

**ЛАБОРАТОРИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

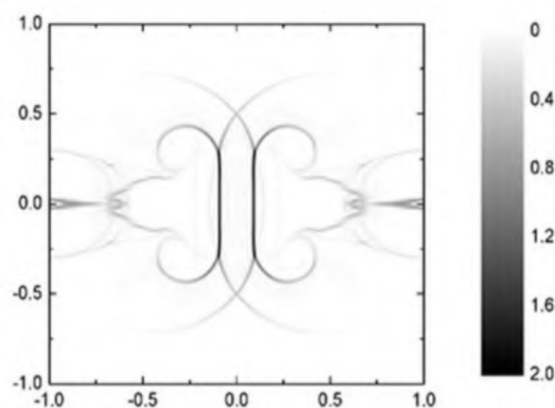
Зав. лабораторией к.ф.-м.н. Черных И. Г.

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

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

Использование современных суперЭВМ накладывает значительные ограничения на минимизацию межпроцессных коммуникаций при реализации программных кодов на архитектурах с распределенной памятью. С использованием технологии Coarray Fortran был разработан новый программный код, масштабируемость которого достигает 92 % при использовании 192 процессов, что соответствует MPI кодам. Характерное число потоков, выполняющихся над общим полем памяти в современных суперЭВМ, достигает нескольких сотен. Для повышения производительности многопоточной программы были использованы шаблоны компоновки данных Intel SDLT и средства автоматической векторизации современного стандарта OpenMP на основе технологий AVX-512. Их использование позволило на порядок повысить производительность вычислений в рамках одного процесса. В то же время повышение производительности требует значительного увеличения энергопотребления процессора. Нами разработана пошаговая методология расчета энергопотребления с использованием аппаратных возможностей Intel и программного обеспечения Intel VTune с оценкой углеродного следа от высокопроизводительного оборудования с водяным охлаждением при его вычислительной нагрузке кодами для моделирования лабораторной и космической плазмы. Использование систем с жидкостным охлаждением позволило на 25 % снизить энергопотребление по сравнению с воздушным охлаждением. Использование методики расчета энергопотребления позволяет найти оптимальное с точки зрения значения флорпс/Ватт число ядер в каждом узле используемого суперкомпьютера для проведения вычислительных экспериментов. Таким образом, разработана методика разработки масштабируемых программных кодов для моделирования лабораторной и космической плазмы с учетом оценки вклада в углеродный след.

Рис. 1: Шлирен безразмерной функции плотности в экваториальной плоскости при взаимодействии двух релятивистских джетов



Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Prigarin, V., Sapetina, A., Ulyanichev, I., Zavyalov, O. A New parallel code based on a simple piecewise parabolic method for numerical modeling of colliding flows in relativistic hydrodynamics // Math. 2022. V. 10 (11). Art. Num. 1865.

2. Akimova, E., Misilov, V., Kulikov, I., Chernykh, I. OMPEGAS: Optimized relativistic code for multicore architecture // *Math. 2022*. V. 10, iss. 11. Art. Num. 2546.

3. Chernykh, I., Kulikov, I., Vshivkov, V., Genrikh, E., Weins, D., Dudnikova, G., Chernoshanov, I., Boronina, M. Energy efficiency of a new parallel PIC code for numerical simulation of plasma dynamics in open trap // *Math. 2022*. V. 10, iss. 11. Art. Num. 3684.

Результаты исследований представлены на конференциях:

1. Национальный Суперкомпьютерный Форум (НСКФ-2022), Переславль-Залесский (Ярославская обл.), 29 ноября – 2 декабря 2022 г.

2. "Challenges and Innovations in Computational Astrophysics IV", виртуальный формат, 21–23 ноября 2022 г.

3. Prospects for Low Frequency Radio Astronomy in South America (IAR 60th), Буэнос-Айрес (Аргентина), 15–18 ноября 2022 г.

4. "Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии", виртуальный формат, 14–18 ноября 2022 г.

5. The 5th Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes, виртуальный формат, 12–14 октября 2022 г.

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

#### **в соответствии с планом НИР института**

**Проект НИР** "Суперкомпьютерные технологии решения больших задач естествознания, математические модели, методы анализа и оптимизации сложных информационных систем".

Номер государственной регистрации 0251-2022-0005.

Руководители: д.ф.-м.н. РАН Марченко М. А., к.ф.-м.н. Черных И. Г.

Разработан новый численный метод решения уравнений идеальной магнитной гидродинамики на основе комбинации метода Годунова, схем Рое и Русанова и кусочно-параболического представления решения для физических переменных. Гибридная схема решения задачи Римана связана с возможностью воспроизводить численное решение без особенностей вдоль направлений, что особенно важно, когда восстанавливаются компоненты скорости и магнитного поля в поперечном направлении. Разработанный численный метод реализован в виде программного комплекса для массивно-параллельных суперЭВМ. На кластере НКС-1П ССКЦ проведены исследования параллельной реализации и вычислительные эксперименты. Рассмотрена задача взаимодействия облака молекулярного водорода с набегающей межзвездной средой.

