

«УТВЕРЖДАЮ
Директор Федерального
государственного учреждения
«Федеральный исследовательский
центр «Информатика и управление»
Российской академии наук»



И.А. Соколов

« 15 » августа 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию **Гоймана Гордея Сергеевича** по теме **«Масштабируемые алгоритмы решения уравнений глобальной динамики атмосферы на редуцированной широтно-долготной сетке»** на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы диссертационной работы

Учитывая важную роль состояния окружающей среды для населения всех регионов в сфере экономики, здравоохранения, экологии, а также уровня эмоционального состояния людей, задача получения эффективного прогноза погоды является неотложной задачей. Основная сложность при этом состоит в подготовке научно обоснованного комплекса средств и методов метеонаблюдений и эффективного использования компьютерных систем для расчетов процессов в атмосфере и поддержки принятия прогнозных решений.

Работа Гоймана Г.С. посвящена актуальной тематике - разработке эффективной вычислительной технологии в области численного прогноза погоды и моделирования климата, разработки и исследования свойств новых вычислительных методов и алгоритмов, повышения масштабируемости программных комплексов глобальных гидродинамических моделей атмосферы, эффективной программной реализации на массивно-параллельных вычислительных системах.

В диссертации удачно сочетаются теоретические рассмотрения предложенных численных методов и практические вопросы организации и программной реализации сложных вычислительных систем для расчета глобальных динамических процессов в атмосфере и прогноза погоды.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения и приложения.

Во введении приведен краткий библиографический обзор литературы, обосновывается актуальность работы, формулируется цель работы и ставятся задачи, необходимые для её достижения. Излагается практическая значимость, научная новизна и положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена построению горизонтальных аппроксимаций на редуцированной широтно-долготной сетке с разнесением переменных типа "С" по классификации Аракавы.

Редуцированная широтно-долготная сетка строится путем уменьшения количества узлов по долготе при приближении к полюсам. Достоинства редуцированной широтно-долготной сетки – простота структуры и возможность широкого использования подходов и программного кода от модели на регулярной сетке, сонаправленность сеточных параллелей основному направлению струйных течений в верхней тропосфере и стратосфере, что повышает точность их воспроизведения. Недостаток сетки – неконформность ячеек сетки, что несколько затрудняет вычисление производных по широте, однако развиваемый автором метод аппроксимации в значительной степени устраняет эту проблему.

Удачным является предложенный автором вариант разнесения переменных с расположением v -компонент скорости не в центрах граней ячеек вычислительной сетки, а равномерно по широтному кругу, с постоянным шагом по долготе

При этом оказывается, что структура алгоритмов и их программная реализация не сильно отличаются от случая регулярной широтно-долготной сетки, что делает возможным применение имеющегося исходного кода (с небольшими изменениями) моделей, использующих регулярную широтно-долготную сетку. Кроме того, показано, что построение схем аппроксимации на редуцированной сетке может быть основано на использовании известных схем на регулярной сетке.

В работе обсуждается применение возможных вариантов для выбора алгоритма построения редуцированной широтно-долготной сетки, а также описание конфигураций сеток, используемых в численных экспериментах.

Решение, выбранное в диссертации, использует некоторую процедуру одномерной интерполяции вдоль зонального направления для получения значений сеточных функций в точках, необходимых для вычислений. Такой подход позволяет использовать известные разностные схемы для регулярной сетки в качестве основы, дополняя их подходящей процедурой интерполяции. Все полученные условия на процедуру одномерной интерполяции являются необходимыми и достаточными. Свойства полученных схем (порядок аппроксимации, наличие законов сохранения, дисперсионные характеристики распространения численных волн) зависят от выбранной процедуры интерполяции, и эти аспекты также проанализированы в Главе 1.

Для тестирования предложенных автором методов построения горизонтальных аппроксимаций на редуцированной широтно-долготной сетке используются несколько различных форм уравнений мелкой воды на вращающейся сфере для численного решения. Исследуются свойства консервативности предложенных аппроксимаций, описывается подход для построения консервативных схем.

В рамках численных экспериментов данного теста рассматривается воспроизведение находящегося в состоянии устойчивого геострофического равновесия зонального потока, который является стационарным аналитическим решением уравнений мелкой воды, а также тест на развитие баротропной неустойчивости зонального струйного течения в средних широтах. Получено, что при повышении пространственного разрешения редуцированной сетки результаты численных расчетов визуально становятся более близкими к эталонному решению. Таким образом, показана принципиальная возможность применения редуцированной сетки с разнесением переменных для численного моделирования динамики атмосферы.

Вторая глава диссертации посвящена разработке и реализации геометрического многосеточного алгоритма решения эллиптических уравнений на редуцированной широтно-долготной сетке. Производится анализ модельной системы уравнений, возникающей вследствие применения полунявного метода аппроксимации по времени уравнений мелкой воды. Приводится описание параллельной реализации многосеточного алгоритма. Исследуется сходимость и масштабируемость предложенного алгоритма.

