem for a one-dimensional non-local rock destruction system // *Bull. NCC. Ser.: Math. Model. in Geoph.* 2017. N 20. P.

20. Imomnazarov B., Imomnazarov Kh. Poroelasticity theory of chemically active clay shales // *Ibid.* P.

21. Hazivaliev F. R., Chetverova O. P., Mikheeva A. V. The new cosmogenic structures on the Russia and Central Asia territories // *Ibid.* P.

22. Mikheeva A. V. The Central and South-East Asian geodynamic structures manifested in the seismicity and tomography data // *Ibid.* P.

23. Перепечко Ю. В., Михеева А. В., Сорокин К. С., Чудненко К. В., Шарапов В. Н. Динамика теплообмена над магматическими очагами в проницаемых областях сейсмофокальной зоны Курило-Камчатского региона при реализации растяжения и компактирования гетерофазных сред // *Сб. материалов совещания, приуроченного к 60-летию Института геологии и геофизики СО РАН "Геология и минерагения Северной Евразии"*. 2017. С. 182–183.

### Прочие публикации

1. Имомназаров Х.Х., Михайлов А.А., Холмурадов А.Э. Об одном эффективном методе численного решения динамической задачи пороупругости // *Abst. of the Republic scientific conference with participation foreign scientists Modern Problems of Dynamical Systems and Their Applications*, May 1 – 3, 2017, Tashkent, pp. 323-325.

2. Имомназаров Б., Имомназаров Х. Об одной задаче для одномерной нелокальной системы, возникающей при разрушении горных пород // *Proc. of the Uzbek-Israel International conference "Contemporary problems in Mathematics and Physics"*, October 6–10, 2017, Tashkent, pp. 167-169.

3. Имомназаров Х.Х., Туйчиева С.Т. Обратная динамическая задача для системы пороупругости // *Proc. of the Uzbek-Israel International Conference "Contemporary problems in Mathematics and Physics"*, October 6–10, 2017, Tashkent, pp. 173-175.

4. Galaktionova, A. Belonosov. Computation of seismic wave field kinematics in a three-dimensional heterogeneous isotropic medium // *Ninth Conference of the Euro-American*

Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Albena, Bulgaria, June 21-26, 2017.

### Свидетельства о регистрации программ

1. Акт о внедрении программно-аналитического комплекса GIS-EEDB в ГИН РАН // ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Геологический институт Российской академии наук, 11 января 2017 г.

2. Регистрационный номер PR17010. Моделирование сейсмических волн в пористой среде (МОДСВИПС) / А. А. Михайлов, Х. Х. Имомназаров. Фонд АП СО РАН. Зарегистрир. 15.11.2017.

### Участие в конференциях и совещаниях

1. Международная конференция "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017) в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 6 докладов (Аксенов В. В., Имомназаров Х. Х., Михайлов А. А., Меграбов А. Г., Решетова Г. В., Урев М. В.).

2. Международная конференция "Математика в современном мире", 14–19 августа 2017 г. – 4 доклада (Аксенов В. В.; Меграбов А. Г., Решетова Г. В., Урев М. В., Имомназаров Х. Х.).

3. Всероссийская конференция с международным участием "Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва", посвященная 60-летию Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, 4–8 сентября 2017 г. – 1 доклад (Меграбов А. Г.).

4. 11-й Междунар. науч. конгр. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017", Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г. – 6 докладов (Имомназаров Х. Х., Михайлов А. А., Решетова Г. В.).

5. 12th International forum on strategic technology (IFOST-2017), Ulsan (S. Korea) – 1 доклад (Khairtdinov M. S., Voskoboynikova G. M., Imomnazarov Kh.Kh., Mikhailov A.A.).

6. 13-я Международная научно-практическая конференция "Новые идеи в науках о Земле", Москва, 5–7 апреля 2017 г. – 4 доклада (Имомназаров Х. Х., Михайлов А. А., Михеева А. В.).

7. 12-я Международная сейсмологическая школа, Алматы (Казахстан), 11–17 сентября 2017 г. – 1 доклад (Михеева А. В.).

8. The Republic scientific conference with participation foreign scientists "Modern problems of dynamical systems and their applications", May 1–3, 2017, Tashkent – 2 доклада (Имомназаров Х. Х., Михайлов А. А.).

9. 16th International conference on intelligent software methodologies, tools and techniques (SOMET 2017), Kitakyushu (Japan), 26–28 сентября 2017 г. – 1 доклад (Важенин А. П.).

10. Joint scientific assembly of the International Association of Geodesy (IAG) and International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI), Kobe (Japan), July 30 – August 4, 2017 – 1 доклад (Решетова Г. В.).

11. Conference of computational modelling of multi-uncertainty and multi-scale problems (COMUS2017), Porto (Portugal), September 12–14, 2017 – 1 доклад (Решетова Г. В.).

12. 14th International conference on parallel computing technologies, Nizhni Novgorod, September 4–8, 2017 – 1 доклад (Решетова Г. В.).

13. 79th EAGE conference and exhibition 2017, Paris (France), 12–15 June, 2017, – 1 доклад (Решетова Г. В.).

14. SEG International Exposition and 87th Annual Meeting, Houston (USA), 24–29 September – 2 доклада (Решетова Г. В.).
15. 22nd International conference mathematical modelling and analysis (MMA2017), Druskininkai (Lithuania), May 30 – June 2, 2017 – 1 доклад (Решетова Г. В.).
16. The 5th Russian-chinese workshop on numerical mathematics and scientific computing within the "Marchuk scientific readings", Novosibirsk, June 29–30, 2017 – 1 доклад (Решетова Г. В.).
17. Научно-практическая конференция "Сейсмические технологии – 2017", Москва, 17–20 апреля 2017 г. – 1 доклад (Решетова Г. В.).
18. 7-я Научно-практическая конференция "Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение", Москва, 16–17 февраля 2017 г. – 1 доклад (Решетова Г. В.).
19. 8-я Международная конференция по математическому моделированию, Якутск, 4–8 июля 2017 г. – 4 доклада (Имомназаров Х. Х., Михайлов А. А.).
20. The 2nd USA-Uzbekistan conference on analysis and mathematical physics, Urgench, August 8–12, 2017 – 4 доклада (Имомназаров Х. Х.).
21. The Uzbek-Israel international conference "Contemporary problems in mathematics and physics", October 6–10, 2017 – 4 доклада (Имомназаров Х. Х.).
22. The Republican scientific conference "Actual problems of differential equations and their applications", Tashkent, December 15–17, 2017 – 3 доклада (Имомназаров Ш. Х., Имомназаров Х. Х., Михайлов А. А.).
23. 9th Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Albena (Bulgaria), June 21–26, 2017 – 1 доклад (Белоносов А. С.).

### Участие в оргкомитетах конференций

1. Имомназаров Х. Х.:
  - член программного комитета "The Republican scientific confer. "Actual problems of differential equations and their applications"", Tashkent, December 15–17, 2017;
  - член оргкомитета 9-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.
2. Кабанихин С. И.:
  - председатель программного комитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017) в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.;
  - председатель программного комитета 9-й молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач".
3. Шишленин М. А.:
  - председатель оргкомитета. Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017) в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.;
  - сопредседатель оргкомитета 9-й Молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач",

### Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 10  
 Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 12  
 Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 45  
 Докладов на конференциях – 48, в том числе 6 пленарный.  
 Участников оргкомитетов конференций – 7

### Кадровый состав

1. Имомназаров Х. Х. и.о. зав. лаб. д.ф.-м.н.
  2. Аксенов В. В. г.н.с. д.ф.-м.н.
  3. Кабанихин С. И. г.н.с. 0,1 ст. чл.-корр. РАН
  4. Меграбов А. Г. в.н.с. д.ф.-м.н.
  5. Решетова Г. В. в.н.с. д.ф.-м.н.
  6. Белоносов А. С. с.н.с. к.ф.-м.н.
  7. Белоносова А. В. с.н.с. 0,75 ст. к.ф.-м.н.
  8. Шишленин М. А. с.н.с. 0,5 ст. д.ф.-м.н.
  9. Михеева А. В. н.с. к.ф.-м.н.
  10. Криворотько О. И. м.н.с. 0,5 ст. к.ф.-м.н.
  11. Подколотный Н. Л. с.н.с.
  12. Виноградов С. П. н.с. 0,5 ст.
  13. Воронов Д. А. м.н.с. 0,5 ст.
  14. Новиков Н. С. м.н.с. 0,5 ст.
  15. Маринин И. В. ведущ. программист 0,1 ст.
  16. Юдина О. А. ведущ. инженер
  17. Шерстюгина Л. П. техник 1-й кат.
- Воронов Д. А., Криворотько О. И., Новиков Н. С. – молодые научные сотрудники.

### Педагогическая деятельность

- Аксенов В. В. – проф. СибУПК  
 Белоносов А. С. – доц. ММФ НГУ  
 Кабанихин С. И. – зав. кафедрой ММФ НГУ  
 Меграбов А. Г. – проф. НГТУ  
 Михеева А. В. – доцент ВКИ НГУ  
 Подколотный Н. Л. – старший преподаватель НГУ  
 Шишленин М. А. – старший преподаватель НГУ  
 Криворотько О. И. – старший преподаватель НГУ  
 Воронов Д. А. – старший преподаватель НГУ  
 Новиков Н. С. – старший преподаватель НГУ

### Руководство аспирантами

1. Ермоленко Д. В. – 1-й курс аспирантуры НГУ, руководители Криворотько О. И., Кабанихин С. И.;

### Руководство студентами

1. Латышенко В. А. – 2-й курс магистратуры НГУ, руководители Криворотько О. И., Кабанихин С. И.;

- 
2. Каштанова В. Н. – 2-й курс магистратуры НГУ, руководители Криворотько О. И.,  
Кабанихин С. И.;
3. Кондакова Е. А. – 1-й курс магистратуры НГУ, руководители Криворотько О. И.,  
Кабанихин С. И.;
4. Ли Цзиюй (Валя) – 1-й курс магистратуры НГУ, руководитель Криворотько О. И.
5. Белоног А. Ю. – 2-й курс магистратуры НГУ, руководители Кабанихин С. И.,  
Воронов Д. А.
6. Вострикова Е. И. – 2-й курс магистратуры НГУ, руководители Кабанихин С. И.,  
Воронов Д. А.;
7. Гродзь А. А. – 2-й курс магистратуры НГУ, руководители Кабанихин С. И.,  
Воронов Д. А.;
8. Чупрасова М. – 2-й курс магистратуры НГУ, руководитель Воронов Д. А.
9. Лифенко В. И. – 1-й курс магистратуры НГУ, руководители Кабанихин С. И.,  
Воронов Д. А.;
10. Галактионова А. А. – 2-й курс магистратуры НГУ, руководитель Белоносов А. С.
11. Москалева А. А. – 4-й курс бакалавриата НГУ, руководитель Белоносов А. С.

## Лаборатория численного моделирования сейсмических полей

Зав. лабораторией – д.ф.-м.н. Фатьянов А. Г.

### Важнейшие достижения

Получение устойчивого аналитического решения для волновых полей в шаре планетарных размеров. Уточнение современной модели строения Земли.

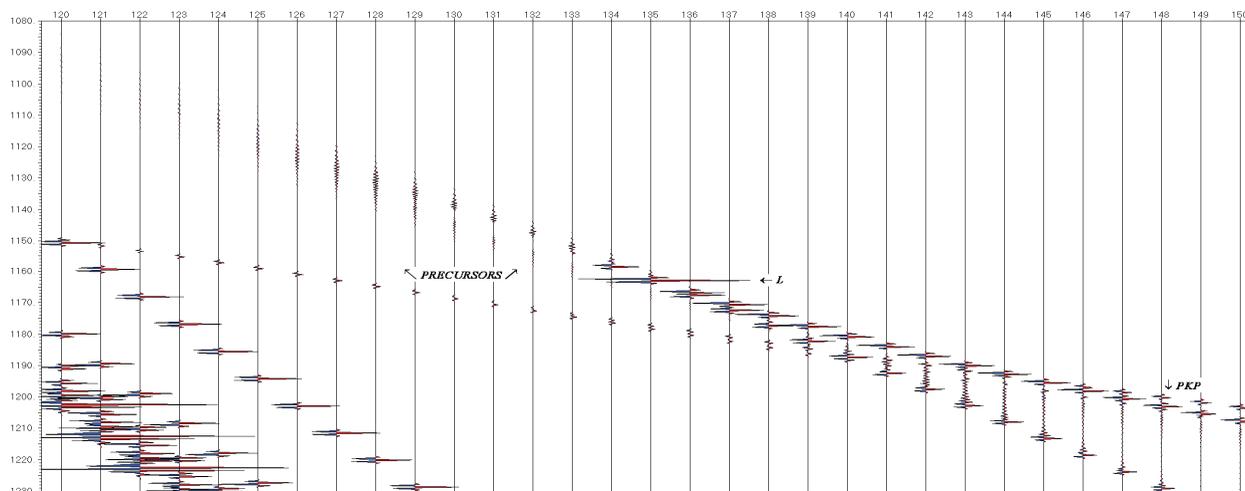


Рис.1. Волновое поле для радиально-симметричной сферической модели Земли. Эффект возникновения предшественников (precursors) перед первым вступлением РКР-волн.  
Буквой L (lens) отмечен эффект фокусировки низкоскоростного ядра (см. рис. 3)

С помощью полученного автором устойчивого аналитического решения обнаружено физическое явление: возникновение волн-предшественников впереди первого вступления РКР волн в рамках радиально-симметричной модели Земли АК135 (рис. 1). В настоящее время принято считать, что невозможно описать появление предшественников на реальных данных без введения в нижней мантии рассеивателей (рис. 2).

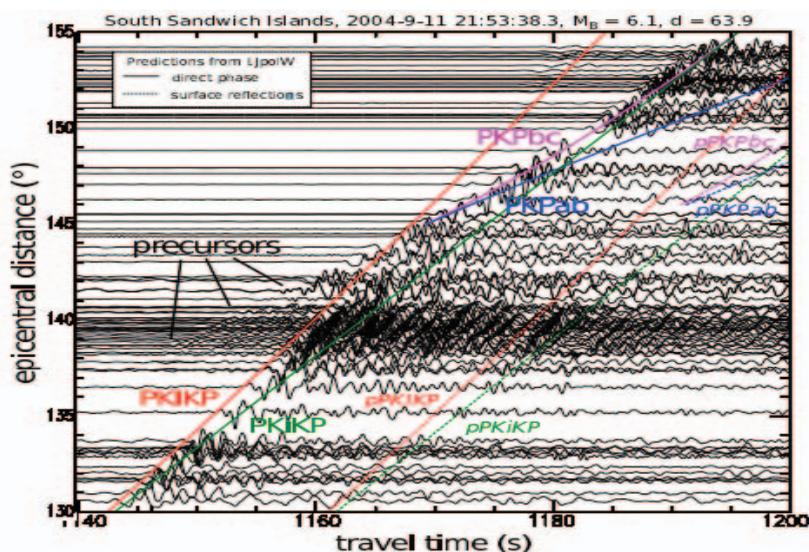


Рис. 2. Предшественники на реальных данных для Земли (precursors)

Д.ф.-м.н. Фатьянов А. Г.

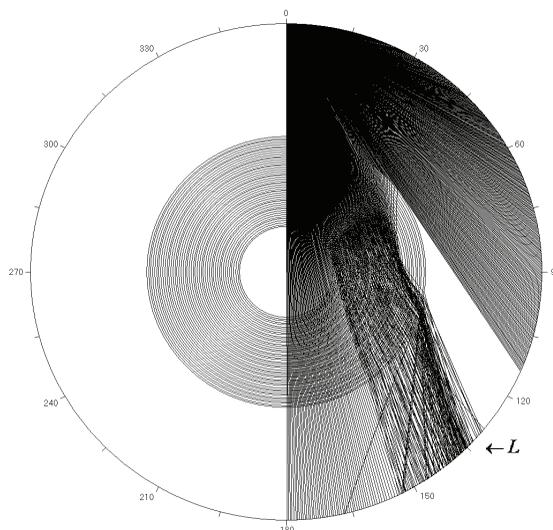


Рис. 3. Упрощенная радиально-симметричная модель Земли АК135 и лучевая картина

### Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2017 г. в соответствии с планом НИР института

**Проект № 0315-2016-0005** "Методы создания, исследования и идентификации математических моделей с помощью суперкомпьютеров".

Руководитель – чл.-корр РАН Кабанихин С. И.

Разработан аналитический метод моделирования в случае наличия в среде нарушений в виде вертикальных трещин. На этой основе создан аналитический алгоритм моделирования волновых полей в 2D упругой среде в случае наличия в среде кластера вертикально-ориентированных трещин. В рамках модели линейного скольжения Шоенберга рассмотрены флюидонасыщенные и минерализованные трещины. Усовершенствованы программы быстрых решений прямых двумерных задач (на GPU) бокового каротажного зондирования и высокочастотного изопараметрического зондирования, которые послужили основой для совместной численной инверсии данных индукционных и гальванических зондирований.

Разработаны алгоритмы для прямых трехмерных задач ВЭЗ, учитывающие рельеф местности, проведены тестовые расчеты. Для задач ВЭЗ проведены расчеты для моделей с присутствием газодобывающей скважины, пробуренной в условиях многолетнемерзлых грунтов с целью обоснования электрического мониторинга зон оттаивания в геокриологических условиях полуострова Ямал.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 15-07-06821** "Создание геоинформационной технологии исследования и верификации скоростных моделей земной коры с применением математического моделирования и методов активной сейсмологии".

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

Проведено сравнение расчетов вибросейсмических полей на 32- и 64-разрядных процессорах. Расчеты проводились на основе аналитического метода для обобщенной модели,

полученной по данным вибросейсмической экспедиции в Монголии. В результате моделирования выяснилось, что точность расчета для этой реальной задачи на ССКЦ (64 разряда) ниже, чем на персональном компьютере (32 разряда). Это объясняется неправильным представлением числа с двойной точностью (переменные в программе описаны с одинарной точностью): при переводе числа с простой точностью в число с двойной точностью в мантиссе на младших разрядах остается "шум". В процессе вычислений (особенно при их большом объеме) "шум" переходит на старшие разряды, что приводит к потере точности.

**Проект РФФИ № 17-57-45166 ИНД\_а** "Подход к обработке данных регистрации вибросейсмических волн и теоретического исследования сейсмических волн".

Руководитель – к.т.н. Знак В. И.

Проведены консультации по теоретическим вопросам относительно физики распространения сейсмических волн в сложно построенных средах.

**Проект РФФИ № 16-01-00729** "Математическое моделирование фильтрации минерализованных растворов в вязкоупругих средах".

Руководитель – д.ф.-м.н. Имомназаров Х. Х.

Разработан численный алгоритм решения динамической задачи распространения сейсмических волн в вязкоупругой и упругодеформируемой пористой среде, насыщенной вязкой жидкостью. Данный алгоритм адаптирован для проведения вычислений на многопроцессорных вычислительных комплексах. Получены результаты численных расчетов волнового поля для тестовой модели, состоящей из вязкоупругих и упругодеформируемых пористых слоев среды, насыщенной вязкой жидкостью.

### Результаты работ по проектам РФФ

**Проект РФФИ № 14-11-00485** "Высокопроизводительные методы и технологии моделирования электрофизических процессов и устройств".

Руководитель – д.ф.-м.н. Ильин В. П.

Разработаны алгоритмы решения эллиптических уравнений с сингулярной правой частью.

### Прочие гранты

**Грант Президента Российской Федерации МК-152.2017.5** "Разработка методов построения изображения земных недр на основе миграционных преобразований в задачах сейсмической разведки".

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

Предложен новый конечно-разностный алгоритм для решения параболического приближения волнового уравнения. Псевдодифференциальный оператор задачи предварительно аппроксимируется системой дифференциальных уравнений в частных производных. В противоположность существующим подходам, вместо преобразования Фурье по времени используется интегральное преобразование Лагерра, что позволяет после аппроксимации пространственных производных получить системы линейных алгебраических уравнений с лучшими вычислительными свойствами и сократить затраты на их решение. Высокая

точность расчетов достигается за счет использования разностных аппроксимаций повышенного порядка точности, построенных на основе метода сохранения дисперсионного соотношения и экстраполяции Ричардсона в направлении продолжения волнового поля. Для большинства существующих алгоритмов с целью сокращения времени счета применяется расщепление типа Марчука – Стренга для декомпозиции оператора задачи на сумму более простых операторов, однако, чтобы не увеличивать число вычислительных артефактов, в предлагаемом методе такой подход не используется. В итоге новый метод обладает большей устойчивостью, в том числе и для негладких скоростных моделей.

Вычислительные эксперименты подтвердили, что по сравнению со спектрально-разностным методом на основе Фурье-преобразования, новый алгоритм позволяет рассчитывать волновые поля с более высокой степенью точности и меньшим уровнем численных шумов и артефактов, в том числе и для негладких скоростных моделей. В рамках решения модельной задачи геофизики проведена постстек миграция для скоростных моделей типа Syncline and the Sigsbee2A. Показано, что по сравнению с известными методами Fourier Finite Difference и Phase-Shift Plus Interpolation полученные изображения содержат меньшее число шумов и значительно лучше сфокусированы. Существует распространенное мнение, что чисто разностные подходы не позволяют выполнять процедуру сейсмической миграции достаточно точно, однако представленные результаты опровергают это утверждение.

Для многопроцессорной реализации предлагается использовать параллельный алгоритм дихотомии для решения систем линейных алгебраических уравнений с блочно-трехдиагональными матрицами, что позволяет достичь линейной зависимости величины ускорения для широкого диапазона числа процессоров.

### **Результаты работ по научно-исследовательским программам, проектам Президиума РАН, ОМН РАН и Сибирского отделения РАН**

**Программа Президиума РАН № 15, проект 16.4 "Моделирование и экспериментальные исследования вулканических структур методами активной и пассивной сейсмологии".**

Координатор – акад. РАН Лавернов Н. П.

Руководитель – д.т.н. Глинский Б. М., исполнитель с.н.с. Мартынов В.Н.

Разработан параллельный алгоритм для численного моделирования распространения сейсмических волн, адаптированный к архитектуре гибридного кластера типа НКС-30T+GPU. В отличие от ранее разработанного алгоритма, основанного на решении задачи, сформулированной в терминах скоростей смещения и напряжений, новый алгоритм и программа основаны на постановке задачи в терминах смещений. Целью исследования является сравнение разработанных программ на основе обеих постановок по быстродействию, масштабируемости, объему используемой памяти. Проведенные эксперименты показали, что подход, основанный на расчете смещений, эффективнее и позволяет проводить расчеты для больших моделей 3D сред, запрашивая меньшее число свободных узлов.

На примере теоретической модели стратовулкана Эльбрус проведена серия численных экспериментов для исследования с помощью вибросейсмического мониторинга структуры магматических каналов с целью прогнозирования возможных извержений. Прогнозирование возможного извержения при вибросейсмическом мониторинге связывается с влиянием уровня жидкой фракции в выводящем канале вулкана на измеряемое волновое поле.

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

1. Михайлов И. В., Глинских В. Н., Никитенко М. Н., Суродина И. В. Совместная численная инверсия данных индукционных и гальванических зондирований в моделях геологических сред с осевой симметрией // Геология и Геофизика. 2017. № 6. С. 935–947. DOI: 10.15372/GiG20170609.

2. Урев М. В., Имомназаров Х. Х. Краевая задача для одной переопределенной стационарной системы, возникающей в двухскоростной гидродинамике // СибЖВМ. 2017. Т. 20, № 4. С. 425–437. DOI: 10.15372/SJNM20170406.

3. Terekhov A. V. The Laguerre finite difference one-way equation solver // Comput. Phys. Commun. 2017. Vol. 214. P. 71–82. DOI: 10.1016/j.cpc.2017.01.014.

4. Epov M. I., Kurochkina E. P., Soboleva O. N. Effective coefficients of quasi-steady Maxwell's equations with multi-scale isotropic log-stable conductivity // J. of Electromagn. Waves and Appl. 2017. Vol. 31. P. 850–866. DOI: 10.1080/09205071.2017.1319301.

5. Soboleva O. N. Modeling of propagation of antiplane acoustic waves in multiscale media with lognormal distribution of parameters // J. of Comput. Acoustics. 2017. Vol. 25. 1750007. DOI: 10.1142/S0218396X17500072.

**Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus**

1. Surodina I. The GPU solvers for high-frequency induction logging // Num. Analysis and Its Appl. 2016. Lecture Notes in Comput. Sci. Vol. 10187. P. 640–647. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0\_73.

2. Voskoboynikova G., Imomnazarov K., Mikhailov A., Tang J.-G. Influence of snow cover on the seismic waves propagation // Lecture Notes in Comput. Sci. (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). The Proc. in Springer-V. 10187. 2017. P. 697–703. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0\_84.

3. Glinskikh V., Dudaev A., Nechaev O., Surodina I. High-performance computing on GPUs for resistivity logging of oil and gas wells // Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS'17) "Proceedings of the 9th International Conference, Albena, Bulgaria, June 21–26, 2017, American Institute of Physics Conference Proceedings, Vol. 1895, Melville, New York, (668 pages), ISBN 978-0-7354-1579-9, ISSN 0094-243X. DOI: 10.1063/1.5007422.

4. Эпов М. И., Еремин В. Н., Никитенко М. Н., Петров А. Н., Суродина И. В., Михайлов И. В. Математическое и физическое моделирование сигналов электромагнитного зонда для изучения макроанизотропии осадочных отложений // Тезисы докл. 19-й Науч.-практ. конф. "Геомодель 2017", Геленджик, 2017. CD-ROM, Submission ID: 43809. Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=43809>. DOI: 10.3997/2214-4609.201702230.

5. Mikhailov A. A., Martynov V. N. Numerical modeling of the infrasonic and seismic waves propagation in the "Earth-Atmosphere" model with a curvilinear interface // AIP Conf. Proc. 1907, 030036 (2017). DOI: 10.1063/1.5012658.

6. Glinskiy B., Sapetina A., Martynov V., Weins D., Chernykh I. (B). The hybrid-cluster multilevel approach to solving the elastic wave propagation problem // Revised selected papers of the 11th Intern. conf. "Parallel Computational Technologies" (PCT 2017), Kazan, Apr. 3–7, 2017. P. 261–274. DOI: 10.1007/978-3-319-67035-5\_19.

**Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Сухорукова К. В., Никитенко М. Н., Нечаев О. В., Суродина И. В. Особенности количественной интерпретации данных электрического и электромагнитного каротажа // Сб. докл. 4-й Науч.-практ. конф. "Проблемы нефтегазового комплекса Западной Сибири и пути повышения его эффективности", Тюмень, 24–26 окт. 2016 г. Тюмень: Тюменский дом печати, 2017. С. 111–120.

2. Имомназаров Х. Х., Михайлов А. А. Численное моделирование двумерных динамических задач насыщенных минерализованной жидкостью пористых сред // Сб. материалов 11-й Междунар. науч. конф. "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология", Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. Т. 4, № 1. С. 181–185. Новосибирск: СГУГиТ, 2017.

3. Имомназаров Х. Х., Имомназаров Ш. Х. Об одной начально-краевой задаче для уравнений двухскоростной гидродинамики // Сб. материалов 11-й Междунар. науч. конф. "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология", Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. Т. 1. С. 196–200. Новосибирск: СГУГиТ, 2017.

4. Имомназаров Ш. Х., Доровский В. Н. Магнитозвуковые колебания в скважинных условиях, определяющие электрокинетические параметры пористой насыщенной среды // Сб. материалов 11-й Междунар. науч. конф. "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология", Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. Т. 1. С. 186–190. Новосибирск: СГУГиТ, 2017.

5. Соболева О. Н. Эффективные коэффициенты в задаче электромагнитного каротажа в многомасштабной среде с логарифмически-устойчивой проводимостью // Сб. материалов 11-й Междунар. науч. конф. "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология", Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. Т. 1. С. 205–209. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. .

6. Фатьянов А. Г. Регуляризация метода подавления кратных и однократных волн. Разработка программного обеспечения для обработки данных с редкой сетью наблюдений без потери точности // Материалы науч.-практ. конф. "Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение", Москва, 16–17 фев. 2017 г. С. 44–48.

7. Fatyanov A. G. The stable analytical modeling for the wave fields in the sphere // 8-я Междунар. конф. по математическому моделированию, Якутск, 2017. С. 114.

8. Imomnazarov Kh. Kh., Imomnazarov Sh. Kh., Mamatqulov M. M. Non-existence of the global solution of initial boundary value problem for the incompressible two-velocity medium equation // Bull. NCC. Ser.: Num. Model. in Atmosph. etc. 2017. N 16. P. 13–18.

9. Imomnazarov B., Imomnazarov Sh. The Bernoulli equation for an incompressible two-fluid medium at pressure phases equilibrium with constant saturation of phases // Bull. NCC. Ser.: Math. Modeling in Geophys. 2017. N 20. P. 9–13.

10. Ковалевский В. В., Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Фатьянов А. Г., Караваев Д. А. Применение геоинформационных технологий в вибросейсмических исследованиях // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2017. № 3(3). С. 50–57.

11. Суродина И. В. Алгоритмы численного прямого трёхмерного моделирования задач магниторазведки // Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПП'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 860–866.

12. Соболева О. Н. Эффективные коэффициенты для задачи распространения упругих волн в двухмерной фрактальной случайной среде // Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПМ'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 828–834.

13. Фатьянов А. Г. Устойчивое аналитическое решение для волновых полей в шаре произвольного размера // Там же. С. 930–935.

### Участие в конференциях и совещаниях

1. Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences (AMiTaNS'17)" Albena (Bulgaria), June 21–26, 2017 – 1 доклад (Суродин И. В.).

2. 19-я научно-практическая конференция "Геомодель 2017 - Вопросы геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа", Геленджик, 2017 – 1 доклад (Суродин И. В.).

3. Международная конференция "Математика в современном мире" посвященная 60-летию Ин-та математики им. С. Л. Соболева, Новосибирск, 14–19 августа 2017 г. – 3 доклада (Фатьянов А. Г., Соболева О. Н., Михайлов А. А.).

4. Международная конференция по вычислительной и прикладной математике (ВПМ'17) в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 8 докладов (Суродин И. В., Соболева О. Н., Мартынов В. Н., Фатьянов А. Г., Михайлов А. А., Терехов А. В., Имомназаров Ш. Х.).

5. 8-я Международная конференция по математическому моделированию, Якутск, 4–8 июля 2017 г. – 4 доклада (Фатьянов А. Г., Мартынов В. Н., Михайлов А. А., Имомназаров Ш. Х.).