Для параллельного программного кода для моделирования трехмерной динамики двухфазных (газопылевых) систем на основе метода SPH (метода сглаженных частиц) разработан модельный тест по разлету газопылевого шара в вакуум, имеющий аналитическое решение и, таким образом, может использоваться для проверки численного кода. Показано совпадение результатов теста с численным кодом при различных параметрах трения между фазами.

На основе созданного ранее метода нулевых столкновений разработан новый скоростной специализированный алгоритм попарных ион-ионных столкновений для метода частиц-в-ячейках без использования тригонометрических функций. Предложенный метод лишен недостатков предыдущего подхода, связанного с необходимостью проводить коррекции энергии и импульса

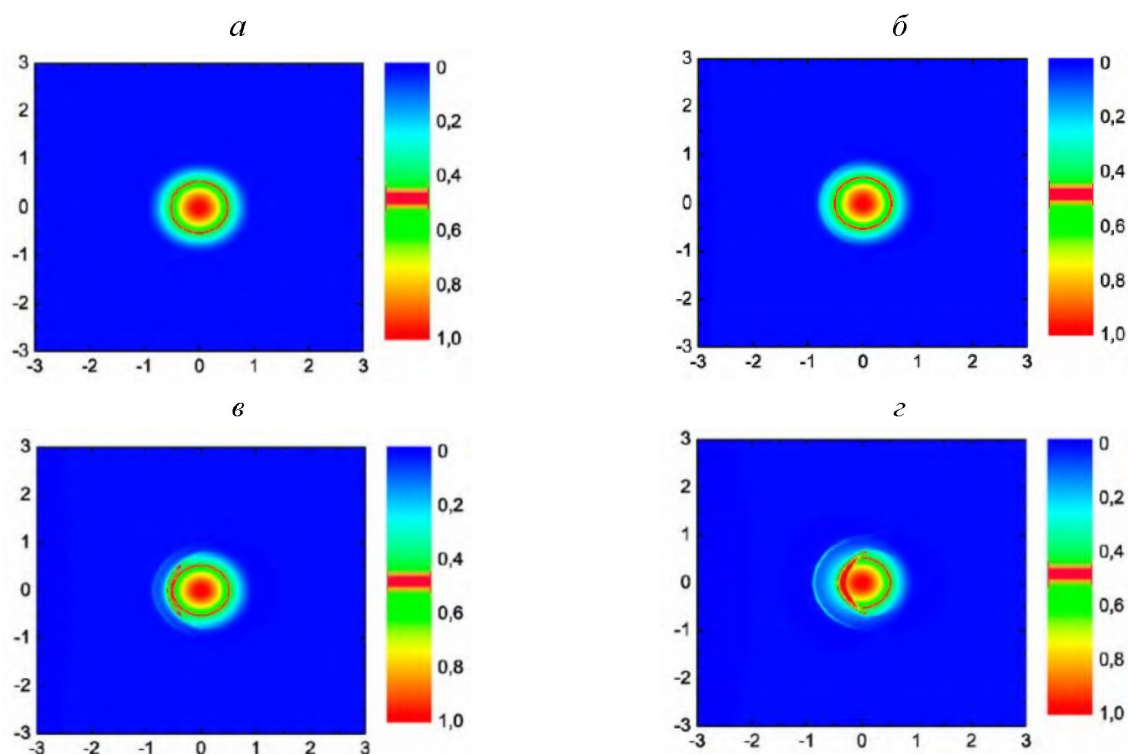


Рис. 1: Задача взаимодействия молекулярного облака с межзвездной средой: распределение плотности в  $10^3 \text{ см}^{-3}$  в начальный момент времени (а); на момент времени 500 тыс. лет (б); 800 тыс./лет (в); 1 млн лет (г). Для вычислительного эксперимента использована сетка  $256^3$  ячеек

частиц, что позволяет обсчитывать столкновения еще на 5–10 % быстрее. Кроме того, предложенный способ удобен для проведения параллельных вычислений, так как все расчеты проводятся внутри одной ячейки. Проведено сравнение нового алгоритма с другими алгоритмами парных столкновений, показавшее его высокую эффективность

Получена оценка погрешности созданного алгоритма, основанного на точном решении уравнений движения заряженных частиц в электромагнитных полях, применительно к решению задачи нагрева и удержания плазмы в открытых магнитных системах.

