

Лаборатория суперкомпьютерного моделирования

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

Важнейшие достижения

Обоснование нестандартности взрыва сверхновых типа Ia с помощью вычислительного эксперимента на суперЭВМ, оснащенных векторными инструкциями

Д.ф.-м.н. Куликов И. М., к.ф.-м.н. Черных И. Г., д.ф.-м.н. Тутуков А. В. (Институт астрономии РАН)

Обоснована нестандартность взрыва сверхновых типа Ia с помощью вычислительного эксперимента на суперкомпьютере НКС-1П, оснащенный процессорами Intel Xeon Phi KNL. Для описания эволюции белых карликов и их взрыва в виде сверхновой типа Ia разработана гидродинамическая модель вырожденного газа с использованием звездного уравнения состояния. Для описания гидродинамической модели используется система уравнений гравитационной газовой динамики, переопределенная уравнением для энтропии. Такая запись уравнений позволяет разработать эффективную программную реализацию с использованием векторных инструкций AVX-512. Вычислительные эксперименты показали, что в зависимости от ядерного горения углерода варьируется энергия взрыва, что приводит к различию в кривых блеска, что, в свою очередь, говорит о ненадежности использования сверхновых типа Ia в виде "стандартных свечей" для измерения расстояний во Вселенной.

Результаты исследований опубликованы в работах:

1. Kulikov, I., Chernykh, I., Tutukov, A. A new hydrodynamic code with explicit vectorization instructions optimizations, dedicated to the numerical simulation of astrophysical gas flow. I. Numerical method, tests and model problems // The Astrophys. J. Suppl. Ser. 2019. Vol. 243. Art. Num. 4.

2. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Berendeev, E., Protasov, V. HydroBox3D: Parallel & distributed hydrodynamical code for numerical simulation of Supernova Ia // Lect. Notes in Comput. Sci. 2019. Vol. 11657. P. 187–198.

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

Проект НИР "Разработка суперкомпьютерных технологий и методов решения сложных физических задач на высокопроизводительных вычислительных системах".

Номер государственной регистрации НИР 0315-2019-0009.

Руководитель – д.т.н. Глинский Б. М.

Этап 2019 г.

Одной из важнейших задач лаборатории является создание физико-математических моделей течения плазмы в открытых магнитных ловушках и обоснование возможности их применения для численного моделирования физических процессов. В частности, поставлена задача разработки новых численных моделей течения плазмы в осесимметричной открытой ловушке, основанной на кинетическом приближении для ионной компоненты плазмы и МГД приближении для замагниченной электронной компоненты (гибридная модель с использованием метода частиц). Разработанная гибридная численная модель, основанная

на МГД приближении для электронной компоненты плазмы и кинетическом приближении для ионов, нацелена на возможность адекватно учитывать основные физические процессы мощных плазменных потоков в открытых плазменных системах и применять ее для анализа результатов проводимых и планируемых экспериментов. Условия и возможности ее применения, полученные на основе существующих теоретических оценок и экспериментальных данных, были проверены и уточнены при численном моделировании и проделанной теоретической работе. Создан и протестирован двумерный аксиально симметричный гибридный численный код и проведена серия предварительных численных экспериментов для параметров плазмы, инжектируемого пучка и начальной конфигурации магнитного поля, соответствующих условиям лабораторных экспериментов. Выполнены тестовые расчеты, продемонстрировавшие накопление плазмы, вытеснение магнитного поля из занятой плазмой области и формирование стационарной конфигурации диамагнитной ловушки в режиме с непрерывной инжекцией ионного пучка в приосевую область ловушки. Показано, что время формирования и радиус образующейся области с нулевым магнитным полем согласуются с полученными в проекте аналитическими оценками, основанными на анализе баланса частиц и энергии в системе. Созданы различные алгоритмы непрерывного ввода частиц в ловушку, основанные на точечной и пространственной инжекции. В двумерной осесимметричной модели учтены следующие особенности метода частиц-в-ячейке: разные массы (заряды) частиц в зависимости от расстояния до оси; объем ячейки пропорционален расстоянию до оси; особенности граничных условий на оси для плотности заряда и тока; в алгоритме вычисления координат и скоростей частиц выполняется переход в декартовы координаты и обратно, в цилиндрические.

Для моделирования взаимодействия лазерных импульсов и электронных пучков с плазмой была разработана модификация метода частиц-в-ячейках, использующая ядра высоких порядков. С помощью данной модификации можно добиться повышения точности расчета при использовании меньшего числа частиц, а также устранить некоторые численные неустойчивости. Вычислительные эксперименты на различных архитектурах показали, что современные многопоточные процессоры, такие как Intel Xeon KNL, IBM Power 9, больше подходят для вычислений с ядрами высокой точности, поскольку векторизация позволяет рассчитывать все ядро за один такт процессора, в то время как во время вычисления простых ядер происходит некоторое простаивание из-за недостаточной загрузки. Данная проблема решена путем правильной организации частиц в оперативной памяти – группировки частиц по ячейкам для одновременной обработки нескольких частиц. Для решения задачи разработана новая модификация метода частиц-в-ячейках. В настоящее время популярен метод, при котором вычисление плотности заряда и тока согласованы, т. е. в программе автоматически выполняется уравнение неразрывности для компонент плазмы. Если для вычисления плотности заряда используется ядро PIC-метода, то плотность заряда вычисляется со вторым порядком по пространству. При согласованном вычислении плотности тока точность вычисления тока уменьшается на порядок. В новой модификации ядро PIC-метода используется для вычисления плотности тока, а плотность заряда определяется из уравнения неразрывности. В этом случае точность вычисления как плотности тока, так и плотности заряда повышается на единицу. Недостатком метода является то, что становится неизвестным эффективное ядро при вычислении плотности заряда, кроме того, вид ядра может быть разным для разных частиц.

