

Е. Д. Астахова, Ю. В. Алферов

**ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ ВЕРСИЯ
СПЕКТРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО
И АНСАМБЛЕВОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ
НА МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ**

Введение

Прогноз погоды — одна из наиболее актуальных задач метеорологии, решение которой важно для экономики. Численный прогноз погоды (ЧПП) основан на компьютерном расчете поведения атмосферы при помощи ее моделей.

Модель атмосферы представляет собой совокупность основных уравнений гидротермодинамики, описывающих изменение ее состояния, способы дискретизации и численного решения этих уравнений, а также способы параметрического учета процессов подсеточного масштаба, т. е. процессов, характерный масштаб которых много меньше масштаба явлений, описываемых дискретизированными уравнениями.

Точность ЧПП определяется точностью исходной информации о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности, а также точностью используемой модели атмосферы — ее пространственно-временным разрешением, точностью численных схем и адекватностью параметризаций физических процессов подсеточного масштаба. Роль всех этих факторов различна для прогнозов разной заблаговременности. В частности, при увеличении заблаговременности прогнозов становится более существенной точность параметризаций процессов подсеточного масштаба, что приводит к необходимости использования более сложных алгоритмов.

Технология ЧПП состоит из нескольких этапов:

- 1) получение данных о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности, их автоматизированный контроль и обработка (объективный анализ данных наблюдений);
- 2) подготовка исходных данных для модели атмосферы (препроцессинг модели);
- 3) численное интегрирование модели атмосферы;
- 4) обработка результатов модели (постпроцессинг модели).

Задача интегрирования модели атмосферы (этап 3) требует наибольших затрат времени счета.

Специфика задачи ЧПП — необходимость получить конечный продукт (прогностические поля) за ограниченное время. С одной стороны, метеорологические наблюдения проводятся в фиксированные сроки, а для подготовки исходных данных для модели нужно иметь информацию за эти сроки из различных источников (данных метеорологических станций, кораблей, самолетов, спутников и т. п.), с другой, — потребитель должен получить прогноз к строго определенному моменту времени.

Обычно на численное интегрирование модели атмосферы отводится не более 20 минут на сутки прогноза.

Из указанного понятно, что выбор модели атмосферы для численного прогноза погоды всегда основан на компромиссе между ее точностью (а значит, и сложностью) и временем, необходимым для ее интегрирования на требуемые сроки. Таким образом, оптимизация программного комплекса модели атмосферы с целью сократить время ее счета — чрезвычайно важная задача, решение которой может способствовать увеличению точности ЧПП.

Заметим, что требования к скорости счета модели атмосферы становятся даже более жесткими в случае ансамблевого прогноза, когда вместо одного интегрирования модели по начальным данным, полученным в результате процедуры объективного анализа, выполняется ряд расчетов (в лучших системах ансамблевого прогнозирования их около 50) по начальным данным, возмущенным в пределах ошибки наблюдений.

Современная тенденция развития вычислительной техники — это уже не увеличение производительности одного процессора (в этой области практически невозможен дальнейший существенный прогресс в рамках известных технологий), а создание многоядерных процессоров и многопроцессорных систем различных архитектур. Многоядерный процессор содержит несколько счетно-решающих устройств, которые в этом случае принято называть процессорными элементами (ПЭ). Далее в статье термин «процессор» используется как синоним термина «процессорный элемент».

Таким образом, задачу оптимизации программного кода можно рассматривать в двух аспектах [2]:

- 1) уменьшение времени счета на одном процессоре,
- 2) организация параллельного счета отдельных частей программы на нескольких процессорах.

В данной работе рассмотрены способы и результаты решения задачи оптимизации программного комплекса спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России [4, 5, 8].

1. Краткая характеристика спектральной модели атмосферы и ее программного обеспечения

В Гидрометцентре России в оперативном режиме для численного кратко- и среднесрочного прогноза погоды используется глобальная спектральная модель атмосферы, имеющая пространственное разрешение 85 спектральных гармоник (с треугольным усечением) и 31 уровень по вертикали — версия T85L31 [7]. Модель основана на решении стандартной системы гидротермодинамических уравнений для бароклиной атмосферы, записанных в сигма-системе координат (вертикальная координата $\sigma = p/p_s$, где p и p_s — давление воздуха на некотором уровне и на уровне земли соответственно). Система решается при помощи спектрально-сеточного метода. Дискретизация по горизонтали осуществляется при помощи спектрального метода, для вертикали используется конечно-разностная дискретизация. Основные переменные модели и геопотенциал земной поверхности аппроксимируются усеченными сходящимися рядами, построенными на базисе ортогональных функций, определенных во всей области решения. При решении полученных уравнений часть вычислений проводится в спектральном пространстве (т. е. со спектральными коэффициентами), а часть, в том числе расчет нелинейных динамических слагаемых основных прогностических уравнений и эффектов физических процессов подсеточного масштаба — в сеточном пространстве (в узлах сетки). При переходе из спектрального пространства в сеточное выполняются некоторые расчеты в пространстве образов Фурье (с коэффициентами Фурье). В модели используется так называемая гауссова сетка, регулярная по долготе и слабо нерегулярная по широте. Шаг этой сетки связан со спектральным разрешением модели (см. далее).