Продолжены работы по моделированию динамики плазмы в диамагнитном режиме открытой магнитной ловушки в двумерной постановке. В частности, модель дополнена возможностью инжектировать ионы из точки вне оси ловушки с заданным углом инжекции. На основе вычислительных экспериментов исследована зависимость характеристик формирующейся магнитной каверны как от параметров инжектируемых ионных пучков (координаты и угла точки инжекции, тока и температуры), так и структуры магнитного поля ловушки (величины пробочного отношения и положения пробок в области). Показано, что в результате непрерывной внеосевой инжекции ионных пучков под углом к оси пробкотрона происходит формирование каверн магнитного поля и фоновой плазмы. При этом напряженность магнитного поля и плотность фоновой плазмы внутри каверн могут составить несколько процентов от начальных значений. Режим диамагнитного удержания плазмы при малых углах инжекции сопровождается формированием области повышенной плотности быстрых ионов на границе каверны магнитного поля.

На основе трехмерной гибридной модели выполнена серия вычислительных экспериментов для исследования режима внеосевой атомарной инжекции в открытую магнитную систему.

Изучена зависимость процесса развития желобков на границе формирующейся магнитной каверны от угла инъекции. Характерная азимутальная длина волны желобковых возмущений (азимутальное волновое число) зависит от скорости инжектируемого пучка и определяется лармовским радиусом инжектируемых ионов. Рост желобков и развитие желобковой неустойчивости сопровождается изменением структуры диамагнитной каверны. Расчеты, выполненные с использованием трехмерной модели, показали, что распространение инжектируемого пучка сопровождалось вытеснением магнитного поля и формированием магнитной каверны, размер которой зависит от параметров инжектируемого пучка, а именно от его энергии и угла инъекции. Образование всплывающих по радиусу желобков, вытянутых вдоль магнитного поля, имеет место на границе магнитной каверны. Рост желобков сопровождается разрушением каверны магнитного поля. Данный процесс можно интерпретировать как развитие желобковой неустойчивости, которая возможна в диамагнитном режиме осесимметричного пробкотрона.

Численно исследована возможность экспериментальной реализации обратного эффекта Фарадея, индуцированного радиационным трением, при облучении плотной плазменной мишени двумя перекрывающимися линейно поляризованными лазерными пучками мульти-петаваттной мощности. Расчеты показали, что использование двух 15-петаваттных ортогонально поляризованных пучков, пересекающихся под небольшим углом, позволяет реализовать условия, необходимые для экспериментального наблюдения этого эффекта. В частности, при параметрах лазерных пучков, которые планируется реализовать на установке XCELS, возможна генерация продольного квазистатического магнитного поля пиковой напряженностью  $\approx (2-3)$  ГГс.

Проведен анализ и обобщение результатов исследования возможности применения мощных прецизионных вибросейсмических источников, разработанных в СО РАН для мониторинга живущих вулканов. Показано, что предложенный подход с использованием активных вибросейсмических методов может успешно применяться на практике для уточнения особенностей сейсмического поля, глубинной структуры геофизической среды, изучения влияния геометрии магматического очага и наличия выходных каналов на данные, получаемые системой наблюдения на свободной поверхности. Проведенные исследования доказывают возможность использования вибросейсмических источников с высокой точностью периодического излучения для исследования вулканических структур и активного мониторинга вулканической активности.

Разработан комплекс параллельных программ для моделирования распространения сейсмических волн в 2D и 3D упругих средах с четвертым порядком точности по пространству на основе явных конечно-разностных схем четвертого порядка точности на сдвинутых сетках. Применение таких схем по сравнению со схемами второго порядка точности позволяет уменьшить накопление ошибки при расчете поля на длинные расстояния, а также сократить размер сетки благодаря более слабым требованиям, накладываемым на соотношение между количеством узлов сетки и длиной моделируемой волны. Сравнение тестовой производительности для многоядерных процессоров Intel и ускорителей NVIDIA GPU показало небольшое (в 1.2 раза) увеличение времени расчетов по сравнению со схемой второго порядка за счет программной оптимизации под архитектуру.

Предложена концептуальная модель построения схемы решения задач математической физики на основе онтологии интеллектуальной поддержки. Сформулированы основные правила вывода для построения схемы решения астрофизических задач на естественном языке с

последующей формализацией с использованием средств Semantic Web и добавлением в разработанную ранее онтологию интеллектуальной поддержки решения астрофизических задач. На примере решения задачи развития спиральной неустойчивости в протозвездном диске показаны результаты работы машины вывода в редакторе Protégé. Важная особенность такого подхода – возможность быстрого выбора пользователем подходящего решения поставленной задачи.

Модернизирована созданная ранее мультиагентная модель вычислительной системы для возможности гибкого управления параметрами всех подсистем суперкомпьютера. Создана методика определения оптимальных параметров суперкомпьютеров на основе имитационного моделирования, предполагающая:

1. Проведение анализа потоков данных и пользовательских заданий; для наглядности были использованы модель потока данных с детектора элементарных частиц и поток заданий, возникающий при их обработке.