Разработан и программно реализован 3D параллельный алгоритм моделирования волновых полей в сложнопостроенных средах с топографией поверхности. Отличительной

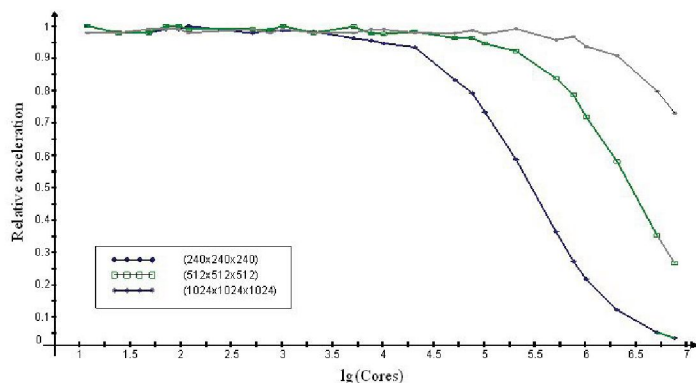


Рис 1: Результаты моделирования масштабируемости алгоритма

особенностью работы является применение криволинейных сеток для лучшего согласования геометрий физической и дискретной моделей. Для численного решения задачи используется явная конечно-разностная схема, построенная с применением метода баланса. В 2019 г. было решено расширить объект исследования вулканических структур, добавив участки в Восточной Сибири, обладающие залежами углеводородов (например, Баженовская сви-

та). В такой постановке задача становится более актуальной с прикладной точки зрения. Проведены работы по изучению эффективности полученного 3D алгоритма (при помощи средств Intel Vtune Amplifier) и потенциальной масштабируемости на системы экзафлопсного уровня (при помощи средств имитационного моделирования). Получены рекомендации по дальнейшей оптимизации алгоритма. Результаты моделирования представлены на рис. 1.

Для конечно-разностного решения задачи распространения сейсмических волн в упругих 3D средах, характерных для магматических вулканов, разработан комплекс параллельных программ, оптимизированных под архитектуры Intel Broadwell, Intel Knights Landing, IBM POWER9 и NVIDIA Pascal с высоким уровнем производительности. В том числе разработан программный код производительностью около 390 GFLOPS для Intel KNL и код производительностью около 620 GFLOPS для NVIDIA Tesla P100.

Проведенное численное моделирование процессов распространения сейсмических волн в вулканических структурах на примере приближенной геофизической модели живущего вулкана Эльбрус показывает, что сейсмическое поле вулканов имеет сложную структуру, зависящую от геометрии и реологических характеристик исследуемых объектов. Это обстоятельство позволяет проводить вибросейсмический мониторинг этих сейсмоопасных объектов с применением прецизионных источников.

Разработана суперкомпьютерная модель трехмерной динамики газопылевого гравитирующего околос звездного диска. Численная модель является комбинацией метода SPH (метод сглаженных частиц) для решения газодинамических уравнений, метода частиц-в-ячейках для моделирования пылевой компоненты и метода свертки для вычисления гравитационного потенциала изолированных систем. Параллельный алгоритм основан на трехмерной декомпозиции области, сортировке частиц по каждой ячейке сетки и передаче необходимого количества частиц между подобластями. Алгоритм предназначен для использования на суперкомпьютерах с распределенной памятью и гибридных суперкомпьютерах.

В качестве теста для проверки работоспособности модели решалась задача распада разрыва в трехмерной прямоугольной области с периодическими граничными условиями, где ударная волна распространяется вдоль оси x . Такие условия позволяют сравнивать полученное численное решение трехмерной задачи с решением одномерной задачи. Было Показано, что метод способен передать основные особенности точного решения, однако для большей точности необходимо использовать существенно больше частиц. Был проведен нагрузочный эксперимент для параллельной реализации данной численной модели. При количестве SPH частиц 100 млн, PIC частиц 100 млн на сетке $2048 \times 256 \times 256$ и с использованием

128 ядер Intel Xeon X5570 время вычисления одного шага составляло около 20 с, при этом на коммуникации потрачено менее 50 % времени.

В процессе анализа инструментов для мультиагентного моделирования на наличие встроенных средств управления моделями и балансировки нагрузки предпочтение отдано языку Erlang. Для моделирования, которое не может быть остановлено или его перезапуск требует существенных временных затрат, в Erlang предусмотрен инструмент горячей замены кода. Таким способом моделирование на Erlang может быть модернизировано без простоев, а выявленные ошибки исправлены. Также программы, написанные на Erlang, способны работать на нескольких узлах. Узлами могут быть процессоры, многие ядра одного процессора и даже целый кластер машин. Создание и взаимодействие процессов разных узлов не отличается от организации взаимодействия процессов внутри узла. Благодаря встроенным в язык возможностям распределенных вычислений объединение в кластер, балансировка нагрузки, добавление узлов и серверов, повышение надежности вызывают лишь небольшие затраты на дополнительный код.

Исследование функционала динамического управления моделями Erlang проводилось на модели исполнения алгоритма моделирования волновых полей в неоднородных средах с топографией поверхности. Исследовалось поведение данного алгоритма при различных количествах и типах вычислительных узлов. Изменение характеристик узлов и их количества проводилось непосредственно в процессе моделирования, "на лету". При этом оценивалось перераспределение нагрузки при добавлении или удалении вычислительных узлов, а также возникновение ошибок в процессе моделирования. Встроенный функционал при внесении изменений отработал без существенных сбоев и ошибок, однако внесение изменений потребовало существенной работы над программным кодом. В дальнейшем планируется создание отдельной библиотеки функций и процедур для облегчения этого процесса.