Модель параметрическим образом учитывает важнейшие процессы подсеточного масштаба:

- радиационно-облачное взаимодействие,
- процессы в пограничном слое атмосферы,
- проникающую конвекцию,
- крупномасштабную конденсацию,
- процессы на поверхности суши.

Мелкомасштабные процессы горизонтальной турбулентности учтены при помощи диффузионной линейной схемы четвертого порядка. Применяется полунявная схема интегрирования по времени. Структура шага модели во времени условно изображена на рис. 1, на котором буквы G или S показывают, что на данном этапе вычисления проводятся в сеточном или спектральном пространстве. Запись G→S (или S→G)

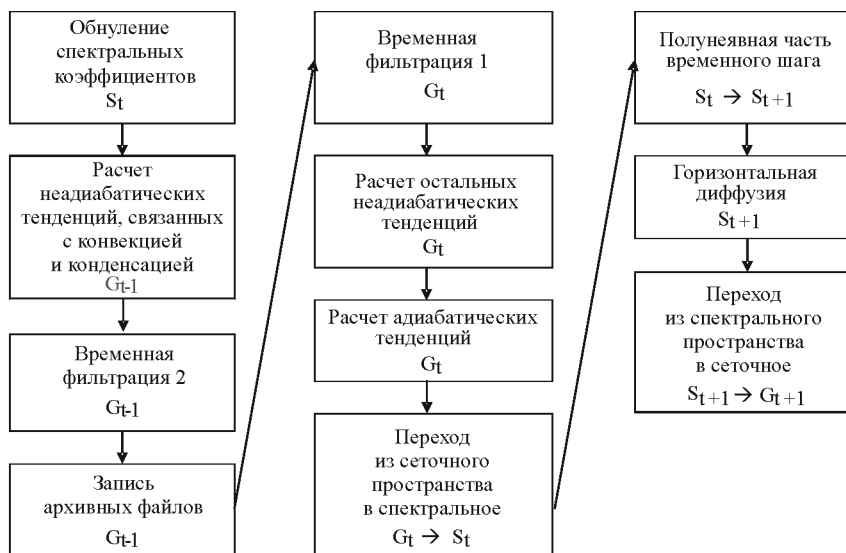


Рис. 1. Структура временного шага модели.

означает, что в этом месте осуществляется переход из сеточного пространства в спектральное (или наоборот). На каждом временном шаге производятся расчеты для трех моментов времени, что показано индексами $t - 1$, t и $t+1$.

Программное обеспечение модели написано на языке Фортран. В целом это 128 программ или около 20 000 строк. Блок-схема программного комплекса приведена на рис. 2, где показаны только основные программы. Обозначения S и G имеют такой же смысл, как и на рис. 1. На каждом временном шаге выполняется два сканирования по широтам, реализованные в подпрограммах SCAN1 и SCAN2.

Расчеты выполняются последовательно для всех кругов широты; при этом сначала рассматривается самая северная широта, затем самая южная, затем следующая северная и следующая южная и т. д. до экватора. Такой порядок перебора широт позволяет сократить объем вычислений за счет использования части результатов расчетов для северной широты при расчетах для симметричной ей относительно экватора южной широты.

Программы модели реализованы так, что можно менять разрешение модели без существенного изменения кода. Для работ по оптимизации использовались версии T169L31 и T339L31. В отличие от опера-