6. The Republic scientific conference with participation foreign scientists "Modern Problems of Dynamical Systems and Their Applications", Tashkent, May 1–3, 2017 – 1 доклад (Имомназаров Ш. Х.).

7. 11-й Междунар. науч. конгр., Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г. – 6 докладов (Суродин И. В., Соболева О. Н., Фатьянов А. Г., Михайлов А. А., Имомназаров Ш. Х.).

8. Международная научная конференция "Актуальные проблемы чистой и прикладной математики", посвященной 100-летию со дня рождения академика Тайманова Асана Дабсовича Алматы, Казахстан, 22–25 августа 2017 г. – 1 доклад (Соболева О. Н.).

9. Научно-практическая конференция "Суперкомпьютерные технологии в нефтегазовой отрасли. Математические методы, программное и аппаратное обеспечение", Москва, 16–17 февраля 2017 г. – 1 доклад (Фатьянов А. Г.)

### Участие в оргкомитетах конференций

1. Чимаева Е. В. – член Оргкомитета Международной конференции по вычислительной и прикладной математике (ВПМ'17) в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 19–23 октября 2015 г.

### Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 5

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 11

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 24

Докладов на конференциях – 26, в том числе 1 пленарный.

Участников оргкомитетов конференций – 1.

**Кадровый состав**

- |                       |                        |           |
|-----------------------|------------------------|-----------|
| 1. Фатьянов А.Г.      | зав. лаб.              | д.ф.-м.н. |
| 2. Урев М. В..        | в.н.с.                 | д.ф.-м.н. |
| 3. Мартынов В.Н.      | с.н.с.                 |           |
| 4. Мاستрюков А.Ф.     | с.н.с.                 | к.ф.-м.н. |
| 5. Соболева О.Н.      | с.н.с.                 | д.ф.-м.н. |
| 6. Суродина И. В.     | с.н.с.                 | к.ф.-м.н. |
| 7. Михайлов А. А.     | н.с.                   | к.ф.-м.н. |
| 8. Терехов А.В.       | н.с.                   | к.ф.-м.н. |
| 9. Куликов А. И..     | ведущ. программист     |           |
| 10. Чимаева Е.В.      | ведущ. программист     |           |
| 11. Кабанихина Е.С.   | инженер                |           |
| 12. Жерняк Г. Ф       | 0.1 ст. ведущ. инженер | к.ф.-м.н. |
| 13. Имомназаров Ш. Х. | инженер 1-й катег.     |           |

**Педагогическая деятельность**

- Урев М. В. – доцент НГУ, профессор СибАГС  
Соболева О. Н. – профессор НГТУ.

**Руководство аспирантами**

- Имомназаров Ш. Х. – аспирант ИВМиМГ, руководитель Михайлов А. А.  
Демулин С. И. – аспирант ИВМиМГ, руководитель Урев М. В.

**Лаборатория математического моделирования волн цунами**

Зав. лабораторией – д.ф.-м.н. Гусяков В. К.

**Важнейшие достижения****Связь цунамигенности подводных землетрясений с условиями осадконакопления на морском дне.**

Установлена тесная корреляция эффективности генерации цунами очагами подводных землетрясений с положением основных зон осадконакопления в Тихом океане, обусловленных наличием климатической и циркумконтинентальной зональности (в русле учения акад. А. П. Лисицына об основных зонах океанического литогенеза).

Д.ф.-м.н. Гусяков В. К.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2017 г.  
в соответствии с планом НИР института**

**Проект НИР 03.15-2016-0005 "Методы создания, исследования и идентификации математических моделей с помощью суперкомпьютеров".**

Руководитель – д.ф.-м.н. Гусяков В. К.

Выполнен анализ методик, используемых в настоящее время в России и за рубежом для получения долгосрочных оценок цунамиопасности (цунамирайонирование побережья). Показано, что методика Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (РТНА) в настоящее время является адекватным инженерным средством для получения оценок цунамиопасности побережья. Практический выбор той или иной методики определяется прежде всего полнотой данных наблюдений и уровнем понимания сейсмотектоники конкретного региона. При всех известных недостатках методики РТНА, как принципиальных, так и технических, она может и должна быть использована для построения обзорных карт цунамиопасности побережья Российской Федерации (в масштабе порядка 1:4,000,000). Основные проблемы применения этой методики заключаются в недостатке надежных данных по сейсмотектонике региона и проявлениям исторических цунами, а также в отсутствии детальной цифровой батиметрии для прилегающих к суше участков морского дна. Однако, даже при невозможности ее применения (как, например, для задачи оценки цунамиопасности Беринговоморского побережья Камчатки), само наличие такой методики, реализованной в виде информационно-экспертной системы, помогает понять ограничения и уровень достоверности оценок цунамиопасности, получаемых другими методами.

Для линейной системы уравнений мелкой воды написана новая программа решения обратной задачи определения источника цунами на базе предложенного оригинального подхода для реальной батиметрии. Тестирование программы для модельного источника проведено для случая шельфа у берегов Чили. На основе предложенного метода выполнено восстановление источника Чилийского цунами 16 сентября 2015 г. Результаты находятся в хорошем соответствии с оценками положения и механизма источника этого цунами, полученными на основе сейсмической информации зарубежными исследователями. Моделирование осуществлено на основе созданной программы, реализующей разработанный собственный метод решения обратной задачи определения источника цунами. Изучены вопросы влияния

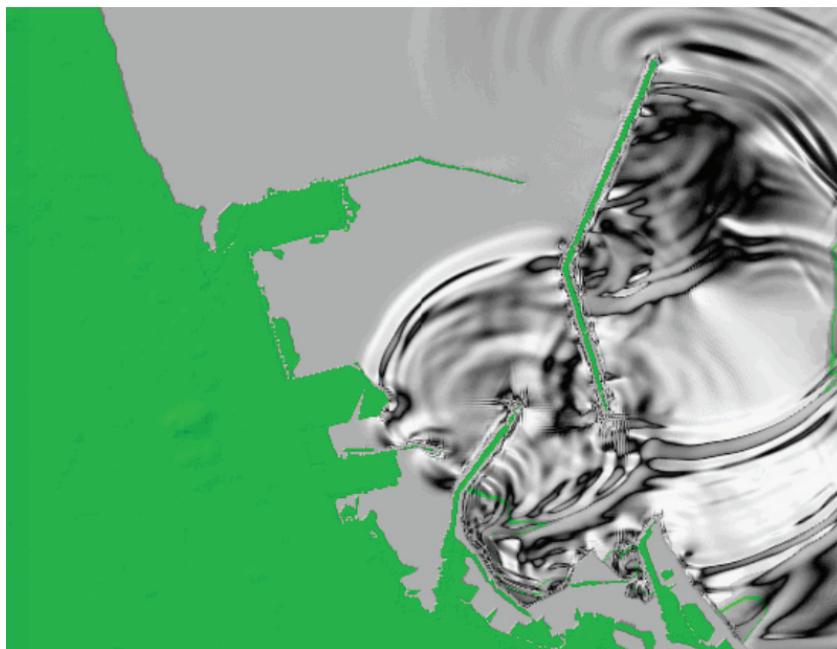


Рис. 1. Пример расчета распространения волны в порту Сома (Япония) на основе детальной цифровой батиметрии с шагом сетки 8 м

на результат инверсии таких факторов, как фильтрация мареограмм, число используемых пространственных гармоник, локализация и объем регистрирующей сети.

На основе технологии FPGA создан программный комплекс, реализующий расчет распространения цунами по разностной схеме Мак-Кормака, позволяющий значительно сократить время вычислений. Алгоритм расчета протестирован на точных решениях и реализован в форме расч етного конвейера на последовательности сгущающихся сеток, дающего возможность быстро вычислять высоту волны у берега. Создан численный алгоритм, реализующий частичное отражение длинной волны от затопленного вертикального барьера (рис. 1). С помощью предложенного метода проведена оценка защитных свойств подводных барьеров в одной из портовых бухт Японии.

По направлению разработки предсказательных оценок воздействия цунами на побережье на основе методов одномерного прогнозирования проведено исследование шкал, используемых в геофизике для количественной оценки природных катастроф и опасных природных процессов. Знания о шкалах распространены (помимо свойств) и на отношения; введены и рассмотрены свойства и меры сходства циклических шкал измерений, многозначных шкал и многозначных измерений; осуществлена сертификация шкал измерений для геокатастрофных природных процессов (включая цунами); построена система примеров и кейсов для классов новой систематики шкал.

По направлению изучения кометно-астероидной опасности в 2017 г. продолжалось пополнение и коррекция содержания экспертной базы данных по импактным структурам Земли "Expert Database for the Earth Impact Structures" (EDEIS). В настоящее время база содержит сведения о 1168 структурах различной степени достоверности (вероятности импактного генезиса, 4050 фотографий, 976 текстовых описаний, 1781 ссылку). За текущий год добавлено 18 новых структур, 124 фото, 25 текстов, 52 библиографические ссылки, уточнены координаты и другие параметры 13 структур. Объем базы данных 582 МБ. На основе литературных данных для 200 достоверных импактных структур составлена таблица с указанием года первого предположения об импактной природе структуры и года доказательства

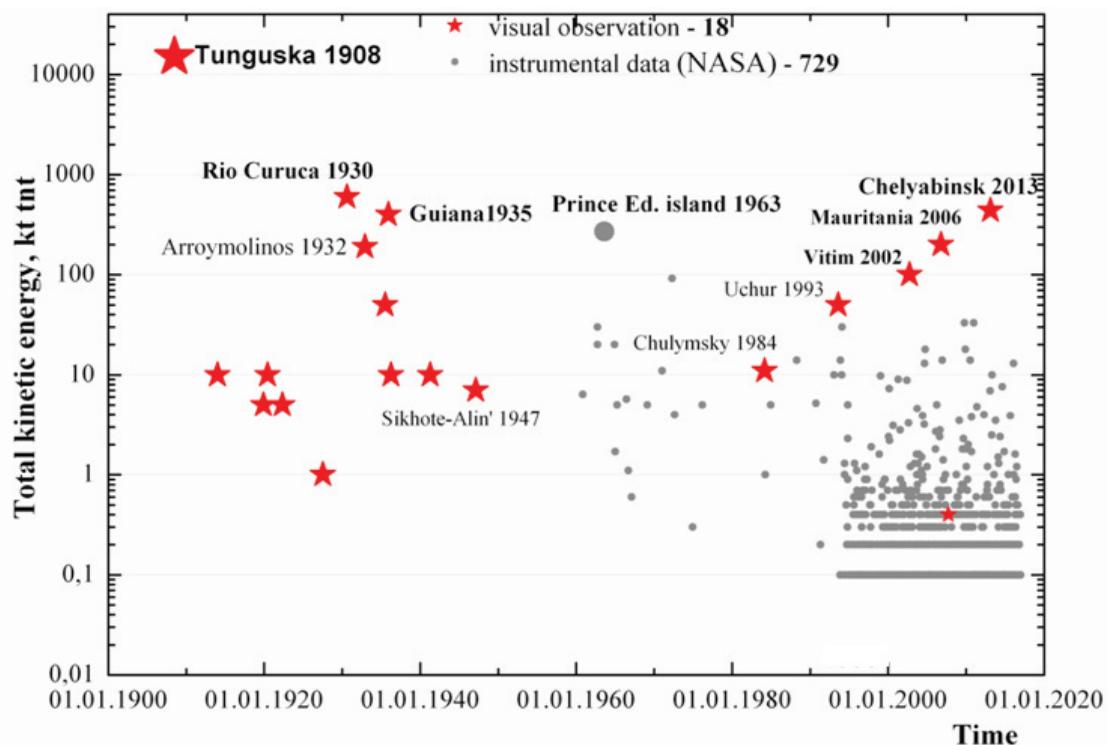


Рис. 2. Временная развертка каталога болидных взрывов в атмосфере Земли с 1900 г. Звездочками помечены события, для которых имеются оценки выделенной энергии

импактного происхождения. В качестве дополнительного элемента базы EDEIS создан каталог болидных взрывов в атмосфере Земли, наблюдавшихся в историческое время и зарегистрированных инструментальными средствами (начиная с 1960-х гг.). Временная развертка этого каталога показана на рис. 2.

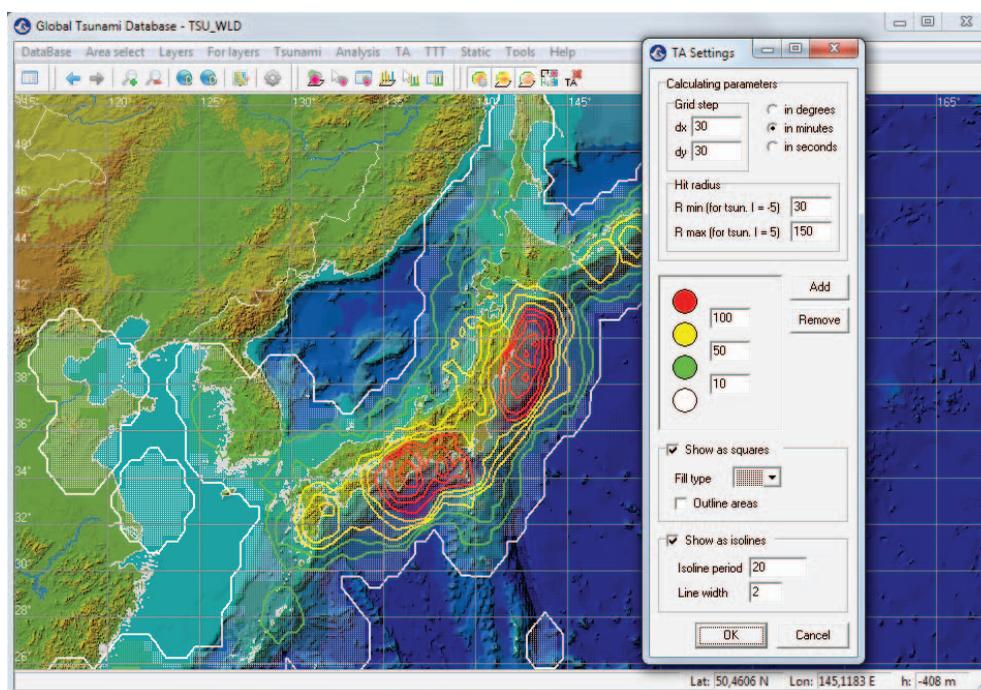


Рис. 3. Пример использования графической оболочки PDM/TSU для расчета карты цунамиактивности для региона Японии

Получила дальнейшее развитие графическая оболочка PDM/TSU, которая используется для поддержки работы с глобальной базой данных по цунами. В 2017 г. в нее была добавлена важная опция по расчету карт цунамиактивности на любом выбранном пользователем участке акватории Мирового океана. Цунамиактивность рассчитывается на основе подсчета числа очагов цунами, попадающих в выбранную единицу площади акватории, которые берутся с весами, пропорциональными баллу интенсивности цунами, измеряемой по шкале Соловьева – Иمامуры (оболочка PDM/TSU имеет встроенные средства расчета этого балла). Карты цунамиактивности позволяют сравнивать между собой различные цунамигенные зоны Мирового океана по уровню потенциальной цунамиопасности.

### **Результаты работ по проектам РФФИ**

**Проект РФФИ 16-05-00450 "Связь интенсивности цунами с параметрами очагов дальневосточных землетрясений".**

Руководитель – д. ф.-м.н. Гусяков В. К.

Основной целью проекта является получение расчетных оценок интенсивности дальневосточных цунами по шкале Соловьева – Иمامуры и исследование на этой основе зависимости балла интенсивности от параметров очага подводного землетрясения. На основе созданного в первый год выполнения проекта полного верифицированного каталога высот цунами в Дальневосточном регионе РФ, конвертированного в базу данных, построенную на СУБД Access, получены расчетные баллы интенсивности дальневосточных цунами с оценкой их точности для различных исторических периодов (доинструментальный – ранее 1900 г.), инструментальный (1901–1991 гг.), современный (после 1991 г.). Для получения оценок интенсивности использовалась созданная ранее процедура расчета балла интенсивности по шкале Соловьева – Иمامуры, встроенная в графическую оболочку PDM/TSU, которая позволяет вычислять интенсивность на основе сделанной экспертом выборки высот из базы данных. Изучена корреляция интенсивности цунами с моментной магнитудой подводного землетрясения и проведено ее сопоставление с имеющимися теоретическими оценками. Такая корреляция изучена как для Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, так и для двух соседних зон (Алеутско-Аляскинской и Японской), имеющих сходное сеймотектоническое строение и условиями образования цунами. Показано, что фактический разброс интенсивности цунами для землетрясений в интервале магнитуд от 7.0 до 8.0 очень велик и достигает 6 баллов шкалы интенсивности. Проведено дальнейшее пополнение и верификации данных исторического каталога цунами на побережьях России, в частности, путем включения в его состав акваторий внутренних морей, в первую очередь Черного, а также Каспийского и Балтийского морей. Получила дальнейшее развитие графическая оболочка PDM/TSU, которая является удобным специализированным средством работы с базой данных по наблюдениям цунами и их визуализации на картографической основе (цифровой карте региона).

### **Результаты работ по научно-исследовательским программам, проектам Президиума РАН, ОМН РАН и Сибирского отделения РАН**

**Проект Президиума РАН № 16 "Природные катастрофы и адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики".**

Руководитель – д.ф.-м.н. Гусяков В. К.

Выполнено численное моделирование 10 сильнейших цунамигенных событий Курило-Камчатского региона. Для них получены расчетные высоты волн в системе виртуальных мареографов, покрывающих все Дальневосточное побережье (около 4000 точек). Расчетные

высоты не только восполняют пропуски между имеющимися (достаточно редкими для старых событий) наблюдениям, но и дают высоты для тех участков Дальневосточного побережья, на которых наблюденные данные отсутствуют (Сахалин, Охотоморское побережье Колымы и Камчатки). В результате получен синтетический каталог высот цунами, содержащий как данные наблюдений, так и расчетные высоты. Применение к этому каталогу методов вероятностной обработки высот позволяет дать оценки повторяемости высот цунами в конкретных точках побережья. Для этого используется процедура расчета эмпирической функции повторяемости высот, встроенная в блок ANALYSIS графической оболочки WinITDB. На ее основе рассчитываются высоты в конкретных точках побережья при заданной обеспеченности (вероятности превышения в течении определенного интервала времени). В дальнейшем эти величины используются для картирования цунамиопасности на протяженных участках побережья.

### Экспедиция в район реки Нижняя Конкули (юго-восток Алданского нагорья)

Вторая экспедиция в Аяно-Майский район Хабаровского края была проведена с 22 июля по 20 августа 2017 г. Целью экспедиции было дальнейшее изучение района падения Учурского болида 1993 г., последствия которого были описаны дальневосточным геологом В. И. Кирилловым. Экспедиция была организована лабораторией ММВЦ на средства экспедиционного гранта СО РАН, гранта РФФИ 16-05-00603 и личные средства участников.



Рис. 4. Вывал леса в долине р. Н. Конкули (а, б); взятые экспедицией образцы торфа (в); микрофотография магнетитовых частиц, обнаруженных в образце Конкули-2 (z)

Возглавлял экспедицию сотрудник ЛММВЦ ИВМиМГ к.ф.-м.н. И. И. Амелин. Главной целью второй экспедиции было достижение эпицентрального района взрыва, указанного В. Е. Кирилловым, определение границ вывала леса, проверка генезиса воронок на западных склонах долины р. Конкули, идентифицированных на спутниковых снимках, сбор образцов торфа и поиск следов воздействия воздушной ударной волны на растительный покров. При наземном исследовании северной части области воздействия обнаружена область поваленного леса с выраженным генеральным направлением упавших стволов (ЮЮВ, вдоль речной долины). В районе предполагаемого воздействия ударной волны на наземные экосистемы произведен отбор образцов торфа из верхнего приповерхностного слоя, в котором по результатам первой экспедиции 2016 г. были обнаружены концентрации космогенного вещества (магнетитовые и силикатные микросферы, самородное железо с большим содержанием никеля и редкоземельных элементов, муассанит, углеродные микротрубки покрытые слоем никеля и силиката кальция), в 6–8 раз превышающие фоновые для этого района. Предварительный микрозондовый анализ "метеоритного слоя" в образцах, взятых в 2017 г., выполненный в Геофизической обсерватории "Борок" ИФЗ РАН, показал, что в образцах сфагновых мхов из долины Нижней Конкули число микросфер FeO (магнетит) на порядок больше фонового значения, также в образцах найдены наноалмазы, оплавленные микрочастицы титаномагнетитов (5–20 мкм) и муассанит SiC, которые рассматриваются как вещественные индикаторы высокотемпературных и высокобарических процессов, сопровождающих падения космических тел на Землю. Все эти данные говорят в пользу реальности масштабного болидного взрыва, происшедшего в этом районе в августе 1993 г.

### Публикации

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Марчук Ан. Г. Оценка высоты цунами, распространяющейся над параболическим дном, в лучевом приближении // СибЖВМ. 2017. Т. 20, № 1. С. 23–35. DOI: 10.15372/SJNM20170103.

2. Vazhenin A., Mikheeva A., Dyadkov P., Marchuk An. The software using digital databases and gis interface for detecting geodynamic structures // New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques. IOS Press, 2017. P. 576–592. DOI: 10.3233/978-1-61499-800-6-576.

3. Hayashi K., Vazhenin A., Marchuk An. Investigation of the artificial underwater object's protection properties using numerical modeling // Proc. of the 27th Intern. ocean and polar engin. conf., San Francisco (USA), June 25–30, 2017. P. 981–988. ISOPE-I-17-333.

4. Lavrentiev M. M., Romanenko A. A., Oblaukhov K. K., Marchuk An. G., Lysakov K. F., Shadrin M. Yu. FPGA based solution for fast tsunami wave propagation modeling // Ibid. P. 924–929. ISOPE-I-17-418.

5. Никонов А. А., Гусяков В. К., Флейфель Л. Д. Новый каталог цунами в Черном и Азовском морях в приложении к оценке цунамиопасности российского побережья // Геология и геофизика. 2018. № 2. С. 238–253. DOI: 10.15372/GiG20180208.

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Гусяков В. К. Методы и проблемы оценки цунамиопасности морских побережий // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 3. С. 26–38. DOI: 10.7868/S2073667317030029.

2. Marchuk An. G. Benchmark solutions for tsunami wave fronts and rays. P. 2: Parabolic bottom topography // Science of Tsunami Hazards. 2017. Vol. 36, N 2. P. 70–85.

3. Voronina T. A. An initial tsunami waveform by inverting the remote sea level records through the r-resolution method // Proc. of the Intern. conf. math. and inform. technol. "MIT-2016" in CEUR Workshop Proceedings series. 2017. P. 496–507.

### **Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Voronina T. A. Recovering the 16 September 2015 Chile (Illapel) tsunami source by the inversion of the observed tsunami waveforms // Bull. NCC. Ser.: Math. Model. in Geoph. 2017.

2. Марчук Ан. Г. Использование граничных условий в численных расчетах генерации и распространения цунами // Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПМ'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 595–600.

3. Марчук А. Г., Зотин А. Г., Курако М. А., Симонов К. В. Следы природных катастроф: геометрический анализ изображений на основе шпатель-преобразования // Там же. С. 601–605.

4. Marchuk An. G. Calculation of the reflected tsunami wave front kinematics using the grid-based algorithm // Bull. NCC. Ser.: Math. Modeling in Geophys. 2017. N 20. P. 29–39.

### **Материалы международных и всероссийских конференций и совещаний**

1. Гусяков В. К., Ивельская Т. Н., Никонов А. А., Чебров Д. В. Оценка опасности и прогнозирование цунами на морских побережья России // Труды 16-й Всерос. науч.-практ. конф. "Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций", Москва, 27–28 сент. 2017 г. С. 39–41.

2. Гусяков В. К. Цунамигенность подводных землетрясений и условия осадконакопления на морском дне // Материалы 22-й Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии "Геология морей и океанов", Москва, 20–24 нояб. 2017 г. Т. 5. С. 72–76.

### **Научно-популярные статьи**

Наш Марчук. 2-е издание, исправленное и дополненное / отв. ред. В. П. Ильин, А. К. Лаврова; сост.: Ан. Г. Марчук, Н. А. Притвиц, Я. И. Фет. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 458 с.

### **Свидетельства о регистрации программ и баз данных в Роспатенте**

1. Кихтенко В. А., Гусяков В. К., Чубаров Л. Б. Система конструирования и визуализации каталога модельных цунамигенных землетрясений с учетом неопределенностей значения параметров их механизмов // Зарегистрирована в ФГУ ФИПС (Роспатент) 21 июля 2017 г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017618054.

2. Кихтенко В. А., Гусяков В. К., Чубаров Л. Б. Интегрированная информационная система конструирования обзорных карт цунамирайонирования побережий с использованием исторических и расчетных данных // Зарегистрирована в ФГУ ФИПС (Роспатент) 01 августа 2017 г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017618398.

### **Участие в конференциях и совещаниях**

1. Международная научная конференция "XIII Забабахинские научные чтения", Снежинск, 20–24 марта 2017 г. – 2 доклада (Гусяков В. К., Амелин И. И.).

2. EGU General Assembly, Vienna (Austria), 8–13 April 2018 – 1 доклад (Воронина Т. А.).

3. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe International Conference Hall, Chiba (Japan), May 20–25, 2017 – 1 доклад (Марчук Ан. Г.).
4. "Вычислительная и прикладная математика" в рамках "Марчуковских научных чтений–2017", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. – 5 докладов (Гусяков В. К., Воронина Т. А., Марчук Ан. Г.).
5. 9-я Международная молодежная научная школа-конференция "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 26 июня – 2 июля 2017 г. – 1 доклад (Марчук Ан. Г.).
6. The 27th International ocean and polar engineering conference, San Francisco (USA), June 25–30, 2017 – 2 доклада (Марчук Ан. Г.).
7. 8-я Международная конференция по математическому моделированию "МКММ-2017", Якутск, 4–8 июля 2017 г. – 2 доклада (Марчук Ан. Г.).
8. Международная конференция, посвященная 60-летию Института математики им. С. Л. Соболева "Математика в современном мире", Новосибирск, 14–19 августа, 2017 г. – 1 доклад (Марчук Ан. Г.).
9. IUGG Tsunami Commission Symposium, August 21–23, 2017, Bali (Indonesia) – 3 доклада (Гусяков В. К., Марчук Ан. Г.).
10. Joint Scientific Assembly of the International Association of Geodesy (IAG) and International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI), July 30 – August 4, 2017, Kobe (Japan) – 1 доклад (Воронина Т. А.).
11. The 5th International tsunami field symposium, Lisbon (Portugal), 3–7 September, 2017 – 1 доклад (Гусяков В. К.).
12. 16-я Всероссийская научно-практическая конференция "Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций", Москва, 27–28 сентября 2017 г. – 2 доклада (Гусяков В. К.).
13. The 16th International conference on intelligent software methodologies, tools, and techniques (SOMET\_2017), Kitakyushu (Japan), September 26–28, 2017 – 1 доклад (Марчук Ан. Г.).
14. 22-я Международная научная конференция (школа) по морской геологии, Москва, 20–24 ноября 2017 г. – 1 доклад (Гусяков В. К.).
15. 13-я Научно-практическая конференция "Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации", Москва, 28 ноября – 1 декабря 2017 г. – 1 доклад (Гусяков В. К.).
16. 2-й Евразийский форум по сейсмической безопасности сооружений и городов ("SEISMO-2017"), Москва, 28 ноября – 1 декабря 2017 г. – 1 доклад (Гусяков В. К.).

#### **Участие в оргкомитетах конференций**

Гусяков В. К. – член Оргкомитета 6-й научно-технической конференции "Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России", Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г.

#### **Итоговые данные по лаборатории**

Публикации, индексируемые в базе данных Web of Science – 6

Публикации, индексируемые в базе данных Scopus – 9

Публикации, индексируемые в базе данных РИНЦ – 12

Свидетельства о регистрации программ и баз данных в ФГУ ФИПС (Роспатент) – 2

Докладов на конференциях – 26, в том числе 2 пленарных

Участие в оргкомитетах конференций – 1.

**Кадровый состав**

1. Гусяков В. К. зав. лаб. д.ф.-м.н.
  2. Марчук А. Г. в.н.с. д.ф.-м.н.
  3. Воронина Т. А. с.н.с. к.ф.-м.н.
  4. Амелин И. И. м.н.с. к.ф.-м.н.
  5. Сергеев В. А. н.с.
  6. Москаленский Е. Д. м.н.с. 0.5 ст.
  7. Лысковская Е. В. ведущ. инженер.
  8. Калашникова Т. В. ведущ. инженер
  9. Ляпидевская З. А. ведущ. программист
  10. Зиновьев П. С. инженер
- Амелин И. И. – молодой научный сотрудник

**Педагогическая деятельность**

Воронина Т. А. – преподаватель СУНЦ НГУ.

## Лаборатория геофизической информатики

Зав. лабораторией д.т.н. Ковалевский В. В.

### Важнейшие достижения

#### Тематический интернет-ресурс для теоретических и экспериментальных исследований в активной сейсмологии.

Создан специализированный интернет-ресурс (<http://org.sssc.ru/>) для поддержки теоретических и экспериментальных исследований в области активной сейсмологии. Архитектуру интернет-ресурса можно представить в виде двух взаимодействующих подсистем. Первая из них – научная информационная система (НИС) "Активная сейсмология" – обеспечивает доступ пользователей к полученным в ходе полевых и вычислительных экспериментов данным и средствам их анализа, а также включает пополняемую пользователями тематическую электронную библиотеку, содержащую отчеты, полные тексты статей и другие документы. Вторая – Портал знаний – предназначена для систематизации как данной предметной области в целом, так и разнородных данных и средств их обработки, представленных в НИС. Концептуальным базисом информационной модели портала знаний является онтология предметной области "Активная сейсмология". Онтология портала вводит формальные описания понятий предметной области в виде классов объектов и отношений между ними, тем самым задавая структуры для представления реальных информационных объектов и их связей. Содержательный доступ к систематизированным знаниям и информационным ресурсам обеспечивается с помощью предоставляемых порталом развитых средств навигации и поиска, функционирование которых также базируется на онтологии.

