

# Программная реализация блока переноса примесей в климатических моделях на основе гибридного программирования MPI-OpenMP\*

Е.В. Мортиков

Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ М.В. Ломоносова  
Институт вычислительной математики РАН

В работе обсуждается задача перехода к высокому пространственному разрешению в климатических исследованиях на примере модели INMCM, разрабатываемой в Институте вычислительной математики РАН. Предложена реализация блока переноса аэрозолей в атмосфере и блока переноса примесей в океане на основе технологии гибридного программирования MPI-OpenMP. Программный подход позволяет задействовать независимое подмножество вычислительных ядер для решения набора дополнительных уравнений переноса, а также допускает возможность выполнения расчетов на сопроцессорах Intel Xeon Phi.

## 1. Введение

В настоящее время один из основных методов изучения климата Земли и прогнозирования его будущего состояния является численное моделирование. Модели климатической системы помимо основных двух элементов – общей циркуляции атмосферы и океана, также включают в себя и другие компоненты: модель поверхности суши, ее деятельного слоя и растительности, модель криосферы, химии атмосферы, углеродного цикла и другие. Развитие климатических моделей связано с учетом все большего числа природных процессов Земной системы и совершенствованием их описания.

Другое направление развития климатических моделей связано с повышением пространственного разрешения при фиксированной системе уравнений гидротермодинамики и методах ее аппроксимации [20, 27, 32]. Ряд численных экспериментов [12, 16, 28, 30] показывают, что точность моделируемых характеристик крупномасштабных циркуляций, по сравнению с результатами CMIP3 и CMIP5 (Climate Model Intercomparison Project), удается существенно повысить за счет увеличения горизонтального разрешения до 0.25 градуса в моделях атмосферы и до 0.1 градуса для моделей Мирового океана. При этом динамика морского льда, перемешивание в океане, мелкомасштабная динамика атмосферы и другие процессы чувствительны к горизонтальному разрешению моделей Земной системы. Важным аспектом является и увеличение вертикального разрешения в климатических моделях. В частности, увеличение вертикального разрешения до 500 м требуется для воспроизведения квазидвухлетних колебаний зонального ветра в приэкваториальной стратосфере [7] близких к наблюдаемым. Повышение уровня верхней границы модели атмосферы вплоть до 60 км также необходимо для правильного воспроизведения динамики стратосферы, в том числе внезапных стратосферных потеплений. По этим причинам задачи воспроизведения климатической системы при высоком пространственно-временном разрешении представляют значительный интерес. Например, можно отметить планируемую программу сравнения моделей высокого разрешения High Resolution MIP в рамках CMIP6 [19].

Климатические модели высокого пространственного разрешения активно разрабатываются в последние десять лет [17, 22, 26, 30]. Однако быстродействие программных реализаций таких моделей на современных суперкомпьютерах представляется недостаточной. Так в работе [25] скорость счета модели атмосферы HadGEM3 (Hadley Centre Global Environment Model 3) для 26-летнего эксперимента составила всего 0.375 – 0.46 лет модельного времени за сутки компьютерного счета. В задаче было задействовано до 4600 ядер, а горизонтальное разрешение

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 33 Президиума РАН

для 70-уровневой по вертикали модели атмосферы составляло до 25 км. Скорость счета для 30-уровневой модели CAM5.1 (Community Atmospheric Model 5.1) [32] при схожем горизонтальном разрешении, но с использованием 7680 ядер системы CRAY XE-6, незначительно лучше – около 1 года за сутки. Очевидно, что приведенная производительность моделей ограничивает возможную постановку климатических задач временным интервалом не более нескольких десятилетий.

Численное моделирование климата с помощью сложных многокомпонентных моделей Земной системы относится к задачам наиболее требовательным к вычислительным ресурсам. Постановка экспериментов с высоким пространственным разрешением предъявляет значительные требования к эффективности программной реализации климатических моделей на современных параллельных вычислительных системах. К основным задачам на сегодняшний день применительно к климатическим исследованиям можно отнести разработку: алгоритмов, обладающих высокой масштабируемостью на массивно-параллельных вычислительных кластерах; масштабируемых систем параллельного ввода-вывода данных; подходов к эффективному объединению различных программных компонент моделей Земной системы на суперкомпьютерах. Особый интерес представляет возможность ускорения расчетов за счет переноса вычислений на архитектуру перспективных сопроцессоров или ускорителей – графических карт [21] и процессоров Intel Xeon Phi [23, 33].