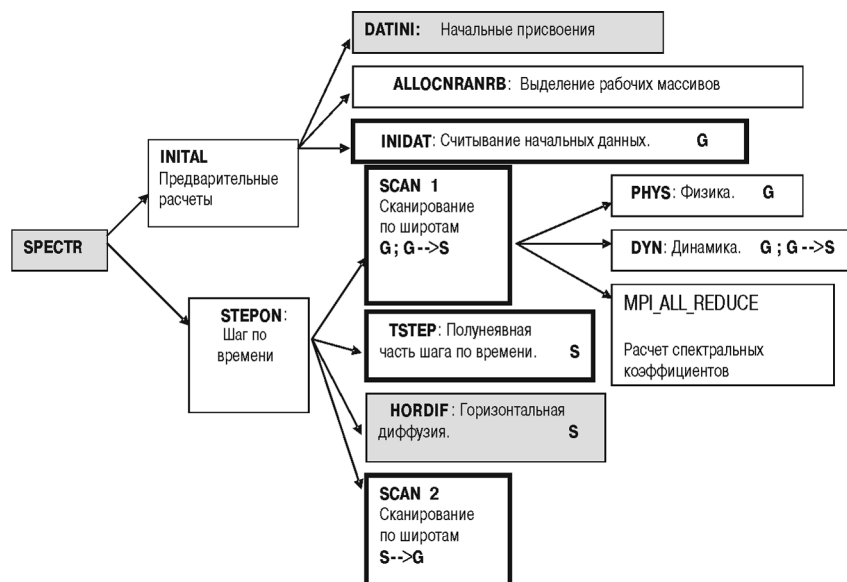


Рис. 2. Блок-схема программного комплекса.

В толстой рамке — имена программ, расчет которых удалось хорошо распараллелить для нескольких процессоров, серым цветом даны последовательные части программы.

Таблица 1

Характеристики различных версий спектральной модели атмосферы ГМЦ РФ

Параметр	Оперативный вариант (T85L31)	Исследовательский вариант		
		1-й (T169L31)	2-й (T339L31)	3-й (T679L31)
Разрешение: спектральное, число гармоник	85	169	339	679
пространственное, км	150	75	37	17,5
Шаг по времени, с	900	900	450	450
Число уровней по вертикали	31	31	31	31

тивной версии T85L31, они в настоящее время эксплуатируются в исследовательском режиме. Кроме того, некоторые эксперименты были проведены с версией T679L31.

Сравнительные характеристики всех перечисленных версий модели приведены в табл. 1.

Заметим, что шаг по времени в исследовательских вариантах выбран так, чтобы заведомо обеспечить устойчивость счета при уменьшении шага по пространству (в соответствии с критерием Фридрихса—Куранта—Леви).

2. Оптимизация программного кода на одном процессоре

Оптимизация программного кода на одном процессоре выполнена для ЭВМ, основанных на процессорах XEON и Itanium, разработанных компанией Intel Inc. Использовался компилятор Intel Fortran 8.1, операционная система LINUX.

Оптимизация программного комплекса модели включала в себя:

- подбор флагов (опций) компилятора для автоматической оптимизации;
- использование директив компилятора, разрешающих оптимизацию отдельных частей программы;
- использование подпрограмм из математической библиотеки Intel MKL¹;
- переписывание отдельных фрагментов программы с целью улучшить условия для конвейеризации расчетов.

Результаты приведены в табл. 2, из которой видно, что использование директив компилятора и подпрограмм библиотеки MKL привело к уменьшению времени счета в 6,3 раза. Заметим, что в основном использовалась директива компилятора CDIR\$ IVDEP, указывающая на независимость переменных друг от друга и позволяющая поэтому конвейеризировать циклы. Сильный положительный эффект от применения этой директивы связан со спецификой программного кода модели, в котором использован один большой массив, где хранятся почти все физические величины, участвующие в вычислениях.

Интересно отметить, что при оптимизации программ модели для векторной машины CRAY YMP/8E в 1998 г. применение аналогичной директивы, обозначающей в этом случае отсутствие векторной зависи-

¹ MKL — Intel Math Kernel Library.

Таблица 2

**Время интегрирования спектральной модели атмосферы на сутки
на одном процессоре
(частота вызова радиационного блока — 1 раз в сутки,
без вызова блока нелинейной инициализации)**

ЭВМ	Версия модели, область интегрирования	Оптимизация	Время CPU, мин	Ускорение
Tiger (Intel Itanium 1.6 ГГц)	T169L31, сфера	Отсутствует	82,42	1
		+ оптимизация компилятора	28,17	2,9
		+ конвейеризация + Intel MKL*	13,07	6,3
		+ БПФ Intel	8,60	9,5
Cray YMP/8E	T40L15, полусфера	Отсутствует	10,40	1
		+ векторизация**	2,42	4,3
		+ CRAY Scientific Library	0,93	11,1

* Конвейеризация циклов осуществлена путем введения в текст директивы компилятора CDIR\$ IVDEP. Кроме того, использованы другие директивы и часть текстов была переписана.