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

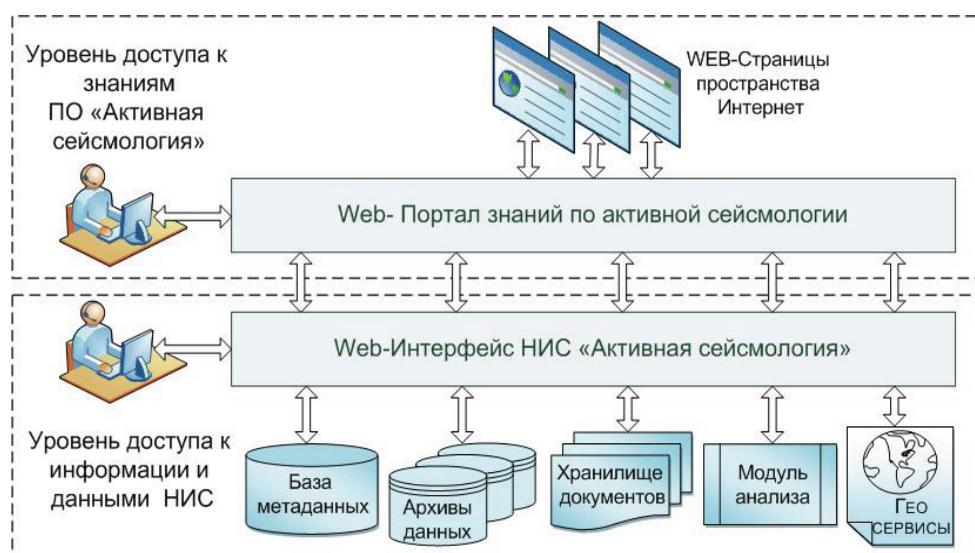


Рис. 1. Структура Интернет-ресурса

#### Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Braginskaya L., Kovalevsky V., Grigoryuk A. Vibroseismic Monitoring Data Management on Web-Technologies Basis // Труды 13-й Международной школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках Международной конференции IEEE SIBIRCON

2017, Новосибирск, 18–22 сент. 2017 г. [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/opcs2017/ru/proceedings>. С. 48–1.

2. Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В. Структура и сервисы системы информационной поддержки вибросейсмических исследований // Сб. трудов Всерос. конф. "Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов" ("SDM-2017"). г. Бердск (Новосиб. обл.), 29–31 авг. 2017 г. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. 323 с. ISBN 978-5-905569-08-1. [Электрон. ресурс]. С. 241–245.

### **Результаты исследований представлены на конференциях:**

1. 2nd Russian-Pacific conference on computer technology and applications (RPC 2017), Vladivostok, Sept. 25–29, 2017. <http://www.rpc2017.dvo.ru/>.

2. 6-я Всерос. конф. с междунар. участием "Знания – Онтологии – Теории" (ЗОНТ–2017), Новосибирск, 2–6 окт. 2017 г.

### **Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершнным в 2017 г. в соответствии с планом НИР института**

**Проект НИР 0315-2016-0003** "Математическое моделирование, численные методы и высокопроизводительные информационно-вычислительные технологии для решения задач активной сейсмологии и дистанционного зондирования Земли".

Номер государственной регистрации НИР 0120.0712227.

Научные руководители: д. т. н. Ковалевский В. В., д. т. н. Пяткин В. П.

**Раздел 1.** Математическое моделирование и обработка данных экспериментов по активному вибросейсмическому мониторингу, анализ результатов, создание базы данных и их интеграция в НИС вибросейсмических исследований Байкальской рифтовой зоны и прилегающих районов Монголии, Алтае-Саянского региона, Таманской грязевулканической провинции и Приэльбрусья. Анализ результатов исследования процессов формирования вибросейсмических волновых полей с учетом резонансных, нелинейных и интерференционных эффектов при вибрационном излучении и распространении сейсмических волн. На основе результатов численного моделирования и экспериментальных исследований развитие вибросейсмических исследований земной коры, вулканических структур и сейсмоопасных зон. Создание прототипа портала знаний "Активная сейсмология", осуществляющего интеграцию знаний и данных на основе базовых онтологий предметной области (ПО).

Развита вычислительная технология для задач численного моделирования сейсмических полей в неоднородных упругих средах, имеющая в своем составе программы реализации адаптированного численного метода для трехмерного моделирования, параллельного алгоритма. Вычисления базируются на конечно-разностном методе второго порядка аппроксимации. Разработанное программное обеспечение ориентировано на проведение вычислительных экспериментов с использованием многоядерных вычислительных систем с гибридной архитектурой с GPU. Математическое моделирование полных волновых полей выполнено на базе разработанных математических моделей для скоростных разрезов экспериментов BEST и PASSCAL на трассе Байкал – Улан-Батор (Монголия). В части подготовки экспериментальных данных для сравнительного анализа с теоретическими сейсмограммами создана база вибрационных сейсмограмм, полученных в ходе экспериментов по полевой регистрации вибросейсмического поля вибратора ЦВ-100 на профиле Бабушкин – Байкал – Кяхта – Улан-Батор (Монголия) на расстояниях от 67 до 500 км от источника. Эти

работы проводились ИВМиМГ СО РАН совместно с ГИН СО РАН, БурФ ГС СО РАН и ЦАГФ АНМ.

Проблема экологоохранного геофизического мониторинга окружающей среды непосредственно связана с изучением закономерностей взаимодействия различных геофизических полей: сейсмических, акустических, оптических, гидроакустических и метеополей. Для проведения экспериментальных работ по проблеме созданы на принципах сетевой архитектуры сбора и дистанционной передачи данных два пространственно распределенных периферийных комплекса на связи с лабораторной рабочей станцией. С помощью созданных программно-технических средств в течение 2017 г. проводилась регулярная всесезонная регистрация и накопление геофизических данных. По результатам анализа полученных данных определены вклады метеофакторов в интегральный показатель геоэкологических рисков для окружающей социальной среды. Выполнен анализ данных экспериментов по изучению закономерности одновременного распространения сейсмических и акустических волн на инфранизких частотах от вибратора ЦВ-40 на 100-километровом профиле. Показано, что ослабление силы инфразвука по расстоянию определяется в основном фактором геометрического расхождения волнового фронта при незначительном влиянии фактора поглощения.

Продолжено изучение механизмов взаимодействия геофизических полей в системе литосфера – атмосфера с помощью таких физических процессов как интерференция сопряженных сейсмоакустических колебаний, нелинейные явления излучения и распространения, многократное усиление эффектов взаимодействия под действием метеопараметров. Проанализирована взаимная интерференция сейсмических колебаний ("сейсмическая").

При этом для многолучевой модели сейсмического волнового поля обосновано утверждение, что наиболее высокая вероятность проявления интерференционного взаимодействия вызывается суперпозицией преобладающих типов волн, к числу которых, в первую очередь, относятся продольные и поперечные волны. Полученный вывод имеет практическую важность для решения прикладных задач геофизики. Рассмотрена интерференция сейсмических колебаний с акустическими ("сейсмоакустическая"), развивающаяся в приграничной зоне земля – атмосфера. Показано, что с учетом метеозависимых эффектов распространения акустических волн в атмосфере рассматриваемый вид интерференции может вносить большие погрешности в оценивание полей амплитуд и фаз сейсмических колебаний, что принципиально важно для сейсмической томографии. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными измерений указанных параметров, полученными на трассе вибратор – приемник протяженностью 50 км.

В связи с изучением нелинейных эффектов распространения сейсмических волн было выполнено математическое моделирование распространения сейсмических волн в трещиноватых средах. Приведены результаты численного моделирования параметров нелинейности волновых сейсмических полей в зависимости от характеристик неоднородности среды при представлении ее моделью трещиноватости в виде хаотически ориентированных пустот сфероидальной либо эллиптической формы, равномерно рассеянных в однородной и изотропной среде. Получены численные характеристики коэффициента нелинейности, определяемого соотношением уровней второй и первой гармоник гармонического колебания на выходе трещиноватой среды в зависимости от параметров трещин.

Разработан алгоритм и новый программный модуль для расчета поляризационных параметров трехкомпонентных сейсмограмм. Алгоритм основан на определении величины и направленности осей поляризационного эллипсоида по собственным векторам и собственным

значениям ковариационной матрицы. Выполнен поляризационный анализ сейсмограмм, полученных при проведении вибросейсмического мониторинга Байкальской рифтовой зоны с использованием виброисточника ЦВО-100 (п. Бабушкин) в течение 2003–2014 гг. Обработано примерно 200 трехкомпонентных сейсмограмм, зарегистрированных на сейсмостанциях Хурамша и Тырган на расстояниях соответственно 68 и 108 км от источника. Результаты анализа показали сезонную зависимость как направления, так и величины осей эллипсоида.

Проводились исследования возможности оценки параметров и характеристик вибросейсмических сигналов с привлечением кластерного анализа. Получены численные характеристики проведенного анализа.

Создан специализированный интернет-ресурс для поддержки теоретических и экспериментальных исследований в области активной сейсмологии, представленный как важнейший результат Лаборатории геофизической информатики за 2017 г. (<http://opg.sssc.ru/>).

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ №17-07-00872-а** "Разработка и исследование методов повышения чувствительности инфранизкочастотной акустооптической технологии дальней регистрации акустических колебаний с применением прецизионных вибрационных источников и лазерных измерительных линий".

Руководитель – д.т.н. Хайретдинов М. С.

Созданы алгоритмы и программы численного моделирования низкочастотного акустооптического преобразования с применением синхронных лазерных пучков, Определены информативные параметры акустооптического взаимодействия.

Получены численные оценки моделирования, разработаны технические требования к оптическому стенду. Проработан проект оптического стенда для регистрации инфранизкочастотных акустических колебаний с применением синхронных лазерных пучков и группирования оптических отражателей. Создан макет двулучевой лазерной измерительной линии для изучения акустооптических взаимодействий на инфранизких частотах. Представлены результаты экспериментов по определению разрешающей способности фотолинейки на основе получения теневых диаграмм отраженного излучения от двух разнесенных рефлекторов на дальностях 100–400 м от лазерных излучателей. Найдено предельное расстояние, на котором может быть зафиксирован отраженный сигнал от рефлектора при работе с оптической системой.

**Проект РФФИ № 15-07-06821-а** "Создание геоинформационной технологии исследования и верификации скоростных моделей земной коры с применением математического моделирования и методов активной сейсмологии".

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

Выполнено математическое моделирование полных волновых полей для разработанных 2D математических моделей земной коры экспериментов BEST и PASSCAL с использованием разработанных алгоритмов и программ на основе аналитического метода, метода конечных разностей и спектрально-разностного метода. Для математического моделирования полного вибросейсмического поля с применением существенно неоднородной 2D-модели скоростей сейсмических волн в земной коре (эксперимент PASSCAL), а также слоистой модели с учетом криволинейности границ слоев (эксперимент BEST), разработаны

параллельные алгоритмы и программы на основе конечно-разностных методов с реализацией на кластере НКС-30Т Сибирского суперкомпьютерного центра. Построена скоростная модель земной коры по данным метода приемной функции с выделением в коде Р-волны обменных поперечных волн на основе метода двумерной сплайновой аппроксимации данных (эксперимент PASSCAL). Получены теоретические (синтетические) сейсмограммы, показавшие преобладание в волновом поле прямых и рассеянных волн в отличие от отраженных, преломленных и головных волн для слоистой модели (эксперимент PASSCAL).

Выполнена обработка данных вибросейсмического просвечивания земной коры в южном Прибайкалье на профиле Тырган – Бабушкин – Кяхта – Улан-Батор с использованием мощного сейсмовибратора Южнобайкальского полигона. Создан раздел "Анализ и верификация скоростных моделей земной коры" в НИС "Активная сейсмология", которая обеспечивает доступ пользователей к полученным в ходе полевых и вычислительных экспериментов данным и средствам их анализа, а также включает пополняемую пользователями тематическую электронную библиотеку, содержащую отчеты, полные тексты статей и другие документы.

**Проект РФФИ №16-07-01052-а** "Разработка программно-алгоритмических средств поиска и анализа комплекса информативных факторов взаимодействия геофизических полей разной природы для прогнозирования разрушительных экологических рисков от природно-техногенных взрывов".

Руководитель – к.т.н. Воскобойникова Г. М.

В текущем году рассмотрена задача взаимодействия акустических волн, распространяющихся через лесной массив, растущий на грунте, и сейсмических волн, возникающих в грунте. Стояла проблема изучить диссипативные свойства леса в зависимости от его характеристик. Подготовлен обзор отечественной и зарубежной литературы, связанной с решением задач газовой динамики, а также по проблеме влияния растительного массива на распространение акустических волн, в том числе гармонических.

Разработана трехслойная модель воздух – лес – грунт взаимодействия гармонических колебаний с растительным массивом. Построена и решена система дифференциальных уравнений на основе уравнений Эйлера газовой динамики, а также волновых уравнений. Данная система с условиями на границах описывает распространение падающих и отраженных акустических волн в воздухе и лесном массиве с учетом диссипации, а также преломленных и отраженных сейсмических волн в упругой среде (грунте) для трехслойной модели воздух – лес – грунт". Вычислены амплитуды и коэффициенты отражения и преломления в случае падения акустической волны на грунт; получено отношение энергии преломленных волн к энергии падающей акустической волны. Реализованы программы моделирования для расчета уровней акустического давления колебаний волн с помощью математической модели, дифференциальных уравнений. Проведены тестовые расчеты для разработанных моделей.

Отмечено, что лес имеет сильное влияние на передачу энергии в грунт, которая может уменьшаться более чем на порядок. Полученные численные результаты согласуются с результатами полевых экспериментов с вибрационным источником.

**Проект РФФИ № 17-57-45166 ИНД\_а** "Подход к обработке данных регистрации вибросейсмических волн и теоретического исследования сейсмических волн".

Руководитель – к.т.н. Знак В. И.

В 2017 г. одобрен проект совместных индийско-российских исследований по гранту РФФИ "Approach for the processing of data of vibro-seismic waves records and theoretical

investigations on seismic waves" / "Подход к обработке данных регистрации вибросейсмических волн и теоретического исследования сейсмических волн". Руководитель гранта со стороны Индии Dr. Santimoy Kundu. За отчетный период

- произведен обмен опытом, опубликованным в открытой печати;
- осуществлен обмен информацией об инструментальных базах (hard ware, soft ware), используемых Santimoy Kundu и лабораторией геофизической информатики;
- намечен план совместных исследований.

Запланированы сроки визита Santimoy Kundu (весна 2018 г.) в ИВМиМГ для обсуждения достигнутых результатов. Предполагается также знакомство Santimoy Kundu с опытом лаборатории в области вибросейсмических исследований и в области моделирования вибросейсмических полей.

**Проект РФФИ №16-37-00240-а** "Разработка и проведение исследований информационно-вычислительной технологии анализа генетических данных на гибридной суперЭВМ".

Руководитель – к.т.н. Якименко А. А.

Выполнено исследование производительности разработанного информационно-вычислительного комплекса путем проведения моделирования (рис. 2, 3). Проведено несколько моделирований с различными входными параметрами.

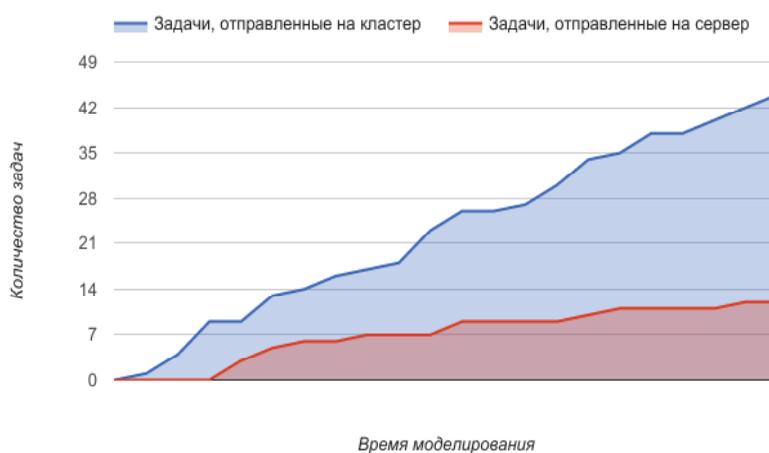


Рис. 2. Число задач, отправленных на сервер и кластер с течением времени



Рис. 3. Число задач в очереди на кластер и выполняющихся на сервере

В результате при низкой загруженности системы, в основном она находится в режиме простоя, что для данной системы является стабильным результатом. Но при большой загруженности, которая не предполагается, но вероятна, коэффициент загруженности вычислительного кластера равен 1, из-за чего систему нельзя назвать эффективной – все задачи простаивают в очереди

После проведения полного факторного эксперимента выявлены значимые факторы, которыми оказались среднее время поступления задачи и процент задач с ошибкой во входных данных. Если время поступления задач в реальных условиях нельзя уменьшить, то процент ошибок в исходных данных можно уменьшить, валидируя данные перед отправлением на вычислительный кластер. Если система будет загружена, необходимо рассмотреть возможность включения дополнительных серверов (в том числе виртуальных) для решения задач в автоматическом режиме или администратором, используя информационную систему.

Исходя из всего перечисленного выше можно сделать вывод о том, что разработанная система обладает широкими возможностями для дальнейшего развития с целью увеличения производительности.

Спектр требований к созданной технологии растет в сторону повышения производительности вычислений. Решением данной проблемы является возможность включения дополнительных вычислительных мощностей для решения задач в автономном режиме или администратором, используя информационную систему.

Кроме того, существует необходимость в популяризации данной системы. Этого можно добиться путем добавления других статистических программ, которые специалисты смогут использовать для расчетов.

**Российско-казахстанский проект НТП 04.03.02 "Создание методических основ геолого-геофизических исследований очаговых зон ПЯВ в магматических породах".**

Руководители: чл.-корр. РАН Кабанихин С. И., д.т.н. Хайретдинов М. С.

В соответствии с заданием на проведение численного моделирования мест проведения подземных ядерных испытаний (ПЯВ) на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) для продольных и поперечных волн были разработаны программы решения прямой задачи и получены синтетические сейсмограммы и годографы для обоих типов волн, представлены графические материалы распределения значений их скоростей для различных профилей наблюдений, разработаны рекомендации по выбору оптимальных параметров сейсмических наблюдений (тип волн, число пунктов регистрации, шаг наблюдений и т. д.).

Восстановление скоростной модели среды проводилось в два этапа. На первом этапе решалась задача продолжения поля с поверхности внутрь земли (миграция). На втором этапе происходило уточнение сейсмических параметров. Каждый этап алгоритма был обоснован, проведены серии численных расчетов.

Разработаны новые и обоснованы уже существующие численные алгоритмы регуляризации задач продолжения на основе сведения некорректной задачи продолжения с помощью метода конечных разностей к системе линейных алгебраических уравнений с плохо обусловленной матрицей. Для решения системы использовалось усеченное сингулярное разложение и было построено  $g$ -решение. Получена оценка условной устойчивости задачи продолжения решения с части границы для гиперболического уравнения

**Результаты работ по научно-исследовательским программам,  
проектам Президиума РАН, ОМН РАН**

**Экспедиционный грант "Экспериментальные работы по изучению неоднородности строения земной коры, геодинамических процессов и проведение вибросейсмического мониторинга Байкальской сейсмоопасной зоны и Алтае-Саянского региона с использованием низкочастотных вибраторов, регистрация сейсмических и акустических полей от взрывов и вибраторов"**

Руководитель — д.т.н. Хайретдинов М. С.

Продолжены регулярные всесезонные мониторинговые сеансы наблюдений сейсмоакустических колебаний от вибратора ЦВ-40 на удалении 50 км в п. Ключи в интересах решения многофакторной задачи распространения сейсмоакустических колебаний на протяженных профилях.

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

1. Grishchenko M. V., Yakimenko A. A., Khairtdinov M. S., Lazareva A. V. The improvement of the parallel algorithm for randomization-based enrichment analysis // Proc. 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences ("SIBIRCON 2017"), Novosibirsk, Sept. 18–22, 2017. IEEE Catalog Number: CFP1711E-CDR [Electron. resource]. <http://conf.nsc.ru/opcs2017/ru/proceedings>. P. 269–272. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109886.

2. Khairtdinov M., Sedukhina G., Matveev I., Voskoboynikova G. Economical sequential algorithmic convolutions in problems of active vibroseismoacoustic monitoring // Ibid. P. 97–101. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109846.

3. Khairtdinov M., Voskoboynikova G. Optimization problem for active geophysical monitoring systems // Ibid. P. 101–105. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109847.

4. Yakimenko A. A., Bogomolov D. A., Morozov A. E., Sokolova A. V. Development and research of the information system for monitoring the condition of the road surface using mobile devices to optimize logistics and repair costs // Ibid. P. 190–193. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109868.

5. Braginskaya L., Kovalevsky V., Grigoryuk A. Vibroseismic monitoring data management on Web-technologies basis // Ibid. P. 48–52. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109835.

6. Khairtdinov M., Voskoboynikova G., Poller B., Britvin A., Sedukhina G. An acoustooptic interaction at infralow frequencies // Proc. of the 17th Intern. multidisciplinary scientific geoconference surveying geology and mining ecology management ("SGEM 2017"), Albena (Bulgaria), June 27 –July 6, 2017. P. 775–782. DOI: 10.5593/sgem2017/21/S08.099.

7. Voskoboynikova G., Shalamov K., Khairtdinov M., Kovalevsky V. Multifactor estimation of ecological risks using numerical simulation. // AIP Conf. Proc. 1895, 120009. 2017. DOI: 10.1063/1.5007426. 2017.

**Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus**

1. Znak V. On studying characteristics of periodic signals based on the cluster analysis // J. Comp. Engin. & Inform. Technol. 2017. Vol. 6, N 3. P. 1–5. DOI: 10.4172/2324-9307.1000173.

2. Voskoboynikova G., Imomnazarov K., Mikhailov A., Tang J.-G. Influence of snow cover on the seismic waves propagation // Lect. Notes in Comp. Sci. (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2017. P. 775–782. DOI 10.1007/978-3-319-57099-0\_84.

**Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Хайретдинов М. С., Поллер Б. В., Бритвин А. В. Акустооптическая двухлучевая лазерная измерительная линия // *Материалы Междунар. науч. конф. "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология"* в рамках 13-го Междунар. науч. конгр. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017", Новосибирск, 17–21 апр. 2017 г. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. Т. 1. С. 235–239.
2. Хайретдинов М. С., Воскобойникова Г. М., Седухина Г. Ф. Алгоритмы поточной свертки в задачах активного вибросейсмоакустического мониторинга // *Там же*. Т. 1. С. 230–234.
3. Караваев Д. А. Моделирование сейсмических полей для сред с существенно неоднородным распределением упругих параметров // *Там же*. Т. 1. С. 201–205.
4. Ефимов С. А. Способ формирования изображения сейсмического волнового поля как метод исследования строения Земли // *Там же*. Т. 2. С. 157–162.
5. Ефимов С. А. Экспериментальное исследование мантии Земли и идентификация границы Леманн методами вибросейсмической технологии // *Там же*. Т. 1. С. 220–224.
6. Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В. "Активная сейсмология" – научный информационный сервис в интернете // *Там же*. Т. 1. С. 166–170.
7. Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В. Вибрационные геотехнологии в экологоохранном прогнозировании // *Сб. трудов 14-й Междунар. науч.-практ. конф. "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии"* (ИНФО-2017), Сочи, 1–10 октября 2017 г. / под. ред. С. У. Увайсова. Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2017. С. 20–25.
8. Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В. Сервисы научной информационной системы "Активная сейсмология" // *Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПМ'17"* в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 119–125.
9. Караваев Д. Моделирование распространения сейсмических волн для сред с существенно неоднородным распределением упругих параметров // *Там же*. С. 381–387.
10. Хайретдинов М. С., Воскобойникова Г. М. Обнаружение и выделение сейсмических волн с помощью апостериорных алгоритмов // *Сб. статей Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием "Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний. Методы и средства"*, Новосибирск, 14–17 нояб. 2017 г. Новосибирск: НГТУ, 2017. С. 123–129.
11. Губарев В. В., Хайретдинов М. С. Инновационная вибротехнология в экологоохранном прогнозировании // *Там же*. С. 139–147.
12. Якименко А. А., Моргунов А. С. Информационная система для организации доступа к вычислительным ресурсам и выполнения программы "Перестановочный тест" // *Там же*. С. 231–235.
13. Stankevich A., Yakimenko A. A. Development of web-services for automating the certification process of information systems // *Тез. 6-й Междунар. науч.-практ. конф. "Progress through Innovations"*, Новосибирск, 30 марта 2017 г. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. С. 14–15.
14. Lazareva A., Khairtdinov M.S. Research into properties of the permutable test in tasks of genetic analysis. // *Там же*. С. 12–13.
15. Хайретдинов М. С., Поллер Б. В., Бритвин А. В., Седухина Г. Ф. Инфранизкочастотная акустооптическая система // *Проблемы информатики*. 2017. № 1 (34). С. 38–51.
19. Ковалевский В. В., Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Фатьянов А. Г., Караваев Д. А. Применение геоинформационных технологий в вибросейсмических исследованиях. // *Информ. технол. в науке, образовании и управлении*. 2017. № 3 (3). С. 50–57.

20. Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В. Структура и сервисы системы информационной поддержки вибросейсмических исследований // Сб. трудов всерос. конф. "Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов ("SDM-2017")", Бердск (Новосибирская обл.), 29–31 авг. 2017 г. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. ISBN 978-5-905569-08-1. С. 241–245. [Электрон. ресурс]. <http://conf.ict.nsc.ru/ru/page/SDM-2017>.

21. Воскобойникова Г. М., Шаламов К. А., Ковалевский В. В. Взаимодействие падающей акустической волны со снежным слоем на упругом полупространстве // Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2017. Т. 1. № 2. С. 31–43.

### Участие в конференциях и совещаниях

1. The 12th International forum on strategic technology (IFOST 2017), Ulsan (Korea), May 31 – June 2, 2017 – 2 доклада (Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В., Воскобойникова Г. М., Седухина Г. Ф.).

2. The 17th International multidisciplinary scientific geoconference "SGEM 2017", Albena (Bulgaria), June 27 – July 6, 2017 – 1 доклад (Хайретдинов М. С., Воскобойникова Г. М., Седухина Г. Ф.).

3. 13-я Международная Азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках международной мультikonференции IEEE SIBIRCON 2017, Новосибирск, 18–22 сентября 2017 г. – 5 докладов (Брагинская Л. П., Ковалевский В. В., Григорюк А. П., Якименко А. А., Хайретдинов М. С., Седухина Г. Ф., Воскобойникова Г. М.).

4. "Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017", Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г. – 6 докладов (Хайретдинов М. С., Воскобойникова Г. М., Седухина Г. Ф., Караваев Д. А., Ефимов С. А., Ковалевский В. В., Брагинская Л. П., Григорюк А. П.).

5. 9th Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Albena (Bulgaria), June 21–26, 2017 – 1 доклад (Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В., Воскобойникова Г. М.).

6. 14-я Международная научно-практическая конференция "Инновационные, информационные и коммуникационные технологии" (ИНФО-2017), Сочи, 1–10 октября 2017 г. – 1 пленарный доклад (Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В.).

7. 4-я Международная научно-техническая конференция "Радиотехника, электроника и связь", Омск, 15–16 ноября 2017 г. – 2 доклада (Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С.).

8. Международная конференция "Вычислительная и прикладная математика" (ВПМ-2017) в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 7 докладов (Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В., Караваев Д. А., Знак В. И., Хайретдинов М. С., Воскобойникова Г. М., Седухина Г. Ф.).

9. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, школа молодых ученых "Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний. Методы и средства", Новосибирск, 14–17 ноября 2017 г. – 3 доклада (Хайретдинов М. С., Воскобойникова Г. М., Якименко А. А.).

10. 5-я Всероссийская конференция "Экология. Экономика. Информатика. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем (САМЭС)", п. Дюрсо (Краснодарский край) – 1 доклад (Ковалевский В. В., Воскобойникова Г. М.).

11. 2nd Russian-Pacific conference on computer technology and applications (RPC 2017), Vladivostok, Sept. 25–29, 2017 – 1 доклад (Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В.).

12. 6-я Всероссийская конференция с международным участием "Знания – Онтологии – Теории" (ЗОНТ–2017), Новосибирск, 2–6 октября 2017 г. – 1 доклад (Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В.).

13. Всероссийская конференция "Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов" (SDM-2017), 29–31 августа 2017 г., Бердск (Новосибирская обл.). – 1 доклад (Брагинская Л. П., Григорюк А. П., Ковалевский В. В.).

14. Международная научно-практическая конференция аспирантов и магистрантов "Progress through Innovations", Новосибирск, 30 марта 2017 г. – 2 доклада (Хайретдинов М. С., Якименко А. А.).

15. Международная научно-практическая конференция "Фундаментальные и прикладные науки сегодня" ("Fundamental science and technology – promising developments XI"), North Charleston (USA), 27–28 марта 2017 г. – 1 доклад (Ефимов С. А.).

16. 8-я Международная конференция по математическому моделированию, Якутск, 4 июля – 8 июля 2017 г. – 1 доклад (Хайретдинов М. С., Воскобойникова Г. М.).

### Участие в оргкомитетах конференций

1. Хайретдинов М. С.:

– член программного комитета 13-й Международной Азиатской школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках международной мультikonференции IEEE SIBIRCON 2017, Новосибирск, 18–22 сентября 2017 г.;

– член программного комитета Всероссийской научно-практической конференции с международным участием "Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний. Методы и средства", Новосибирск, 14–17 ноября 2017 г.

2. Ковалевский В. В.:

– член программного комитета 13-й Международной Азиатской школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках международной мультikonференции IEEE SIBIRCON 2017, Новосибирск, 18–22 сентября 2017 г.;

– член программного комитета Всероссийской научно-практической конференции с международным участием "Интеллектуальный анализ сигналов, данных и знаний. Методы и средства", Новосибирск, 14–17 ноября 2017 г.

### Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 7.

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 9.

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 25.

Докладов на конференциях – 36, в том числе 1 пленарный.

Участников оргкомитетов конференций – 4.

### Кадровый состав

1. Ковалевский В. В.	зав. лаб.	д.т.н.
2. Хайретдинов М. С.	г.н.с.	д.т.н.
3. Знак В. И.	с.н.с., 0.5 ст.	к.т.н.
4. Григорюк А. П.	н.с.	

5. Ефимов С. А. н.с., 0.5 ст.
  6. Седухина Г. Ф. н.с.
  7. Воскобойникова Г. М. н.с. к.т.н.
  8. Караваев Д. А. н.с. к.ф.-м.н.
  9. Якименко А. А. м.н.с., 0.25 ст. к.т.н.
  10. Борисов В. В. ведущ. инженер
  11. Брагинская Л. П. ведущ. программист
  12. Кайсина Н. В. ведущ. инженер, 0.5 ст.
  13. Иванова И. Н. ведущ. инженер
  14. Макаров В. А. ведущ. инженер-электроник
- Караваев Д. А., Якименко А. А. – молодые научные сотрудники.