В настоящей работе обсуждается программная реализация блока переноса аэрозолей в атмосфере и блока переноса примесей в океане на основе технологии гибридного программирования MPI-OpenMP в модели INMCM. Предложенный подход позволяет выделять для решения уравнений переноса дополнительные вычислительные ядра как в рамках модели MPI, так и OpenMP. Программная независимость блоков переноса примесей допускает возможность использования сопроцессоров Intel Xeon Phi в расчетах.

## 2. Модель Земной системы INMCM

Модель Земной системы INMCM состоит из двух основных блоков – общей циркуляции атмосферы и общей циркуляции океана [4].

В модели атмосферы рассматривается система нелинейных уравнений гидротермодинамики в квазистатическом приближении на сфере. Для численной аппроксимации уравнений на сдвинутой C-сетке [11], регулярной по долготе и широте, применяется метод конечных разностей. В качестве вертикальной координаты используется сигма-координата. Горизонтальные компоненты скорости, температура, удельная влажность в атмосфере и давление на поверхности Земли относятся к прогностическим переменным. Конечно-разностная схема имеет второй порядок аппроксимации по пространству. Для интегрирования уравнений по времени используется полуявный метод, имеющий первый порядок. Применение полуявного подхода позволяет значительно ослабить ограничение на шаг по времени по сравнению с явной схемой, однако приводит к необходимости решения эллиптического уравнения на каждом шаге по времени. Для решения эллиптического уравнения, используется либо итерационный метод [8, 9], либо прямой метод, основанный на преобразовании Фурье. Полный вид системы дифференциальных уравнений и численный метод их решения приведены в работах [1, 6].

Горизонтальное разрешение в стандартной версии модели составляет  $2 \times 1.5$  градуса по долготе и широте, в версии высокого разрешения –  $0.4 \times 0.3$  градуса. По вертикали рассматривается 73 уровня, что соответствует разрешению вплоть до 500 м и верхней границе на высоте около 60 км. Шаг по времени при расчете динамики модели зависит от пространственного разрешения, так для модели с разрешением в  $2 \times 1.5$  градуса он составляет 4 минуты. Условный временной шаг для физических параметризаций – 1 час, а для блока радиации – 3 часа. В модели атмосферы используются параметризации глубокой и мелкой конвекции, орографического и неорографического гравитационно-волнового сопротивления [6], атмосферной радиации [5], процессов в почве, на поверхности суши и в растительном покрове [3].

Модель атмосферы также включает аэрозольный блок, в котором рассчитываются прогностические уравнения для концентрации заданного числа веществ. В частности,

рассматривается крупная и мелкая фракция пыли и морской соли, сернистого газа, сульфатного аэрозоля, гидрофильной и гидрофобной форм черного и органического углерода и др. В аэрозольном блоке учитывается перенос концентрации, ее предписанные или рассчитываемые источники на поверхности, гравитационное оседание, поглощение поверхностью, вымывание осадками. В радиационном блоке рассчитываются как прямой эффект аэрозолей, так и непрямой, связанный с изменением радиуса облачных капель и характерного времени жизни облачной влаги.

В блоке океана конечно-разностные уравнения решаются на сетке с разрешением вплоть до 0.125 градусов по долготе и широте. Вертикальное разрешение составляет 40 уровней. Важной особенностью модели океана является то, что используется сетка с обобщенными сферическими координатами. В этом случае Южный полюс совпадает с положением географического полюса, а Северный полюс помещен на территорию Сибири – вне расчетной области. Данное преобразование позволяет избежать проблем, связанных с расчетом динамики у полюсов. Система уравнений гидротермодинамики океана и численный метод решения приведены в работе [34]. Отметим, что в модели используется явная схема для решения уравнения переноса, а также итерационный метод решения дискретных уравнений для уровня океана и баротропных составляющих скорости, что обеспечивает эффективность реализации модели на параллельных вычислительных системах [31]. Блоки атмосферы и океана обмениваются между собой результатами расчетов каждые 2 часа модельного времени.