** Векторизация осуществлена в основном путем включения в тексты программ директивы компилятора CDIR\$ IVDEP и замены пользовательских программ, вызов которых в циклах препятствовал векторизации, на векторные встроенные программы.

мости и разрешающей векторизацию цикла, также оказалось весьма плодотворным. Это, а также замена ряда пользовательских подпрограмм, вызов которых из циклов препятствовал векторизации, на встроенные функции и программы из математической библиотеки CRAY Scientific Library, позволило ускорить счет почти в 11 раз на одном векторном процессоре для версии модели T40L15 [1].

В табл. 2 для сравнения приведены результаты по оптимизации программ модели для векторной ЭВМ CRAY YMP/8E, на которой оперативная технология среднесрочного и краткосрочного прогноза функционировала с 1999 по 2006 г. Для суперскалярных ЭВМ, основанных на процессорах XEON и Itanium, удалось добиться общего уменьшения времени счета T169L31 в 9,6 раз по сравнению с первоначальным вариантом.

При анализе табл. 2 следует также обратить внимание на важность оптимизации программ быстрого преобразования Фурье (БПФ). Использование программы БПФ из CRAY Scientific Libraries дало ускорение счета почти в 2 раза на ЭВМ CRAY, а использование программы БПФ, специально разработанной компанией Intel, ускорило счет в 1,5 раза на ЭВМ Tiger.

3. Методика распараллеливания программного кода

Основная задача при оптимизации программного комплекса спектральной модели атмосферы — создание варианта, способного функционировать с одновременным использованием нескольких процессоров на многопроцессорной ЭВМ. Для этого решено использовать технологию MPI¹ [3, 6]. Эта технология позволяет выполнять параллельные вычисления на многопроцессорных системах с памятью, разделяемой между процессорами (SMP²-машины), а также с распределенной памятью.

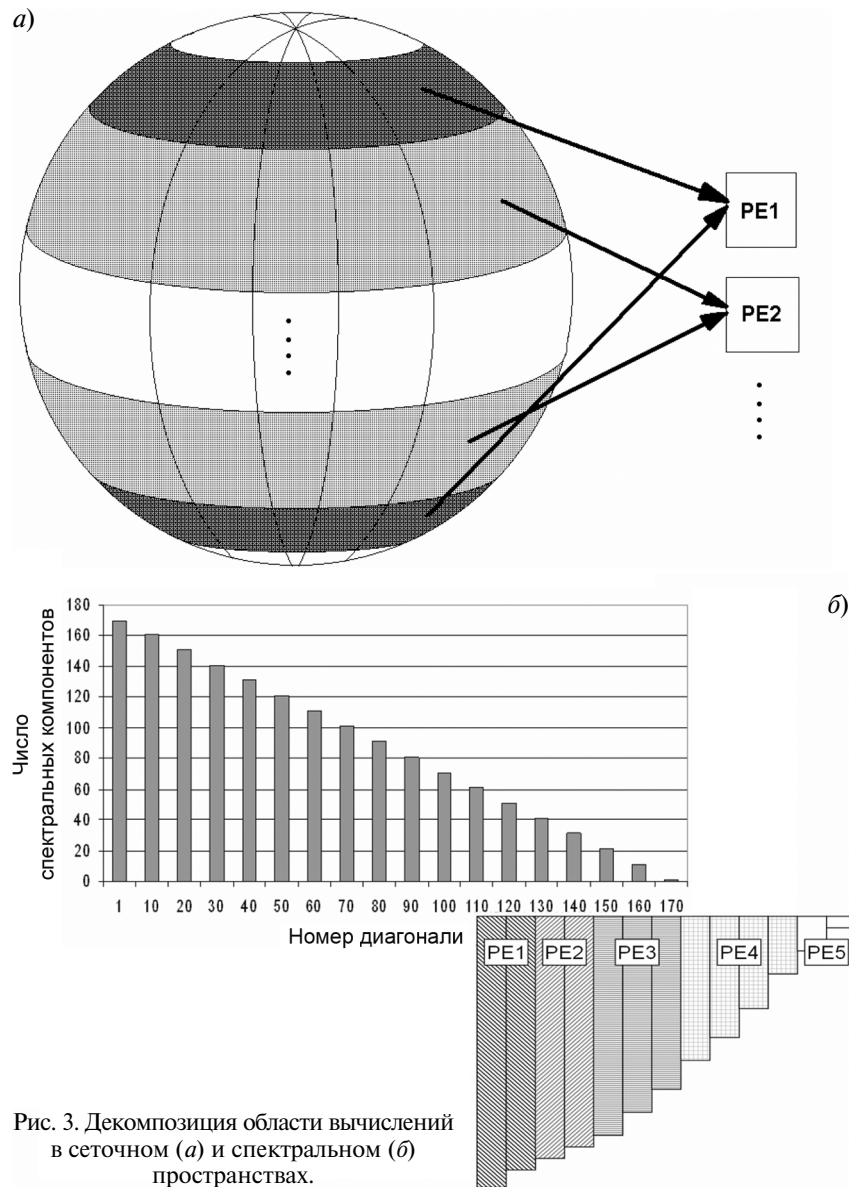
Главная проблема при создании параллельной версии любой большой программы — оценка независимости отдельных фрагментов расчетов и декомпозиция вычислений. Желательно также начать параллельную часть программы на как можно более раннем этапе счета.