### Педагогическая деятельность

- Хайретдинов М. С. – профессор НГТУ  
Якименко А. А. – доцент, зав. кафедрой НГТУ.

### Руководство аспирантами

1. Козин Д. С. – 3-й курс аспирантуры ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С.
2. Матвеев И. Н. – 2-й курс аспирантуры ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С.
3. Грищенко М. В. – 2-й курс аспирантуры ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С.
4. Добродородный В. И. – 2-й курс аспирантуры ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С.
5. Машников Д. Я. – 1-й курс аспирантуры ИВМиМГ, руководитель Хайретдинов М. С.

### Руководство студентами

1. Машников Д. Я. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
2. Хасанайн али Аль-Маяали – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
3. Лазарева А. В. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
4. Шунаев Н. А. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
5. Егоров И. С. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
6. Минахурдин Р. Ф. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
7. Чендыева Я. А. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
8. Черепанов А. С. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Хайретдинов М. С.
9. Букреев А. В. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
10. Дементьев А. А. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
11. Станкевич А. И. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
12. Бибииков Н. А. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
13. Гончарук П. С. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
14. Карачаков В. А. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
15. Лыков А. С. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
16. Омеляненко Е. А. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
17. Пинигина Д. Л. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.
18. Чуприн К. В. – 1-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Якименко А. А.

## Лаборатория обработки изображений

Зав. лабораторией д.т.н. Пяткин В. П.

### Важнейшие достижения

#### **Восстановление изображений по многоспектральным рентгеновским проекциям с применением условной минимизации полной вариации на линейных фрагментах.**

Предложена модификация известного в томографии итерационного алгоритма ART-TV, позволяющая повысить качество реконструкции, уменьшить артефакты, уточнить границы объектов и сократить время расчетов.

Д.ф.-м.н. Казанцев И. Г.

#### **Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2017 г. в соответствии планом НИР института**

**Проект НИР № 0315-2014-0003** "Математическое моделирование, численные методы и высокопроизводительные информационно-вычислительные технологии для решения задач активной сейсмологии и дистанционного зондирования Земли".

Номер государственной регистрации НИР 01201370226.

Руководители – д.т.н. Ковалевский В. В., д.т.н. Пяткин В. П.

**Блок 2.** Разработка распределенных высокопроизводительных технологий решения задач моделирования, обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием кластеров Сибирского суперкомпьютерного центра (ССКЦ). Разработка и реализация облачных Web-интерфейсов для доступа как к вновь создаваемым, так и к существующим программным технологиям. Дальнейшее развитие и совершенствование высокопроизводительных программных технологий обработки данных ДЗЗ различного спектрального и пространственного разрешения. Разработка методов и алгоритмов решения задач моделирования, обработки и интерпретации гиперспектральных данных ДЗЗ и томографических сканеров. Разработка статистических алгоритмов и критериев для анализа и моделирования как единичного изображения, так и последовательности изображений. Визуализация "естественной кластеризации" для анализа многомерной гистограммы на основе ее представления в виде четырехмерного рельефа. Разработка высокопроизводительных методов и алгоритмов кластеризации гиперспектральных данных ДЗЗ. Представление результатов проекта для экспертной проверки на лабораторном Web-сервере.

**Этап 2017 г.** Разработка библиотеки обработки и анализа данных ДЗЗ на ЭВМ с несколькими графическими ускорителями. Адаптация разработанной системы жёсткой кластеризации данных ДЗЗ к данным гиперспектральных сканеров. Визуализация макетного четырехмерного рельефа, созданного на основе простейшего четырехмерного многогранника – симплекса. Применение разработанных алгоритмов иерархической кластеризации к решению задач мониторинга загрязнений. Разработка и реализация оптимизационных методов решения прикладных задач ДЗЗ (улучшение качества изображений, снятие шумов, обнаружение аномальных структур и др.). Разработка двух новых последовательных непараметрических статистических критериев для задач скорейшего обнаружения на 3- и 5-зашумленных изображениях, зарегистрированных в результате экспозиции треков (следов) объекта-цели, движущегося прямолинейно к центру важного объекта.

В рамках работ по высокопроизводительной обработке спутниковых данных получила развитие разрабатываемая в лаборатории библиотека обработки изображений на GPU SSCCGPUIP. Актуальность данных исследований определяется потребностью в обработке интенсивного потока спутниковых данных в реальном времени и отсутствием соответствующих средств в программном обеспечении суперкомпьютерных центров.

1. Введена система сборки исполняемых модулей библиотеки на основе свободно распространяемого пакета CMake, что обеспечивает возможность компиляции кода библиотеки на широком классе программно-аппаратных платформ.

2. Выполнено расширение библиотеки операциями обработки на нескольких графических ускорителях. Расширение сохраняет подход библиотеки SSCCGPUIP к:

- сокрытию параллелизма и использования GPU от пользователей за "последовательным" интерфейсом библиотеки;
- организации кода как технологического каркаса, упрощающего расширение библиотеки новыми алгоритмами;
- минимизации накладных расходов на рост уровня абстракции модели вычислений посредством механизма шаблонов C++;
- переносимости кода библиотеки.

Реализованы три подхода к распараллеливанию вычислений между графическими ускорителями.

1. Несколько (по одному для каждого GPU) процессов ОС, запускаемых средой выполнения MPI.

2. Один процесс ОС, несколько (по одному для каждого GPU) потоков, запускаемых кросс-платформенной библиотекой POSIX threads.

3. Один процесс ОС, один поток, использование в цикле асинхронных вызовов CUDA.

Разработка библиотеки ведется на гибридном кластере ССКЦ НКС-30Т+GPU, на момент отчета выполняется профилирование кода библиотеки для решения возникших при разработке проблем с производительностью. Получаемые результаты позволят расширить состав программного обеспечения суперкомпьютерных центров и облегчить использование трудоемких вычислительных алгоритмов в прикладных дистанционных исследованиях.

Выполнена адаптация разработанной ранее системы жесткой кластеризации много-спектральных данных ДЗЗ к данным гиперспектральных сканеров. Известно, что гиперспектральная (с количеством спектральных диапазонов больше 100) съемка, при которой спектральные диапазоны каналов съемочной аппаратуры покрывают некоторый диапазон электромагнитного спектра, обеспечивает получение данных, обладающих большей информативностью по сравнению с мультиспектральными данными. Вместе с тем обработка гиперспектральных данных требует значительных вычислительных ресурсов. До недавнего времени при обработке данных гиперспектральной съемки либо разрабатывались более простые с вычислительной точки зрения, но менее "точные" алгоритмы (например, классификатор спектрально-углового картирования, использующий только статистики первого порядка), либо уменьшалась размерность пространства измерений до значений, присущих многоспектральным данным (как правило, посредством выделения главных компонент, что, как всякое линейное преобразование, может приводить к разрушению нелинейных связей между векторами признаков). В рамках настоящего проекта:

1. Разработана система визуализации гиперспектральных данных, позволяющая в интерактивном режиме исключать "шумовые" каналы из обрабатываемых данных.

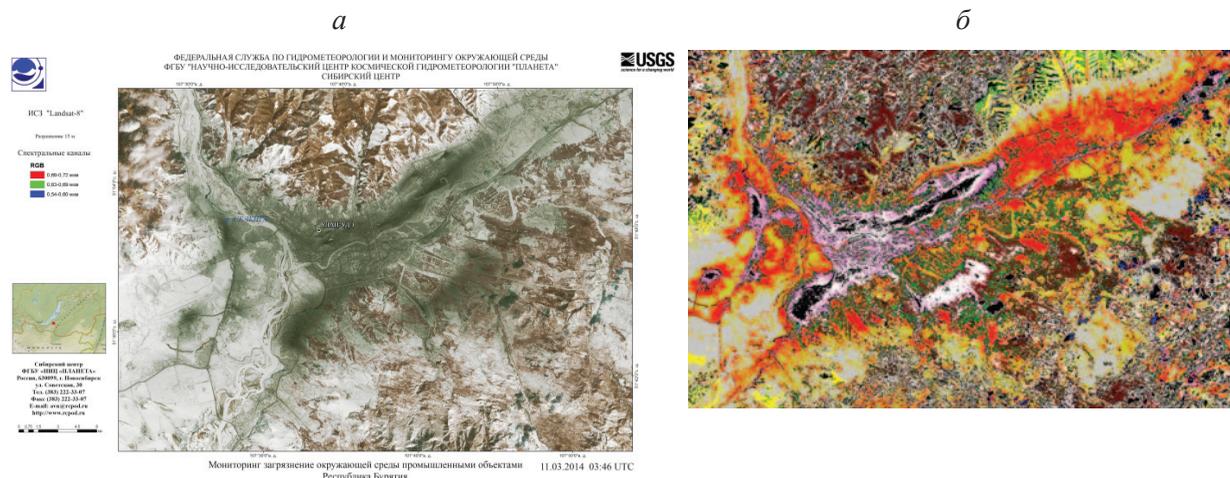


Рис. 1. Анализ загрязнений в районе г. Улан-Удэ:  
*а* – фактическая карта загрязнений; *б* – кластерная карта

2. Оба варианта алгоритма К-средних – Ллойда и Макквина – адаптированы к размерностям векторов измерений, присущих гиперспектральным данным.

Вычислительные эксперименты, проведенные на реальных данных, выявили необходимость распараллеливания вычислений. Получаемые карты кластеризации имеют как самостоятельное значение, так и могут быть использованы для построения сигнатур классов в контролируемой классификации Байеса.

Разработанная программная система может быть использована в программных комплексах тематической обработки данных ДЗЗ. Она включена в состав развиваемого в лаборатории программного комплекса обработки данных ДЗЗ PlanetMonitoring, а в пакетном варианте стала вычислительным ядром разрабатываемой облачной технологии кластеризации данных ДЗЗ. Программный комплекс PlanetMonitoring, предназначенный для обработки информации как с низкоорбитальных, так и с геостационарных спутников Земли, рекомендуется для внедрения в практику научной и производственной деятельности центров приема и обработки спутниковых данных. В настоящее время комплекс внедрен в НИЦ "Планета" (Москва).

Работы по визуализации четырехмерных объектов развивают масштабируемую модель рельефа, в основе которой находятся решения уравнений Пуассона. В отчетный период предложена плоская развертка четырехмерного многогранника-симплекса, служащая алгоритмической базой визуализации макетного четырехмерного рельефа.

Разработанные ранее алгоритмы иерархической кластеризации были применены к решению задач мониторинга загрязнений. Автоматизированное построение карт на основе иерархической кластеризации позволило определить загрязненные территории, оценить их площади; задание порога хорошо отделенных кластеров позволило уточнить их границы.

На рис. 1 приведен анализ загрязнений в районе г. Улан-Удэ, основные источники загрязнения здесь ГРЭС, промышленные предприятия, транспорт, мусорные свалки. Рис 1, *а* – фактическая карта загрязнений, предоставленная сибирским центром ФГБУ НИЦ "Планета". Рис 1, *б* – кластерная карта семиспектрального спутникового изображения, полученного со спутника Landsat-8.

В связи с продолжающимся прогрессом в создании многоспектральных детекторов электромагнитного излучения для их использования в спутниковых системах дистанционного зондирования Земли, в медицинских сканерах и томографах, дефектоскопии и других

технических устройствах, актуальным является оптимизация численных методов обработки больших объемов данных. Разработанный в рамках проекта РФФИ № 16-07-00066 новый метод решения задачи итерационной реконструкции изображения в томографии по много-спектральным данным (см. "Важнейшие достижения") позволяет оптимизировать не только процедуры реконструкции объектов томографии, но и улучшать границы на изображениях ДЗЗ с помощью обработки одномерных фрагментов разработанными алгоритмами.

Продолжалось рассмотрение актуальной задачи обнаружения микрообъектов-целей, движущихся прямолинейно и равномерно к важному (охраняемому) объекту. За отчетный период в проекте разработаны формы последовательных непараметрических критериев для задач по возможности скорейшего (или близкого к нему) обнаружения появления объекта-цели по результатам многоканальных наблюдений, в каждом канале которых "зарегистрирован" трек (след) движущегося объекта. Задачи обнаружения движущихся объектов, появляющихся в произвольные моменты времени и в произвольных точках контролируемого пространства, особенно в условиях сложного (случайного) фона и/или плохой видимости в оптическом и радиодиапазонах, возникают при создании разного рода информационных систем научного, гражданского и, что особенно важно, военного назначения. Известно, что задачу обнаружения движущихся объектов можно трактовать как задачу проверки последовательности статистических гипотез об однородности величин, наблюдаемых в точках области возможного положения объекта и в точках окружающего объект сложного (случайного) фона. На практике такие задачи приходится решать, как правило, в условиях большой априорной неопределенности, при неизвестных вероятностных распределениях наблюдаемых величин (сигналов). Существует мнение, что чем меньшей информацией о случайном явлении мы располагаем, тем более необходимым оказывается прибегать к помощи решений, основанных на функциях от наблюдаемых величин (статистиках), распределения значений которых не зависят от того, по какому именно закону и с какими параметрами распределены значения наблюдаемых величин. Такие статистики называют непараметрическими, а тесты (критерии), основанные на этих статистиках, – непараметрическими. Очень большое внимание задаче обнаружения движущихся объектов уделяется в англоязычных журналах, однако в подавляющем большинстве публикаций предполагается наличие полной априорной информации о наблюдаемых величинах, публикации с особенно востребованными последовательными непараметрическими критериями почти отсутствуют. Разработанный алгоритм основан на созданном ранее в лаборатории новом непараметрическом статистическом критерии для проверки гипотезы об однородности трех совокупностей (выборки) случайных векторов, более мощном, чем известный непараметрический критерий Уитни, и на предложенном ранее последовательном непараметрическом статистическом критерии и наследует их устойчивость к возможному присутствию в поле зрения "мешающих" объектов.

Поддерживался сервер лаборатории <http://loi.sccc.ru>.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 16-07-00066** "Исследование и разработка эффективных методов, алгоритмов и программных технологий обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли, получаемых сканерами различного спектрального и пространственного разрешения"

Руководитель – д.т.н. Пяткин В. П.

Создана высокопроизводительная технология классификации гиперспектральных данных ДЗЗ на основе алгоритма спектрально-углового картирования. Исследована точность

быстрого моделирования измерений аппаратуры КА Метеор М № 2. Разработаны способы комплексирования спектральной информации на основе сходства фазовых изображений томографических реконструкций в различных диапазонах; проведены вычислительные эксперименты с алгоритмом ART-TV и его управляющими параметрами в 2- и 3-мерных реализациях; разработаны нелинейные аналоги итерационных методов с включением регуляризирующих функционалов высокого порядка. Разработан новый, более эффективный последовательный статистический алгоритм по возможности скорейшего обнаружения на единичном зашумленном изображении следа траектории объекта-цели, движущегося прямолинейно к важной заданной точке (к важному объекту) на этом изображении. Получены модели стыковки-слияния трех поверхностей относительно общей оси, позволяющие интерпретировать их на внешние и внутренние стороны в четырехмерном пространстве, обеспечивающие расширение трехмерной гиперповерхности масштабируемой модели рельефа в четырехмерное гиперпространство. Разработана схема распараллеливания иерархического алгоритма кластеризации. Поддерживался Web-сайт проекта <http://loi.sscs.ru/labweb/Lab/RFFI2016-2018/RU/main16.html>.

### **Результаты работ по научно-исследовательским программам, проектам Президиума РАН, ОМН РАН и Сибирского отделения РАН**

**Программа Президиума РАН I.33П, проект № 0315-2015-0012 "Разработка методов математического моделирования и вычислительных технологий для решения взаимосвязанных задач экологии и климата с использованием данных наземного и спутникового мониторинга".**

Руководители: д.ф.-м.н. Пененко В. В., д.т.н. Пяткин В. П.

Разработана высокопроизводительная технология жесткой кластеризации гиперспектральных данных ДЗЗ. Разработаны технологии обработки данных ДЗЗ на удаленной ЭВМ с несколькими GPU. Разработаны новые параметрические методы обнаружения разломов ледяных структур на спутниковых изображениях с помощью вероятностного аналога преобразования Радона. Разработаны статистические алгоритмы для задач анализа поверхности ледяного покрова и открытой воды Арктики по данным ДЗЗ.

### **ФЦП "Федеральная космическая программа России на 2016–2025 гг."**

**Проект в рамках хозяйственных работ с Научно-исследовательский центром "Планета" (Москва) "Разработка предложений в аванпроект по модернизации универсального программно-математического обеспечения для построения быстрых радиационных моделей измерений существующей и перспективной спутниковой целевой аппаратуры метеорологического назначения".**

Руководитель – д.т.н. Пяткин В. П.

Подготовлены и представлены заказчику предложения в аванпроект по составной части ОКР, обеспечивающие технологическое обоснование модернизации разработанного ранее комплекса SatRaS для обеспечения разрабатываемой в ОКР системы валидационных подспутниковых наблюдений средствами высокопроизводительного моделирования спутниковых измерений в различных метеоусловиях.

**Проект в рамках хоздоговорных работ с Научно-исследовательский центром "Планета" (Москва)** "Разработка автоматизированного программного комплекса внешней калибровки и валидации информационных продуктов аппаратуры МТВЗА-ГЯ космических аппаратов серии "МЕТЕОР-М".

Руководитель – д.т.н. Пяткин В. П.

Начата разработка программного комплекса внешней калибровки и валидации информационных продуктов аппаратуры МТВЗА-ГЯ космических аппаратов серии "Метеор-М".

### Публикации

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Asmus V. V., Timofeyev Yu. M., Polyakov A. V., Uspensky A. B., Golovin Yu. M., Zavelevich F. S., Kozlov D. A., Rublev A. N., Kukharsky A. V., Pyatkin V. P., Rusin E. V. Atmospheric temperature sounding with the Fourier spectrometer // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. Vol. 53, iss. 4. P. 428–432. DOI: 10.1134/S0001433817040028.

2. Beyerlein K. R., White T. A., Yefanov O., Gati C., Kazantsev I. G., Nielsen N. F., Larsen P. M., Chapman H. N., Schmidt S. FELIX: an algorithm for indexing multiple crystallites in X-ray free-electron laser snapshot diffraction images // *J. of Appl. Crystallography*. 2017. Vol. 50. P. 1–9. DOI: 10.1107/S1600576717007506.

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Асмус В. В., Бучнев А. А., Кровотынцев В. А., Пяткин В. П., Салов Г. И. Комплекс программного обеспечения PlanetaMonitoring // Труды Всерос. конф. "Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов", Новосибирск, 29–31 авг. 2017 г. [Электрон. ресурс]. [http://conf.nsc.ru/files/conferences/SDM-2017/418269/\(SDM-2017\)%20Thesis.pdf](http://conf.nsc.ru/files/conferences/SDM-2017/418269/(SDM-2017)%20Thesis.pdf) (27.10.2017). С. 31–39.

2. Бучнев А. А., Пяткин В. П. Нечеткая классификация данных дистанционного зондирования Земли // Там же. С. 73–77.

3. Казанцев И. Г. Об одном подходе к задаче улучшения границ на многоспектральных изображениях // Там же. С. 98–101.

4. Сидорова В. С. Неконтролируемая кластеризация мультиспектральных изображений // Там же. С. 155–159.

#### Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Предметное образование : коллективная монография / Арбузова Е. Н., Гефан Г. Д., Дубова М. А., Чернова Л. А., Никонова Н. К., Яскина О. А., Ким П. А., Федоровых О. П., Кувшинова И. А., Милицина О. В., Величко Ю. В., Панина С. В. Москва: Русальянс Сова, 2016. 99 с. (Не вошла в отчет 2016 г.)

2. Асмус В. В., Тимофеев Ю. М., Поляков А. В., Успенский А. Б., Головин Ю. М., Завелевич Ф. С., Козлов Д. А., Рублев А. Н., Кухарский А. В., Пяткин В. П., Русин Е. В. Температурное зондирование атмосферы по данным спутникового ИК Фурье-спектрометра // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 4. С. 487–492.

3. Бучнев А. А., Пяткин В. П., Пяткин Ф. В. Модель облачной среды для обработки данных дистанционного зондирования Земли // *ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении*. 2017. № 3 (3). С. 57–61.

4. Ким П. А. Гобеленовый класс // Сб. статей Всероссийской научно-практической конференции "Подготовка кадров технологического профиля в условиях реиндустриализации экономики региона". 2017. [Электрон. ресурс]. С. 39–45.

5. Бучнев А. А., Пяткин В. П. Нечеткие кластеры с объемными прототипами в тематической обработке данных дистанционного зондирования Земли // Журн. Сиб. фед. ун-та. Сер.: Техника и технологии. 2017. Т. 10, № 6. С. 723–726.
6. Бучнев А. А., Ким П. А., Пяткин В. П., Салов Г. И. Макет облачного Web-сервиса по выделению линейных и кольцевых структур на космических изображениях // Там же. С. 741–746.
7. Сидорова В. С. Гистограммный иерархический алгоритм и понижение размерности пространства спектральных признаков // Там же. С. 714–722.
8. Бучнев А. А., Пяткин В. П., Пяткин Ф. В. Облачная среда в прикладных дистанционных исследованиях Земли // Сборник статей по материалам 13-го Международного научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь", Новосибирск, 19–21 апреля 2017 г. Т. 4, № 2. С. 8–13.
9. Бучнев А. А., Пяткин В. П. Классификация с обучением гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли // Там же. С. 8–12.
10. Казанцев И. Г. Комплексирование многоспектральной информации в задачах уточнения границ на изображениях в томографии // Там же. С. 3–7.
11. Ким П. А. О слиянии-стыковке краев проективных поверхностей // Там же. С. 34–37.
12. Пяткин В. П., Салов Г. И. К задаче обнаружения протяженных объектов на зашумленных изображениях при отсутствии вероятностных распределений // Сборник статей по материалам 13-го Международного научного конгресса "Интерэкспо Гео-Сибирь", Новосибирск, 19–21 апреля 2017 г. Т. 4, № 2. С. 23–27.
13. Сидорова В. С. Сравнение карт по капле Коэна // Там же. С. 18–22.
14. Ким П. А. 4D моделирование // Материалы 17-й Международной конференции по науке и технологиям Россия – Корея – СНГ. 2017. С. 225–228.
15. Бучнев А. А., Пяткин В. П. Классификация гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли // Материалы 4-й Международной научной конференции "Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли", Красноярск, 12–15 сент. 2017 г. 2017. С. 73–77.
16. Сидорова В. С. Автоматизированное сравнение кластерных карт многоспектральных изображений Земли, полученных дистанционными методами, и таксационных карт леса // Там же. С. 167–170.
17. Бучнев А. А., Пяткин В. П. Контролируемая классификация гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли // Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПМ'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 133–136.
18. Казанцев И. Г. Многоспектральные проекции в задаче уточнения границ на изображениях в томографии // Там же. С. 401–404.
19. Сидорова В. С. Иерархический кластерный алгоритм для текстурных данных поверхности Земли // Там же. С. 809–813.

#### **Сдано в печать**

1. Kazantsev I. G., Olsen U. L., Poulsen H. F., Hansen P. C. A spectral geometric model for Compton single scatter in PET based on the Single Scatter Simulation (SSS) approximation // Inverse Problems.

2. Sidorova V. S. Unsupervised Classification of the Earth's Surface Data // Information Technology in Industry.

### **Участие в конференциях и совещаниях**

1. 13-й Международный научный конгресс и выставка "Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2017", Новосибирск, 19–21 апреля 2017 г. – 6 докладов, из них 1 пленарный (Пяткин В. П., Бучнев А. А., Казанцев И. Г., Ким П. А., Салов Г. И., Сидорова В. С.).

2. Всероссийская научно-практическая конференция "Подготовка кадров технологического профиля в условиях реиндустриализации экономики региона", Новосибирск, 19–21 апреля 2017 г. – 1 (Ким П. А.).

3. 46-я Международная конференция "Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе" (IT+SE-2017) (весенняя сессия), Гурзуф, 22 мая – 1 июня 2017 г. – 1 доклад (Пяткин В. П.).

4. Международная конференция по науке и технологиям Россия – Корея – СНГ. Южно-Сахалинск, 15–17 июня 2017 г. – 1 доклад (Ким П. А.).

5. Международная конференция "Математика в современном мире", посвященная 60-летию Института математики им. С. Л. Соболева, Новосибирск, 14–19 августа 2017 г. – 1 доклад (Салов Г. И.).

6. 8-я Международная конференция по математическому моделированию, Якутск, 4–8 июля 2017 г. – 1 доклад (Казанцев И. Г.).

7. Международная конференция по вычислительной и прикладной математике (ВПМ'17), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 4 доклада, из них 1 приглашенный (Бучнев А. А., Казанцев И. Г., Ким П. А., Сидорова В. С.).

8. 7-я Байкальская международная школа-семинар "Методы оптимизации и их приложения", Максимиха (Бурятия); Иркутск, 31 июля – 6 августа 2017 г. – 1 доклад (Казанцев И. Г.).

9. Всероссийская конференция "Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов". Бердск, 29-31 августа 2017 г. – 4 доклада, из них 1 пленарный (Пяткин В. П., Бучнев А. А., Казанцев И. Г., Сидорова В. С.).

10. 4-я Международная научная конференция "Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли", Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. – 2 доклада, из них 1 пленарный (Пяткин В. П., Сидорова В. С.).

11. Всероссийская астрономическая конференция 2017 г. "Астрономия: познание без границ", Ялта, 17–22 сентября 2017 г. – 1 доклад (Бучнев А. А.).

12. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика–2017", Санкт-Петербург, 9–13 октября 2017 г. – 1 доклад (Бучнев А. А.).

### **Участие в оргкомитетах российских и международных конференций**

1. Пяткин В.П.:

– член оргкомитета 13-го Международного научного конгресса и выставки "Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2017", Новосибирск, 19–21 апреля 2017 г.;

– член программного комитета Международной конференции по вычислительной и прикладной математике (ВПМ'17), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.;

– член программного комитета 4-й Международной научной конференции "Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли", Красноярск, 12–15 сентября 2017 г.

**2. Русин Е.В.:**

– член оргкомитета 13-го Международного научного конгресса и выставка "Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2017", Новосибирск, 19–21 апреля 2017 г.;

– член оргкомитета Международной конференции по вычислительной и прикладной математике (ВПМ'17), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

**Итоговые данные по лаборатории**

Монографий, глав в монографиях – 1

Публикаций, индексируемых в базе данных WoS – 2

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 6

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 25

Докладов на конференциях – 25, в том числе пленарных – 3, приглашенных – 1

Участников оргкомитетов конференций – 5

**Кадровый состав лаборатории**

- |                      |                   |
|----------------------|-------------------|
| 1. Пяткин В. П.      | зав. лаб., д.т.н. |
| 2. Бучнев А. А.      | с.н.с., к.т.н.    |
| 3. Казанцев И. Г.    | с.н.с., д.ф.-м.н. |
| 4. Ким П. А.         | с.н.с., к.ф.-м.н. |
| 5. Русин Е. В.       | с.н.с., к.т.н.    |
| 6. Салов Г. И.       | с.н.с., к.т.н.    |
| 7. Сидорова В. С.    | н.с.              |
| 8. Калашникова Е. Г. | ведущ. инженер    |
| 9. Карогодина Т. И.  | ведущ. инженер    |

**Педагогическая деятельность**

Пяткин В. П. – профессор СГУГиТ.

Ким П. А. – доцент НГПУ.

**Премии и награды**

Салов Г. И. – медаль им. К. Э. Циолковского Федерации космонавтики России.

## Лаборатория системного моделирования и оптимизации

Зав. лабораторией д.т.н. Родионов А. С.

### Важнейшие достижения

#### Параллельные методы расчета показателей надежности сетей.

Разработка параллельных алгоритмов точного и приближенного расчета показателей структурной надежности сетей, позволяющих их анализ и оптимизацию для широкого класса сетей реальной размерности (до сотен и тысяч узлов) за разумное время (до нескольких часов).

Д.т.н. Родионов А. С., к.ф.-м.н. Мигов Д. А.

#### Разработка и исследование алгоритма многовариантного эволюционного синтеза нелинейных моделей.

Предложен алгоритм решения проблемы построения нелинейных моделей (математических выражений, функций, алгоритмов, программ) на основе заданных экспериментальных данных, множества переменных, базовых функций и операций. Получены оценки эффективности предложенного алгоритма на параллельных суперкомпьютерных системах и показано существенное преимущество данного подхода по сравнению с известными алгоритмами как по времени поиска решения (более чем на порядок в большинстве случаев), так и по вероятности нахождения заданной функции (во многих случаях более чем в два раза).

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

### Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершаемым в 2017 г. в соответствии с планом НИР института

**Проект № 0315-2016-0006** "Развитие теории и разработка математических моделей и методов мониторинга, анализа и оптимизации сложных систем".

Номер государственной регистрации НИР 01201370228.

Руководитель проекта – д.т.н. Родионов А. С.