Результаты работ по проектам РФФИ

Проект РФФИ № 19-07-00085 а "Интеллектуальная поддержка решения задач на пета- и эксафлопсных суперЭВМ".

Руководитель проекта – д.т.н. Глинский Б. М.

Разработана концепция создания интеллектуальной поддержки решения вычислительно сложных задач на суперкомпьютерах, которая базируется на онтологии вычислительных методов и алгоритмов, онтологии параллельных архитектур и технологий и использует экспертные правила для поиска наилучшего возможного подхода к параллельному решению специфицируемой пользователем задачи. Разработан и программно реализован 3D параллельный алгоритм моделирования волновых полей в сложно построенных средах с топографией поверхности. Создана и расширяется обобщенная онтология интеллектуальной поддержки решения геофизических задач. Разработан подход к созданию алгоритмического и программного обеспечения для моделирования космической плазмы с использованием онтологического подхода. Разработана схема принятия решения в задачах моделирования космической плазмы.

Проект РФФИ № 19-07-00446 а "Разработка алгоритмов и программного обеспечения для суперкомпьютерного моделирования терагерцового излучения в плазме".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Берендеев Е. А.

Разработан аксиально симметричный 2D3V PIC код, адаптированный к различным архитектурам – классической процессорной архитектуре (на основе процессоров Intel Broadwell,

IBM Power9), ускорителям Intel KNL, а также графическим ускорителям Nvidia. Получены высокие показатели производительности (~10 % пиковой производительности Nvidia Tesla V100 и ~20 % процессоров Intel и IBM).

С помощью созданного кода проведено полномасштабное моделирование лабораторного эксперимента по генерации терагерцового излучения за счет столкновения плазменных кильватерных волн, возбуждаемых встречными лазерными импульсами фемтосекундной длительности. Определена оптимальная схема перекрытия кильватерных полей и оптимальное распределение энергии между лазерными импульсами.

Проект РФФИ № 18-01-00166 "Разработка векторизованных параллельных вычислительных методов высокого порядка точности для моделирования динамической эволюции галактик на суперЭВМ, оснащенных ускорителями Intel Xeon Phi".

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

В ходе работы над проектом в 2019 г. разработана усложненная вычислительная гидродинамическая модель взаимодействующих галактик. Для описания межзвездной среды использована модель гравитационной многокомпонентной односкоростной гидродинамики. Для описания звездной компоненты и темной материи использована модель на основе первых моментов бесстолкновительного уравнения Больцмана. В гидродинамическую модель добавлены подсеточные процессы фазовых переходов между газом и звездами: процесс звездообразования и эффект от процесса взрыва сверхновых Ia звезд солнечной массы, ветра звезд средней массы и взрыва сверхновых на основе коллапса ядра для массивных звезд. Также включены функции охлаждения и нагревания при различных температурных режимах и химических процессах. В вычислительную модель включены химические и ядерные реакции основных форм водорода и монооксида углерода до образования формальдегида. Гидродинамическая форма уравнений позволяет сформулировать единый векторный вычислительный метод на основе метода Хартена – Лакса – Ван Леера (HLL) для их разрешения. Проведены вычислительные эксперименты по моделированию химодинамики образования формальдегида во взаимодействующих галактиках.

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

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

Для численного моделирования течения плазмы в открытой магнитной ловушке создана новая модификация двумерной гибридной численной модели. Показано, что данная модель отражает основные закономерности нелинейных физических процессов, наблюдаемых в условиях лабораторных экспериментов. Разработаны новые, более точные алгоритмы решения уравнений движения заряженных частиц, позволившие создать более экономичную реализацию PIC-метода. Проведена серия тестовых расчетов решения задачи формирования и эволюции диамагнитной каверны в открытой магнитной ловушке, что позволило получить необходимые оценки точности и сходимости решений в зависимости от пространственного и временного шагов, количества частиц в ячейке.

Проект РФФИ № 18-31-00314 мол_а "Численное моделирование конфигурации магнитного поля в осесимметричных открытых ловушках с диамагнитным удержанием плазмы".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Генрих Е. А.

В рамках работы по гранту на основе разработанной гибридной двумерной математической модели для изучения процессов формирования согласованной с движением плазмы

конфигурации магнитного поля создан численный алгоритм решения поставленной задачи. Проведено тестирование разработанного численного кода на задаче разлета плазменного облака и на задаче с инъекцией частиц с различными параметрами.

Проект РФФИ № 18-41-543012 «Разработка цифровой платформы "Виртуальный планетарий" для Большого новосибирского планетария».

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

Разработан эйлерово-лагранжев подход, при котором физические величины сосредоточены в материальных точках, что характерно для метода SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), а расчет сил производится на адаптивной подвижной сетке, привязанной к системе материальных точек. Такой подход единообразно учитывает динамику как сплошной среды, так и дискретных частиц. Расчет гравитационного взаимодействия осуществляется путем решения уравнения Пуассона для гравитационного потенциала. Для этого все частицы проецируются на расчетную сетку, и уже по ней вычисляются значения потенциала в каждой ячейке. Решение уравнения Пуассона для гравитационного потенциала выполняется с использованием быстрого преобразования Фурье.