2. Проведение серии полномасштабных модельных экспериментов (для всех возможных параметров потоков данных и задач) с целью определения максимально необходимого количества ресурсов на основе модели суперкомпьютера с неограниченными ресурсами.

3. Проведение серии полномасштабных модельных экспериментов (для всех возможных параметров потоков данных и задач) с целью определения минимально необходимого количества ресурсов на основе модели суперкомпьютера с конкурентным доступом к ограниченным ресурсам.

4. Сведение параметров из всех серий модельных экспериментов в единую диаграмму и ее анализ для определения оптимальных параметров.

5. Модельные эксперименты с полученными параметрами для различных характеристик потоков данных и задач с целью удостовериться, что эти параметры оптимальны.

### **Результаты работ по проектам РФФИ**

**Проект РФФИ № 18-29-21025** "Суперкомпьютерное моделирование плазменных течений в режимах диамагнитного удержания открытых ловушек".

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

В результате выполнения проекта создана двумерная гибридная численная модель течения плазмы в осесимметричной открытой ловушке, основанная на кинетическом приближении для ионной компоненты плазмы и МГД приближении для замагниченной электронной компоненты. В модели учитываются механизмы диссипации, связанные с конечной проводимостью плазмы и электронной теплопроводностью, ион-ионные столкновения, многокомпонентный состав плазмы и ионного пучка, различные методы непрерывной осевой и внеосевой инжекции ионов.

На основе двумерной гибридной модели выполнена серия вычислительных экспериментов для исследования диамагнитного режима нагрева и удержания плазмы в открытой магнитной системе, когда давление плазмы близко к давлению магнитного поля. Исследована структура магнитного поля и определено время формирования магнитной каверны в зависимости от энергии, тока и ионного состава инжектируемого пучка. Изучен эффект преимущественного нагрева электронов в переходном слое на границе плазма – вакуум, обусловленный омическим нагревом, протекающим по слою диамагнитным током, который приводит к формированию положительного электростатического потенциала в переходном слое и в пробках. Показано, что скорость наблюдаемого в переходном слое азимутального вращения плазмы, которое может стабилизиро-

вать часть магнитогидродинамических неустойчивостей и уменьшить поперечный перенос вещества и энергии, может составлять несколько процентов от скорости быстрых ионов. Исследована возможность формирования конфигурации с обращенным магнитным полем при внеосевой атомарной инжекции в открытую ловушку, когда пучок высокоскоростных ионов генерировался внутри охватывающего ось ловушки кольца.

**Проект РФФИ № 19-51-14002 "Моделирование образования звезд на массивно параллельных суперкомпьютерах".**

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Куликов И. М.

Во втором году выполнения проекта российской стороной разработана новая вычислительная модель гравитационной гидродинамики с учетом переноса излучения в диффузионном приближении. Построенная вычислительная модель является качественным расширением модели гравитационной гидродинамики, адаптированной для воспроизведения процесса звездообразования и эволюции протопланетных дисков. Расширение состоит в дополнении закона сохранения полной механической энергии газа уравнением состояния для идеального газа с учетом переменного отношения теплоемкостей газа и параболического терма. Терм сформулирован в виде теплопроводного члена с зависимостью от температуры в четвертой степени. Для вычислительной модели на основе метода разделения операторов разработан численный метод решения гиперболических, эллиптических и параболических уравнений. Вычислительная модель реализована с использованием неструктурированных тетраэдральных сеток и подвижных геодезических сеток. Для детальной верификации и сравнительных вычислительных экспериментов по изучению образования и эволюции протозвезд и газопылевых протозвездных дисков математическая модель также реализована с использованием многоуровневых вложенных сеток. Проведены вычислительные эксперименты по исследованию коллапса облака солнечной массы в модели гравитационной гидродинамики с учетом переноса излучения в диффузионном приближении. Проведен анализ образования и эволюции протозвезд и протозвездных дисков в газовой и газопылевой моделях. В основе параллельной реализации вычислительной модели лежит технология AVX-2 для реализации уравнений гидродинамики и автоматическая векторизация AVX-512 для решения уравнения Пуассона. Для многоядерной реализации используется технология OpenMP.

### Результаты работ по проектам РФФ

**Грант РФФ № 18-11-00044 "Разработка, реализация и исследование эффективных параллельных вычислительных методов для решения уравнений гидродинамики с использованием технологии вложенных сеток на массивно-параллельных суперЭВМ".**

Руководитель проекта – д.ф.-м.н. Куликов И. М.