Кроме двух основных блоков атмосферы и океана модель также включает в себя блок динамики и термодинамики морского льда [10] и расчет углеродного цикла [2].

Реализация моделей атмосферы и океана на параллельных вычислительных системах с распределенной памятью основана на двумерной декомпозиции расчетной области по широте и долготе. Для выполнения обменов данными между параллельными процессами используются функции библиотеки MPI. В модели атмосфере также реализована надстройка над библиотекой MPI, позволяющая выполнять характерные операции перераспределения данных между процессами и обмена граничными значениями [18].

### 3. Программная реализация блока переноса примесей

Для описания динамики аэрозолей в модели атмосферы INMCM рассматривается набор уравнений переноса, записанных для концентраций различных химических компонент. Для численного решения уравнений используется явная схема по времени. На каждом шаге рассчитывается вертикальная и горизонтальная диффузия, динамические тенденции, выполняется обновление вектора решения на новом шаге по времени и пространственно-временная фильтрация. Климатические задачи и задачи прогноза обуславливают необходимость расчета большого числа примесей – предполагается, что современные модели должны допускать возможность решения более 100 вспомогательных уравнений переноса для различных концентраций веществ. Очевидно, что такое усложнение климатических моделей требует разработки новых программных подходов для учета все большего объема дополнительных вычислений.

В настоящей работе предлагается рассматривать блоки переноса примесей в моделях атмосферы и океана в виде независимых программных модулей, выполняемых на независимых подмножествах вычислительных ядер. Такой подход согласуется с общим развитием представления компонент моделей Земной системы в виде независимых программных элементов [15]: модуль атмосферы, модуль океана, модуль динамики и термодинамики морского льда и т.д. Отметим, что предложенный расчет переноса примесей на независимых группах вычислительных процессов представляется более эффективным решением, по сравнению с введением дополнительных и лишь частично активных параллельных нитей OpenMP, предложенным в работе [24] для моделей атмосферы, включающих аэрозольный блок. Для подхода [24], реализованном в модели CAM, масштабируемость ограничена числом ядер на процессоре, а также непосредственно MPI-масштабируемостью модели атмосферы. Более того, ресурсы в таком подходе используются неэффективно – часть ядер остается незадействованной в ходе счета.