Результаты работ по проектам РФ

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

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

В рамках работы по проекту в 2019 г. разработаны математические модели: внегалактических струй, для описания которых используются уравнения специальной релятивистской гидродинамики, дополненные ядерными и химическими реакциями ионизации водорода; взрыва сверхновых типа Ia, для описания которых используется модель гравитационной гидродинамики со звездным уравнением состояния, которое усложнено по сравнению с моделью 2018 г. цепочкой ядерных реакций до железа и никеля; взрыва сверхновых на основе коллапса ядра, причем для описания коллапса используется модель гравитационной гидродинамики со звездным уравнением состояния при учете только вырожденного газа, для описания процесса взрыва используются модели идеальной и релятивистской гидродинамики. Разработаны, реализованы и подробно верифицированы численные методы решения уравнений специальной релятивистской гидродинамики на основе схемы Рое и схемы Русанова с использованием кусочно-параболического и кусочно-линейного представления решения. Дополнительно разработан метод типа HLLM/HLLI, с помощью которого происходит достройка кусочно-линейного решения в рамках решения задачи Римана, что позволяет значительно уменьшить диссипацию на разрывах и обеспечить минимальные межпроцессные коммуникации при реализации распределенных вложенных сеток. Разработана параллельная реализация технологии вложенных сеток для архитектур с распределенной памятью. Для балансировки загрузки используется одномерная декомпозиция расчетной области на основе веса слайсов корневой сетки. Исследована эволюция внегалактического джета при прохождении через плотную среду галактики. Выполнено моделирование всех основных компонент джета, в том числе эффект "обратного течения". Экспериментально обоснована нестандартность взрыва сверхновой типа Ia за счет различных режимов горения углерода. При решении обеих задач для моделирования ядерных и химических реакций в

ходе развития гидродинамической турбулентности использовались спутниковые вычисления. Исследована задача коллапса ядра и последующая гидродинамика взрыва сверхновой. Последние задачи исследовались в режимах спутниковых и базовых вычислений.

Проект РФФ № 19-71-00054 "Суперкомпьютерное моделирование генерации терагерцового излучения при фокусировке мультигигаваттных электронных пучков в плазме".

Руководитель проекта – к.ф.-м.н. Берендеев Е. А.

В рамках проекта создан высокопроизводительный 2D3V PIC код, позволяющий непрерывно инжектировать электронные пучки в расчетную область и измерять основные характеристики генерируемого ЭМ излучения. Проведены расчеты длительной инжекции встречных электронных пучков, сфокусированных в малые поперечные размеры. Выполнено сравнение динамики заряженных частиц при фокусировке круглых и плоских (бесконечных вдоль одного направления) пучков.

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

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

Проект направлен на создание алгоритмов численного моделирования физических процессов и различных способов удержания в установках плазмы с термоядерными параметрами. Наличие существенно разных пространственных и временных масштабов плазменных процессов потребовало больших вычислительных ресурсов. Создана математическая модель и соответствующий параллельный численный алгоритм решения задачи динамики частиц в электромагнитных полях ловушки. Выполнена оценка эффективности распараллеливания разработанного алгоритма на большое число вычислительных ядер методами имитационного моделирования. Данный подход позволяет предсказать эффективность использования алгоритма на будущих НТС системах без привлечения большого количества вычислительных и материальных ресурсов. Исследована слабая масштабируемость алгоритма. Для этого была разработана имитационная модель исполнения разработанного алгоритма на суперкомпьютере НКС-1П ЦКП ССКЦ СО РАН. Для демонстрации масштабируемости проведены расчеты для различного числа вычислительных узлов (более 10^6 вычислительных ядер).

Публикации

Монографии, главы в монографиях

1. Kovalevsky, V. V., Glinsky, B. M., Khairtdinov, M. S., Fatyanov, A. G, Karavaev D. A., Braginskaya L. P., Grigoryuk A. P., Tubanov T. A. Active geophysical monitoring. Ch. 1.3 Active vibromonitoring: experimental systems and fieldwork results // Active Geophysical Monitoring / ed. J. Kasahara, S. M. Zhdanov and H. Mikada. ISBN: 978-0-08-102684-7.

Издания, включенные в реферативную базу данных Web of Science

1. Boronina, M., Vshivkov, V., Dudnikova, G. Computer simulation of plasma dynamics in open magnetic systems // AIP conf. Proc. 2164, 110002 (2019). DOI: 10.1063/1.5130847.

2. Annenkov, V., Berendeev, E., Volchok, E., Timofeev, I. Second harmonic electromagnetic emission in a beam-driven plasma antenna // Plasma Phys. and Controll. Fusion. 2019. Vol. 61, iss. 5, 055005. DOI: 10.1088/1361-6587/ab0789.