Редуцированная широтно-долготная сетка рассматривается как один из возможных перспективных вариантов для использования в глобальных моделях атмосферы высокого пространственного разрешения. В этой главе приводится описание разработанного автором

параллельного геометрического алгоритма для решения систем линейных алгебраических уравнений, возникающих вследствие применения полунявной метода на редуцированной широтно-долготной сетке. Данный алгоритм основан на применении модификации метода условного сгрубления сетки и равномерного распределения точек грубой сетки по долготе.

В качестве модельного уравнения при разработке геометрического многосеточного алгоритма используется полунявная полулагранжева дискретизация уравнений мелкой воды на сфере в Лагранжевой форме с адвективной формой силы Кориолиса. Уравнения приводятся к эллиптическому уравнению типа Гельмгольца и далее дискретизируются на редуцированной широтно-долготной сетке.

В диссертации предложено обобщить метод условного сгрубления сетки для построения геометрического многосеточного метода на регулярной широтно-долготной сетке на случай редуцированной сетки. Метод состоит в том, что сетка всегда сгрубляется в долготном направлении, а в широтном направлении сгрубление происходит только в областях вдали от полюсных точек. Предлагается равномерно распределять точки грубой сетки по кругу долготы. Оператор билинейной интерполяции используется для перехода с грубой на мелкую сетку.

В этой главе приводится также описание параллельной реализации предложенного геометрического многосеточного метода. Для возможности распараллеливания кода на узлах с распределенной памятью используется технология MPI (Message Passing Interface). В рамках данной работы для параллельной реализации всех компонентов предложенного многосеточного метода на языке программирования Fortran был разработан прототип объектно-ориентированной библиотеки параллельных обменов, определяющей структуру распределенного хранения данных и схему взаимодействия параллельных процессов. Библиотека предоставляет алгоритмы и структуры данных для разбиения расчетной области по MPI-процессам, параллельных обменов и хранения данных на редуцированной широтно-долготной сетке. Используется статическая балансировка вычислительной нагрузки между MPI-процессами.

В работе приводятся результаты численных экспериментов, целью которых является исследование сходимости и параллельной масштабируемости предложенного многосеточного алгоритма. Для построения редуцированных сеток используется алгоритм, приведенный в Главе 1 диссертации. Результаты расчетов показывают, что предложенный метод обладает высокой скоростью сходимости, практически независимой от разрешения и степени редукции сетки. Во всех случаях для достижения заданной точности достаточно использовать 6-7 итераций метода.

Численные эксперименты показали, что предложенный метод обладает высокой скоростью сходимости, которая не зависит от разрешения и конфигурации редуцированной широтно-долготной сетки.

В третьей главе диссертации приводится описание работ, целью которых является повышение параллельной и вычислительной эффективности имеющегося программного комплекса глобальной модели атмосферы ПЛАВ. Модель традиционно состоит из оригинального гидростатического динамического ядра и стороннего блока параметризации физических процессов подсеточного масштаба.

Данная глава включает четыре раздела. В разделе 3.1 представлено внедрение в модель ПЛАВ полулагранжевого алгоритма с динамической адаптацией параллельных обменов. В разделе 3.2 приведено описание работ по внедрению в модель ПЛАВ вычислений и обменов с использованием чисел с плавающей точкой одинарной точности. В разделе 3.3 представлены модификации кода модели ПЛАВ, предназначенные для оптимизации работы с памятью процессора. В разделе 3.4 приведен обзор основных результатов данной главы.

В этой главе, в частности, описывается внедрение полулагранжевого алгоритма адвекции с динамической адаптацией ширины обменов, частичное внедрение чисел с плавающей точкой одинарной точности, модификация структуры данных и алгоритмов с целью повышения эффективности использования памяти процессора.

Эти меры действительно приводят к повышению эффективности численных расчетов на модели.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Оценка новизны и практической значимости

Новизна работы заключается в том, что на основе имеющихся результатов по моделированию глобальных процессов в атмосфере, численных методов исследования уравнений в частных производных, методов дискретизации примитивных уравнений динамики атмосферы автор предложил модификацию подхода для аппроксимации горизонтальных операторов в этих уравнениях на редуцированной широтно-долготной сетке на сфере с разнесением переменных типа "С" по классификации Аракавы. На этой основе предложены также общий подход построения консервативных схем и параллельный геометрический многосеточный алгоритм для сеток такого типа. Разработанные теоретические положения подтверждены данными вычислительных экспериментов, выполненных автором, а также их программной реализацией.

Автором сформулированы и доказаны необходимые и достаточные условия выполнения дискретных аналогов законов сохранения массы и полной энергии для этих аппроксимаций. Проведено численное исследование точности, сходимости и дисперсионных характеристик предложенных аппроксимаций для модели мелкой воды. Эта модель обладает основными свойствами примитивных уравнений, используемых для описания глобальной динамики атмосферы, что оправдывает ее применение для этих целей. Предложен геометрический многосеточный алгоритм решения эллиптических уравнений, используемых в модели прогноза, на редуцированной широтно-долготной сетке на сфере и проведено численное исследование скорости сходимости этого метода.