Выполнив некоторые изменения в программах спектральной модели атмосферы, мы создали ее новую версию, в которой вычисления в подпрограммах SCAN1 и SCAN2 для различных широт независимы. Далее мы использовали такую декомпозицию области, при которой все процессоры обрабатывали бы по возможности равное число широт. Единственным ограничением при «раздаче» широт процессорам было требование парности северной и южной широты. Ограничение связано с тем, что некоторые вычисления для северной широты используются в расчетах для симметричной ей относительно экватора южной широты (см. ранее). Таким образом, минимальное число широт, которое может обрабатывать каждый процессор — две; максимально возможное число процессоров, используемых для вычислений, определяется как половина числа модельных широт. Используемая в сеточном пространстве декомпозиция приведена на рис. 3 а, из которого видно, что каждый процессор выполняет вычисления для двух одинаковых широтных зон, расположенных симметрично относительно экватора. Заметим, что полюса не включены в расчетную сетку модели.

В спектральном пространстве использована также одномерная декомпозиция, но по спектральным числам. Так как в модели используется треугольное усечение спектральных рядов, то объемы вычислений, производимых для различных спектральных компонентов, оказываются различными. Поэтому приходится перераспределять загрузку процессоров для достижения баланса. Декомпозиция, использованная в пространстве спектральных коэффициентов, приведена на рис. 3 б.

¹ MPI — Message Passing Interface.

² SMP — Symmetric Multiprocessing.



Для объяснения алгоритма работы новой параллельной версии спектральной модели атмосферы и проблем, возникающих при организации параллельных вычислений модели, обратимся к рис. 2.

При запуске задачи инициируется N одинаковых MPI-процессов, где число N определяется пользователем. Этап предварительных вычислений выполняется всеми процессами одновременно. Так как эти вычисления выполняются только 1 раз при интегрировании модели и не требуют много времени, последовательный характер этой части кода несуществен. Параллельная работа программы начинается с вызова подпрограммы ALLOCNRANRB, в которой выделяются основные массивы для работы модели. Разработанная нами версия программного кода основана на динамическом распределении памяти в зависимости от числа используемых процессов N , что позволяет уменьшить объем памяти, необходимой для каждого процесса. Затем каждый процесс считывает свою долю исходной информации о состоянии атмосферы на гауссовой сетке (в подпрограмме INIDAT) и подготавливает данные, необходимые для дальнейшего интегрирования модели. В отличие от прежней версии модели, файл с исходными данными — это файл прямого доступа.

При выполнении шага по времени сначала каждый процесс проводит вычисления для своей порции широт (подпрограмма SCAN1). После расчетов эффектов физических процессов подсеточного масштаба (подпрограмма RHYS) и вычисления нелинейных динамических слагаемых (подпрограмма DYN) необходимо рассчитать спектральные коэффициенты, в которые вносят вклад все широты. Поэтому приходится суммировать вклады, рассчитанные разными процессами и возвращать окончательные значения спектральных коэффициентов всем процессам. Эта операция осуществляется при помощи стандартной для пакета MPI программы MPI_ALLREDUCE. Массив спектральных коэффициентов достаточно велик (более 27 МБ для версии T169L31). Поэтому, хотя число обменов информацией между процессами не слишком велико, эти обмены занимают большое время, поскольку передаваемый объем информации велик. К тому же время, требуемое на обмены, растет с увеличением числа процессоров. Таким образом, необходимость суммирования массива спектральных коэффициентов накладывает ограничение на ускорение счета модели на многих процессорах.