3. Hanusch, A., Liseykina, T., Malkov, M., Aharonian, F. Steepening of cosmic-ray spectra in shocks with varying magnetic field direction // *The Astrophys. J.* 2019. Vol. 885, iss. 11. DOI: 10.3847/1538-4357/ab426d.
4. Genrikh, E. A., Boronina, M. A., Dudnikova G. I. Hybrid model of the open plasma trap // *AIP Conf. Proc.* 2164, 110003 (2019). DOI: 10.1063/1.5130848.
5. Kulikov, I., Chernykh, I., Tutukov, A. A new hydrodynamic code with explicit vectorization instructions optimizations, dedicated to the numerical simulation of astrophysical gas flow. I. Numerical method, tests and model problems // *The Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2019. Vol. 243. Art. Num. 4. DOI: 10.3847/1538-4365/ab2237.
6. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Berendeev, E., Protasov, V. HydroBox3D: parallel & distributed hydrodynamical code for numerical simulation of Supernova Ia // *Lect. Notes in Comp. Sci.* 2019. Vol. 11657. P. 187–198. DOI: 10.1007/978-3-030-25636-4_15.
7. Kulikov, I. M., Chernykh, I. G., Karavaev, D. A., Protasov, V. A., Serenko, A. A., Prigarin, V. G., Ulyanichev, I. S., Tutukov, A. V. Using adaptive nested mesh code HydroBox3D for numerical simulation of type Ia Supernovae: Merger of carbon-oxygen white dwarf stars, collapse, and non-central explosion // 2018 Ivannikov ISPRAS Open Conf. (ISPRAS), Moscow, Nov. 22–23, 2018. P. 77–81. DOI: 10.1109/ISPRAS.2018.00018.
8. Kulikov, I. M., Chernykh, I. G., Berendeev, E. A., Protasov, V. A., Serenko, A. A., Prigarin, V. G., Ulyanichev, I. S., Karavaev, D. A., Vorobyov, E. I., Tutukov, A. V. Numerical modeling of hydrodynamic turbulence with self-gravity on Intel Xeon Phi KNL // *Commun. in Comput. and Inform. Sci.* 2019. Vol. 1063. P. 309–322. DOI: 10.1007/978-3-030-28163-2_22.
9. Kulikov, I., Chernykh, I., Vshivkov, V., Prigarin, V., Mironov, V., Tutukov, A. The parallel hydrodynamic code for astrophysical flow with stellar equations of state // *Commun. in Comput. and Inform. Sci.* 2019. Vol. 965. P. 414–426. DOI: 10.1007/978-3-030-05807-4_35.
10. Chernykh, I., Kulikov, I., Glinsky, B., Vshivkov, V., Vshivkova, L., Prigarin, V. Advanced vectorization of PPML method for Intel® Xeon® scalable processors // *Commun. in Comput. and Inform. Sci.* 2019. Vol. 965. P. 465–471. DOI: 10.1007/978-3-030-05807-4_39.
11. Kulikov, I., Chernykh, I., Protasov, V. The hydrodynamical modeling of the Supernovae Ia explosion by means adaptive nested meshes on supercomputers // *J. of Phys.: Conf. Series.* 2019. Vol. 1268. Art. Num. 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1268/1/012038.
12. Akimova, E., Misilov, V., Kulikov, I., Chernykh, I. Hydrodynamical simulation of astrophysical flows: High-Performance GPU implementation // *J. of Phys.: Conf. Series.* 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012014.
13. Kulikov, I., Chernykh, I., Sapetina, A., Prigarin, V. A new MPI/OpenMP code for numerical modeling of relativistic hydrodynamics by means adaptive nested meshes // *J. of Phys.: Conf. Series.* 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012008.
14. Kulikov, I., Chernykh, I., Karavaev, D., Protasov, V., Prigarin, V., Ulyanichev, I., Vorobyov, E., Tutukov, A. The numerical modeling of moving of dwarf galaxy through the intracluster medium // *J. of Phys.: Conf. Series.* 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012004.
15. Weins, D. V., Glinskiy, B. M., Chernykh, I. G. Analysis of means of simulation modeling of parallel algorithms // *Commun. in Comput. and Inform. Sci.* 2019. Vol. 965. P. 1–11. DOI: 10.1007/978-3-030-05807-4_3.
16. Zagorulko, G., Zagorulko, Y., Glinskiy, B., Sapetina, A. Ontological approach to providing intelligent support for solving compute-intensive problems on supercomputers / *Commun. in Comput. and Inform. Sci.* 2019. Vol. 1093. P. 363–375. DOI: 10.1007/978-3-030-30763-9_30.
17. Vshivkov, V. A., Boronina, M. A., Genrikh, E. A., Dudnikova, G. I., Vshivkova, L. V., Sudakov A. M. Hybrid numerical model of the plasma flow dynamics in open magnetic

systems // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012020. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012020.

18. Vshivkova, L., Vshivkov K., Dudnikova G. 3D numerical modeling of the plasma beam expansion using the MHD-kinetic approach // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012022.

19. Boronina, M. A., Chernykh, I. G., Genrikh, E. A., Vshivkov V. A. Parallel realization of the hybrid model code for numerical simulation of plasma dynamics // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012017. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012017.

20. Hanusch, A., Liseykina, T., Malkov, M. Chemistry of ion injection in supernova remnant shocks: hybrid simulations in the light of He/C/O data from AMS-02 // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012010.

21. Dudnikova, G. I., Chernykh, I. G., Chernoshtanov, I. S., Vshivkov, V. A. Computer simulation of diamagnetic regime in open magnetic trap // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012013.

22. Stoyanovskaya, O. P., Glushko, T. A., Okladnikov, F. A., Snytnikov, V. N., Snytnikov, N. V. Gas-monodisperse dust mixtures in smoothed particle hydrodynamics: computing of stiff non-linear drag // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012015.

23. Snytnikov, N. V., Stoyanovskaya, O. P., Glushko T. A. Parallel algorithm for supercomputing simulation of dust-gaseous gravitating systems using particle-in-cell and SPH methods // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012021.

24. Sapetina, A., Ulyanichev, I., Glinskiy, B. The grid codes generation for solving problems of the cosmic plasma hydrodynamics on supercomputers // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012012. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012012.

25. Weins, D., Boronina, M., Vshivkov, V., Mesyats, E., Dudnikova, G., Chernykh, I. Scalability investigation of parallel algorithms for plasma dynamics problems in open magnetic traps by simulation modeling // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012024.