В рамках работы по проекту в 2022 г. построена модель альфа-сети 15 ядерных реакций для семи изотопов:  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{20}\text{Ne}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{56}\text{Ni}$ ,  $^4\text{He}$ . В результате рассмотрения характерных режимов горения материалов белых карликов была построена свертка ядерных реакций в виде аналитических функций для изменения массовой доли изотопов в зависимости от температуры и плотности. Вместе со сверткой турбулентного горения материала белых карликов удалось построить эффективную гидродинамическую модель эволюции белых карликов и взрыва сверхновых типа Ia. Были проведены вычислительные эксперименты по исследованию основных сценариев взрыва

сверхновых типа Ia. В результате вычислительных экспериментов определены характеристики, которые лежат в основе трех механизмов взрыва сверхновых типа Ia:

- механизм кинетического удара на основе соударения белого карлика с компаньоном;
- механизм гравитационного удара на основе влияния внешнего источника;
- механизм теплового удара на основе формирования точки поджига.

В основе всех сценариев взрыва сверхновых типа Ia лежит один из представленных механизмов. В целом вычислительные эксперименты по исследованию сценариев взрыва сверхновых типа Ia подтверждают гипотезу о взрыве белых карликов дочандрасекаровской массы, высказанной проф. А. В. Тутуковым в 2018 г. Для разрешения математической модели был доработан численный метод в части аппроксимации адвективного члена в уравнениях гидродинамики. Для этого использовано точное решение о распаде разрыва уравнений для пыли. Построенный численный метод детально верифицирован и расширен на решение уравнений специальной релятивистской гидродинамики. Важнейший результат в части параллельной реализации – редизайн программного кода с использованием односторонних сетевых коммуникаций средствами языка Coarray Fortran. В ходе вычислительных экспериментов достигнуто 17-кратное ускорение при 32 образах Coarray Fortran программы и 92 % эффективность при использовании 192 образов Coarray Fortran. Вычислительные эксперименты показали, что оптимальное увеличение образов Coarray Fortran программы следует проводить в следующей последовательности: увеличение числа узлов, потоков, процессоров и только в последнюю очередь – ядер.

**Грант РФФИ № 19-71-20026** "Численное моделирование открытых плазменных ловушек для решения задач управляемого термоядерного синтеза с использованием перспективных высокопроизводительных вычислительных систем".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Черных И. Г.

В отчетном периоде проведена работа по созданию новых схем решения уравнений движения заряженных частиц. Созданная и апробированная на предыдущем этапе выполнения проекта схема обобщена на случай движения частиц в релятивистском пределе. Полученная схема имеет второй порядок точности. Разработан новый алгоритм интерполяции электрических и магнитных полей в местоположение частиц, который заключается в выполнении всех арифметических операций, не связанных с частицами, вне цикла по частицам. Если рассматривается группа частиц, находящихся в одной ячейке, то некоторые операции, зависящие от номера ячейки и общие для всех частиц, находящихся в этой ячейке, могут выполняться один раз и, следовательно, требуют меньше времени вычислений. Закончена работа по векторизации численного кода, когда одна операция применяется к нескольким данным одновременно. Это позволяет использовать процессоры в интенсивном режиме и значительно повысить производительность кода. Исследована зависимость эффективности полученного кода от количества модельных частиц. Реализован комплекс программ для анализа и представления результатов решения задачи в графическом виде. Поскольку вычисление в основном коде некоторых величин, необходимых для графической диагностики решений, сильно замедляет расчеты, то анализ результатов осуществляется по файлам выданных, соответствующих необходимым моментам времени, при необходимости – параллельно.

Проведено исследование плазменных процессов в открытых магнитных ловушках на основе созданных гибридных численных моделей. Расчеты показали, что вытекание плазмы сопровож-

дается раскручиванием ее вокруг оси вследствие преимущественной потери ионов в направлении вращения, противоположном направлению циклотронного вращения (так называемый plasma spin-up). При вытекании полный момент импульса возрастает, несмотря на снижение концентрации ионов, а средний момент импульса на одну частицу увеличивается более чем в два раза. Из-за раскручивания время вытекания увеличивалось и, по-видимому, определялось потерей момента импульса вследствие трения ионов об электроны в переходном слое на границе плазма – вакуум. Еще один источник расхождения между аналитическими и численными расчетами может заключаться в сравнительно большом отношении ларморовского радиуса ионов (посчитанного по вакуумному магнитному полю) к радиусу плазмы. Эта величина определяет отношение ширины переходного слоя к радиусу плазмы и в аналитических моделях, как правило, предполагается малым. Однако в проведенных численных расчетах оно не мало (порядка 0.2–0.3).