Вторая часть вычислений на временном шаге модели осуществляется в пространстве спектральных коэффициентов. На этом этапе решается уравнение Гельмгольца и вычисляется полунейная часть временных тенденций (подпрограмма TSTEP, см. рис. 3 б). Заметим, что распараллеливание в TSTEP не накладывает дополнительных ограни-

чений на число процессоров, на которых можно считать модель, так как спектральное разрешение M и число широт N_G связаны формулой

$$N_G \geq (3M + 1)/2,$$

и N_G всегда выбирается близким к минимальному значению, получаемому из этой формулы. Так, для T339L31 $N_G = 512$, а для T169L31 $N_G = 256$. Однако, к сожалению, при распараллеливании программы TSTEP мы опять столкнулись с необходимостью больших обменов, что замедляет быстроедействие программы, хотя и не так существенно, как расчеты спектральных коэффициентов.

Далее учитывается вклад горизонтальной диффузии (подпрограмма HORDIF). Эта программа небольшая и выполняется всеми процессами одновременно (т. е. этот кусок последовательный), что, согласно закону Амдала [2], накладывает ограничения на ускорение счета при увеличении числа используемых процессоров и является еще одним ограничением в нашей задаче.

В конце временного шага восстанавливаются сеточные функции для следующего момента времени при помощи обратного преобразования Лежандра и обратного быстрого преобразования Фурье на основе спектральных коэффициентов (подпрограмма SCAN2). В этой части кода используется декомпозиция, аналогичная приведенной на рис. 3 а.

Таким образом, создан параллельный вариант спектральной модели атмосферы, с использованием которого можно выполнять расчеты на большом числе процессоров, но не превышающем половины числа гауссовых широт. При этом получаемое уменьшение астрономического времени счета ограничено:

- во-первых, из-за больших обменов данными между процессорами при расчете спектральных коэффициентов;
- во-вторых, из-за наличия последовательного куска в итоговом коде.

В следующем разделе показаны результаты и обсуждены возможности преодоления этих ограничений.

4. Анализ результатов

Разработанный параллельный алгоритм подробно протестирован на ЭВМ с разделяемой памятью. Расчеты выполнялись на 4-, 12-, 32- и 64-процессорных SMP-компьютерах, основанных на процессорах Itanium. Возможность провести расчеты нам любезно предоставили компании Intel и Silicon Graphics.

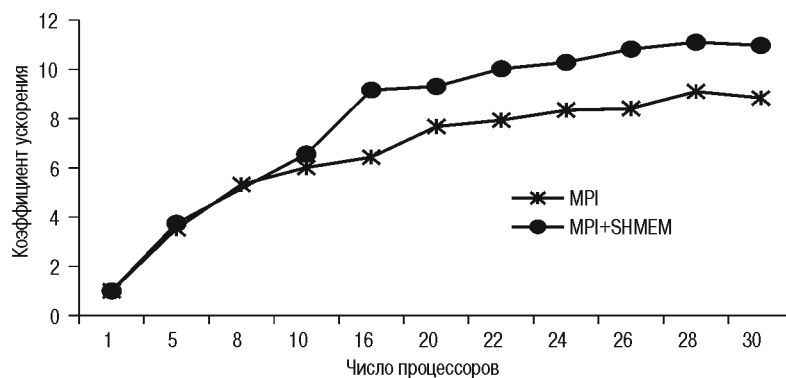


Рис. 4. Уменьшение времени счета модели T339L31 при увеличении числа используемых процессоров.

На рис. 4 продемонстрировано уменьшение времени счета модели T339L31 при увеличении числа используемых процессоров. По оси ординат отложен коэффициент ускорения — отношение времени численного интегрирования модели на сутки на одном и на нескольких процессорах. При числе процессоров менее 20 кривая растет достаточно быстро. Увеличение этого числа свыше 30 приводит лишь к небольшому ускорению программы за счет того, что время, требуемое на обмены, оказывается сопоставимым с временем, затраченным на реальные вычисления.

Сделана попытка уменьшить время, затрачиваемое на обмены, путем использования библиотеки SHMEM, разработанной Silicon Graphics Inc. для своих SMP-машин. Подпрограммы SHMEM являются аналогом подпрограмм MPI с существенным использованием факта общности оперативной памяти для всех процессоров. Средства SHMEM могут использоваться совместно со средствами MPI и имеют аналогичный интерфейс. Поэтому мы смогли применить соответствующую программу из библиотеки SHMEM только вместо MPI_ALLREDUCE при сложении массивов (основной из которых — массив спектральных коэффициентов), не отказываясь от технологии MPI в целом. Оказалось, что такое использование SHMEM позволяет улучшить скорость счета модели на большом числе процессоров (см. рис. 4). На 64 процессорах использование SHMEM привело к уменьшению времени счета почти на 30%. На рис. 5 сопоставлены периоды времени, используемого моделью на коммуникации (т. е. на передачу информации от процессора к процессору) и на вычисления в случае применения только MPI