26. Weins, D., Vorobyev, V., Chernykh, I., Logashenko I. Development of simulation model of HPC system for Super Charm-Tau factory // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1336. Art. Num. 012025. DOI: 10.1088/1742-6596/1336/1/012025.

27. Efimova, A. A., Dudnikova G. I. Hybrid models of ion-acoustic shock waves formation on collisionless plasma // *AIP Conf. Proc.* 2164, 100002 (2019). DOI: 10.1063/1.5130839.

28. Dudnikova, G. I., Boronina, M. A., Genrikh, E. A., Vshivkov V. A. Computer simulation of ion beam-plasma interaction // *J. of Physics: Conf. Series*. 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/13931/012041.

29. Titov, P. A. The simulation of 3D wave fields in complex topography media / V. Voevodin, S. Sobolev (eds) *Supercomputing. RuSCDays // Commun in Comput. and Inform. Scie.* 2019. Vol. 1129. P. 451–462. DOI: 10.1007/978-3-030-36592-9.

30. Berendeev, E., Snytnikov, A., Efimova, A. Performance of the particle-in-cell method with the Intel (Broadwell, KNL) and IBM Power9 architectures / V. Voevodin, S. Sobolev (eds) *Supercomputing. RuSCDays // Commun in Comput. and Inform. Scie.* 2019. Vol. 1129. P. 610–624. DOI: 10.1007/978-3-030-36592-9.

31. Kalinin, S., Karavaev, D., Sapetina, A. The parallel implementation of adaptive mesh technology in poroelasticity problems / Voevodin V., Sobolev S. (eds) *Supercomputing. RuSCDays Commun in Comput. and Inform. Scie.* 2019. Vol. 1129. P. 439–450. DOI: 10.1007/978-3-030-36592-9.

32. Glinskiy, B., Zagorulko, Y., Zagorulko, G., Kulikov, I., Sapetina, A. The creation of intelligent support methods for solving mathematical physics problems on supercomputers / Voevodin V., Sobolev S. (eds) Supercomputing. RuSCDays 2019 // Commun. in Comput. and Inform. Sci. 2019. Vol. 1129. P. 427–438. DOI: 10.1007/978-3-030-36592-9.

33. Cheverda, V., Kolyukhin, D., Lisitsa, V., Protasov, M., Reshetova, G., Merzlikina, A., Volyanskaya, V., Petrov, D., Shilikov, V., Melnik, A., Glinsky, B., Chernykh, I., Kulikov I. Digital twin of the seismogeological object: Building and application / Voevodin V., Sobolev S. (eds) Supercomputing. RuSCDays 2019 // Commun. in Comput. and Inform. Sci. 2019. Vol. 1129. P. 214–224. DOI: 10.1007/978-3-030-36592-9.

34. Glinskiy, B., Zagorulko, Y., Kulikov, I., Sapetina, A. Supercomputer technologies for solving problems of computational physics // J. of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1392. Art. Num. 012052 DOI: 10.1088/1742-6596/1392/1/012052.

35. Mironov, V., Chernykh, I., Kulikov, I., Moskovsky, A., Epifanovsky, E., Kudryavtsev, A. Performance evaluation of the Intel Optane DC memory with scientific benchmarks // IEEE/ACM Workshop on memory centric high performance computing (MCHPC), Denver (USA), 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/MCHPC49590.2019.00008.

Издания, включенные в реферативную базу данных Scopus

1. Volchok, E., Annenkov, V., Timofeev, I., Berendeev E. Efficient electromagnetic emission from plasma with continuously injected counterstreaming electron beams // Abst. of the 46th European Physical Society Conf. on Plasma Physics. Vol. 43C. P2.2020.

2. Annenkov, V., Timofeev, I., Berendeev, E., Volchok, E. Powerful electromagnetic emission from a plasma with counterstreaming different-size electron beams // Abst. of the 46th European Physical Society Conf. on Plasma Physics. Vol. 43C O2.202.

Издания, включенные в библиографическую базу данных РИНЦ

1. Вшивков, В. А., Вшивкова, Л. В., Боронина, М. А. Распараллеливание алгоритмов для решения задач физики плазмы на основе гибридных моделей // Научный сервис в сети Интернет : труды XXI Всероссийской научной конференции, Новороссийск, 23–28 сент. 2019 г. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2019. С. 222–229. DOI: 10.20948/abrau-2019-13.

2. Генрих, Е. А., Боронина, М. А. Двумерная гибридная модель открытой плазменной ловушки // Выч. мет. программирование. 2019. Т. 20. С. 128–137. DOI: 10.26089/NumMet.v20r213.

3. Вшивков, В. А., Вшивкова, Л. В., Дудникова Г. И. Алгоритм определения структуры электромагнитных волн в вакууме // Выч. мет. программирование. 2019. Т. 20. С. 21–28. DOI: 10.26089/NumMet.v20r103.

4. Titov, P. A., Weins, D. V., Chernykh, I. G. Application of an integral approach to the parallel algorithm of 3D wave fields simulation in generalized coordinates // Суперкомпьютерные дни в России : труды международной конференции, Москва, 23–24 сент. 2019 г. М.: МАКС Пресс, 2019. С. 14–25. DOI: 10.29003/m680.RussianSCDays.

5. Куликов, И. М., Протасов, В. А. Код "Виртуальный планетарий" для моделирования астрофизических объектов: математическая модель, методология и первые результаты // Вестн. НГУ. Сер.: Информ. технол. 2019. Т. 17, № 2. С. 81–90. DOI: 10.25205/1818-7900-2019-17-2-81-90.