Предложены методы измерения параметров пар узлов распределенной информационно-вычислительной системы (РИВС), состоящей из конечного непустого множества узлов  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$  и подмножества пар узлов  $J \times J$ , связанных бинарным отношением  $R$ . Множество  $J$  представляет коллекцию научных журналов, а каждый журнал рассматривается как агрегированное множество научных статей, опубликованных за время издания журнала. На  $J$  задано бинарное отношение  $R: J_i R J_j \equiv J_i$  цитирует  $J_j$ , определяющее сеть  $N = (J, R)$  цитирования научных журналов (СЦЖ), в которой журналы являются узлами сети, а цитирования – связями между ними. Здесь термин " $J_i$  цитирует  $J_j$ " означает, что в журнале  $J_i$  опубликована статья, которая цитирует статью из журнала  $J_j$ . На основе СЦЖ построены две производные сети: библиографического сочетания, для которой выполняется тождество  $J_i R^{\text{bib}} J_j \equiv (\exists k) J_i J_k \& J_j R J_k$ , и сеть коцитирования, для которой  $J_i R^{\text{coc}} J_j \equiv (\exists k) J_k R J_i \& J_k R J_j$ . Для моделирования СЦЖ представлена в виде взвешенного орграфа  $G = (V, E)$ , в котором журналы соответствуют узлам  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , а отношения цитирования – ориентированным ребрам  $E \subseteq V \times V$ ,  $e = (v_i, v_j) \in E$ . На множестве  $E$  определена функция веса  $w: E \rightarrow \mathbb{N}^+$ ,  $w(v_i, v_j)$  – число цитирований, полученных журналом  $J_j$  от журнала  $J_i$ . На момент времени  $T$  БД *RePEc* содержала информацию о цитировании статей, опубликованных в 1731 журнале, организованную в кортежи пар вида  $(i, \{u(i)\})$ , где  $i$  указывает на статью  $a_i$ ,

а множество  $\{u(i)\}$  содержит указатели на все статьи, цитирующие статью  $a_i$ :  $1,3 \times 10^5$  статей и  $5,1 \times 10^5$  цитирований. Была выделена главная слабо связанная компонента, для которой были измерены значения сетевых параметров, отражающих свойства пар узлов, характерные для СЦЖ и производных сетей (коцитирования и библиографического сочетания): параметризованное взвешенное расстояние, взвешенное среднее расстояние и взвешенный коэффициент кластеризации. Проведенные численные эксперименты и анализ полученных результатов позволяют утверждать, что в рассмотренной парадигме представленные библиометрические сети обладают свойствами “малого мира”: наличие одной иерархически организованной связанной компоненты значительного размера; достаточно малое значение диаметра графа, соответствующего этой компоненте; большие значения кластерного коэффициента компоненты; распределение степеней вершин графа, отвечающее степенному закону. Исследованы подходы выявления на основе цитирования сообществ научных журналов, соответствующих тематическим областям.

К.т.н. Бредихин С. В., с.н.с. Щербакова Н. Г., ведущ. инж. Ляпунов В. М.

Задача минимизации невыпуклой функции на шаре сводится к последовательности задач минимизации ее выпуклых мажорант на шаре. Для построения мажорант используются представление целевой функции в виде разности выпуклых квадратичных функций и результат решения задачи на предыдущем шаге. Представление целевой функции в виде разности выпуклых квадратичных функций базируется на модифицированной процедуре декомпозиции Холецкого симметричной знакопеременной матрицы. Для данного алгоритма обосновывается способ выбора эффективного начального приближения с использованием некоторых результатов исследований из области многокритериальной оптимизации. За основу построения векторного критерия берется представление целевой функции в виде разности двух выпуклых квадратичных функций.

Для решения задач безусловной минимизации и минимизации при простых ограничениях на переменные рассматривались квазиньютоновские алгоритмы. В одном из них на итерациях строится матрица, являющаяся приближением к гессиану. Матрица, соответствующая приближениям к гессиану, на итерациях с помощью метода отражения поддерживается в LDLT форме, что позволяет на шагах метода контролировать обусловленность оценок гессиана. В квазиньютоновском алгоритме с ограниченной памятью строятся аппроксимации для обращенной матрицы Гессе, но матрица явно не формируется, а запоминаются по ходу итерации некоторое число векторов, определяющих квазиньютоновские поправки. Проведено сопоставление алгоритмов относительно точности и трудоемкости. Для решения задач большой размерности разработан параллельный вариант квазиньютоновского алгоритма с ограниченной памятью на основе технологии OpenMP. Выполнена проверка эффективности параллельного алгоритма на тестовых задачах большой размерности. Результаты численных экспериментов показывают, что распараллеливание эффективно в широком диапазоне изменения размерности задач.

К.т.н. Забияко Г. И., Котельников Е. А.

Продолжены исследования свойств моделей календарного планирования: показано, что в формализации задач календарного планирования сложных комплексов работ содержатся неточности, приводящие к ошибкам в расписаниях сложных комплексов работ; разработана модель объемно-календарного планирования для построения долгосрочных планов проектов большой размерности.

К.э.н. Ляхов О. А.

В рамках развития информационной системы Фонда алгоритмов и программ СО РАН выполнялся анализ тенденций развития программных сред и оценка существующих решений, осуществлялось развитие информационной системы ФАП СО РАН и интегрированных с ней сервисов. Основной объем работ проводился над обновлением корпоративных репозиторий свободного ПО, демонстрационной площадки свободного ПО. Были существенно модернизированы следующие сервисы:

- информационная система Фонда алгоритмов и программ СО РАН;
- корпоративные репозитории свободного ПО;
- демонстрационная площадка свободного ПО.

Также в течение всего года осуществлялось информационное пополнение сервисов Фонда. Организована постоянная техническая поддержка и администрирование системы, сопровождение и актуализация ее сервисов и служб.

Осуществлялось развитие разработанного ранее комплекса базовых решений сайта ИВМиМГ СО РАН (техническая архитектура, подсистемы), особое внимание уделялось повышению интерактивности системы, ее удобства для пользователей. Реализованы следующие функции системы: единая категоризация всех видов содержимого (контента), разграничение доступа пользователей к отдельным функциям системы на основе ролей, поддержка XML-форматов (вывод документов в RDF, агрегация материалов из внешних источников), механизм ограничения нагрузки на систему (кэширование, автоматическое отключение информационных блоков и модулей в зависимости от нагрузки на систему). Для обеспечения функционирования системы на мощностях ССКЦ был развернут программно-технический комплекс с обеспечением доступа к сети Интернет.

Кратов С. В.

Для оценивания надежности сети методом статистического моделирования предлагается осуществлять генерацию частной реализации графа одновременно с проверкой его связности. Как показали численные эксперименты, проведенные на различных структурах, в том числе на структурах реальных сетей, новый подход значительно ускоряет процесс оценки надежности. Например, для плотных высоконадежных структур – в 4 раза. В таблице приведены результаты оценки надежности европейской научно-образовательной сети GÉANT в 2009 г. (390 узлов и 503 ребра).

**Таблица 1** – Сравнение эффективности алгоритмов генерации связных структур

Надежность ребра	P=0.75	P=0.9	P=0.99	P=0.999
Время расчета (с):				
– новый метод	45	72	314	402
– стандартный метод	67	92	421	623

К.ф.-м.н. Мигов Д. А.

В ходе работ по моделированию дорожного движения расширена описанная в ранних работах клеточно-автоматная модель за счет добавления понятия скорости автомобиля, реализации перестроения на прямых многополосных дорогах и перекрестках многополосных дорог. Реализована модель Трайбера для однополосного движения, проведены сравнения результатов моделирования с более ранними работами и между собой. Построенные фундаментальные диаграммы незначительно отличаются от эмпирических данных, равно как и от результатов моделирования такой же однополосной дороги с помощью клеточных автоматов и модели Трайбера.

К.ф.-м.н. Омарова Г. А.

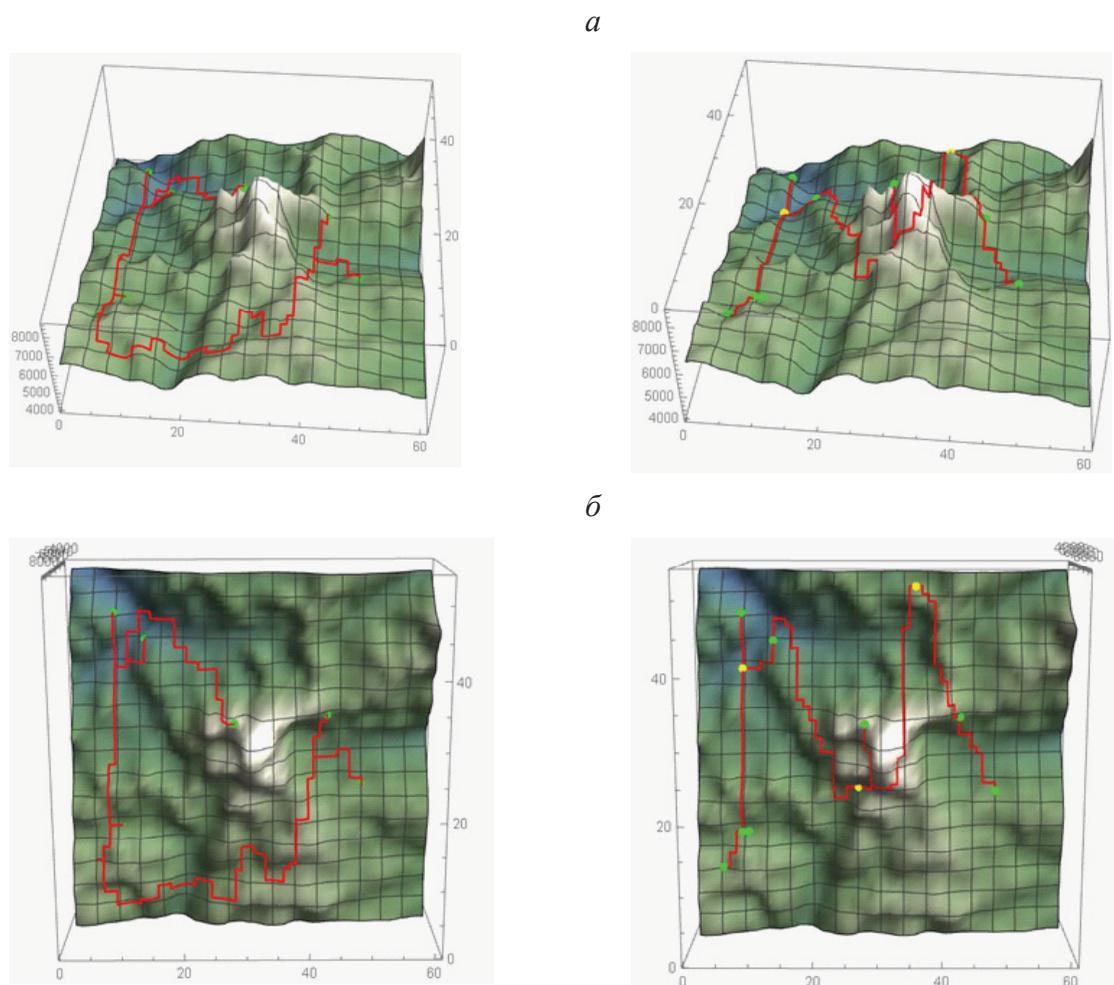


Рис. 1 – Построение начального решения и его улучшение для восьми вершин-потребителей и трех дополнительных вершин:  
*а* – вид сбоку; *б* – вид сверху

Рассмотрена задача оптимизации сетей инженерных коммуникаций различного назначения, включающей необходимости поиска оптимальной по критерию минимальности затрат трассы с учетом ограничительных условий, определяемых характеристиками заданной территории, и оптимального вложения структур проектируемой сети по найденной трассе.

Задача решена в гиперсетевой постановке, в которой область размещения представлена первичной сетью, а структура проектируемой сети вторичной. В рамках гиперсетевого подхода и эволюционного синтеза были предложены два алгоритма, которые позволяют сократить в среднем суммарные затраты для заданной инженерной сети по сравнению с начальным решением примерно на 3–15 % в зависимости от конфигурации, параметров и области размещения: первый – это модифицированный алгоритм дифференциальной эволюции, учитывающий основные правила и ограничения (в том числе рельеф местности) при построении сетей различного назначения, второй – новый модифицированный алгоритм муравьиной колонии, включающий правила построения множества вершин и ветвей первичной сети и множества ребер вторичной сети (рис. 1).

К.т.н. Токтошов Г. Ы.

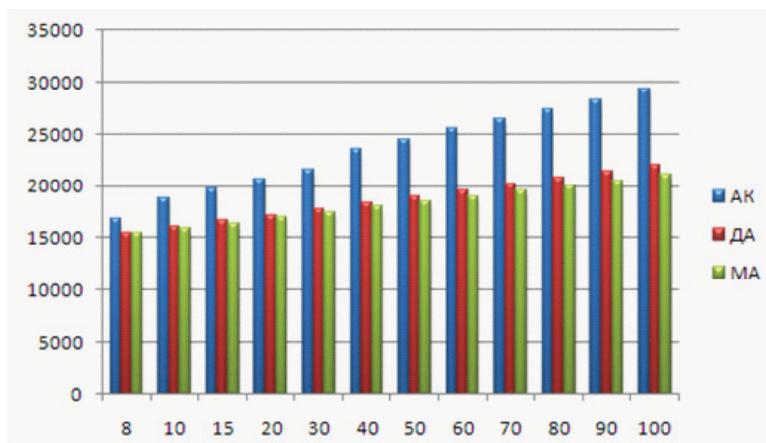


Рис. 2 – АК – алгоритм Крускала; ДА – дифференциальная эволюция; МА – муравьиный алгоритм (по оси  $x$  – число ребер вторичной сети; по оси  $y$  – стоимость сети)

**Таблица 2** – Средняя величина сокращения затрат (в скобках – среднеквадратическое отклонение) для инженерных сетей в проц. от начального решения для различного числа дополнительных точек (ДТ) и вершин-потребителей (П)

ДТ \ П	10	40	70	100
3	7.3 (3.4)	11.0 (5.7)	11.0 (5.3)	9.0 (2.4)
5	7.3 (3.1)	11.8 (7.7)	11.2 (3.3)	10.3 (2.1)
7	6.1 (3.0)	8.0 (2.9)	10.6 (4.8)	14.6 (5.4)
10	0.3 (0.5)	8.8 (4.0)	14.3 (4.9)	13.6 (2.7)
15	0	9.7 (5.5)	9.5 (2.6)	10.3 (2.8)
20	0	4.6 (3.0)	12.7 (5.3)	15.9 (5.8)

Рассматривается задача функционирования беспроводных сетей в условиях несанкционированных вторжений, под действием атак. Исследуется моделирование атак Black Hole и Jamming на узлы БСС. В качестве модели беспроводной сети используются графы единичных кругов (UDG-графы), наиболее адекватно описывающие связи в беспроводных сетях, передача информации между узлами которых возможна, если они находятся в пределах взаимной достижимости радиосигнала. Для простого случая остовного дерева и двух атакованных вершин получена формула оценки среднего числа вершин, от которых будет потеряна информация при атаке Jamming. Для более сложных случаев проведено имитационное моделирование (для построения остовного дерева использовался алгоритм маршрутизации Minimum Hop Route). Полученные аналитические результаты согласуются с результатами имитационного моделирования.

Рассматривалась задача оптимального вложения вторичной сети в первичную (модель гиперсети) с учетом условий надежности построенной гиперсети. Для получения решения использовался двухстадийный алгоритм (поиск приближенного решения и дальнейшее его улучшение) и алгоритм муравьиной колонии.

К.ф-м.н. Юргенсон А. Н., к.ф-м.н. Мигов Д. А, к.т.н. Токтошов Г. Ы.

Разработан эволюционный алгоритм для синтеза семейств оптимальных регулярных структур инфокоммуникационных сетей суперкомпьютерных систем, позволяющий находить их аналитические описания. Разработанный алгоритм применен при решении задачи оптимизации циркулянтных сетей, состоящей в максимизации числа вершин (порядка)

при заданных степени и диаметре графа. Для мультипликативных циркулянтных сетей с образующими, представленными в виде степеней натурального числа, найдены новые семейства аналитически описываемых графов степеней 8 и 10 и диаметром от 6 до 80. На основе найденных максимальных значений порядков графов построены два новых семейства мультипликативных циркулянтов и математически доказано их существование для любых степеней. Найденные графы превосходят по числу вершин все известные по литературе семейства мультипликативных циркулянтов при одинаковых степенях и диаметрах. Максимальность порядков (компактность) полученных графов и простой вид их образующих дают теоретическую основу хороших структурных и коммуникационных свойств при их применении в качестве сетей связи суперкомпьютерных систем.

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

Реализованы базовые средства моделирования динамики поведения многоуровневых сетей с применением мультиагентного подхода к описанию моделей. Предложен подход к реализации средств имитационной оптимизации в создаваемой параллельной системе имитационного моделирования для СКЦ КП СО РАН, основанной на опыте использования мультиагентной системы AGNES. Создана библиотека элементарных моделей системы моделирования MTSS для быстрой сборки моделей систем сетевой структуры.

Д.т.н. Родионов А. С., к.т.н. Рудомётов С. В., Ткачёв К. В.

Продолжена разработка методов точного расчета и оценивания показателей качества функционирования ненадежных сетей и соответствующих методов структурной оптимизации. Получены новые методы ускорения расчета и оценивания математического ожидания значения выбранного показателя с применением метода частичных сумм.

Д.т.н. Родионов А. С., к.ф.-м.н. Мигов Д. А.

Продолжаются работы по сопровождению и актуализации баз данных для поддержки научного процесса ИВМиМГ, включая ведение базы "Публикации научных сотрудников института" (добавлены 719 записей за 2016 г.) и базы сотрудников института, для которой реализовано новое программное обеспечение, включающее функционал для обработки запросов, касающихся научной и производственной деятельности.

Моисеенко В. В.

### **Результаты работ по проектам РФФИ**

**Проект № 17-07-00775 "Разработка математических моделей и алгоритмов анализа и оптимизации иерархических сетей".**

Руководитель проекта – д.т.н. Родионов А. С.

Подготовлен обзор по моделированию многоуровневых сетей. Многоуровневыми сетями принято описывать структуру современных коммуникационных сетей (как транспортных сетей, так и сетей передачи информации). Для адекватного отображения процессов функционирования таких сетей используются сложные математические объекты – модели на базе случайных и нечетких графов, гиперграфов, многоуровневые сети, в частности гиперсети. Например, с помощью аппарата гиперсетей возможно адекватное описание таких сложных систем, как структурированные кабельные системы, транспортные сети, инженерные коммуникации. При решении прикладных задач анализа функционирования многоуровневых сетей отдельные уровни моделируются традиционными графовыми моделями. При этом необходимо разрабатывать алгоритмы, которые будут учитывать иерархию

уровней – сложные взаимосвязи между вершинами разных уровней, вложение элементов графа одного уровня в элементы другого и т. д. Для удобства использования моделей с иерархической структурой необходимо наличие удобного языка – как для описания входных данных, так и для алгоритмов решения оптимизационных задач и описания полученного результата. В ходе работы над проектом разработаны способы описания элементов гиперсетей для использования в качестве модели. Разработаны программные интерфейсы для управления объектами многоуровневых иерархических структур – хранения, извлечения и анализа данных. Предложены различные способы управления данными, различающиеся использованием форматов данных.

Разработана модель для анализа надежности/живучести узла сети мониторинга, основанная на марковском процессе с поглощающим состоянием. Получены формулы зависимости вероятностей состояния ресурсов узла от времени.

Для некоторых видов ресурса получены аналитические формулы, которые могут быть использованы в постановках задач размещения пунктов промежуточного сбора и обработки данных, оптимизации стратегии обеспечения информационной безопасности, живучести и надежности сетей мониторинга.

Модель и полученные сопутствующие характеристики можно использовать как часть более сложной системы, например СМО, в которой узлы образуют входной поток заявок на обслуживание. Например, в данной СМО в качестве прибора выступает мобильное устройство подзарядки, восстанавливающее заряд батареи до  $N$  действий. Также прибором может быть мобильный сток, тогда частота посещения стоком узла пропорциональна интенсивности процесса разрядки (параметр марковского процесса).

Предложено формальное описание Q-гиперсети (QHN), т. е. многоуровневой сети обслуживания, в которой СМО одного уровня сети могут обслуживаться в СМО других уровней по одной или группами. Наглядно показана неприменимость обычно используемых бимодальных распределений времени обслуживания для описания времени обслуживания в периодически либо квазипериодически обслуживаемой СМО.

В результате работы над проектом в целях более оперативной разработки имитационных моделей было принято решение об использовании, наряду с системой AGNES, системы моделирования MTSS, обеспечивающей быструю разработку имитационных моделей с графическим интерфейсом.

**Проект № 17-47-540977 р\_а** "Разработка моделей и методов решения оптимизационных задач функционирования беспроводных VANET-сетей для повышения транспортной безопасности в Новосибирске".

Руководитель проекта – к.т.н. Соколова О. Д.

Цель проекта – разработка математического аппарата для решения некоторых оптимизационных задач функционирования беспроводной связи на движущихся объектах (VANET-сети). Объект исследования – беспроводные самоорганизующиеся сети. Разработан метод расчета вероятности установления соединения между двумя узлами в сети при условии ограниченного числа транзитных узлов. За основу был взят наиболее быстрый метод расчета надежности сети с ограничением на диаметр, предложенный H. Cancela и L. Petingi в 2001 г. (модификация известного рекурсивного метода факторизации). Усовершенствование данного метода, полученное в ходе работы над проектом, позволяет осуществлять расчет с использованием модифицированного последовательно-параллельного преобразования на каждом вызове рекурсивной процедуры факторизации.

При разработке технологий повышения эффективности VANET активно применяются методы, основанные на кластеризации. Множество транспортных средств разделяется на кластеры, в каждом выбирается головной узел (cluster head (CH)), который аккумулирует пакеты узлов и передает их другим мобильным CH. Данный подход был использован для решения проблем, связанных с массовым использованием широковещательной рассылки (Broadcast Storm Problem). Получена оценка параметра Quality of Service, позволяющая разрабатывать требования к производительности протоколов VANET и инфраструктуре V2V/V2R, решать задачи оптимизации вложений в развертывание сетей VANET и их эксплуатации.

Исследовалась задача повышения эффективности потребления энергии в процессе сбора пространственно-временных данных. Рассмотрен подход к сбору информации с использованием мобильных стоков, разработан оптимальный алгоритм перемещения мобильного стока для сбора данных от сенсоров.

Рассматривалась задача расстановки устройств мониторинга в узлах транспортной сети или на придорожном оборудовании для передачи мгновенных сообщений от этих устройств движущимся транспортным средствам (ТС). Моделировалось движение ТС на сетке дорог, рассматривались различные варианты расстановки устройств и при заданном временном пороге (время актуальности сообщения) вычислялся процент ТС, получивших данное сообщение.

Для моделирования процессов передачи данных в сетях VANET была разработана библиотека в системе имитационного моделирования MTSS (зарегистрирована в ФАП СО РАН, <http://far.sbras.ru/node/2325>). При моделировании движения машин использованы данные открытого сервиса Open Street Map. Были рассмотрены условия распространения сообщения широковещательным методом: сообщение получают машины, находящиеся в зоне распространения сигнала; каждая машина транслирует сообщение после некоторой случайной задержки на обработку данных. Получены результаты скорости распространения сообщений для различных топологий сети. Рассмотрен пример оповещения на дорожной сети Советского р-на.

**Проект № 17-01-20488** «Организация 13-й Международной Азиатской школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем"».

Руководитель проекта – д.т.н. Родионов А. С.

Силами лаборатории при поддержке проекта РФФИ проведена XIII Международная Азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках Международной конференции IEEE SIBIRCON 2017.

В работе XIII школы-семинара приняли участие приблизительно 120 ученых из России, Казахстана, Кыргызстана, Узбекистана, Южной Кореи, Италии и Турции. Среди участников один член-корреспондент РАН, 25 докторов и 56 кандидатов наук.

Кроме лекционных заседаний, на которых заслушивались выступления приглашенных ученых из разных стран, работали семь секций по следующим направлениям:

- задачи оптимизации в организации вычислений;
- оптимизация в задачах управления и автоматизации;
- оптимизация систем сетевой структуры;
- задачи оптимизации в социально-экономических процессах;
- математические методы решения оптимизационных задач;
- оптимизационные задачи в моделировании реальных систем.

Все заслушанные лекции и доклады были посвящены различным задачам, возникающим при моделировании и оптимизации сложных систем.

Полные тексты докладов, представленных на английском языке, выложены в IEEE Explorer и прореферированы в Scopus. Русскоязычные доклады опубликованы в электронном сборнике, размещены в elibrary.ru и прореферированы в РИНЦ.

### Публикации

#### Идания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Monakhov O.G., Monakhova E.A. A parallel algorithm of multi-variant evolutionary synthesis of nonlinear models // Num. Analysis and Appl. 2017. Т. 10. № 2. С. 140–148. DOI: 10.1134/S1995423917020057.

2. Shakhov V., Koo C. Experiment design for parameter estimation in probabilistic sensing models // IEEE Sensors J. 2017. Vol. 17, iss. 24. P. 8431–8437. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2766089.

3. Nesterov S., D. Migov. Parallel calculation of diameter constrained network reliability // Springer Lecture Notes in Computer Science. 2017. Vol. 10421. P. 473–479. DOI: 10.1007/978-3-319-62932-2\_45.

4. Rodionov A. S. Agent-oriented simulation: New advantages in simulation optimization // Proc. of the 11th International conference on ubiquitous information management and communication, IMCOM 2017. [Electron. resource]. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3022329&dl=ACM&coll=DL>. DOI: 10.1145/3022227.3022329.

5. Shakhov, I. Koo, A. Rodionov. Energy exhaustion attacks in wireless networks // Proc. of IEEE Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences 2017. P. 1–3. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109825.

6. Rodionov A. Q-Hypernets as a new model of dynamical multi-layer networks // Ibid. P. 4–7. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109826.

7. Kratov S. The information system for the scientific news site support // Ibid. P. 105–108. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109848.

8. Nesterov S., Migov D. Series-parallel transformation for diameter constrained network reliability computation // Ibid. P. 121–125. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109852.

9. Tkachev K. Using agents in parallel simulation and optimization // Ibid. P. 161–163. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109861.

10. Tkachev K. Effective methods for implementing calendar of events for VANET models // Ibid. P. 164–166. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109862.

11. Toktoshov G., Monakhov O. Models and algorithms of evolutionary synthesis for optimization of engineering networks // Ibid. P. 167–171. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109863.

12. Toktoshov G., Yurgenson A., Migov D. Design of utility network subject to reliability constraint // Ibid. P. 172–175. DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109864.

13. Materukhin A., Shakhov V., Sokolova O. An efficient method for collecting spatio-temporal data in the WSN using mobile sinks // Ibid. P. 118–120. DOI: doi:10.1109/sibircon.2017.8109851.

#### Идания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Zaheer H., Pant M., Kumar S., Monakhov O., Monakhova E., Deep K. A new guiding force strategy for differential evolution // Intern. J. of System Assurance Engineering and Management. 2017. Vol. 8, Suppl. 4. P. 2170–2183. DOI: 0.1007/s13198-014-0322-6.

2. Kratov S.V. On providing the fault-tolerant operation of information systems based on open content management systems // Proc. of the 11th Intern. scientific and technical conference

"Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines" (Dynamics), Omsk, Nov. 14–16, 2017. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012067.

3. Sokolova O. D., Kratov S. V. Foundations of algorithms and programs: History and perspectives // Proc. SORUCOM, Москва; Зеленоград, 3–5 окт. 2017 г. DOI: 10.1109/SoRuCom.2017.00025.

### **Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Соколова О. Д., Кратов С. В. О необходимости внедрения результатов научных разработок // Материалы 2-й Всерос. науч. конф. "Научные коммуникации. Научная этика. Инженерная этика", Омск, 1–2 июня 2016 г. 2017. С. 45–46.

2. Бакулина М. П. Эффективный метод блочного кодирования двухуровневых изображений // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30, № 2. С. 282–285.

3. Шахов В. В., Юргенсон А. Н., Соколова О. Д. Моделирование воздействия атаки black hole на беспроводные сети // Там же. № 1. С. 34–39.

4. Жусупбаев А., Токтошов Г. Ы. Об одной задаче оптимизации распределения ресурсов в иерархических сетях // Проблемы информатики. 2017. № 1. С. 2–14.

5. Родионов А. С. Кумулятивные оценки показателей структурной надежности сети и их использование // Там же. № 1. С. 15–24.

6. Моисеенко В. В., Родионов А. С. Возрастная зависимость соавторства при проведении научных исследований в академическом институте // Там же. № 1. С. 62–73.

7. Бредихин С. В., Ляпунов В. М., Щербакова Н. Г. Структура сети цитирования научных журналов // Там же. № 2. С. 38–52.

8. Бредихин С. В., Ляпунов В. М., Щербакова Н. Г. Кластерный анализ сети цитирования научных журналов // Там же. № 3. С. 19–34.

9. Казанцев Г. Ю., Омарова Г. А. Моделирование и сравнение различных транспортных микромоделей // Там же. С. 5–15.

10. Ляхов О. А. Сетевые модели объемно-календарного планирования сложных комплексов работ // Материалы Рос. науч.-техн. конф. "Обработка информации и математическое моделирование", Новосибирск, 26–27 апр. 2017 г. С. 87–93.

11. Монахова Э. А., Монахов О. Г. Оптимизация семейств циркулянтных сетей // Сб. трудов XVII Междунар. науч.-техн. конф. "Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике" / Под ред. В. И. Горбаченко, В. В. Дрожжина. ПДЗ. Пенза, 2017. С. 32–39.

12. Токтошов Г. Ы. Гиперсетевая модель и методы оптимизации инженерных и транспортных сетей // Материалы Российской науч.-технич. конф. "Обработка информационных сигналов и математическое моделирование", Новосибирск, 26–27 апр. 2017 г. С. 267–272.

13. Забиняко Г. И. Оценка упорядочений для перепостроения базисов линейного программирования // Труды Междунар. конф. "Вычислительная и прикладная математика 2017" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 1123–1128.

14. Ляхов О. А. Сетевые модели стратегического планирования проектов // Там же. С. 563–567.

15. Он же. Формализация условий задач календарного планирования // Труды 13-й Междунар. Азиат. школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем". Новосибирск, 2017. С. 642–649.

16. Sokolova O. D., Kratov S. V. Foundations of algorithms and programs: history and perspectives // Труды 4-й Междунар. конф. "Развитие вычислительной техники в России и

странах бывшего СССР: история и перспективы" (SORUCOM 2017), Москва; Зеленоград, 3–5 окт. 2017 г.

17. Забиняко Г. И. Применение квазиньютоновских алгоритмов для решения больших задач // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22, № 5. С. 47–57.

### **Сдано в печать**

1. Котельников Е. А. Выбор начального приближения при минимизации невыпуклой квадратичной функции на шаре // СибЖВМ.

### **Участие в конференциях и совещаниях**

1. Российская научно-техническая конференция, Новосибирск, 26–27 апреля 2017 г. – 1 доклад (Ляхов О. А.).

2. Международная конференция по вычислительной и прикладной математике (ВПМ'17) в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 3 доклада (Ляхов О. А., Забиняко Г. И., Мигов Д. А.).

3. 13-я Международная Азиатская школа-семинар "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках международной мультikonференции IEEE SIBIRCON 2017, Новосибирск, 18–22 сент. 2017 г. – 4 доклада (Ляхов О. А., Мигов Д. А., Токтошов Г. Ы., Монахов О. Г.).

4. IEEE Int. Forum on Strategic Technology. Ulsan, Korea, May, 31 – June, 2, 2017 – 1 доклад (Мигов Д. А.).

5. Int. Conf on Parallel Computing Technologies (РАСТ-17), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г. – 1 доклад (Мигов Д. А.).