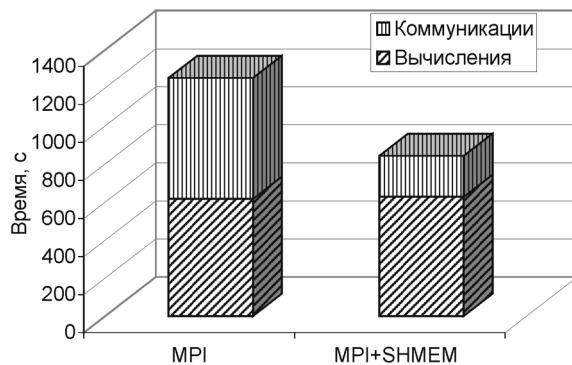


Рис. 5. Соотношение времени, используемого моделью на коммуникации и на вычисления в случае применения только MPI и комбинированного применения SHMEM и MPI.

и комбинированного применения SHMEM и MPI. Видно, что во втором случае время, затрачиваемое на коммуникации, оказывается существенно меньше.

Для анализа дальнейшей возможности ускорения программного кода модели рассмотрены затраты времени на выполнение расчетов в подпрограммах модели SCAN1, SCAN2, TSTEP, HORDIF, PHYS, а также на коммуникации (ALL_REDUCE), расчеты эффектов конвекции (CONVECTION) и общее время счета (TOTAL) на 16 и 64 процессорах (рис. 6). Коммуникации начинают вносить наибольший вклад в общее время счета при использовании 64 процессоров. Таким образом, дальнейшее увеличение скорости счета модели возможно за счет уменьшения времени межпроцессорных взаимодействий.

T339L31. 24-часовой прогноз. Itanium 1,5 GHz 6 MB cache

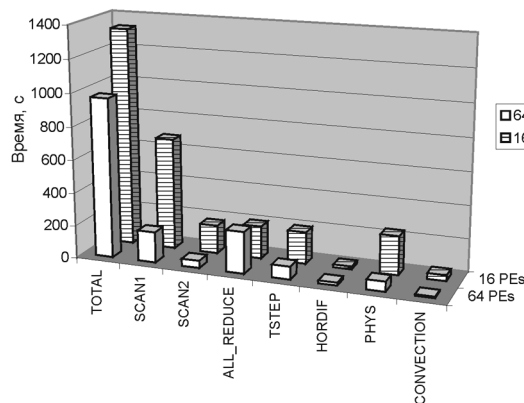


Рис. 6. Затраты времени на выполнение расчетов в различных подпрограммах модели и на коммуникации, расчеты эффектов конвекции и общее время счета.

Заштрихованные и незаштрихованные столбцы — расчет на 16 и 64 процессорах соответственно.

Заметим, что рассмотренные в наших тестах версии модели T169L31 и T339L31 являются исследовательскими вариантами.

Необходимый этап в дальнейшем развитии модели атмосферы высокого разрешения — усовершенствование параметризаций подсеточного масштаба. Заметим также, что расчет эффектов подсеточного масштаба (так называемая «физика» модели) выполняется в той части программы, которая успешно распараллеливается. Это позволяет сильно «утяжелять» параметризацию модели без существенного роста времени счета. При этом доля последовательных вычислений уменьшается, и поэтому ускорение счета модели при увеличении числа процессоров оказывается более существенным. Это демонстрирует рис. 7, на котором показано ускорение модели T169L31 при увеличении объема радиационных расчетов за счет изменения частоты вызова радиационного блока с 1 раза в сутки до 1 раза в 15 минут. При увеличении объема вычислений в параллельной области программы ускорение становится близким к максимально возможному.

Исходя из указанного, мы надеемся, что новый доработанный вариант спектральной модели (с более сложной «физикой») покажет лучшее ускорение, чем приведенное на рис. 4. Однако этот эффект, понятно, будет наблюдаться до тех пор, пока число используемых для расчетов процессоров не достигнет указанного максимума (половины числа широт). Для дальнейшего ускорения счета необходимо будет работать над распараллеливанием алгоритмов «физики».