### Публикации

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

1. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Prigarin, V., Sapetina, A., Ulyanichev, I., Zavyalov, O. A. New parallel code based on a simple piecewise parabolic method for numerical modeling of colliding flows in relativistic hydrodynamics // *Math.* 2022. V. 10, iss. 11. Art. Num. 1865. DOI: 10.3390/math10111865.
2. Akimova, E., Misilov, V., Kulikov, I., Chernykh, I. OMPEGAS: Optimized relativistic code for multicore architecture // *Math.* 2022. V. 10, iss. 11. Art. Num. 2546. DOI: 10.3390/math10142546.
3. Chernykh, I., Kulikov, I., Vshivkov, V., Genrikh, E., Weins, D., Dudnikova, G., Chernoshtanov, I., Boronina, M. Energy efficiency of a new parallel PIC code for numerical simulation of plasma dynamics in open trap // *Math.* 2022. V. 10, iss. 11. Art. Num. 3684. DOI: 10.3390/math10193684.
4. Куликов, И. М., Черных, И. Г., Ульяничев, И. С., Тутуков, А. В. Математическое моделирование ядерного горения углерода в белых карликах с использованием 7-изотопной сети реакций // *СибЖИМ.* 2022. Т. 25, № 3. С. 55–66. DOI: 10.1134/S1990478922030085.
5. Куликов, И. М., Черных, И. Г., Тутуков, А. В. Математическое моделирование высокоскоростного столкновения белых карликов – механизма взрыва сверхновых типа Ia/Iax // *СибЖИМ.* 2022. Т. 25, № 1. С. 80–91. DOI: 10.1134/S1990478922010070.
6. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Prigarin, V., Sapetina, A., Ulyanichev, I., Zavyalov, O. A new approach to the supercomputer simulation of carbon burning sub-grid physics in Ia type supernovae explosion // *CCIS.* 2022. V. 1618. P. 210–232. DOI: 10.1007/978-3-031-11623-0\_15.
7. Chernykh, I., Vorobyov, E., Elbakyan, V., Kulikov, I. The impact of compiler level optimization on the performance of iterative Poisson solver for numerical modeling of protostellar disks // *CCIS.* 2022. V. 1510. P. 415–426. DOI: 10.1007/978-3-030-92864-3\_32.
8. Kulikov, I. M. Using a combination of Godunov and Rusanov solvers based on the piecewise parabolic reconstruction of primitive variables for numerical simulation of supernovae Ia type explosion // *Lobachevskii J. Math.* 2022. V. 43. P. 1545–1559. DOI: 10.1134/S1995080222090153.
9. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Sapetina, A. The energy efficiency research of Godunov Method on Intel Xeon scalable architecture // *IEEE. 2021 Ivannikov Ispras Open Conference (ISPRAS).* 2022. Art. Num. 21722440. DOI: 10.1109/ISPRAS53967.2021.00030.



10. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Sapetina, A., Lomakin, S. The Efficiency of hydrodynamic code on Intel Xeon scalable architecture // IEEE. 2021 Ivannikov Memorial Workshop (IVMEM). 2022. Art. Num. 21704168. DOI: 10.1109/IVMEM53963.2021.00013.

11. Куликов, И. М. Кусочно-линейная реконструкция переменных, уменьшающая диссипацию метода HLL при решении уравнений газодинамики // СибЖВМ. 2022. Т. 25, № 2. С. 141–156. DOI: 10.1134/S1995423922020045.

12. Боронина, М. А., Куликов, И. М., Черных, И. Г., Винс, Д. В. Использование комбинации схем Роу и Русанова для численного решения уравнений магнитной гидродинамики в задачах космической плазмы // СибЖИМ. 2022. Т. 25. № 4(92). С. 14–26. DOI: 10.33048/SIBJIM.2021.25.402.

13. Sapetina, A., Kulikov, I., Zagorulko, G., Glinskiy, B. Constructing an expert system for solving astrophysical problems based on the ontological approach // CCIS. 2022. V. 1618. P. 30–42. DOI: 10.1007/978-3-031-11623-0\_3.

14. Glinskiy, B. M., Kovalevsky, V. V., Khairtdinov, M. S., Fatyanov, A. G., Martynov, V. N., Karavaev, D. A., Sapetina, A. F., Sobisevich, A. L., Sobisevich, L. E., Braginskaya, L. P., Grigoryuk A. P. The experimental study and simulation of volcanic structures using active vibroseismic methods // J. Volcanology and Seismology. 2022. V. 16. P. 280–298. DOI: 10.1134/S0742046322040030.

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

1. Stoyanovskaya, O. P., Grigoryev, V. V., Suslenkova, A. N., Davydov, M. N., Snytnikov, N. V. Two-phase gas and dust free expansion: Three-dimensional benchmark problem for CFD codes // Fluids. 2022. V. 7, iss. 2. DOI: 10.3390/fluids7020051.

2. Wiens, D., Chernykh, I., Logashenko I. Full-scale simulation of the super C-Tau factory computing infrastructure to determine the characteristics of the necessary hardware // LNCS. 2022. V. 13708. P. 450–460. DOI: 10.1007/978-3-031-22941-1\_33.