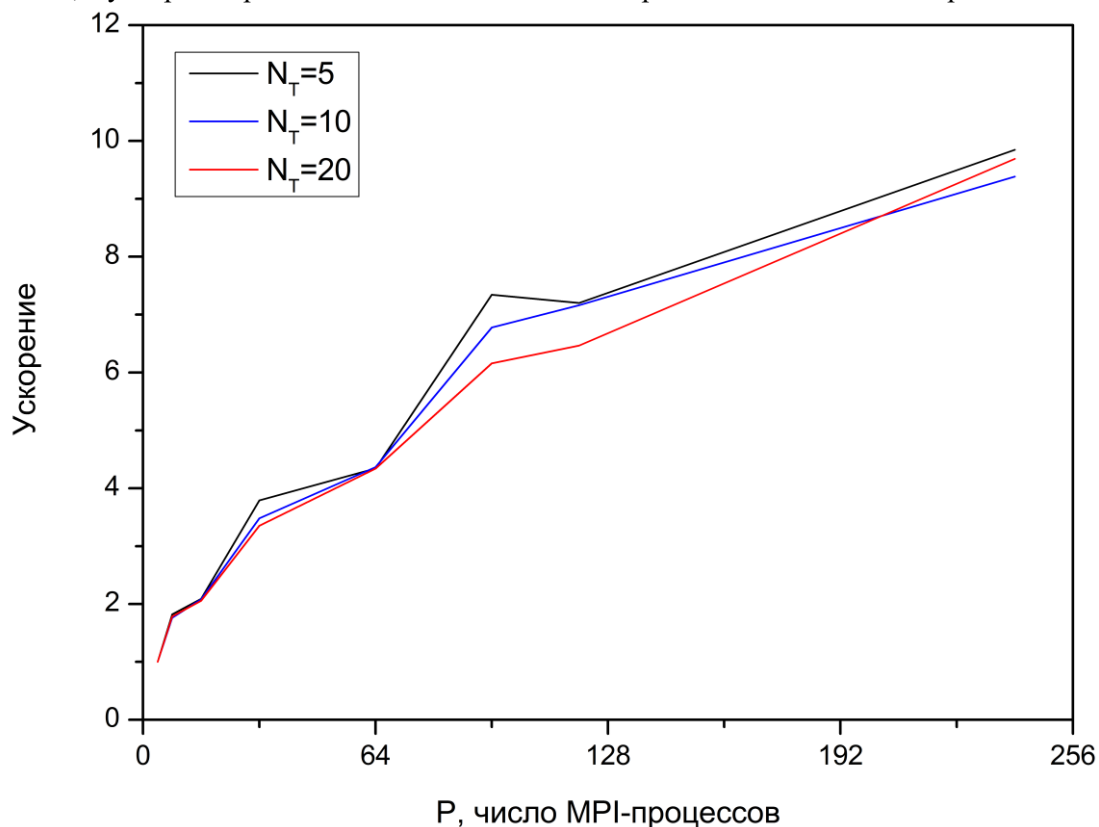
Программная реализация блоков переноса примесей основана на использовании гибридного программирования MPI-OpenMP. Данная методика является наиболее универсальной с точки зрения использования ресурсов современных суперкомпьютеров, позволяя оптимизировать число MPI процессов и число нитей OpenMP с учетом числа примесей и архитектуры вычислительных элементов. Совмещение MPI-OpenMP позволяет ускорить вычисления, как за счет пространственной декомпозиции задачи по параллельным процессам – в том числе учитывая параллелизм части операций по вертикали, так и за счет независимости уравнений для пассивных примесей, что обеспечивает большую масштабируемость нового подхода. Развитие современных суперкомпьютеров также определяет необходимость применения смешанного параллелизма MPI-OpenMP. Вычислительные узлы таких систем, как правило, представляют собой гетерогенную архитектуру, состоящую из процессоров «традиционной» архитектуры и ускорителей или сопроцессоров. Например, каждый узел системы Межведомственного суперкомпьютерного центра МВС-10П состоит из 2-х 8-ядерных процессоров Intel Xeon E5-2690 и 2-х 60-ядерных ускорителей Intel Xeon Phi SE10X. Можно отметить и архитектуру RSC Petastream полностью основанной на использовании процессоров Intel Xeon Phi 7120D. Для эффективного использования таких вычислительных платформ, сочетающих элементы с распределенной и общей памятью, необходима реализация компонентов моделей Земной системы на основе технологии гибридного программирования MPI-OpenMP. Отметим, что использование именно интерфейса OpenMP представляется наиболее предпочтительным – методика «инкрементального распараллеливания» – возможность постепенной модификации и оптимизации модели, является существенной с учетом сложной программной структуры климатических моделей. Тем не менее эффективное совмещение MPI и OpenMP для приложений, в которых важной является скорость доступа к памяти, как правило требует оптимизации программной реализации. В частности, в работе [13] показано, что во многих случаях большего быстродействия модели атмосферы UM (Unified Model UK Met Office) на обычных процессорах Intel Xeon удается добиться при размещении одного MPI-процесса на узел кластера и не используя поддерживаемый моделью интерфейс OpenMP.