Также отметим, что в задачах ансамблевого прогноза, когда выполняется более 20—30 интегрирований модели, чтобы получить один прогноз, для каждого члена ансамбля вряд ли можно выделить более 20—30 процессоров. Таким образом, применение разработанного алгорит-

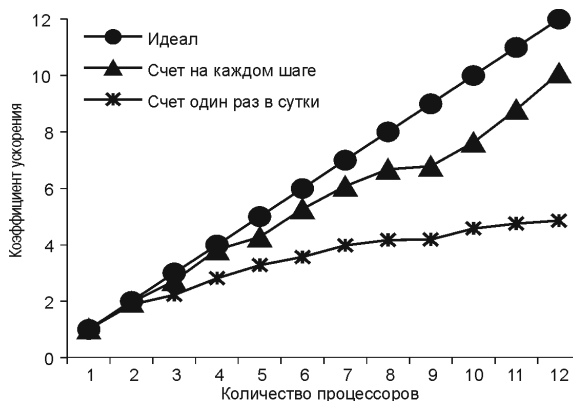


Рис. 7. Ускорение счета модели T169L31 при вызове радиационного блока на каждом временном шаге и 1 раз в сутки.

ма для ансамблевого прогноза представляется весьма перспективным. Заметим, что новый параллельный алгоритм позволяет получить детерминированный прогноз на средние и краткие сроки по модели с высоким разрешением за время, требуемое для проведения оперативного численного прогноза. Так, время счета модели T339L31 на сутки составляет около 18 мин на 32 процессорах. Причем, это время получено при вызове радиационного блока каждый час, чего достаточно для корректного описания суточного хода радиации. Это даже меньше, чем тратится в настоящее время для расчетов оперативного варианта T85L31, в котором радиационные расчеты выполняются лишь 2 раза в сутки, а суточный ход учтен при помощи приближенной методики.

Заключение

Разработана новая версия программного обеспечения спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России, способная функционировать на многопроцессорных ЭВМ. Для этого использована технология MPI и выполнена одномерная декомпозиция области расчетов. Дополнительное привлечение средств SMMEM позволило сократить время на межпроцессорные взаимодействия.

При помощи полученного программного обеспечения можно выполнять расчеты на любом числе процессоров, не превышающем половину числа гауссовых широт, используемых моделью.

Программное обеспечение протестировано на многопроцессорных ЭВМ с разделяемой памятью, основанных на процессорах Intel Itanium. Время счета модели T339L31 на сутки на 32 процессорах около 18 мин при проведении расчетов эффектов радиации каждый час, что позволяет после доработки и соответствующих испытаний рассматривать модель T339L31 как возможную замену нынешней оперативной версии T85L31.

Авторы выражают благодарность компаниям Intel Inc. и Silicon Graphics Inc. за предоставленную возможность проведения расчетов на многопроцессорных ЭВМ, ГВЦ Росгидромета (В. А. Анцыповичу, С. В. Лубову и В. Д. Жупанову) за поддержку работы, И. Е. Захарову за консультации и выполнение расчетов, Н. Местеру, П. Е. Шелепугину, А. Семину, А. И. Нарайкину за консультации и оптимизацию для процессоров Intel, В. И. Цветкову за проведение расчетов.

Работа поддержана грантами РФФИ 04-05-64530-а, 05-05-64575-а, 07-05-13607-офи_ц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахова Е. Д. Исследовательская технология численного среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России // Тр. ГМЦ РФ. — 2002. — Вып. 338. — С. 107—118.
2. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. — СПб.: БХВ-Петербург, 2002. — 609 с.
3. Корнеев В. Д. Параллельное программирование в MPI. — Москва—Ижевск.: Изд. Института компьютерных исследований. — 2003. — 304 с.
4. Курбаткин Г. П., Астахова Е. Д., Крупчатников В. Н., Рябинин В. Э. и др. Модель среднесрочного прогноза погоды // ДАН СССР. — 1987. — № 194, вып. 2. — С. 291—297.
5. Курбаткин Г. П., Дегтярев А. И., Фролов А. В. Спектральная модель атмосферы, инициализация и база данных для численного прогноза погоды. — СПб.: Гидрометеиздат, 1994. — 184 с.
6. Оленев Н. Н. Основы параллельного программирования в системе MPI. — М.: Изд. Вычислительного центра им. А. А. Дородницына РАН, 2005. — 80 с.
7. Розинкина И. А., Астахова Е. Д., Фролов А. В., Цветков В. И. и др. Особенности реализации новой версии спектральной модели Гидрометцентра России T85L31 и технологии выпуска глобальных кратко- и среднесрочных гидродинамических прогнозов // Тр. ГМЦ РФ. — 2002. — Вып. 338. — С. 84—98.
8. Фролов А. В., Астахова Е. Д., Розинкина И. А., Цветков В. И. и др. О практической предсказуемости метеорологических величин с помощью глобальной спектральной модели Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. — 2004. — № 5. — С. 5—20.