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

1. Глинский, Б. М., Ковалевский, В. В., Хайретдинов, М. С., Фатьянов, А. Г., Мартынов, В. Н., Караваев, Д. А., Сапетина, А. Ф., Собисевич, А. Л., Собисевич, Л. Е., Брагинская, Л. П., Григорюк, А. П. Экспериментальное изучение и моделирование вулканических структур с использованием активных вибросейсмических методов // Вулканология и сейсмология. 2022. № 4. С. 47–66. DOI: 10.31857/S0203030622040034.

2. Черноштанов, И. С., Дудникова, Г. И., Вшивков, В. А., Боронина, М. А., Соловьев, А. А. Численное моделирование перехода в диамагнитный режим в осесимметричной открытой ловушке // Тез. 49-й Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу "ICPAF-2022", Москва, 14–18 марта 2022 г. С. 67. DOI: 10.34854/ICPAF.2022.49.1.034.

3. Вшивков, В. А., Боронина, М. А., Вшивков, К. В., Дудникова, Г. И., Ефимова, А. А., Судачков А. М. Численные схемы для моделирования течений плазмы в открытых магнитных системах // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тезисы Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 24–25. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-07.

4. I. S. Chernoshtanov, A. A. Efimova, A. A. Soloviev, V. A. Rapid algorithm of pairwise collisions for particle-in-cell method // Марчуковские научные чтения – 2022 : Тезисы Междунар. конф., Новосибирск, 3–7 окт. 2022 г. С. 99. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-01-35.

5. Воропаева Е. С. Методы численного решения уравнений движения заряженной частицы в электромагнитном поле // Тез. докл. 23-й Всерос. конф. молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям, Новосибирск, 24–28 октября 2022 г. С. 14.

### Свидетельства о регистрации в Роспатенте

Свидетельство № 2023610467. Программа для ЭВМ "Программный комплекс для численного решения уравнений динамической теории упругости на суперЭВМ с возможностью использования ускорителей вычислений Intel Xeon Phi KNL или NVIDIA GPU" : св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ / Сапетина А. Ф. Дата поступления заявки: 29.12.2022.

### Участие в конференциях и совещаниях

1. The 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, 12–14 октября 2022 г., виртуальный формат – 5 докладов, из них 3 приглашенных (Боронина, М. А., Воропаева Е. С., Вшивков В. А., Вшивков К. В., Дудникова Г. И., Ефимова А. А., Куликов И. М., Соловьёв А. А.).

2. Национальный суперкомпьютерный форум (НСКФ-2022), Переславль-Залесский (Ярославская обл.), 29 ноября – 2 декабря 2022 г. – 1 доклад (Куликов И. М.).

3. Challenges and innovations in computational astrophysics IV, виртуальный формат, 21–23 ноября 2022 г. – 1 доклад (Куликов И. М.).

4. Prospects for low frequency radio astronomy in South America (IAR 60th), Буэнос-Айрес (Аргентина), 15–18 ноября 2022 г. – 1 доклад (Куликов И. М.).

5. Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии, виртуальный формат, 14–18 ноября 2022 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

6. 25th Annual international conference on particle physics and cosmology "COSMO 2022", Рио-де-Жанейро (Бразилия), 22–26 августа 2022 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

7. Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ) 2022, г. Дубна (Московская обл.), 29–31 марта 2022 г. – 3 доклада, из них 1 пленарный (Боронина М. А., Вшивков К. В., Глинский Б. М., Дудникова Г. И., Ефимова А. А., Куликов И. М., Сапетина А. Ф., Черных И. Г.).

8. 49-я Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (ICPAF-2022), г. Звенигород (Московская обл.), 14–18 марта 2022 г. – 1 доклад (Боронина М. А., Вшивков В. А., Дудникова Г. И., Соловьёв А. А.).

9. Международная конференция "Марчуковские научные чтения – 2022", Новосибирск, 3–7 октября 2022 г. – 2 доклада (Боронина М. А., Вшивков В. А., Вшивков К. В., Дудникова Г. И., Ефимова А. А., Соловьёв А. А., Судаков А. М.).

10. 11-я Всероссийская конференция с элементами школы молодых ученых "Актуальные проблемы прикладной математики и механики", посвященная памяти акад. А. Ф. Сидорова, с. Кабардинка (Краснодарский кр.), 1–7 сентября 2022 г. – 1 доклад (Вшивков К. В., Дудникова Г. И., Ефимова А. А.).

11. Суперкомпьютерные дни в России (RuSCD2022), Москва, 26–27 сентября 2022 г. – 1 доклад (Винс Д. В., Черных И. Г.).