6. Межд. научно-техническая конференция студентов и молодых ученых "Молодежь. Наука. Технологии" (МНТК-2017). Новосибирск, 18–20 апр. 2017 г. – 2 доклада (Мигов Д. А.).

7. The 2nd IEEE Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications. Владивосток, 25–29 сентября 2017 г. – 2 доклада (Мигов Д. А.).

8. Российская научно-техническая конференция "Обработка информационных сигналов и математическое моделирование", Новосибирск, 26–27 апр. 2017 г. – 1 доклад (Токтошов Г. Ы.)

### **Участие в оргкомитетах конференций**

1. Мигов Д. А. – член организационного комитета 13-й Международной Азиатской школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках Международной мультikonференции IEEE SIBIRCON, Новосибирск, 2017.

2. Токтошов Г. Ы. – секретарь организационного комитета 13-й Международной Азиатской школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках Международной мультikonференции IEEE SIBIRCON, Новосибирск, 2017.

3. Родионов А. С.:

– член Программного комитета 18th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM 2017), Novosibirsk, June 29 – July 3, 2017;

– член Программного комитета 17th International conference on computational science and applications (ICCSA 2017), Trieste (Italy), July 3–6, 2017;

– член Программного комитета 9th International conference on computer science and its applications (CSA 2017), Taichung (Taiwan), Dec 18–20, 2017;

– член Программного комитета 11th International conference on ubiquitous information management and communication ACM IMCOM (ICUIMC 2017), Beppu (Japan), January 5–7, 2017 (сопредседатель);

- член Программного комитета 13-й Международной Азиатской школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках Международной мультikonференции IEEE SIBIRCON 2017, Новосибирск, 18–22 сентября 2017 г.;
- член Программного комитета International conference on information science and communications technologies (ICISCT 2017), Tashkent (Uzbekistan), 2–4 November, 2017;
- член Программного комитета XXIX Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 3–14 июля 2017 г.;
- член Программного комитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.
- член Организационного комитета 13-й Международной Азиатской школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках Международной мультikonференции IEEE SIBIRCON 2017, Новосибирск, 18–22 сентября 2017 г. (зам. председателя);
- председатель оргкомитета 2017 International multiconference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON), Novosibirsk, 18–22 Sept., 2017.

### Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 13

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 16

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 33

Докладов на конференциях – 15

Участников оргкомитетов конференций – 12.

### Кадровый состав:

- |                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| 1. Родионов Алексей Сергеевич        | – зав. лаб., д.т.н.    |
| 2. Бакулина Марина Павловна          | – н.с., к.ф-м.н.       |
| 3. Бредихин Сергей Всеволодович      | – в.н.с., к.т.н.       |
| 4. Волжанкина Ксения Александровна   | – м.н.с.               |
| 5. Забиняко Герард Идельфонович      | – в.н.с., к.т.н.       |
| 6. Капустина Галина Анатольевна      | – ведущ. инженер       |
| 7. Котельников Евгений Алексеевич    | – с.н.с.               |
| 8. Кратов Сергей Викторович          | – м.н.с.               |
| 9. Ляпунов Виктор Михайлович         | – ведущ. инженер       |
| 10. Ляхов Олег Алексеевич            | – н.с., к.э.н.         |
| 11. Марусина Ольга Андреевна         | – техник 1-й категории |
| 12. Мигов Денис Александрович        | – с.н.с., к.ф-м.н.     |
| 13. Моисеенко Владислав Владимирович | – н.с.                 |
| 14. Монахов Олег Геннадьевич         | – в.н.с., к.т.н.       |
| 15. Монахова Эмилия Анатольевна      | – с.н.с., к.т.н.       |
| 16. Омарова Гульзира Алимовна        | – н.с., к.ф-м.н.       |
| 17. Рудометов Сергей Валерьевич      | – н.с., к.т.н.         |
| 18. Соколова Ольга Дмитриевна        | – с.н.с., к.т.н.       |
| 19. Ткачев Кирилл Валерьевич         | – инженер              |
| 20. Токтошов Гулжигит Ысакович       | – н.с., к.т.н.         |
| 21. Трофимова Лариса Викторовна      | – ведущ. инженер       |
| 22. Шахов Владимир Владимирович      | – с.н.с., д.ф-м.н.     |

23. Щербакова Наталья Григорьевна – с.н.с.  
24. Юргенсон Анастасия Николаевна – н.с., к.ф-м.н.  
Волжанкина К. А. – молодой научный сотрудник.

#### **Педагогическая деятельность**

- Родионов А. С. – профессор НГУ, СибГУТИ  
Бакулина М. П. – доцент НГУ  
Омарова Г. А. – доцент НГУ

#### **Руководство студентами**

- Кучеров А. В. – 2-й курс магистратуры ФИТ НГУ, руководитель Мигов Д. А.  
Казанцев Г. Ю. – 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Омарова Г. А.  
Костромин В. – 4-й курс ММФНГУ, руководитель Омарова Г. А.  
Гарибов Руслан – защитил диплом СибГУТИ, руководитель Токтошов Г. Ы.  
Ткаченко Евгения – 4-й курс СибГУТИ, руководитель Токтошов Г. Ы.  
Мистюрин В. В. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Родионов А. С.  
Кальней А. М. – 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Родионов А. С.

#### **Руководство аспирантами**

- Нестеров С. Н. – 3-й год, ИВМиМГ, руководитель Мигов Д. А.  
Ядыкина О. А. – 2-й год, ИВМиМГ, руководитель Мигов Д. А.  
Гарбузов К. Е. – 2-й год ИВМиМГ, руководитель Родионов А. С.  
Ткачев К. В. – 3-й год, НГУ, руководитель Родионов А. С.

## Лаборатория синтеза параллельных программ

Зав. лабораторией д.т.н. Малышкин В.Э.

Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершённым в 2017 г.  
в соответствии с планом НИР института

**Программа НИР № 0315-2016-0007** "Математическое моделирование с использованием параллельных и распределённых вычислений".

**I.4.1.1.** "Технологии, языки высокого уровня и средства параллельной реализации задач численного моделирования на пета- и эксафлопсных суперЭВМ".

Номер государственной регистрации НИР 01201370230.

Руководитель – д.т.н. В.Э. Малышкин.

**Раздел 1.** "Разработка методов, алгоритмов и средств конструирования параллельных программ численного моделирования для пета- и эксафлопсных суперкомпьютеров".

**Этап 2017 г.** Разработать алгоритмы реализации системы LuNA для программирования неоднородных вычислительных систем, включая GRID системы.

В системе фрагментированного программирования LuNA, ориентированной на автоматическое конструирование параллельных программ численного моделирования, прикладная программа собирается из заранее заготовленных последовательных модулей. Это позволяет генерировать динамически настраиваемые на ресурсы и/или текущую ситуацию в мультикомпьютере прикладные программы. Для создания системы LuNA потребовалось разработать распределённые алгоритмы реализации, в том числе алгоритмы динамического распределения/перераспределения распределённых ресурсов мультикомпьютера. Разработаны два алгоритма распределения ресурсов – Rope и Patch, которые открывают возможности разрабатывать различные системы параллельного программирования. На их основе разработана базовая версия системы LuNA, прошло успешное тестирование исполнения фрагментированных программ на неоднородных вычислителях. Множество фрагментов вычислений рассматривается в системе LuNA как жидкость/газ, а алгоритмы Rope и Patch технологически моделируют явление диффузии на множестве фрагментов вычислений, и избыточная нагрузка в некотором узле мультикомпьютера переливается в соседние недогруженные узлы, ликвидируя дисбаланс нагрузки. Поэтому при использовании этих алгоритмов отпадает необходимость программирования балансировки нагрузки в прикладной программе, в том числе при исполнении программы на неоднородном мультикомпьютере.

**Раздел 2.** "Разработка и исследование клеточно-автоматных моделей нелинейной пространственной динамики с использованием технологии параллельного программирования".

Руководитель – д.т.н. Бандман О. Л.

**Этап 2017 г.** Исследовать вычислительные свойства локальных и глобальных композиций клеточно-автоматных моделей. Провести вычислительные эксперименты для сравнения производительности параллельных реализаций систем клеточных автоматов.

Выполнена классификация методов синтеза глобальных операторов клеточно-автоматных моделей (КА-моделей) сложных явлений, основанная на введенной ранее количественной характеристике – стохастичности модели, равной доле случайных операций в алгоритме функционирования клеточного автомата. Получены формулы зависимости

стохастичности модели от режимов работы компонентных КА, которые показали, что получение приемлемой эффективности параллельной реализации асинхронных КА-моделей возможно только путем введения детерминированности в алгоритм вычисления, что снижает стохастичность модели. Показано, что приемлемые значения эффективности можно получить при применении блочно-синхронного режима функционирования с размерами блоков не превышающими 100.

Полученные теоретические положения проверены путем моделирования процесса просачивания жидкости через вещество (почву), имеющее сложную пористую микроструктуру. Функционирование моделирующего стохастического трехмерного КА размером  $700 \times 700 \times 1000$  клеток представлено композицией глобальных операторов конвекции, испарения и диффузии. В результате выполнения серий вычислительных экспериментов на многопроцессорном кластере mvs-10П (МСЦ РАН) получены зависимости эффективности параллельной реализации от стохастичности КА-модели, подтвердившие теоретические результаты и позволившие сформулировать рекомендации по выбору параметров синтеза глобальных операторов КА.

Исследовалась параллельная программная реализация клеточно-автоматных моделей газопорошковых потоков. Проблема неравномерности загрузки устранялась путем динамической балансировки. Предложены два критерия балансировки нагрузки кластера: отношение и разность времени выполнения задания соседними ядрами. Даны рекомендации по использованию исследованных критериев.

### **Результаты работ по научно-исследовательским программам, проектам Президиума РАН, ОМН РАН и Сибирского отделения РАН**

**Программа президиума РАН П.2П/Л.4-1** "Проблемы создания высокопроизводительных, распределенных и облачных систем и технологий".

Координаторы: акад. Велихов Е. П., акад. Савин Г. И., акад. Жижченко А. Б.

**Проект № 0315-2015-0014** "Создание высокопроизводительной информационно-вычислительной системы на базе ЦКП ССКЦ СО РАН.

Руководители: д.т.н. Глинский Б. Г., д.т.н. Малышкин В. Э.

На основе разработанного в 2016 г. распределенного алгоритма в систему LuNA включен блок динамического распределения памяти мультимпьютера, разработаны алгоритмы и реализована библиотека для обеспечения реагирования параллельных программ на изменение доступности вычислительных ресурсов и разработаны алгоритмы программирования сети мультимпьютеров HPC Cloud. Совместно эти средства позволяют реализовать в системе LuNA автоматическое перераспределение вычислений в случаях, когда имеется возможность выделить дополнительные вычислительные узлы для работающей параллельной программы, в том числе за счет динамического подключения ресурсов дополнительного мультимпьютера в рамках сети мультимпьютеров HPC Community Cloud. Алгоритмы и библиотека разработаны в рамках стандарта MPI3.1.

**Программа Президиума РАН П.2П/Л.3-1** "Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы".

Координаторы: акад. Емельянов С. В. акад. Журавлев Ю. И.

**Проект № 0315-2015-0015.** "Новые информационные и вычислительные технологии для решения актуальных проблем естествознания, в частности задач геофизики и атмосферной оптики".

Руководители: член-корр. Кабанихин С. И., член-корр. Михайлов Г. А.

**Подпроект** "Методы и технологии распараллеливания алгоритмов и параллельная реализация численного моделирования на многопроцессорных системах".

Отв. исполнитель – д.т.н. Малышкин В. Э.

Сформулированы фундаментальные принципы автоматического генерирования параллельных фрагментированных программ численного моделирования. На их основе разработаны распределенные системные алгоритмы с локальными взаимодействиями для реализации системных функций автоматического построения параллельных программ, в первую очередь, функций распределения ресурсов. Алгоритмы разработаны для асинхронного распределенного решения задач распределения ресурсов мультимикомпьютеров с большим числом процессоров-вычислителей.

Для предложенных распределенных алгоритмов динамического распределения данных в параллельной программе разработаны их технологические варианты, которые реализованы и включены в систему фрагментированного программирования LuNA. Полученные средства позволяют автоматически генерировать в системе LuNA прикладные программы, динамически настраиваемые на ресурсы мультимикомпьютера. Алгоритмы позволяют избыточную нагрузку, возникшую в некотором узле мультимикомпьютера, перемещать в соседние недогруженные узлы. Использование этих алгоритмов дает возможность исключить программирование балансировки нагрузки в прикладной программе. В результате в системе LuNA автоматически создаются параллельные программы без специального программирования. Проведено тестирование разработанных средств на приложениях.

**Подпроект** "Клеточно-автоматные модели нелинейных естественных процессов и их реализация на суперкомпьютерах".

Отв. исполнитель – к.т.н. Медведев Ю. Г.

Исследованы вычислительные свойства стохастических клеточно-автоматных моделей естественных процессов с разными режимами функционирования. Особое внимание уделено влиянию стохастичности модели на эффективность параллельных реализаций при разных режимах функционирования клеточного автомата. Показана целесообразность применения блочно-синхронного режима при реализации модели на кластере с многоядерными узлами.

Получены зависимости ускорения вычислений от главного параметра блочно-синхронного режима – размера блока. Аналитические зависимости подтверждены путем моделирования на кластере следующих явлений: 1) 3D-процесса агрегации, ограниченного диффузией (DLA-process), моделирующего рост кораллов, электрический разряд, распространение трещин и др.; 2) 3D-процесса просачивания жидкости через пористое вещество со сложной конфигурацией пор.

Проведено экспериментальное тестирование стохастической дискретной модели просачивания жидкости через трехмерный фрагмент пористой среды с помощью системы автоматического распараллеливания LuNA. Исследовано влияние анизотропии, вносимой в конечный результат гексагональной структурой клеточного массива, для задачи моделирования газового потока клеточным автоматом.

При использовании программной реализации клеточно-автоматных моделей газопорошковых потоков проведена серия вычислительных экспериментов на кластере. Разработан сценарий реализации системы клеточно-автоматного моделирования газопорошковых потоков с использованием веб-интерфейса проекта HPC Community Cloud.

### Публикации

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Бандман О. Л. Клеточно-автоматные модели естественных процессов и их реализация на современных компьютерах // Прикл. дискр. матем. 2017. № 35. С. 102–121. DOI: 10.17223/20710410/35/9.
2. Malyshkin V., Perepelkin V., Schukin G. Scalable distributed data allocation in LuNA fragmented programming system // J. of Supercomp. 2017. Vol. 73, iss. 2. P. 726–732. DOI:10.1007/s11227-016-1781-0.
3. Malyshkin V. E., Schukin G. A. Distributed algorithm of dynamic multidimensional data mapping on multidimensional multicomputer in the LuNA fragmented programming system // Lect. Notes in Comput. Sci. 2017. Vol. 10421. P. 308–315. DOI: 10.1007/978-3-319-62932-2\_30.
4. Bandman O. Parallelization efficiency versus stochasticity in simulation reaction–diffusion by cellular automata // J. of Supercomp. 2017. Vol. 73, iss. 2. P. 687–699. DOI: 10.1007/s11227-016-1775-y.
5. Malyshkin V. Parallel computing technologies 2016 // Ibid. P. 607–608. DOI: 10.1007/s11227-016-1843-3.
6. Bandman O. Stochastic cellular automata aModels of reaction-diffusion processes // Encyclopedia of Complexity and Systems Science / R. A. Meyers (ed.). 2nd ed. Springer, 2017. P. 1–14. DOI: DOI: 10.1007/978-3-642-27737-5\_672-1.
7. Markova V. P., Ostapkevich M. B. The implementation of cellular automata interference of two waves in LuNA fragmented programming system // Lect. Notes in Comput. Sci. 2017. Vol. 10421. P. 225–231. DOI: 10.1007/978-3-319-62932-2\_21.
8. Belyaev N., Perepelkin V. Automated GPU support in LuNA fragmented programming system // Ibid. P. 272–277. DOI: 10.1007/978-3-319-62932-2\_26.
9. Alias N., Kireev S. Fragmentation of IADE method using LuNA system // Ibid. P. 85–93.
10. Arykov S. Defining order of execution in aspect programming language // Ibid. P. 255–261. DOI: 10.1007/978-3-319-62932-2\_7.
11. Tkacheva A. A. The algorithm of control program generation for optimization of LuNA program execution // Ibid. P. 365–371. DOI: 10.1007/978-3-319-62932-2\_35.
12. Akhmed-Zaki D., Lebedev D., Perepelkin V. Implementation of a three dimensional three-phase fluid flow ("oil – water – gas") numerical model in LuNA fragmented programming system // J. of Supercomp. 2017. Vol. 73, iss. 2. P. 624–630. DOI: 10.1007/s11227-016-1780-1.

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Alias N., Sahnoun R., Malyshkin V. High-performance computing and communication models for solving the complex interdisciplinary problems on DPCS // ARPN J. of Engin. and Appl. Sci. 2017. Vol. 12, iss. 2. P. 356–364.
2. Perepechko L., Romenski E., Reshetova G., Kireev S., Perepechko Yu. Modeling the multiphase flows in deformable porous media // MATEC Web of conf. 33rd Sib. Thermophys. Seminar (STS-33). 2017. Vol. 115, article 05004. DOI: 10.1051/mateconf/201711505004.

**Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Маркова В. П., Остапкевич М. Б. Сравнение возможностей mpi и Luna на примере реализации модели клеточно-автоматной интерференции волн // Пробл. информ. 2017. № 2. С. 53–64.
2. Малышкин В. Э., Перепелкин В. А., Щукин Г. А. Распределенный алгоритм управления данными в системе фрагментированного программирования LuNA // Там же. № 1. С. 74–88.
3. Перепелкин В. А., И.В. Софронов И. В., Ткачева А. А. Автоматизация конструирования численных параллельных программ с заданными нефункциональными свойствами на базе вычислительных моделей // Там же. № 4. С. 47–60.
4. Медведев Ю. Г. О размещении окрестностей осреднения на параллельной композиции гексагональных клеточных массивов в моделях газового потока // Тез. докладов 29-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск. 2017. С. 26–27.
5. Арыков С. Б. Фрагментированное программирование численных задач // Труды 7-й Междунар. науч.-практ. конф. "Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов". Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та. 2017. С. 20–24.
6. Беляев Н. А. Алгоритмы и модули динамического планирования вычислительной нагрузки в системе фрагментированного программирования LuNA // Труды конф. молодых ученых ИВМиМГ СО РАН. 2017. С. 13–20.
7. Софронов И. В. Подсистема управления процессом конструирования параллельных программ для системы LuNA // Там же. С. 21–28.
8. Снытникова Т. В., Непомнящая А. Ш. О реализации на GPU базовых ассоциативных процедур языка STAR // Труды Междунар. конф. по вычислительной и прикладной математике "ВПИМ'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 822–827.
9. Маркова В. П., Остапкевич М. Б. Реализация алгоритма клеточно-автоматной интерференции на мультикомпьютерах // Там же. С. 581–587.
10. Щукин Г. А. Распределенные алгоритмы с локальными взаимодействиями для управления данными в системе фрагментированного программирования LuNA // Там же. С. 1011–1017.

**Участие в конференциях и совещаниях**

1. 14th International conference on parallel computing technologies "PaCT-2017", Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г. – 6 докладов (Малышкин В. Э., Арыков С. Б., Киреев С. Е., Маркова В. П., Остапкевич М. Б., Перепелкин В. А., Ткачева А. А., Щукин Г. А.).
2. 11-я Международная конференция "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ'2017), Казань, 3–7 апреля 2017 г. – 3 доклада (Киреев С. Е., Перепелкин В. А., Щукин Г. А.).
3. Международная конференция "Марчуковские научные чтения", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 – 8 докладов (Бандман О. Л., Киреев С. Е., Снытникова Т. В., Арыков С. Б., Перепелкин В. А., Маркова В. П., Остапкевич М. Б., Ткачева А. А., Щукин Г. А.).
4. Всерос. науч.-практ. конф. "Многоядерные процессы, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов", Барнаул, 10–11 марта 2017 г. – 1 доклад (Арыков С. Б.).

5. 9-я Сибирская конференция по параллельным и высокопроизводительным вычислениям "ПВВ-2017", Томск, 10–11 октября 2017 г. – 2 доклада (Медведев Ю. Г., Перепелкин В. А., Шукин Г. А.).

6. Международная конференция "Вычислительная и прикладная математика 2017" в рамках "Марчуковских научных чтений, Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 7 докладов (Арыков С. Б., Городничев М. А., Киреев С. Е., Маркова В. П., Остапкевич М. Б., Медведев Ю. Г., Перепелкин В. А., Снытникова Т. В.).

7. 33-й Сибирский теплофизический семинар, Новосибирск, 6–8 июня 2017 г. – 1 доклад (Киреев С. Е.).

8. 29-я Летняя международная молодежная школа-конференция по параллельному программированию, Новосибирск, 10–14 июля 2017 г. – 3 доклада (Городничев М. А., Киреев С. Е., Ткачева А. А.).

9. Конференция молодых ученых ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, 11–13 апреля 2017 г. – 3 доклада (Ткачева А. А., Софронов И. В., Беляев Н. А.).

### **Участие в программных и организационных комитетах конференций**

1. Малышкин В. Э.:

– член программного комитета Международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ'2017), Казань, 3–7 апреля 2017 г.;

– член программного комитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.;

– председатель оргкомитета 29-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 10–14 июля 2017 г.

2. Бандман О. Л.:

– член программного комитета Международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ'2017), Казань, 3–7 апреля 2017 г.;

– член программного комитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.

3. Киреев С. Е.:

– член оргкомитета Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПМ 2017", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.;

– член оргкомитета 29-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 10–14 июля 2017 г.;

– член оргкомитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.

4. Городничев М. А.:

– член оргкомитета 29-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 10–14 июля 2017 г.;

– член оргкомитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.

5. Ткачева А. А.:

– член оргкомитета 29-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 10–14 июля 2017 г.;

– член оргкомитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.

## 6. Щукин Г. А.:

– член оргкомитета 29-й Летней международной молодежной школы-конференции по параллельному программированию, Новосибирск, 10–14 июля 2017 г.;

– член оргкомитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.

## 7. Медведев Ю. Г.:

– член экспертного совета 55-й Междунар. научной студенческой конференции, МНСК-2017;

– член оргкомитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.

8. Арыков С. Б. – член оргкомитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.

9. Ачасова С. М. – член оргкомитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.

10. Маркова В. П. – член оргкомитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.

11. Остапкевич М. Б. – член оргкомитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.

12. Перепелкин В. А. – член оргкомитета 14th International conference on parallel computing technologies (PaCT-2017), Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.

### Международные научные связи

1. Совместный проект НИИ математики и механики КазНУ им. Аль Фараби (Алма-Ата (Казахстан)) и лаборатории синтеза параллельных программ ИВМиМГ СО РАН "Разработка библиотеки параллельных подпрограмм для автоматизации создания больших параллельных численных моделей для суперкомпьютеров в области нефтяной геофизики".

2. Малышкин В. Э. – член редколлегий международных журналов:

– The International Journal of Computational Science and Engineering,

– J. of Parallel and Distributed Computing (Elsevier Science),

– The International Journal of Big Data Intelligence (IJDBI),

– The Journal of Supercomputing.

3. Бандман О. Л. – член редколлегии The Journal of Cellular Automata

### Итоговые данные по лаборатории

Публикации, индексируемые в базе данных Web of Science – 12

Публикации, индексируемые в базе данных Scopus – 12

Публикации, индексируемые в базе данных РИНЦ – 20

Докладов на конференциях – 34

Участие в оргкомитетах конференций – 22

### Кадровый состав

1. Малышкин В. Э. зав. лаб. д.т.н.

2. Бандман О. Л. г.н.с. д.т.н.

3. Фет Я. И г.н.с. д.т.н.

4. Ачасова С. М. с.н.с. к.т.н.

- |                      |               |           |
|----------------------|---------------|-----------|
| 5. Маркова В. П.     | с.н.с.        | к.т.н.    |
| 6. Медведев Ю. Г.    | с.н.с.        | к.т.н.    |
| 7. Непомнящая А. Ш.  | с.н.с.        | к.ф.-м.н. |
| 8. Арыков С. Б.      | м.н.с.,       | к.ф.-м.н. |
| 9. Калгин К. В.      | м.н.с.,       | к.ф.-м.н. |
| 10. Киреев С. Е.     | н.с.          |           |
| 11. Городничев М. А. | м.н.с.        |           |
| 12. Снытникова Т. В. | м.н.с.        |           |
| 13. Остапкевич М. Б. | м.н.с.        |           |
| 14. Ткачева А. А.    | м.н.с.        |           |
| 15. Перепелкин В. А. | м.н.с.        |           |
| 16. Щукин Г. А.      | м.н.с.        |           |
| 17. Савукова В. А.   | техник 1 кат. |           |

Арыков С. Б., Городничев М. А., Калгин К. В., Перепелкин В. А., Ткачева А. А., Снытникова Т. В., Щукин Г. А. – молодые научные сотрудники.

### **Проведение лабораторией конференций и школ по параллельному программированию**

1. 14th International conference on parallel computing technologies "PaCT-2017", Нижний Новгород, 4–8 сентября 2017 г.
2. 29-я Летняя международная молодежная школа-конференция по параллельному программированию, Новосибирск, 10–14 июля 2017 г.
3. Зимняя и летняя школы по параллельному программированию для студентов НГУ и НГТУ, Новосибирск, 30 января – 3 февраля и 3–14 июля 2017 г.

### **Педагогическая деятельность**

- |                  |                                    |
|------------------|------------------------------------|
| Мальшкин В. Э.   | – профессор, зав. каф. НГУ и НГТУ. |
| Маркова В. П.    | – доцент НГУ и НГТУ.               |
| Арыков С. Б.     | – доцент НГТУ.                     |
| Киреев С. Е.     | – ст. преподаватель НГУ.           |
| Медведев Ю. Г.   | – доцент ВКИ НГУ.                  |
| Городничев М. А. | – ассистент НГУ и НГТУ.            |
| Калгин К. В.     | – ассистент НГУ.                   |
| Остапкевич М. Б. | – ассистент НГТУ.                  |
| Перепелкин В. А. | – ассистент НГУ.                   |
| Щукин Г. А.      | – ассистент НГТУ.                  |
| Ткачева А. А.    | – ассистент НГУ.                   |

### **Защита диссертаций**

Лебедев Д. В. – докторант Национального исследовательского университета им. Аль Фараби (Алма-Ата), специальность ИВТУ.

Тема диссертации: "Разработка эффективных параллельных алгоритмов и библиотечных подпрограмм для решения краевой задачи фильтрации жидкости для системы нефть – вода – газ".

Отечественный руководитель – д.т.н. Ахмед-Заки Д. Ж.

Зарубежный руководитель – д.т.н. проф. Мальшкин В. Э.

Успешная защита состоялась 24 ноября в Национальном исследовательском университете им. Аль-Фараби (Алма-Ата).

### **Руководство аспирантами**

- Ткачева А. А. – ИВМиМГ, руководитель Малышкин В. Э.  
Беляев Н. А. – ИВМиМГ, руководитель Малышкин В. Э.  
Софронов И. В. – ИВМиМГ, руководитель Малышкин В. Э.

### **Защита дипломов**

- Беляев Н. А. – магистр НГТУ, руководитель Малышкин В. Э.  
Софронов И. В. – магистр НГУ, руководитель Малышкин В. Э.  
Литвинов В. С. – бакалавр, НГУ, руководитель Киреев С. Е.  
Ажбаков А. А. – бакалавр, НГУ, руководитель Перепелкин В. А.  
Лысенко Е. О. – бакалавр, НГУ, руководитель Перепелкин В. А.

### **Руководство студентами**

1. Литвинов В. С. – НГУ, 4-й курс, руководитель Киреев С. Е.
2. Титов А. И. – НГУ, 4-й курс, руководитель Киреев С. Е.
3. Гусельников М. Д. – НГУ, 4-й курс, руководитель Киреев С. Е.
4. Артюхов А. А. – НГУ, 3-й курс, руководитель Киреев С. Е.
5. Бедарев Н. А. – НГУ, 4-й курс, руководитель Перепелкин В. А.
6. Провоторов Н. В. – НГУ, 4-й курс, руководитель Городничев М. А.
7. Прокопьева А. В. – НГУ, 4-й курс, руководитель Перепелкин В. А.
8. Шелехин А. В. – НГУ, 4-й курс, руководитель Городничев М. А.
9. Ажбаков А. О. – НГУ, 1-й курс магистратуры, руководитель Перепелкин В. А.
10. Лысенко Е. О. – НГУ, 1-й курс магистратуры, руководитель Перепелкин В. А.
11. Можина А. В. – НГУ, 2-й курс магистратуры, руководитель Городничев М. А.
12. Прочкин П. В. – НГУ, 2-й курс магистратуры, руководитель Городничев М. А.
13. Грачев А. В. – НГТУ, 1-й курс магистратуры, руководитель Маркова В. П.
14. Мошкина А. Д. – НГТУ, 4-й курс, руководитель Городничев М. А.
15. Нестеркина А. А. – НГТУ, 4-й курс, руководитель Городничев М. А.

**Лаборатория параллельных алгоритмов решения больших задач**

Зав. лабораторией д.ф.-м.н. Вшивков В. А.

**Важнейшие достижения****Численное моделирование генерации электромагнитного излучения в режиме косо́й эмиссии при взаимодействии электронного пучка с плазмой.**

С помощью PIC моделирования исследованы возможности повышения эффективности генерации электромагнитного излучения в пучково-плазменной системе в режиме косо́й эмиссии, при котором плазма становится прозрачной для излучения вблизи плазменной частоты. Практическое применение данного исследования направлено на решение задачи дистанционного зондирования объектов, передачи информации в терагерцовом диапазоне и обработки материалов с помощью мощного терагерцового излучения.

К.ф.-м.н. Берендеев Е. А.

**Суперкомпьютерное моделирование фрагментации околозвездного диска с помощью метода сглаженных частиц (SPH) и сеточного метода вычисления гравитационного потенциала.**

Проведены численные эксперименты по моделированию аккреции вещества диска на протозвезду с использованием ресурсов ССКЦ: воспроизведено явление эпизодической аккреции, когда протозвезда набирает существенную часть своей массы за счет короткоживущих аккреционных процессов с очень высоким темпом. Эпизодическая аккреция – один из косвенных признаков существования планеты.