Данные о динамике атмосферы поступают в аэрозольный блок на каждом динамическом шаге, а информация о концентрации аэрозолей передается в блок динамики атмосферы один раз в 3 модельных часа. Схожая структура обменов данными справедлива и для связки модели океана и модуля переноса примесей (например, блока биохимии океана). Для уменьшения числа точек синхронизации обмена данными с блоком примесей выполняются асинхронно с дополнительной буферизацией сообщений. В общем случае программная реализация позволяет использовать для модуля переноса примесей произвольное число MPI-процессов. В данном случае массивы после приема объединяются или перераспределяются в рамках группы процессов, связанной с вспомогательным модулем переноса примеси, не влияя на расчет основных уравнений динамики. Вычислительные эксперименты показывают, что для версии модели атмосферы, включающей перенос концентраций десяти веществ, выделение равного числа ядер для динамики атмосферы и аэрозольного блока является достаточным для уменьшения времени счета до двух раз. При этом ускорение также достигается за счет уменьшения доли вычислений, предполагающих выполнение операций объединения данных с параллельных процессов. Для более эффективной балансировки нагрузки между моделью атмосферы и блоком аэрозолей возможно увеличение числа компонентов примеси (до 12-15 компонент), что не приведет к замедлению расчетов. При дальнейшем увеличении аэрозольных веществ допускается разделение их на группы и последующее численное решение уравнений для каждой группы на отдельных вычислительных MPI-процессах.

Дополнительный параллелизм при использовании OpenMP нитей в рамках одного MPI процесса обеспечивает возможность асинхронного выполнения обменов и их перекрытия с вычислениями. Данная возможность достигается за счет выполнения MPI обменов одной нитью OpenMP. Высокая стоимость синхронизации нитей и инициализации параллельных областей на процессорах Intel Xeon Phi учитываются за счет минимизации точек синхронизации, в том числе при MPI обменах, а инициализация параллельной области OpenMP выполняется однократно на один шаг расчета динамики примесей по времени. В данном случае используется поддержка «orphan» директив («оторванных» директив) в интерфейсе OpenMP

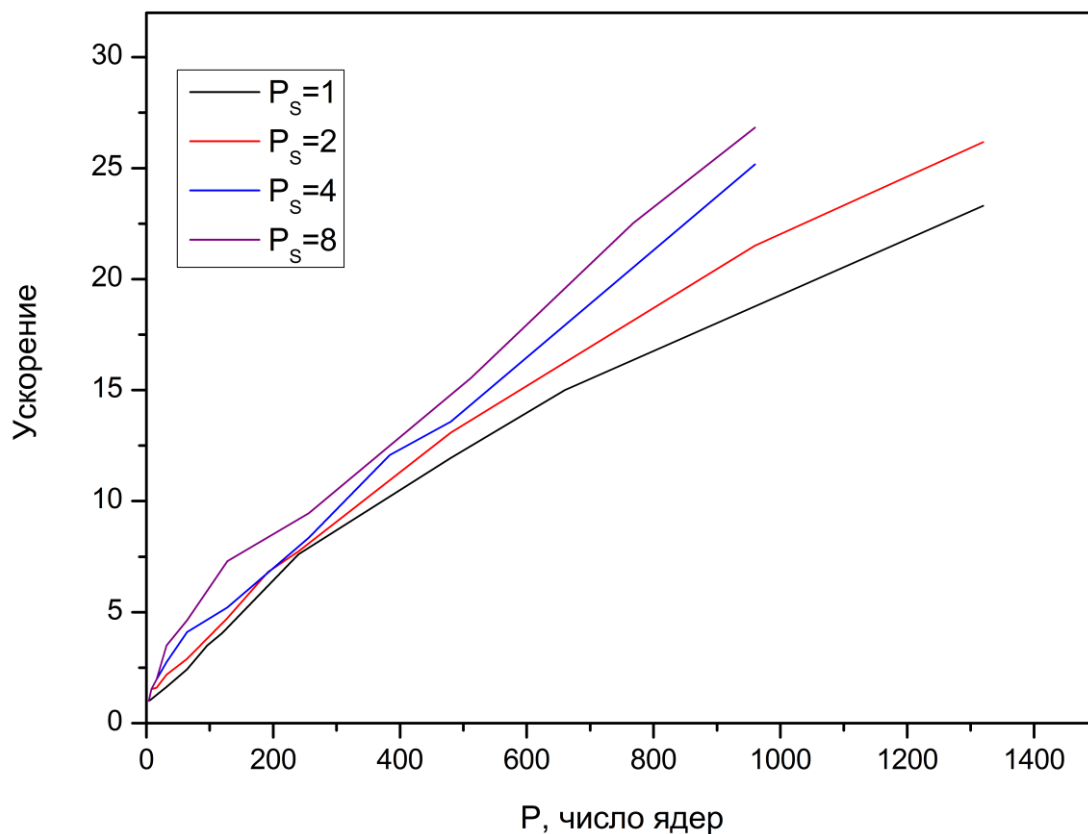
[14] – допускается, что директивы синхронизации и распределения работы могут не входить в лексический контекст параллельной области.