12. Методы численного решения уравнений движения заряженной частицы в электромагнитном поле // 60-я Международная научная студенческая конференция, Новосибирск, 10–20 апреля 2022 г. Россия – 1 доклад (Воропаева Е. С.).

13. 23-я Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Новосибирск, 24–28 октября 2022 г. – 1 доклад (Воропаева Е. С.).

### **Участие в организации научных мероприятий**

1. Куликов И. М. – председатель организационного комитета The 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, virtual hosted in Novosibirsk, 12–14 октября 2022 г.;

2. Боронина М. А.:

– член организационного комитета 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, virtual hosted in Novosibirsk, 12–14 октября 2022;

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

– член программного комитета 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, Virtual hosted in Novosibirsk, 12–14 октября 2022;

3. Вшивков В. А. – председатель программного комитета 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, virtual hosted in Novosibirsk, 12–14 октября 2022 г.;

4. Глинский Б. М.:

– член программного комитета Международной научной конференции "Суперкомпьютерные дни в России 2022", Москва, 26–27 сентября 2022 г.;

– член программного комитета Всероссийской научной конференции с международным участием "Параллельные вычислительные технологии 2022", г. Дубна (Московская обл.), 29–31 марта 2022 г.;

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

5. Дудникова Г. И. – член программного комитета 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, virtual hosted in Novosibirsk, October 12–14, 2022;

6. Черных И. Г. – член программного комитета 5th Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, virtual hosted in Novosibirsk, 12–14 октября 2022 г.

### **Итоговые данные по лаборатории**

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 14

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 16

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 18

Свидетельств о регистрации программ в Роспатенте – 1

Докладов на конференциях – 18, в том числе 1 пленарный и 3 приглашенных

Участников оргкомитетов конференций – 10

**Кадровый состав**

1. Черных И. Г.	зав. лаб.	к.ф.-м.н.
2. Боронина М. А.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
3. Винс Д. В.	н.с.	к.т.н.
4. Воропаева Е. С.	инженер	
5. Вшивков В. А.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
6. Вшивков К. В.	н.с.	к.ф.-м.н.
7. Глинский Б. М.	г.н.с.	д.т.н.
8. Дудникова Г. И.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
9. Ефимова А. А.	м.н.с.	
10. Зернова Л. В.	ведущ. программист	
11. Кононов А. А.	электроник 1-й катег.	
12. Куликов И. М.	в.н.с.	д.ф.-м.н.
13. Кучин Н. В.	гл. специалист по системному ПО	
14. Лисейкина Т. В.	с.н.с.	Dr. rer. nat. habil.
15. Ломакин С. В.	ведущ. программист	
16. Макаров И. Н.	ведущ. программист	
17. Сапетина А. Ф.	м.н.с.	
18. Снытников Н. В.	н.с.	к.ф.-м.н.
19. Судаков А. М.	инженер	

Винс Д. В., Воропаева Е. С., Сапетина А. Ф., Судаков А. М. – молодые научные сотрудники.

**Педагогическая деятельность**

Вшивков В. А.	– профессор НГУ
Вшивков К. В.	– ст. преподаватель НГУ
Глинский Б. М.	– профессор НГУ
Куликов И. М.	– профессор НГТУ, доцент НГУ
Сапетина А. Ф.	– ст. преподаватель НГУ
Соловьев А. А.	– ст. преподаватель НГУ

**Руководство студентами**

Воропаева Е. С.	– 2-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Вшивков В. А.
Холияров У. А.	– 1-й курс магистратуры ММФ НГУ, руководитель Вшивков В. А.

**Руководство аспирантами**

Судаков А. М.	– 3-й год аспирантуры ИВМиМГ, руководитель Вшивков В. А.
Пригарин В. Г.	– 4-й курс аспирантуры НГТУ, руководитель Куликов И. М.
Ульяничев И. С.	– 4-й курс аспирантуры НГТУ, руководитель Куликов И. М.

**Защита дипломов**

Пригарин В. Г.	– аспирантура НГТУ, руководитель Куликов И. М.
Ульяничев И. С.	– аспирантура НГТУ, руководитель Куликов И. М.

**Награды**

1. Куликов И. М. – лауреат именной премии Правительства Новосибирской обл. за выдающиеся научные достижения в 2022 г.

2. Сапетиной А. Ф. присужден Диплом II степени победителя конкурса докладов молодых ученых международной научной конференции "Параллельные вычислительные технологии" (ПаВТ'2022) за научный доклад "The expert system constructing for solving astrophysical problems based on the ontological approach".

3. Воропаевой Е. С. присужден диплом I степени на 60-й Международной научной студенческой конференции за доклад "Методы численного решения уравнений движения заряженной частицы в электромагнитном поле" и победителя конкурса молодых учёных 23-й Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям за доклад "Методы численного решения уравнений движения заряженной частицы в электромагнитном поле".