К.ф.-м.н. Снытников Н. В.

**Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершаемым в 2017 г.  
в соответствии с планом НИР института****Проект НИР 1.4.1.2 "Математическое моделирование комплексных многомерных процессов естествознания на супер-ЭВМ".**

Номер государственной регистрации НИР 0315-2016-0008.

Руководители: д.ф.-м.н. Вшивков В. А., д.ф.-м.н. Свешников В. М.

В 2017 г. продолжена работа по созданию вычислительных методов и параллельных алгоритмов для решения больших задач в области астрофизики и физики плазмы. Особое внимание уделялось созданию алгоритмов для решения задач на суперЭВМ пета- и эксафлопсной производительности. Созданные алгоритмы и их возможности проверялись на решении конкретных задач из области астрофизики и физики плазмы.

Выполнено сравнение результатов численного моделирования мощности электромагнитного излучения в системе замагниченная плазма – электронный пучок с теоретическими оценками. Исследована зависимость эффективности генерации электромагнитного излучения от периода модуляции плотности плазмы  $q$  (при фиксированной ширине  $l$ ), а также от ширины плазменного столба  $l$  (при фиксированном периоде модуляции плотности  $q$ ). Данные вычислительного эксперимента сравнивались с теоретическими оценками (рис. 1). Показано, что мощность излучения в Х-поляризации ( $E_z, V_x, V_y$ ) достаточно хорошо описывается линейной теорией, в то время как мощность О-поляризованной волны ( $B_z, E_x, E_y$ )

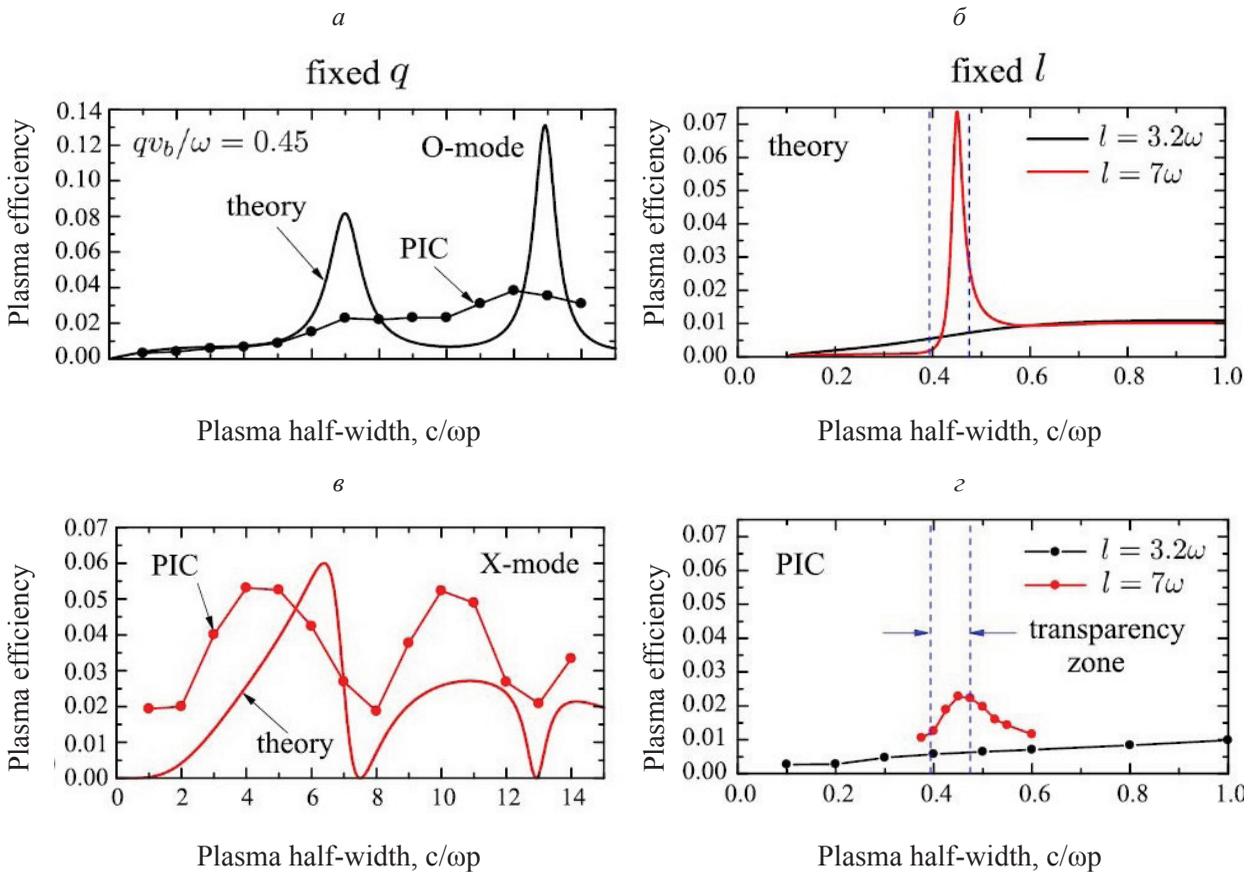


Рис. 1. Сравнение данных вычислительного эксперимента с теоретическими оценками: зависимость эффективности генерации в О-поляризации от ширины плазмы ( $a$  – для фиксированных значений периода модуляции плотности  $q$ ;  $б$  – для Х-поляризации); теоретически предсказанная мощность излучения в О-поляризации для различных значений ширины плазмы с зоной "прозрачности" ( $в$ ); мощность излучения в О-поляризации в PIC расчетах с выделенной зоной "прозрачности" плазмы ( $г$ )

меньше зависит от ширины плазмы, чем предполагалось, что объясняется существенной нелинейностью задачи. Тем не менее, при изменении периода модуляции плотности плазмы  $q$  можно добиться мощности излучения в 2–3 % даже в плазме, ширина которой на порядок превышает длину излучаемых ЭМ-волн.

Выполнено численное моделирование структуры формирования электростатических ударных волн в плазме для задачи о распаде разрыва плотности ионов. Одной из целей моделирования была оценка возможности ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны. Исследования проводились на основе кинетической модели и двух гибридных моделей. В рассматриваемых гибридных моделях движение ионов описывается кинетическим уравнением, а движение электронов в первом случае описывается уравнением Больцмана, а во втором – адиабатической функцией. Созданные электростатические модели имеют отношение к микрофизике отражения частиц от фронта ударной волны, включая космические лучи. Для решения поставленной задачи используется метод частиц-в-ячейках. Основное внимание уделялось исследованию количества отраженных частиц в закритических режимах ударных волн.

На рис. 2 приведены графики максимальной плотности и числа отраженных частиц в зависимости от времени для трех рассматриваемых моделей. Видно, что картина отражения

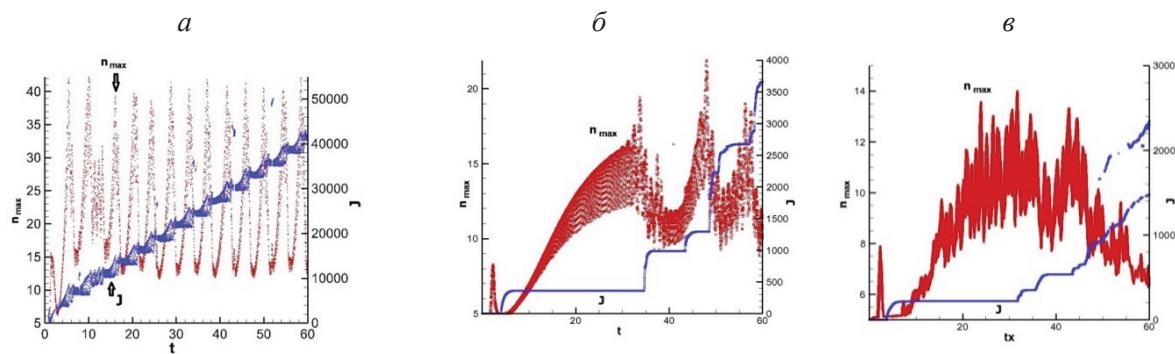


Рис. 2. Максимальная плотность  $n_{\max}$  и число отраженных частиц  $J$  в зависимости от времени для адиабатического приближения (а), приближения Больцмана (б), кинетической постановки (в)

частиц для кинетической постановки и больцмановского приближения достаточно похожи. Первый максимум плотности происходит в один и тот же момент для всех постановок, для кинетической постановки и больцмановского приближения значения максимумов совпадают. Затем максимум плотности постепенно увеличивается, энергия захваченных частиц растет и происходит следующий выброс частиц. В адиабатической постановке энергия захваченных частиц увеличивается равномерно и отражение частиц происходит через равные промежутки времени. В больцмановском приближении выбросы происходят неравномерно, что совпадает с результатом для кинетической модели. В приближении Больцмана число Маха и максимальная скорость частиц совпадают с кинетической постановкой. В адиабатическом приближении число Маха отличается от полученного в кинетическом: максимальная скорость в два раза больше, чем в кинетическом приближении. Таким образом, можно сделать вывод, что для моделирования задачи о распаде разрыва плотности больше подходит гибридная модель с больцмановским описанием электронов.

Для трехмерной численной модели взаимодействия пучка с плазмой, основанной на решении уравнений Власова – Максвелла методом частиц в ячейках, созданы модули, реализующие два алгоритма вычисления функции токов: метод прямого суммирования по вкладам модельных частиц и метод Есиркепова. Созданные модули позволяют задавать произвольную симметричную функцию формы ядра модельной частицы. В программном комплексе реализованы три формы ядра частицы: РС-ядро, sin-ядро, параболическое ядро.

Проведен обзор численных методов задания аналитических поглощающих граничных условий для FDTD-схемы решения системы уравнений Максвелла. Сравнивались поглощающие граничные условия Мура и Ляо на задаче прохождения монохроматической волны и лазерного импульса. Показано, что применение схемы Мура эффективнее для случая волн, падающих на границу по нормали, чем для волн, идущих под углом к границе. В частности, при угле прохождения импульса через границу в  $45^\circ$  при использовании граничных условий Мура в области остается более 3 % от общей энергии импульса, в то время как граничные условия Ляо даже первого порядка дают отражение не больше чем 0.2 % энергии. Схема Ляо повышенного порядка хорошо справляется с волнами, падающими на границу под любым углом. Единственный недостаток этого ПГУ – условная устойчивость.

Реализована схема для расчета уравнений Максвелла в тонких областях с заряженными частицами. В этом случае потребовалось дополнить имеющийся алгоритм этапом предварительного расчета электрического поля, а также хранением двух компонент токов с предыдущего шага. Электрическое поле, необходимое для работы неявной схемы с большим временным шагом, вычисляется по схеме Бориса с меньшим временным шагом. Результаты

сравнения работы модификаций схем показали существенное улучшение эффективности вычисления продольной компоненты электрического поля для схемы с дополнительным этапом, а также возможность проводить расчеты в десять и более раз быстрее в зависимости от параметров пучков. Проведено исследование получаемых решений в зависимости от технических (количество частиц, величины шагов) и физических (угол встречи, заряд, релятивистские факторы частиц, размеры пучков) параметров задачи.

Для упрощения создания высокоскоростных численных кодов для решения задач физики плазмы на гибридных суперЭВМ создана параметризованная реализация метода частиц в ячейках. Реализация выполнена для суперЭВМ, оснащенных графическими ускорителями (Graphical Processing Unit, GPU). В качестве параметров рассматривались специфичные для каждой конкретной плазменной задачи программные реализации объектов "частица" и "ячейки" (в виде классов языка C++). В зависимости от конкретной задачи замена алгоритма расчета электромагнитного поля и граничных условий осуществляется через механизм наследования и виртуальных функций. Возможное число используемых узлов с GPU практически не ограничено. Проведенные на суперЭВМ "Ломоносов" расчеты показали эффективность распараллеливания 92 % при использовании 500 GPU Nvidia Tesla.

Проведены крупномасштабные расчеты динамики частиц (640 млн частиц) на 100 узлах, оснащенных ускорителями Intel Xeon Phi (МВС-10П, МСЦ РАН), а также со 150 млн частиц на 250 узлах, каждый из которых оснащен двумя ускорителями Nvidia Tesla ("Ломоносов", НИВЦ МГУ) в рамках задачи пучково-плазменного взаимодействия.

Уточнен список диагностик, необходимых для задачи моделирования встречных пучков. Это плотности пучков в поперечном сечении, значение эмитанса и светимости пучков в зависимости от времени. Реализован класс GPUBeam – расчетная область для моделирования встречных пучков на GPU (это производный класс от GPUPlasma – расчетной области для моделирования пучково-плазменного взаимодействия).

Создана численная модель вращающегося гравитирующего газодинамического диска, представляющего околозвездный диск с возможностью фрагментации (образованием сгустков плотности). В ее основе лежит алгоритм, комбинирующий бессеточный метод SPH и сеточный метод вычисления гравитационного потенциала. Разработан параллельный алгоритм, применимый как для модели тонкого диска (когда отсутствует движение вещества в вертикальном направлении), так и для полностью трехмерной модели.

В рамках сотрудничества с Институтом астрономии РАН в лице д.ф.-м.н. проф. А. В. Тулукова и Институтом астрономии университета Вены (Австрия) в лице к.ф.-м.н. Э. И. Воробьева проводятся исследования в области математического моделирования эволюции и столкновения галактик и процессов звездообразования в них. В 2017 г. объяснен механизм образования туманности NGC 6188. В результате вычислительного эксперимента была получена плотная область в виде "пальмовой ветки" (рис. 3,а), видна корреляция  $M \sim n^2$  (белая линия на рис. 3,б), большая часть облака  $n > 10 \text{ см}^{-3}$  попадает в сверхальфвеновскую область. Контуры косинуса угла коллинеарности между векторами скорости и магнитного поля образуют седловидную структуру (рис. 3,в), что говорит о том, что сжатие происходит вдоль силовых линий магнитного поля.

В рамках совместной работы лаборатории ПАРБЗ и акад. С. К. Годунова проводились исследования математической модели упруго-пластических деформаций, возникающих при косом соударении пластин. Сформулировано и исследовано новое уравнение состояния, записанное через тензор напряжений. Использование неприводимого представления позволило описать девиатор тензора напряжений как пятимерный вектор, допускающий учет

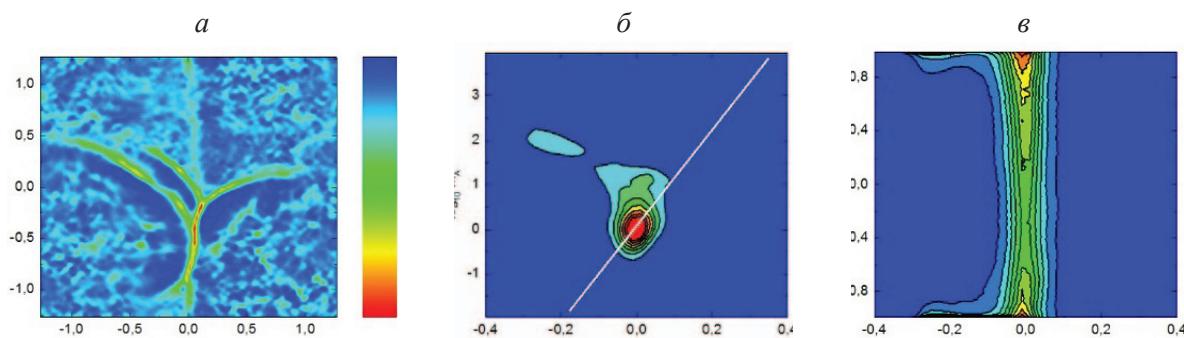


Рис. 3. Плотность атомарного водорода,  $\text{см}^{-3}$  (а); зависимость альфвеновского числа Маха от плотности (б), зависимость косинуса угла между векторами скорости и вектора магнитного поля (в)

кристаллической структуры и фазовые переходы между твердым состоянием, жидкостью, газом и потоком частиц. Математическая модель была верифицирована на задаче о косом соударении пластин при малом угле между ними. В результате такого соударения образуется кумулятивная струя, которая наблюдается в лабораторных экспериментах, проводимых в ИГиЛ СО РАН.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 15-01-00508** "Разработка эффективных параллельных вычислительных методов высокого порядка точности для моделирования динамики астрофизических объектов на гибридных высокопроизводительных вычислительных системах"

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Куликов И. М.

В рамках работы по гранту разработан новый численный метод высокого порядка точности для решения уравнений гравитационной газовой динамики и уравнений для первых моментов бесстолкновительного уравнения Больцмана. Численный метод основан на комбинации метода разделения операторов, метода Годунова, HLL метода и кусочно-параболического метода на локальном шаблоне. Полученный метод сохраняет все преимущества HLL метода, обеспечивая малую диссипацию численного решения. С помощью программной реализации смоделирован новый механизм образования галактик типа "Медуза" на основе развития ram-pressure механизма, возникающего при столкновении галактик различных масс.

**Проект РФФИ № 16-01-00209** "Численное моделирование неустойчивых режимов взаимодействия релятивистских электронных пучков с плазмой в установках УТС".

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Дудникова Г. И.

Проведено исследование влияния магнитного поля на формирование электромагнитного спектра при развитии пучково-пламенной неустойчивости в условиях замагниченной неоднородной плазмы. Определены спектральные и поляризационные характеристики электромагнитных волн, покидающих плазму в зависимости, от величины магнитного поля. Отдельно рассмотрен случай влета пучка в однородную плазму под углом к магнитному полю. С помощью численных экспериментов показано, что увеличение угла влета пучка ведет к существенному увеличению энергии электромагнитных волн, покидающих плазму (от 1 до 3 % энергии входящего пучка). Для проведения вычислительных экспериментов разработан алгоритм параллельных вычислений с оптимальной пересылкой плотности тока.

**Проект РФФИ № 16-07-00916** "Разработка алгоритмов и программного обеспечения для суперкомпьютерного моделирования двухфазных гравитирующих систем в задачах астрофизики"

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Снытников Н. В.

Разработан параллельный алгоритм для численного моделирования вращающегося гравитирующего газодинамического диска, основанный на декомпозиции области, параллельном вычислении траекторий частиц и динамическом перераспределении частиц между подобластями. Разработаны программная архитектура, алгоритмы и реализация распределенной клиент-серверной системы: облака точек хранятся непосредственно на сервере в виде октодеревя, по запросу пользователя происходит передача данных на клиентскую машину и дальнейшая визуализация в браузере с выбором необходимой степени детализации.

**Проект РФФИ № 16-31-00301** "Разработка эффективных параллельных алгоритмов для численного моделирования ультрарелятивистских пучков заряженных частиц".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Боронина М.А.

Разработаны и реализованы алгоритмы численного моделирования динамики тонких ультрарелятивистских пучков с ненулевым углом встречи. Метод основан на вычислении вклада поля при движении пучка под углом к оси координат в зависимости от элемента плотности с использованием модельных частиц в виде игл, полученного линейной интерполяцией. Выполнено сравнение численных результатов с аналитическими для электрического поля в частных случаях, когда существует аналитическое решение. Проведено сравнение численных результатов со светимостью, полученной на основе несобственного интеграла для случая сфокусированных встречных пучков небольших зарядов. Поведение светимости подтверждает корректность вычисления координат частиц во все моменты времени взаимодействия пучков во всей области.

**Проект РФФИ № 16-31-00304** "Численное моделирование неустойчивых режимов взаимодействия релятивистских электронных пучков с плазмой"

Руководитель проекта – Ефимова А. А.

Проведены расчеты для установления характерного размера энергосодержащей части электромагнитного спектра при взаимодействии электронного пучка с плазмой. Выполнено сравнение вариантов с влетом в однородную плазму одного пучка, а также двух встречных пучков. Подтверждено предположение о доминирующей роли излучения на плазменной и двойной плазменной частотах, определен механизм перекачки энергии по спектру.

Для проведения численного моделирования были рассмотрены две модели: с периодическими и открытыми граничными условиями, когда пучок постепенно и инжектируется в плазму. Показано, что в случае инжекции одного электронного пучка в однородную плазму обе модели обеспечивают похожие результаты, в то время как при инжекции в плазму встречных пучков модель с открытыми граничными условиями не позволяет корректно воспроизвести режим трехволнового взаимодействия.

**Проект РФФИ № 16-29-15120** "Разработка алгоритмического и программного обеспечения многомасштабного моделирования месторождений углеводородов с использованием суперкомпьютеров".

Руководитель проекта – чл.-корр. РАН Кабанихин С. И.

В рамках проекта разработана вычислительная модель распространения упругоупругих волн в геологической среде. Модель основана на лагранжевой постановке нелинейной

теории упругости, которая разрешается методом Годунова, с использованием адаптивного уравнения состояния. Выполнены вычислительные эксперименты, подтверждающие работоспособность вычислительной модели.

**Проект РФФИ № 16-07-00434** "Разработка алгоритмического и программного обеспечения экзафлопсных суперЭВМ на основе интегрального подхода".

Руководитель проекта – д.т.н. Глинский Б. М.

В рамках гранта с помощью концепции со-дизайна вычислительной модели разработана модель взаимодействия галактик, допускающая реализацию на гибридных суперЭВМ, оснащенных ускорителями Intel Xeon Phi с помощью низкоуровневой векторизации. В рамках интегрального подхода созданная вычислительная модель реализована в виде программного комплекса, исследована его энергоэффективность.

### **Результаты работа по проектам Российского научного фонда**

**Проект РФФИ № 16-11-10028** "Высокопроизводительное моделирование турбулентных режимов генерации высокочастотного электромагнитного излучения в системе плазма — релятивистский электронный пучок".

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

С помощью численного моделирования проведено исследование процесса формирования турбулентности при пучково-плазменном взаимодействии с дальнейшей генерацией электромагнитного излучения. В турбулентной плазме имеется широкий спектр флуктуаций плотности, поэтому излучение генерируется во всех возможных направлениях. Если в плазме предварительно создать выделенное возмущение ионной плотности, то появляется возможность генерации узконаправленного излучения, которое можно использовать в различных приложениях. Показано, что небольшая модуляция плотности плазмы (до 10 %) позволяет добиться существенного повышения мощности излучения (с 1 до 5 %). Проведенные расчеты с ионами различной массы показали, что самосогласованное изменение плотности плазмы даже с минимальной начальной амплитудой модуляции для ионов водорода позволяет добиться более эффективной генерации излучения, чем предсказывает линейная теория, в то время как поведение плазмы с более тяжелыми ионами описывается линейной теорией точнее. Получены оценки применимости линейной теории в рамках нелинейного насыщения по параметру амплитуды модуляции, а также определено значение амплитуды модуляции плотности (10 % для водородной плазмы, 15 % для аргоновой плазмы), позволяющее обеспечить максимально эффективную конвертацию энергии пучка в электромагнитное излучение. Расчеты на гибридной части суперкомпьютера "Ломоносов" (МГУ) с использованием нескольких тысяч вычислительных ядер проведены для числа частиц порядка  $10^{10}$ – $10^{11}$  и размером сетки 108–1010 узлов. Использовано в одном расчете до 500 ускорителей Nvidia Tesla с оперативной памятью 6 Гб по 125 млн модельных частиц на каждый ускоритель, всего до 50 млрд модельных частиц, сетка до  $1000 \times 1000 \times 1000$  млн узлов.

### **Прочие гранты**

**Грант Президента РФ МК-6648.2015.9.**

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Куликов И. М.

В рамках гранта исследован и реализован векторизованный численный метод решения уравнений гравитационной газовой динамики на основе метода HLL. Исследована

производительность векторизованного варианта реализации HLL метода решения уравнений газовой динамики на ускорителях Intel Xeon Phi на архитектуре KNL, получена производительность 302 гигафлопса в рамках одного ускорителя. На основе комбинации метода разделения операторов и HLL метода был сформулирован новый метод решения уравнений магнитной газовой динамики, который по свойствам эквивалентен HLLC методу и позволяет векторизовать вычисления. С помощью разработанных методов выполнено моделирование сценария взаимодействия солнечного ветра с газовым гигантом HD 209458b. При этом образуются отраженная плоская ударная волна, тангенциальные разрывы в виде круговой волны вокруг газового гиганта и фрагментация хвоста. Периферия хвоста при сохранении момента импульса, помимо фрагментации, становится похожей на основу естественных спутников, которая за счет гравитации может образовывать устойчивые конфигурации (луны).

### Публикации

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Timofeev I. V., Berendeev E. A., Dudnikova G. I. Simulations of a beam-driven plasma antenna in the regime of plasma transparency // *Physics of Plasmas*. 2017. Vol. 24, 093114. DOI: 10.1063/1.4995323.
2. Stoyanovskaya O. P., Snytnikov N. V., Snytnikov V. N. Modeling circumstellar disc fragmentation and episodic protostellar accretion with smoothed particle hydrodynamics in cell // *Astron. and Comput.* 2017. Vol. 21. Oct. 2017. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.ascom.2017.09.001.
3. Glinsky B., Kulikov I., Chernykh I., Weins D., Snytnikov A., Nenashev V., Andreev A., Egunov V., Kharkov E. The co-design of astrophysical code for massively parallel supercomputers // *Lect. Notes in Comp. Sci.* 2016. V. 10049. P. 342–353. DOI: 10.1007/978-3-319-49956-7\_27.
4. Berendeev E. A., Dudnikova G. I., Efimova A. A. PIC-simulation of the electron beam interaction with modulated density plasma // *AIP Conf. Proc.* 2017. V. 1895, 120002. DOI: 10.1063/1.5007419.
5. Kulikov I., Glinsky B., Chernykh I., Nenashev V., Shmelev A. Numerical simulations of astrophysical problems on massively parallel supercomputer // *Proc. 11th Intern. forum on strategic technology "IFOST 2016"*. 2017. DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884117.
6. Глинский Б. М., Куликов И. М., Сапегина А. Ф., Черных И. Г., Снытников А. В. The integrated approach to solving large-size physical problems on supercomputers // *RuSCDays 2017. CCIS 793*. 2017. P. 278–289. DOI: 10.1007/978-3-319-71255-0\_22.
7. Kulikov I., Chernykh I., Protasov V. The numerical modelling of MHD astrophysical flows with chemistry // *J. of Phys. Conf. Ser.* 2017. V. 894. Art. Num. 012132. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012132.

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Berendeev E., Dudnikova G., Efimova A., Vshivkov V. Computer simulation of plasma dynamics in open plasma trap // *Springer Intern. Publ. AG 2017. NAA 2016. Lect. Note in Comp. Sci.* 10187. 2017. P. 227–234. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0\_23. 2017.
2. Titarenko S. S., Kulikov I. M., Chernykh I. G., Shishlenin M. A., Krivorot'ko O. I., Voronov D. A., Hildyard M. Multilevel parallelization: Grid methods for solving direct and inverse problems // *Commun. in Comput. and Inform. Sci.* 2016. V. 687. P. 118–131. DOI: 10.1007/978-3-319-55669-7\_10.

3. Berendeev E., Boronina M., Efimova A., Vshivkov V., Dudnikova G. Supercomputer modeling of the generation of the electromagnetic radiation by the beam-plasma interaction // PCT 2017, CCIS 753. 2017. P. 247–260. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-67035-5\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-67035-5_18).

### **Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Stoyanovskaya O., Snytnikov N. Supercomputer simulations of gravitating gaseous circumstellar disk using SPH // Сборник коротких статей Междунар. науч. конф. "Параллельные вычислительные технологии 2017", Казань, 3–7 апр. 2017 г. С. 190–198.

2. Лаговская К. В., Боронина М. А. Сравнительный анализ двух алгоритмов моделирования динамики заряженных пучков // Труды Междунар. конф. по вычислительной и прикладной математике "ВПП'17" в рамках "Марчуровских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля 2017 г. С. 498–503.

3. Боронина М. А., Вшивков В. А. Математическое моделирование движения пучков заряженных частиц с ненулевым углом встречи // Там же. С. 113–118.

4. Кривошеин Е. О., Снытников Н. В. Клиент-серверная система визуализации больших объемов трехмерных данных суперкомпьютерного моделирования // Там же. С. 463–469.

5. Вшивков В. А., Генрих Е. А. Алгоритм вычисления тока и форма ядра частицы в методе частиц в ячейках // Там же. С. 173–178.

6. Глинский Б. М., Черных И. Г., Куликов И. М., Снытников А. В., Сапетина А. Ф., Винс Д. В. Интегральный подход к разработке алгоритмического и программного обеспечения экзафлопсных суперЭВМ: некоторые результаты // Там же. С. 204–210.

### **Участие в конференциях и совещаниях**

1. Международная конференция "Вычислительная и прикладная математика 2017", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 11 докладов (Вшивков В. А., Берендеев Е. А., Боронина М. А., Ефимова А. А., Генрих Е. А., Куликов И. М., Лаговская К. В., Снытников А. В., Снытников Н. В.).

2. Национальный суперкомпьютерный форум, Переславль-Залесский, 28 ноября – 1 декабря 2017 г. – 3 доклада (Куликов И. М., Снытников А. В., Протасов В. А.).

3. Суперкомпьютерные дни в России, Москва, 25–26 сентября 2017 г. – 2 доклада (Куликов И. М., Снытников А. В.).

4. The 5th Russian-Chinese workshop on numerical mathematics and scientific computing, Новосибирск, 29–30 июня 2017 г. – 1 доклад (Куликов И. М.).

5. Всероссийская конференция с международным участием "Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва", посвященная 60-летию Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, 4–8 сентября 2017 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Протасов В. А.).

6. Международная конференция "Математика в современном мире", посвященная 60-летию Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск, 14–19 августа 2017 г. – 4 доклада (Берендеев Е. А., Боронина М. А., Вшивков В. А., Генрих Е. А., Куликов И. М.).

7. Международная научная конференция "Параллельные вычислительные технологии", Казань, 3–7 апреля 2017 г. – 3 доклада (Берендеев Е. А., Боронина М. А., Вшивков В. А., Ефимова А. А., Куликов И. М., Снытников Н. В.).

8. Конференция молодых ученых ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, 24–25 апреля 2017 г. – 1 доклад (Куликов И. М.).

9. International conference on mathematical modelling in applied sciences "ICMMAS 2017", Санкт-Петербург, 24–28 июля 2017 г. – 2 доклада (Берендеев Е. А., Боронина М. А., Вшивков В. А., Ефимова А. А., Генрих Е. А.).

10. 13-я Международная конференция "Забабихинские научные чтения", Снежинск, 20–24 марта 2017 г. – 2 доклада (Берендеев Е. А., Вшивков В. А., Генрих Е. А., Ефимова А. А.).