6. Романенко, А. А., Снытников, А. В. Оптимизация переупорядочивания модельных частиц при реализации метода частиц-в-ячейках на GPU // Вестн. НГУ. Сер.: Информ. технол. 2019. Т. 17, № 1. С. 82–89. DOI: 10.25205/1818-7900-2019-17-1-82-89.

7. Глинский, Б. М., Мартынов, В. Н., Сапетина А. Ф. Моделирование распространения упругих волн при вибросейсмическом мониторинге вулканических структур на многоядерных процессорах // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование: сб. тез. российско-французского семинара, г. Ханты-Мансийск, 25–29 авг. 2019 г. / отв. ред. С. Г. Пятков. Ханты-Мансийск: Югорский формат, 2019. С. 20.

8. Глинский, Б. М., Черных, И. Г., Мартынов, В. Н., Сапетина, А. Ф., Винс, Д. В. Сибирский суперкомпьютерный центр коллективного пользования и его применение для создания вычислительных технологий // Пробл. информ. 2019, № 1. С. 42–60.

Участие в конференциях и совещаниях

1. Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ) 2019, 2–4 апреля 2019 г., Калининград, – 2 доклада, из них 1 приглашенный (Берендеев Е. В., Куликов И. М., Черных И. Г., Ефимова А. А.).

2 Конференция молодых ученых ИВМиМГ СО РАН. 23–24 апреля 2019 г., Новосибирск – 1 доклад (Куликов И. М.).

3. Mathematical problems of continuum mechanics, Novosibirsk, 13–17 мая 2019 г., Новосибирск – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

4. The 5th International conference on information technology and nanotechnology, Самара, 20–24 мая 2019 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

5. Astrophysics of hot plasma in extended X-ray sources, Madrid (Spain), 12–14 июня 2019 г., – 1 доклад (Куликов И. М.).

6. Numerical computations: Theory and algorithms, Ле Кастелла (Италия), 15–21 июня 2019 г. – 2 доклада (Куликов И. М., Черных И. Г., Сапетина А. Ф.).

7. The 14th International conference on numerical modeling of space plasma flows "Astronom 2019", Париж (Франция), 1–5 июля 2019 г. – 1 доклад (Куликов И. М.).

8. Международная конференция "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики" в рамках Марчуковских научных чтений, Новосибирск, 1–6 июля 2019 г. – 9 докладов, из них 3 приглашенных (Берендеев Е. А., Боронина М. А., Вшивков В. А., Генрих Е. А., Дудникова Г. И., Ефимова А. А., Глинский Б. М., Сапетина А. Ф., Куликов И. М., Снытников Н. В., Черных И. Г.).

9. High energy phenomena in relativistic outflows VII, 9–12 июля 2019, Барселона, Испания – 1 доклад (Куликов И. М.).

10. Международная конференция "Математика в приложениях", 4–10 августа 2019 г. Новосибирск – 4 доклада (Боронина М. А., Вшивков В. А., Генрих Е. А., Дудникова Г. И., Куликов И. М.).

11. Parallel computing technologies 2019, 19–23 августа 2019, Алматы, Казахстан – 1 доклад (Берендеев Е. А., Куликов И. М., Черных И. Г.).

12. Российские суперкомпьютерные дни 2019, Москва, 23–24 сентября 2019 – 6 докладов (Берендеев Е. А., Винс Д. В., Ефимова А. А., Куликов И. М., Титов П. А., Сапетина А. Ф., Черных И. Г.).

13. 2nd workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes, Москва, 10–11 октября 2019 г. – 15 докладов, из них 3 приглашенных (Берендеев Е. А., Боронина М. А., Винс Д. В., Вшивков В. А., Генрих Е. А., Глинский Б. М., Дудникова Г. И., Ефимова А. А., Глинский Б. М., Сапетина А. Ф., Куликов И. М., Снытников Н. В., Сапетина А. Ф., Черных И. Г.).

14. The 20th International conference on parallel and distributed computing, applications and technologies, Голд Кост (Австралия), 5–7 декабря 2019 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

15. 46-я Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Звенигород, 18–22 марта 2019 г. – 1 доклад (Вшивков В. А., Дудникова Г. И.).

16. The 11th conference of the Euro-American Consortium for promoting the application of mathematics in technical and natural sciences, Албена (Болгария), 20–25 июня 2019 г. – 3 доклада (Боронина М. А., Вшивков В. А., Генрих Е. А., Дудникова Г. И., Ефимова А. А.).

17. Аналитические и численные методы решения задач гидродинамики, математической физики и биологии, Пущино, 26–29 августа 2019 г. – 1 доклад (Дудникова Г. И.).

18. Gas discharge plasmas and their applications (GDP 2019), Томск, 15–21 сентября 2019 г. – 1 доклад (Боронина М. А., Вшивков В. А., Генрих Е. А., Дудникова Г. И.).

19. 18-я Всероссийская конференция-школа молодых исследователей "Современные проблемы математического моделирования", Абрау-Дюрсо, 16–21 сентября 2019 г. – 1 доклад (Дудникова Г. И.).

20. 21-я Всероссийская конференция "Научный сервис в сети Интернет", 23–28 сентября 2019 г. – 1 доклад (Вшивков В. А., Боронина М. А.).

21. Российско-французский семинар "Дифференциальные уравнения и математическое моделирование", Ханты-Мансийск, 25–29 августа 2019 г. – 1 доклад (Сапетина А. Ф., Глинский Б. М.).

22. 4-я Международная конференция "Суперкомпьютерные технологии математического моделирования" (СКТеММ'19), Москва, 19–21 июня 2019 г. – 1 приглашенный доклад (Сапетина А. Ф., Глинский Б. М., Куликов И. М.).