На рисунке 1 показана масштабируемость MPI-OpenMP реализации блока переноса аэрозолей на системе МВС-10П при фиксированных горизонтальном разрешении –  $1.25 \times 1$  градусов и числе вертикальных уровней – 73, но при различном количестве примесей. На каждый MPI процесс задавалось 4 OpenMP нити. По горизонтальной оси отложено число MPI процессов, а ускорение рассчитывалось относительно времени счета на 4 MPI процессах.



**Рис. 1.** Масштабируемость программной реализации MPI-OpenMP блока переноса примесей при различном количестве переносимых концентраций веществ  $N_T$ . Горизонтальное разрешение:  $1.25 \times 1$  градус, число уровней по вертикали: 73.

Увеличение числа примесей в экспериментах не приводит к значимому уменьшению масштабируемости программной реализации. Применение OpenMP позволяет частично скрыть дополнительные расходы, связанные с увеличением объема MPI-сообщений. Результаты экспериментов показывают, что увеличение числа OpenMP нитей при достаточно большом числе задействованных MPI процессов является более эффективным методом ускорения расчетов. Наоборот, на начальном этапе более целесообразно введение дополнительных MPI процессов – в этом случае достигается ускорение за счет размещения данных локальных массивов в более быстрой с точки зрения времени доступа памяти процессора. Дополнительное ускорение за счет использования OpenMP связано с лучшей масштабируемостью основных операций расчета динамики примеси в рамках модели с общей памятью: выполнение фильтрации переменных, расчета явных тенденций, горизонтальной и вертикальной диффузии. Масштабируемость алгоритма фильтрации при увеличении числа нитей на MPI процесс показана на рисунке 2 для переноса 20 веществ в блоке примеси. Приведенное ускорение рассчитывается относительно времени счета эксперимента, в котором было задействовано 4 MPI процесса на 4 ядрах. Такое сопоставление позволяет оценить эффективность увеличения числа нитей OpenMP, по сравнению с увеличением числа MPI процессов. По горизонтальной оси отложено суммарное число используемых процессорных ядер.



**Рис. 2.** Масштабируемость алгоритма фильтрации в MPI-OpenMP блоке переноса примеси при увеличении числа нитей  $P_s$  на один MPI процесс. Горизонтальное разрешение:  $1.25 \times 1$  градус, число уровней по вертикали: 73, число примесей: 20.

Вычислительные эксперименты с использованием архитектуры Intel Xeon Phi проводились на системе MBC-10П, где удается добиться ускорения по ядрам одной карты, однако масштабируемости блока переноса по процессорам препятствуют архитектурные особенности реализации обменов между устройствами Intel Xeon Phi, которые существенно замедляют MPI-коммуникации [29]. Результаты вычислительных экспериментов на системах следующего поколения (MBC-10П МП, RSC Petastream) показывают, что при высоком пространственном разрешении в атмосферном блоке примеси удается добиться как ускорения по ядрам Intel Xeon Phi, так и между процессорами Intel Xeon Phi. При этом производительность расчетов на одной карте Intel Xeon Phi 7120D сопоставима с экспериментами на 2-х процессорах Intel Xeon E5-2690.