Разработанные теоретические положения подтверждены данными вычислительных экспериментов, выполненных автором, а также их программной реализацией. Отдельно отметим продемонстрированную сильную масштабируемость (при фиксированном размере задачи) разработанной модификации комплекса программ до 13608 процессорных ядер x86, что является очень хорошим результатом.

Практическая значимость работы заключается в том, что автором на основе предложенных теоретических построений разработан программный комплекс, реализующий предложенные методы аппроксимации на сфере для глобальной модели мелкой воды. Реализован параллельный геометрический многосеточный алгоритм решения эллиптических уравнений на редуцированной широтно-долготной сетке на сфере, проведено исследование параллельной масштабируемости алгоритма. Реализован ряд оригинальных модификаций и уточнений в программный комплекс глобальной модели атмосферы ПЛАВ, позволивший существенно сократить время расчетов без ухудшения точности прогноза.

Набор математических моделей, вычислительных методов, алгоритмов, схем их исследования из первых двух глав работы составляет предложенную автором вычислительную методику их применения в модели динамики атмосферы. Результаты третьей главы в целом направлены на программную оптимизацию работы глобальной модели атмосферы ПЛАВ, что крайне важно при проведении массовых затратных расчетов прогноза погоды и, возможно, климата. Таким образом, первые две главы работы и третья отличаются по подходам и методам рассмотрения и решения поставленных задач, но в целом определяют новые результаты для применения их на практике для улучшения функционирования модели. Автор работы при этом продемонстрировал высокую квалификацию владения численными методами, методами разработки современного программного обеспечения и работы с комплексами программ для параллельных расчетов на суперЭВМ.

Результаты работы могут использоваться в учреждениях, связанных с организацией и проведением гидродинамических расчетов с применением суперЭВМ, например, в

Росгидромете, ИФА РАН, Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова, Научно-производственном объединении «Тайфун», Институте гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН и др.

Оценка достоверности результатов

Теоретические положения, сформулированные в работе, проверены на большом экспериментальном материале, полученном в результате вычислительных экспериментов, проведенных лично автором.

Основные положения и выводы работы - достоверны и обоснованы. Они получены с помощью хорошо апробированных численных методов, на основе которых автор развивает теорию построения и исследования указанных методов аппроксимации. Публикации автора по теме диссертации в научных журналах являются дополнительным доказательством новизны и достоверности полученных результатов.

Замечания по работе

Несмотря на общую высокую оценку диссертации, имеются некоторые замечания, а именно:

1. В работе недостаточно четко определено, почему при существующем разрешении применение схем на редуцированной широтно-долготной сетке для ПЛАВ нецелесообразно.
2. В работе не доведено до использования в модели ПЛАВ предложенных методов аппроксимации.
3. Хотелось бы видеть тестирование двухуровневой версии кода ПЛАВ (с применением OpenMP+ MPI) на большем числе ядер.
4. Некоторые фигуры оформлены в английском стиле, хотя подписи к ним - на русском языке.
5. Имеются технические погрешности – отсутствие описания некоторых переменных или не там, где первый раз вводятся, ошибки в ссылках на некоторые формулы, нет ссылок тексте на некоторые формулы, в фразе “8 MPI-процессами и 4 OpenMP нитями на каждом узле” на странице 97 по всей видимости имелось в виду использование 4 нитей на один MPI процесс, фраза “с использованием 108 вычислительных узлов и 6 OMP-потокков на системе Cray XC” на странице 103 непонятна, и т.д.

Заключение ведущей организации

Сделанные замечания не умаляют общей ценности диссертации. Работа обладает четкой и логичной структурой, изложение ведется последовательно, наглядно и убедительно. Автореферат дает полное представление о содержании диссертации.

Совокупность полученных результатов и положений, выносимых на защиту, можно квалифицировать как решение важной научной проблемы: предложен и реализован в собственном пакете программ ИВМ РАН с использованием современных технологий параллельного программирования общий подход построения оригинальных консервативных схем на редуцированной широтно-долготной сетке для уравнений глобальной динамики атмосферы. Продемонстрирована масштабируемость пакета программ до 13608 процессорных ядер x86. Данный метод может быть использован и в других разделах вычислительной математики, связанных с проведением расчетов на сетках с несогласованными интерфейсами, например при численном моделировании аэродинамики самолетных винтов. Разработанные теоретические положения подтверждены данными

вычислительных экспериментов, выполненных автором, а также их эффективной программной реализацией.

Исходя из вышеизложенного, считаем, что представленная диссертация «Масштабируемые алгоритмы решения уравнений глобальной динамики атмосферы на редуцированной широтно-долготной сетке» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Гойман Гордей Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен на совместном семинаре отделов 23 и 24 ФИЦ ИУ РАН 19 июля 2022 года.

Пархоменко Валерий Павлович,
ведущий научный сотрудник отдела 23 ФИЦ ИУ РАН,
кандидат физико-математических наук



Сведения об организации:

Полное наименование организации: Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук»

Адрес: 119333, Москва, ул. Вавилова, д.44, корп. 2

Телефон: +7 499 135-62-60

Сайт организации: <http://www.frccsc.ru>

Электронная почта: frccsc@frccsc.ru