23. Intel HPC developers conference, Дэнвер (США), 18–19 ноября 2019 г. – 1 доклад (Черных И. Г.).

24. The international conference for high performance computing, networking, storage, and analysis, Дэнвер (США), 17–22 ноября 2019 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

25. The event for high performance computing, networking & storage, Франкфурт (Германия), 16–20 июня 2019 г. – 1 доклад (Черных И. Г.).

26. Astrochemistry: From nanometers to megaparsecs – A symposium in honour of John H. Black, Гётеборг (Швеция), 24–28 июня 2019 г. – 1 доклад (Куликов И. М., Черных И. Г.).

Участие в организации научных мероприятий

1. Берендеев Е. А. – член организационного комитета Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2019" (АПВПМ-19) 1–5 июля 2019 г., Новосибирск.

2. Боронина М. А.:

– член организационного комитета Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2019" (АПВПМ-19) 1–5 июля 2019 г., Новосибирск;

– член организационного комитета "2nd Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes", Moscow, October 10–11, 2019.

3. Вшивков В. А.:

– член программного комитета "2nd Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes", Moscow, October 10–11, 2019;

– член программного комитета Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2019" (АПВПМ-19), Новосибирск, 1–5 июля 2019 г.;

4. Генрих Е. А.:

– член организационного комитета Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2019" (АПВПМ-19), Новосибирск, 1–5 июля 2019 г.;

– член организационного комитета "The 2nd Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes", Moscow, October 10–11, 2019.

5. Глинский Б. М.:

– член организационного комитета Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2019" (АПВПМ-19), Новосибирск, 1–5 июля 2019 г.;

– член программного комитета "The 2nd Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes", Moscow, October 10–11, 2019.

6. Дудникова Г. И.:

– член программного комитета "The 2nd Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes", Moscow, October 10–11, 2019.

7. Ефимова А. А.:

– Международной конференции "Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики 2019" (АПВПМ-19), Новосибирск, 1–5 июля 2019 г.;

– член организационного комитета "The 12th Conference of the Euro-American consortium for promoting the application of mathematics in technical and natural sciences", Albena (Bulgaria), June 20–25, 2019.

8. Куликов И. М.:

– член организационного комитета конференции молодых ученых ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, 23–24 апреля 2019 г.;

– член программного комитета конференции молодых ученых ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, 23–24 апреля 2019 г.;

– член организационного комитета 11-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 26 августа – 4 сентября 2019 г.;

– член программного комитета 11-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 26 августа – 4 сентября 2019 г.;

– член программного комитета "The 2nd Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes", Moscow, October 10–11, 2019.

9. Черных И. Г.:

– член программного комитета "The 2nd Workshop on numerical modeling in MHD and plasma physics: Methods, tools, and outcomes", Moscow, October 10–11, 2019.;

– член программного комитета 11-й Международной молодежной научной школы-конференции "Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач", Новосибирск, 26 августа – 4 сентября 2019 г.

Итоговые данные по лаборатории

Публикаций, индексируемых в базе данных Web of Science – 35

Публикаций, индексируемых в базе данных Scopus – 37

Публикаций, индексируемых в базе данных РИНЦ – 19

Докладов на конференциях – 61, в том числе пленарных – 18

Участников организации конференций – 19

Кадровый состав

1. Черных И. Г.	зав. лаб.	к.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. Винс Д. В.	н.с.	к.т.н.
5. Вшивков В. А.	г.н.с.	д.ф.-м.н.
6. Генрих Е. А.	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.	программист 1-й катег.	
11. Кононов А. А.	инженер-электроник.	
12. Куликов И. М.	н.с.	д.ф.-м.н.
13. Кучин Н. В.	гл. специалист по СПО	
14. Лисейкина Т. В.	с.н.с.	к.ф.-м.н.
15. Ломакин С. В.	гл. специалист по ИС	
16. Макаров И. Н.	ведущ. программист.	
17. Сапетина А. Ф.	м.н.с.	
18. Снытников Н. В.	н.с.	к.ф.-м.н.
19. Титов П. А.	м.н.с.	

Берендеев Е. А., Винс Д. В., Генрих Е. А., Ефимова А. А., Куликов И. М., Сапетина А. Ф., Титов П. А. – молодые научные сотрудники.

Педагогическая деятельность

Вшивков В. А.	– профессор НГУ
Глинский Б. М.	– профессор НГУ
Куликов И. М.	– доцент НГУ
Сапетина А. Ф.	– ассистент НГУ

Руководство студентами

1. Судаков А. М. – 6-й курс ММФ НГУ, руководитель Вшивков В. А.
2. Горнова А. Л. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Куликов И. М.
3. Макаров И. О. – 4-й курс ММФ НГУ, руководитель Сапетина А. Ф.

Руководство аспирантами

1. Протасов В. А. – 4-й год, НГТУ, руководитель Куликов И. М.
2. Ульяничев И. С. – 2-й год, НГТУ, руководитель Куликов И. М.
3. Пригарин В. Г. – 1-й год, НГТУ, руководитель Куликов И. М.

Защита дипломов

Горнова А. Л. – магистр ММФ НГУ, руководитель Куликов И. М.

Награды

Куликов И. М., Черных И. Г., Берендеев Е. А. Доклад на тему HydroBox3D: Parallel & distributed hydrodynamical code for numerical simulation of Supernova Ia на конференции "Parallel Computing Technologies 2019" (Almaty (Kazakhstan), 19–23 August, 2019) удостоен награды Springer Best Paper Award.