#### 4. Заключение

В настоящей работе предложена реализация блока переноса примесей в моделях атмосферы и океана на основе гибридного программирования MPI-OpenMP. Программная реализация учитывает, как возможность пространственной декомпозиции задачи по параллельным процессам, так и независимость уравнений для переноса примеси и обеспечивает большую масштабируемость и эффективность использования вычислительных ресурсов современных суперкомпьютеров, по сравнению с известными решениями. Данный подход естественным образом допускает использование сопроцессоров Intel Xeon Phi для расчета уравнений переноса примесей.

Полученные результаты подтверждают возможность эффективного использования сопроцессоров в задачах моделирования климата и прогноза погоды. В этой связи перспективной представляется разработка программной реализации моделей основной динамики атмосферы и океана на основе гибридного программирования MPI-OpenMP,

позволяющей проводить расчеты на гетерогенных вычислительных системах, включающих процессоры Intel Xeon Phi.

## Литература

1. Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лыкосов В.Н. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН // М. Препринт ИВМ РАН. 1998. 180 С.
2. Володин Е.М. Модель общей циркуляции атмосферы и океана с углеродным циклом // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 34. № 3. С. 298-313.
3. Володин Е.М., Лыкосов В.Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность-почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. I. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 4. С. 453-565.
4. Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин Я.В., Лыкосов В.Н., Грицун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г. Воспроизведение современного климата с помощью модели климатической системы INMCM5.0 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016 (в печати).
5. Галин В.Я. Параметризация радиационных процессов в атмосферной модели ИВМ // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 3. С. 380-389.
6. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М., Галин В.Я., Глазунов А.В., Грицун А.С., Дианский Н.А., Толстых М.А., Чавро А.И. Моделирование климата и его изменений. – В: «Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования» М.: Наука, 2005. Т. 2. С. 38-175.
7. Кулямин Д.В., Володин Е.М., Дымников В.П. Моделирование квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. № 1. С. 43-61.
8. Мортиков Е.В. Повышение масштабируемости программного комплекса модели Земной системы высокого пространственного разрешения // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2015): Труды международной научной конференции. 2015. С. 431-435.
9. Мортиков Е.В. Эффективность реализации итерационных методов решения эллиптических уравнений в моделях общей циркуляции атмосферы на массивно-параллельных вычислительных системах // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции (28-29 сентября 2015 г., г. Москва). М.: Изд-во МГУ, 2015. С. 528-534.
10. Яковлев Н.Г. Совместная модель общей циркуляции вод и эволюции морского льда Северного Ледовитого океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39, № 3. С. 349-409.
11. Arakawa A., Lamb V.R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model // Methods Comput. Phys. 1977. V. 17. P. 173-265.
12. Bell R.J., Strachan J., Vidale P.L., Hodges K.I., Roberts M. Response of tropical cyclones to idealized climate change experiments in a global high resolution coupled general circulation model // J. Climate. 2013. V. 26, N 20. P. 7966-7980.
13. Bermous I., Steinle P. Efficient performance of the Met Office Unified Model v8.2 on Intel Xeon partially used nodes // Geosci. Model Dev. 2015. V. 8. P. 769-779.
14. Chapman B. Jost G., van der Pas R. Using OpenMP. Portable shared memory parallel programming. Cambridge: MIT Press, 2008. 378 P.