11. 17-я Всероссийская конференция-школа молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования", Дюрсо, 11–16 сентября 2017 г. – 1 доклад (Вшивков В. А., Генрих Е. А.).

12. 9th conference "Application of mathematics in technical and natural sciences", Албена (Болгария), 21–26 июня – 1 доклад (Ефимова А. А., Берендеев Е. А.).

### Участие в программных и организационных комитетах конференций

1. Вшивков В. А. – член программного комитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017, САМ-2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

2. Берендеев Е. А. – член оргкомитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017, САМ-2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

3. Боронина М. А. – член оргкомитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017, САМ-2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.

5. Генрих Е. А.:

– член оргкомитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017, САМ-2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.;

– член оргкомитета 9-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", посвященной 85-летию со дня рождения акад. М. М. Лаврентьева, Новосибирск, 26 июня – 2 июля 2017 г.

6. Ефимова А. А.:

– член оргкомитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017, САМ-2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.;

– член оргкомитета международной конференции 9th Conference "Application of mathematics in technical and natural sciences", Албена (Болгария), 21–26 июня 2017 г.

7. Куликов И. М.:

– зампредседателя программного комитета Конференции молодых ученых ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, 24–26 апреля 2017 г.

– зампредседателя программного комитета The 5th Russian-Chinese workshop on numerical mathematics and scientific computing, Новосибирск, 29–30 июня 2017 г.;

– секретарь программного комитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017, САМ-2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.;

– член оргкомитета 13-й Международной Азиатской школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем", Новосибирск, 18–22 сентября 2017 г.

### Защита диссертации

Куликов И. М. Математическое моделирование трехмерных гидродинамических процессов в самосогласованном гравитационном поле на суперЭВМ. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. 7 февраля 2017 г. Номер диплома ДНД 004576 (приказ 826/нк-20 от 24 июля 2017 г.).

**Итоговые данные по лаборатории**

Публикаций, индексируемых в базе данных Web Of Science – 7  
Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 10  
Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 16  
Докладов на конференциях – 32  
Участников оргкомитетов конференций – 6

**Кадровый состав**

1. Вшивков В. А. зав. лаб. д.ф.-м.н.
2. Берендеев Е. А. м.н.с. к.ф.-м.н.
3. Боронина М. А. н.с. к.ф.-м.н.
4. Генрих Е. А. н.с., к.ф.-м.н.
5. Ефимова А. А. м.н.с.
6. Куликов И. М. н.с. д.ф.-м.н.
7. Снытников А. В. с.н.с. к.ф.-м.н.
8. Снытников Н. В. н.с. к.ф.-м.н.

Берендеев Е. А., Боронина М. А., Генрих Е. А., Ефимова А. А., Куликов И. М., Снытников А.В. – молодые научные сотрудники.

**Педагогическая деятельность**

Вшивков В. А. – профессор НГУ.

Куликов И. М. – доцент НГТУ, лекционные курсы в аспирантуре ИВМиМГ СО РАН.

**Руководство аспирантами**

Протасов В. А. – 3-й курс аспирантуры НГТУ, руководитель Куликов И. М.

Ненашев Е. В. – 3-й курс аспирантуры НГТУ, руководитель Куликов И. М.

Серенко А. А. – 3-й курс аспирантуры ИВМиМГ СО РАН, руководитель Куликов И. М.

**Руководство студентами**

Лаговская К. В. – 2-й курс магистратуры НГУ, руководитель Боронина М. А.

Пехтерев М. С. – 2-й курс магистратуры НГУ, руководитель Вшивков В. А.

Пригарин В. Г. – 3-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Куликов И. М.

Пугачев В. В. – 2-й курс магистратуры НГТУ, руководитель Куликов И. М.

Тарасов В. С. – 2-й курс магистратуры НГУ, руководитель Вшивков В. А.

Назарченко Е. А. – 4-й курс НГУ, руководитель Вшивков В. А.

Чуркин Е. А. – 4-й курс НГУ, руководитель Вшивков В. А.

Судаков А. М. – 4-й курс НГУ, руководитель Вшивков В. А.

Заречнев М. А. – 4-й курс НГУ, руководитель Вшивков В. А.

## Лаборатория ССКЦ

Зав. лабораторией д.т.н. Глинский Б. М.

### Важнейшие достижения

#### **Алгоритмическое и программное обеспечение для высокопроизводительных суперЭВМ на основе со-дизайна, имитационного моделирования и оценки энергоэффективности алгоритма**

Предложена методика разработки алгоритмического и программного обеспечения для суперкомпьютеров пета и эксафлопсного уровня, включающая три связанных этапа: первый определяется со-дизайном, под которым понимается адаптация вычислительного алгоритма и математического метода к архитектуре суперкомпьютера на всех этапах решения задачи; на втором предполагается создание упреждающего алгоритмического и программного обеспечения для наиболее перспективных суперЭВМ на основе имитационного моделирования под заданную архитектуру суперкомпьютера; на третьем оценивается энергоэффективность алгоритма при различных реализациях на данной архитектуре, либо на различных архитектурах.

Данный подход был апробирован на вычислительно сложных задачах астрофизики, физики плазмы и геофизики. Понятие со-дизайна в контексте математического моделирования физических процессов понимается как построение физико-математической модели явления, численного метода, параллельного алгоритма и его программной реализации, эффективно использующей архитектуру суперкомпьютера.

Имитационное моделирование позволило исследовать масштабируемость алгоритмов решения вышперечисленных задач, определить оптимальное число вычислительных ядер для реализации вычислений. Показано, что алгоритмы решения данных задач для заданной архитектуры суперкомпьютера эффективно могут использовать около 1 млн вычислительных ядер.

Для повышения энергоэффективности алгоритмов решения указанных задач каждый программный код оптимизировался по следующим трем направлениям: работа с процессором и оперативной памятью, работа с сетевыми устройствами и работа с периферийными устройствами. Для эффективной работы с процессором и памятью использовался пакет Intel Parallel Studio XE 2016 Beta, включающий Intel Vectorization Advisor, который анализирует код и выдает предложения для оптимизации программы с целью максимизации эффективности использования векторных инструкций. Использование этого продукта дало прирост производительности в 30 % для астрофизического кода на процессорах семейства Intel Sandy Bridge. С использованием профилировщика Nvidia Visual Profiler проанализирована программа моделирования релаксации мощного электронного пучка в плазме на основе метода частиц-в-ячейках на графическом ускорителе Nvidia Kepler в силу того, что именно на этом ускорителе была получена наибольшая производительность. Энергоэффективность, определяемая в данном случае как отношение вычислительной производительности к потребляемой мощности, равна 60.8 Мфлопс/Вт.

В результате применения интегрального подхода разработан набор параллельных программ для решения данных физических задач.

Д.т.н. Глинский Б. М., к.ф.-м.н. Черных И. Г., д.ф.-м.н. Куликов И. М., к.ф.-м.н. Снытников А. В., к.т.н. Винс Д. В., Сапетина А. Ф.

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Glinskiy B., Sapetina A., Martynov V., Weins D., Chernykh I. The hybrid-cluster multilevel approach to solving the elastic wave propagation problem // Communications in Computer and Information Science book series. Vol. 753. Springer, 2017. P. 261–274.
2. Glinsky B., Kulikov I., Chernykh I., et al. The co-design of astrophysical code for massively parallel supercomputers // Lecture Notes in Comp. Sci. 2017. Vol. 10049. P. 342–353. Springer, Heidelberg. DOI: 10/1007/978-3-319-49956-7\_27.
3. Glinskiy B., Kulikov I., Chernykh I., Snytnikov A., Sapetina A., Weins D. The integrated approach to solving large-size physical problems on supercomputers // Труды международной конференции "Суперкомпьютерные дни в России", Москва, 25–26 сент. 2017 г. М.: Изд-во МГУ, 2017. С. 432–443.
4. Kulikov I., Chernykh I., Glinsky B. Numerical simulations of astrophysical problems on massively parallel supercomputers // AIP Conf. Proc. 1776, 090006. 2016. DOI: 10.1063/1.4965370.
5. Kulikov I., Chernykh I., Glinskiy B., Weins D., Shmelev A. Astrophysics simulation on RSC massively parallel architecture // Proc. IEEE/ACM 15th Intern. symp. on cluster, cloud, and grid computing "CCGrid 2015". 2015. P. 1131–1134.
6. Glinskiy B., Kulikov I., Snytnikov A., Romanenko A., Chernykh I., Vshivkov V. Co-design of parallel numerical methods for plasma physics and astrophysics // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2014. V. 1, iss. 3. P. 88–98.

#### **Отчет по этапам научно-исследовательских работ, завершающимся в 2017 г. в соответствии с планом НИР института**

**Проект НИР** "Разработка суперкомпьютерных технологий и методов моделирования масштабируемости алгоритмов для высокопроизводительных вычислительных систем".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2016-0009.

Руководитель – д.т.н. Глинский Б.М.

В рамках развития работ по суперкомпьютерным технологиям исследована масштабируемость параллельных алгоритмов с применением имитационного моделирования. Исследовалась возможность масштабирования численного моделирования задач сейсмологии, астрофизики и физики плазмы на большое число вычислительных ядер. Особенностью параллельных сеточных методов является возможность геометрической декомпозиции расчетной области с последующим обменом граничных значений только между соседними вычислительными узлами. При выполнении вычислений используются однотипные нити-вычислители, совершающие циклы расчета в своей подобласти и обмены граничными значениями с "соседними" нитями. В каждой итерации цикла могут выполняться несколько блоков вычислений и обменов в зависимости от решаемой задачи. Процесс обменов может происходить как в синхронном, так и в асинхронном режиме.

В качестве примера ниже приведены результаты исследования масштабируемости алгоритмов для задачи сейсмологии, решаемой в терминах скоростей смещения и напряжения и в терминах смещений с использованием методики со-дизайна (рис. 1).

Расчеты проводились на кластере НКС-30Т с графическими ускорителями. На рис. 1,*а* приведены результаты верификации модельных расчетов (сравнивались результаты реальных и модельных расчетов для двух подходов решения сейсмической задачи); на рис. 1,*б* – результаты модельных расчетов. Показано, что при решении данной задачи можно эффективно использовать около 1 млн вычислительных ядер.

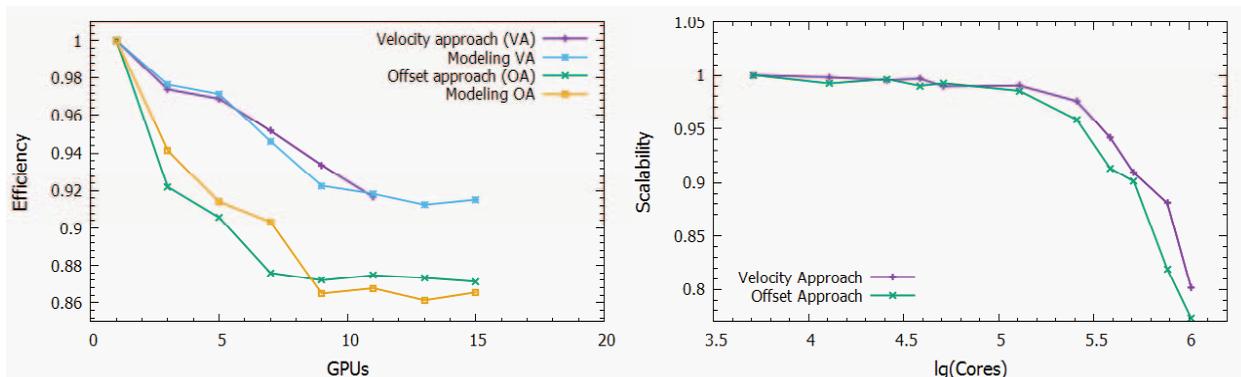


Рис. 1. Результаты исследования масштабируемости алгоритмов для задачи сейсмоки

В рамках работ по разработке кинетических решателей в рамках проекта CosmoPhi велись работы по оптимизации кинетических решателей для Intel Xeon Phi. Оптимизирована работа с оперативной памятью для использования больших матриц правых частей систем ОДУ. Реализована возможность выбора места хранения расчетных массивов – 16 гигабайтный MCDRAM кэш процессора Intel Xeon Phi или оперативная память узла. На синтетическом тесте производительности (матрица правых частей системы ОДУ размерностью  $1000 \times 1000$ ) показана разница в производительности между кэшем Intel Xeon Phi и оперативной памятью узла в четыре раза. Intel Xeon Phi 7290 имеет 8 контроллеров памяти MCDRAM против 2 контроллеров DDR памяти. Разница в производительности кода в четыре раза обусловлена тем, что число контроллеров MCDRAM в четыре раза больше, чем контроллеров DDR памяти. Так как в ЦКП ССКЦ ИВМиМГ СО РАН закуплена специализированная память на основе технологии Intel Optane, выполнены работы по оптимизации кода для использования бесстраничной памяти Intel Optane. В рамках проводимых работ оптимизирован код CosmoPhi с целью увеличения производительности. После оптимизации арифметическая интенсивность наиболее ресурсоемкого участка кода увеличилась более чем в три раза. Показано, что код эффективно использует кэш процессора, так как скорость обмена с памятью превзошла пиковую производительность MCDRAM кэш памяти процессора.

По разработанному программному обеспечению подана заявка в Роспатент на получение свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ.

### Результаты работ по проектам РФФИ

**Проект РФФИ № 16-07-00434** "Разработка алгоритмического и программного обеспечения экзафлопсных суперЭВМ на основе интегрального подхода".

Руководитель – д.т.н. Глинский Б. М.

Выполнено исследование возможностей интегрального подхода к решению вычислительно сложных задач из различных областей знаний (сейсмика, астрофизика, физика плазмы) как для различных архитектур современных компьютеров, так и гипотетических с применением методов имитационного моделирования.

В контексте со-дизайна проведено сравнение разработанных параллельных реализаций решения задачи динамической теории упругости, записанной в разных постановках для гибридных кластеров, оснащенных графическими картами; исследован новый векторизованный численный метод для решения уравнений гравитационной газовой и магнитной газовой динамики, основанный на комбинации метода разделения операторов, метода Годунова и HLL-метода. Для программной реализации разработанных векторизованных алгоритмов

достигнута производительность в размере 245 гигафлопс на ускорителе Intel Xeon Phi 7250 и производительность 302 гигафлопс на ускорителе Intel Xeon Phi 7290A. Аналогичный подход был применен и для проблемы физики плазмы.

Масштабируемость полученных алгоритмов была проверена с использованием системы моделирования AGNES. В нашем случае в процессе моделирования можно определить оптимальное число ядер для конкретной архитектуры. Это позволяет исследовать масштабируемость алгоритма, не прибегая к прямым трудоемким вычислениям. Показано, что алгоритмы решения перечисленных выше задач для заданной архитектуры суперкомпьютера эффективно могут использовать примерно 1 млн вычислительных ядер.

Энергоэффективность алгоритма для геофизической задачи была рассмотрена на суперкомпьютерах, оснащенных графическими процессорами Tesla 2090M и K40M. Принимая во внимание особенности геофизического кода, удалось достигнуть энергоэффективности 9 гигафлопс/Вт и 12 гигафлопс/Вт для решения задачи в напряжениях и в смещениях соответственно на Nvidia Tesla 2090 и K40M без изменения исходного кода. Для астрофизического кода удалось уменьшить время MPI операций до 7–8 % от общего времени выполнения программы и добиться уровня разбалансировки процессов не более 2–3 % между всеми нитями процессов. Такие показатели позволили получить 75-процентную эффективность (weak scalability) распараллеливания на 224 Intel Xeon Phi (более 50К ядер). Применяя этот же подход для кода физики плазмы была получена 92-процентная эффективность распараллеливания на 500 Tesla GPUs (более 250 К ядер).

В результате применения интегрального подхода разработан набор параллельных программ для решения данных физических задач. Он способен выполнять 3D-моделирование в приемлемое время, при условии достаточности ресурсов. Показана возможность исполнения разработанных алгоритмов на суперЭВМ петафлопсного класса.

### **Результаты работ по научно-исследовательским программам, проектам Президиума РАН, ОМН РАН и Сибирского отделения РАН**

**Программа Президиума РАН № 6, проект 14.2 "Создание высокопроизводительной информационно-вычислительной системы на базе ЦКП ССКЦ ИВМиМГ СО РАН".**

Номер государственной регистрации НИР 0315-2015-0014.

Координаторы: акад. РАН Велихов Е. П., акад. РАН Савин Г. И., акад. РАН Жижченко А. Б.

Руководитель: д.т.н. Глинский Б. М.

В марте 2017 г. в ЦКП ССКЦ ИВМиМГ СО РАН установлен новой суперкомпьютерной кластер НКС-1П на базе решения "РСК Торнадо" с жидкостным охлаждением, общие вычислительные ресурсы центра были увеличены почти в два раза – на 71 % до уровня 197 терафлопс. Аналогичная вычислительная система установлена в МСЦ РАН. С технической точки зрения оба проекта – в суперкомпьютерных центрах РАН в Москве и СО РАН в Новосибирске – уникальны, поскольку это первое в мире внедрение серверных вычислительных узлов с жидкостным охлаждением в режиме "горячая вода" на базе самых мощных 72-ядерных процессоров Intel® Xeon Phi™ 7290 (были представлены в ноябре 2016 г.), а также на основе 16-ядерных процессоров Intel® Xeon® E5-2697A v4. Кроме того, в ходе реализации этих уникальных проектов впервые в России и СНГ коммуникационные подсистемы двух кластерных комплексов были реализованы на основе высокоскоростного межзвучного соединения Intel® Omni-Path со скоростью передачи данных 100 Гбит/с. Новый кластер подключен к суперкомпьютерной сети GridННЦ.

Вычислительный кластер НКС-1П работает под управлением ОС CentOS Linux 7.3. На нем установлены: система управления кластерами РСК "БазИС" 3.2 и система управления очередью заданий SLURM 17.02; доступные всем пользователям прикладные пакеты Quantum Espresso в варианте как для процессоров Intel Broadwell, так и для Intel Knights Landing (KNL); Gaussian 09, Gromacs 2016.3 и NAMD 2.12.

В начале декабря 2017 г. кластер НКС-1П расширен в расчете на решение больших задач, требующих большого объема оперативной памяти. Стандартная память вычислительного узла (128 Гб) расширена за счет установки Intel Optane Memory объемом 768 Гб. Стало возможным выполнение счетных задач на гетерогенной системе (составленной из узлов различной конфигурации) в рамках одной очереди заданий. Такое решение изначально было реализовано и протестировано на задачах геофизики совместно с сотрудниками ИНГГ СО РАН на кластере НКС-30Т с возможностью реализации на современной архитектуре.

За четыре месяца с окончания тестовой эксплуатации на кластере зарегистрированы 70 пользователей из 9 учреждений СО РАН, двух учреждений РАН и двух университетов (НГУ и МГУ), из них 35 – новые пользователи ССКЦ.

Отметим, что в тестовом режиме ресурсы двух центров коллективного пользования – Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСЦ РАН) в Москве и Сибирского суперкомпьютерного центра Сибирского отделения РАН (ССКЦ ИВМиМГ СО РАН) в Новосибирске – были объединены в территориально распределенный вычислительный комплекс с использованием высокоскоростного защищенного канала передачи данных (10 Гбит/с). Высокопроизводительный защищенный канал связи создан специалистами группы компаний РСК, компаний "С-Терра СиЭсПи" и "Милеком", а также Института вычислительных технологий СО РАН. В результате проведенного тестирования продемонстрирована возможность передачи данных по защищенному каналу со скоростью до 4 ТБ в час (около 9 Гбит/с) между двумя центрами, расположенными друг от друга на расстоянии примерно 3000 км. Защита информации обеспечивается в соответствии с отечественными криптографическими алгоритмами ГОСТ Р 34.10-2012, ГОСТ Р 34.11-2012, VKO\_GOSTR3410\_2012\_256, ГОСТ 28147, реализованными в криптошлюзах С-Терра на базе унифицированных высокопроизводительных серверов "РСК Торнадо".

На территориально распределенном вычислительном комплексе МСЦ-ССКЦ проведен расчет на перспективном решателе систем гиперболических уравнений ИВМиМГ СО РАН (газовая динамика, магнитная газовая динамика и др.). Использованы вычислительные узлы кластера в Новосибирске (ССКЦ) и система хранения данных в Москве (МСЦ). Эксперимент показал, что скорость расчета всего в два раза ниже, чем при использовании только локальной кластерной установки.

С учетом того, что ССКЦ СО РАН подключен к суперкомпьютерной сети GridННЦ 10 Гбит, пользователи учреждений ФАНО СО РАН в перспективе имеют возможность решать свои научные задачи с использованием совместных ресурсов МСЦ-ССКЦ.

В течение 2017 г. продолжались работы по эксплуатации виртуализированной вычислительной ГРИД-среды ННЦ, основанной на суперкомпьютерной 10 Гбит сети ННЦ и включающей вычислительные ресурсы ССКЦ, ИЯФ и НГУ. Виртуализированная ГРИД-среда активно использовалась для обработки данных экспериментов по физике высоких энергий, осуществляемых в ИЯФ СО РАН как на собственных ускорителях, так и на Большом адронном коллайдере. Со стороны ССКЦ в виртуальный кластер входит подсистема кластера НКС-30Т на двойных блейд-серверах HP BL2x220 G6. Рассматривается возможность включения в ГРИД нового кластера НКС-1П.

**Программа Президиума РАН № 18, проект 16.4 "Моделирование и экспериментальные исследования вулканических структур методами активной и пассивной сейсмологии".**

Номер государственной регистрации НИР 0315-2015-0016.

Координатор – акад. РАН Лаверов Н. П.

Руководитель – д.т.н. Глинский Б. М.

Продолжались работы по выбору оптимального алгоритма численного моделирования распространения сейсмических волн в 3D средах, характерных для магматических вулканов. Разработан алгоритм и создано соответствующее параллельное ПО для решения этой задачи на гетерогенном кластере, использующем графические ускорители; исследована масштабируемость алгоритма. Показано, что при реализации этого алгоритма на данной архитектуре вычислительного кластера можно эффективно использовать примерно 1 млн. вычислительных ядер. Проведена серия вычислительных экспериментов на основе разработанного ПО для приближенной геофизической модели стратовулкана Эльбрус при различных диаметрах выводящего канала и различных положениях контакта жидкой и твердой фаз в нем. Во всех экспериментах рассчитанное волновое поле от точечного источника представляет собой сложное явление и существенно зависит от геометрии, размеров и свойств включений. Результаты численных экспериментов показали, что можно выделить кинематические отличия в волновом поле и по ним приблизительно восстановить уровень магмы в выводящем канале.

В рамках проекта выполнена адаптация 3D-алгоритма моделирования сейсмических полей к архитектуре кластера НКС-1П с новыми вычислительными узлами на базе Intel KNL (16 узлов, на каждом один Intel Xeon Phi 7290 KNL 1.5 ГГц, 72 ядра, 16 ГБ кэш MCDRAM, RAM 96 Гбайт), установленного в ССКЦ в 2017 году. Проведены тестовые расчеты на небольшой задаче, размер области 100×100×600 точек в течение 640 итераций, гипертрейдинг отключен (1 поток – 1 ядро).

### Публикации

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Kulikov I., Chernykh I., Protasov V. The numerical modelling of MHD astrophysical flows with chemistry // J. of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 894. Art. Num. 012132. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012132.
2. Kulikov I., Glinsky B., Chernykh I., Nenashev V., Shmelev A. Numerical simulations of astrophysical problems on massively parallel supercomputer // IEEE Proc. 2016 11th Intern. forum on strategic technology "IFOST 2016". INSPEC Accession Num. 16760377. DOI: 10.1109/IFOST.2016.7884117.

#### Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Glinskiy B., Sapetina A., Martynov V., Weins D., Chernykh I. The hybrid-cluster multilevel approach to solving the elastic wave propagation problem // Communications in Computer and Information Science book series. Vol. 753. Springer, 2017. P. 261–274. DOI: 10.1007/978-3-319-67035-5\_19.
2. Glinsky B., Kulikov I., Chernykh I., et al. The co-design of astrophysical code for massively parallel supercomputers // Lecture Notes in Comp. Sci. 2017. Vol. 10049. P. 342–353. Springer, Heidelberg. DOI: 10/1007/978-3-319-49956-7\_27.
3. Glinskiy B. M., Kulikov I. M., Chernykh I. G., Snytnikov A. V., Sapetina A. F., Weins D.V. The integrated approach to solving large-size physical problems on supercomputers // RuSCDays 2017 CCIS. 2017. Vol. 793. P. 278–289. DOI: 10.1007/978-3-319-71255-0\_22.
4. Kataev N., Kolganov A., Titov P. Automated parallelization of a simulation method of elastic wave propagation in media with complex 3D geometry surface on high-performance

heterogeneous clusters // Springer International Publishing Parallel Computing Technologies. 2017. № 10421. P. 32–41. DOI: 10.1007/978-3-319-62932-2.

5. Glinsky B., Kulikov I., Chernykh I., et al. The co-design of astrophysical code for massively parallel supercomputers // Lect. Notes in Comp. Sci. 2017. Vol. 10049. P. 342–353. DOI: 10/1007/978-3-319-49956-7\_27.

6. Glinskiy B., Kuchin N., Kostin V., Solovyev S. Parallel computations for solving 3D Helmholtz problem by using direct solver with low-rank approximation and HSS technique // Lect. Notes in Comp. Sci. (including subseries Lecture Notes in Artif. Intelligence and Lecture Notes in Bioinform.). 2017. Vol. 10187. P. 342–349. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0\_37.

7. Kulikov I., Chernykh I., Protasov V. The numerical modelling of MHD astrophysical flows with chemistry // J. of Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 894. Article Num. 012132. DOI: 10.1088/1742-6596/894/1/012132.

### **Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ**

1. Glinskiy B., Kulikov I., Chernykh I., Snytnikov A., Sapetina A., Weins D. The integrated approach to solving large-size physical problems on supercomputers // Труды международной конференции "Суперкомпьютерные дни в России", Москва, 25–26 сент. 2017 г. М.: Изд-во МГУ, 2017. С. 432–443.

2. Катаев Н. А., Колганов А. С., Титов П. А. Автоматизированное распараллеливание задачи моделирования распространения упругих волн в средах со сложной 3D геометрией поверхности на кластеры разной архитектуры // Короткие статьи и описания плакатов 11-й Междунар. конф. "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ'2017), Казань, 3–7 апр. 2017 г. С. 341–355.

3. Катаев Н. А., Колганов А. С., Титов П. А. Автоматизированное распараллеливание задачи моделирования распространения упругих волн в средах со сложной 3d-геометрией поверхности на кластеры разной архитектуры // Вестник УГАТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. Т. 21, № 3. С. 87–96.

4. Глинский Б. М., Черных И. Г., Куликов И. М., Снытников А. В., Сапетина А. Ф., Винс Д. В. Интегральный подход к разработке алгоритмического и программного обеспечения экзафлопсных суперЭВМ: некоторые результаты // Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПП'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. С. 204–210.

5. Кабанихин С. И., Куликов И. М., Шишленин М. А. О методе высокого порядка точности для решения прямых и обратных задач гравитационной газовой динамики в сферической симметрии // Там же. С. 348–356.

### **Участие в конференциях и совещаниях**

1. Intel HPC Dev Con 2017, Denver (USA), 11–12 Nov., 2017 – 2 доклада (Черных И. Г.).  
2. German-russian conference "Supercomputing in scientific and industrial problems", Stuttgart (Germany), 27–29 Mar., 2017 – 2 доклада (Черных И. Г.).

3. "Параллельные вычислительные технологии", Казань, 3–7 апреля 2017 г. – 1 доклад (Сапетина А. Ф.).

4. Russian supercomputing days 2017, Moscow, Sept. 25–26, 2017 – 2 доклада (Глинский Б. М., Черных И. Г.).

5. Intel artificial intelligence day – Искусственный интеллект, Новосибирск, 30 ноября 2017 г. – 1 доклад (Черных И. Г.).

6. Международная конференция "Вычислительная и прикладная математика 2017", Новосибирск, 25–30 июня 2017 г. – 3 доклада (Черных И. Г., Куликов И. М.).
7. Национальный суперкомпьютерный форум – 2017, Переславль-Залесский, 28 ноября – 1 декабря 2017 г. – 3 доклада (Куликов И. М.).
8. Открытая конференция ИСП РАН им. В. П. Иванникова, Москва, 30 ноября – 1 декабря 2017 г. – 1 доклад (Куликов И. М.).
9. "Центры коллективного пользования и уникальные научные установки организаций, подведомственных ФАНО России", Москва, 25–27 октября 2017 г. – 2 доклада (Черных И. Г.)

### Участие в оргкомитетах конференций

1. Глинский Б. М.:
  - член Программного комитета "Russian Supercomputing Days 2017", Moscow, September 25–26, 2017;
  - член Программного комитета Международной конференции "Вычислительная и прикладная математика 2017" (ВПМ 2017), Новосибирск, 25–30 июня 2017 г.
  - член Программного комитета Международной конференции "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ) 2017, Казань, 3–7 апреля 2017 г.
2. Черных И. Г.:
  - член Программного комитета "Russian Supercomputing Days 2017", Moscow, September 25–26, 2017;

### Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 2  
 Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 7  
 Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 14  
 Докладов на конференциях – 16, в том числе 1 пленарный.  
 Участников оргкомитетов конференций – 4

### Кадровый состав

- |                   |                    |                   |
|-------------------|--------------------|-------------------|
| 1. Глинский Б.М.  | зав. лаб.          | д.т.н.            |
| 2. Черных И.Г.    | с.н.с.             | к.ф.-м.н.         |
| 3. Винс Д.В.      | м.н.с.             | к.т.н., 0.5       |
| 4. Титов П.А.     | м.н.с.             | 0.25              |
| 5. Кучин Н.В.     | гл. спец.          | по СПО            |
| 6. Ломакин С.В.   | ведущ.             | инженер           |
| 7. Макаров И.Н.   | ведущ.             | программист       |
| 8. Зернова Л.В.   | ведущ.             | программист, 0.25 |
| 9. Кононов А.А.   | инженер-электроник | 0.75              |
| 10. Сапетина А.Ф. | инженер            | 0.25, аспирант    |

Черных И. Г., Ломакин С. В., Титов П. А., Сапетина А. Ф. – молодые научные сотрудники.

### Педагогическая деятельность

Глинский Б. М. – зав. кафедрой ММФ НГУ  
 Сапетина А. Ф. – ассистент кафедры ММФ НГУ

### Руководство аспирантами

1. Сапетина А.Ф. – 3-й курс аспирантуры