15. Collins N., Theurich G., DeLuca C., Suarez M., Trayanov A., Balaji V., Li P., Yang W., Hill C., da Silva A. Design and implementation of components in the Earth System Modeling Framework // *Int. J. of High Perform. Comp. App.* 2005. V. 19, N 3. P. 341-350.
16. Demory M.-E., Vidale P.L., Roberts M.J., Berrisford P., Strachan J., Schiemann R., Mizielinski M.S. The role of horizontal resolution in simulating drivers of the global hydrological cycle // *Clim. Dyn.* 2014. V. 42. P. 2201-2225.
17. Dennis J.M., Vettenstein M., Worley P.H., Mirin A.A., Craig A.P., Jacob R., Mickelson S. Computational performance of ultra-high-resolution capability in the Community Earth System Model // *Int. J. High Performance Computing Applications.* 2012. V. 26, N 1. P. 5-16.
18. Gloukhov V. Parallel implementation of the INM atmospheric general circulation model on distributed memory multiprocessors // *Lecture Notes in Computer Science.* 2002. V. 2329. P. 752-762.
19. Haarsma R.J., Roberts M., Vidale P.L. et al. High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP) // *Geosci. Model Dev. Discuss.* 2016 (in review).
20. Jung T., Miller M.J., Palmer T.N., et al. High-resolution global climate simulations with the ECMWF model in Project Athena: Experimental design, model climate, and seasonal forecast skill // *J. Clim.* 2012. V. 25, N 9. P. 3155-3172.
21. Kelly R. GPU computing for atmospheric modeling // *Comp. Sci. Eng.* 2010. V. 12, N 4. P. 26-33.
22. Malcolm A., Selwood P., Glover M. Scalability of the Met Office Unified Model // *The 14<sup>th</sup> ECMWF Workshop on High Performance Computing in Meteorology.* 2010.
23. Mielikainen J., Huang B., Huang A.H.-L. Intel Xeon Phi accelerated Weather Research and Forecasting (WRF) Goddard microphysics scheme // *Geosci. Mode Dev. Discuss.* 2014. V. 7. P. 8941-8973.
24. Mirin A.A., Worley P.H. Improving the performance scalability of the community atmosphere model // *Int. J. of High Performance Computing. Applications.* 2012. V. 26, N 1. P. 17-30.
25. Mizielinski M.S., Roberts M.J. Vidale P.L. et al. High-resolution global climate modelling: the UPSCALE project, a large-simulation campaign // *Geosci. Model Dev.* 2014. V. 7. P. 1629-1640.
26. Mizuta R., Oouchi K., Yoshimura H., Noda A., Katayama K., Yukimoto S., Hosaka M., Kusunoki S., Kawai H., Nakagawa M. 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model: Mean climate states // *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 2006. V. 84. P. 165-185.
27. Navarra A., Kinter J.L., Tribbia J. Crucial experiments in climate sciences // *B. Am. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91. P. 343-352.
28. Roberts M.J., Clayton A., Demory M.-E. et al. J. Impact of resolution on the Tropical Pacific Circulation in a matrix of coupled modes // *J. Climate.* 2009. V. 22. P. 2541-2556.
29. Semin A., Druzhinin E., Mironov V., Shmelev A., Moskovsky A. The performance characterization of the RSC PetaStream Module // *Proc. of the 29<sup>th</sup> Supercomputing Int. Conf., ISC 2014.* 2014. P. 420-429.
30. Shaffrey L.C., Stevens I., Norton W.A. et al. U.K. HiGEM: the new U.K. High-Resolution Global Environment Model – model description and basic evaluation // *J. Climate.* 2009. V. 22. P. 1861-1896.
31. Terekhov K.M., Volodin E.M., Gusev A.V. Methods and efficiency estimation of parallel implementation of the –model of general ocean circulation // *Russian J. Numer. Anal. Math. Modelling.* 2011. V. 26, N 2. P. 189-208.
32. Wehner M.F., Reed K.A., Li F., Prabhat, Bacmeister J., Chen C.-T., Paciorek C., Cleckler P.J., Sperber K.R., Collins W.D., Gettelman A., Jablonowski C. The effect of horizontal resolution on simulation quality in the Community Atmospheric Mode, CAM5.1 // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2014. V. 6. P. 980-997.



33. Xue W., Yang C., Fu H. et al. Ultra-scalable CPU-MIC acceleration of mesoscale atmospheric modeling on Tianhe-2 // *Computers, IEEE Transactions on*. 2014. V. 64, N 8. P. 2382-2393.
34. Zalesny V.B., Marchuk G.I. Agoshkov V.I., Bagno A.V., Gusev A.V., Diansky N.A., Moshonkin S.N., Tamsalu R., Volodin E.M. Numerical simulation of large-scale ocean circulation based on the multicomponent splitting method // *Russian J. Numer. Anal. Math. Modelling*. 2010. V. 25. N 6. P. 581-609.