

УДК 551.509.33; 681

## ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ В СПЕКТРАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ГИДРОМЕТЦЕНТРА РОССИИ

Е. Д. Астахова<sup>1</sup>, Ю. В. Алферов<sup>1</sup>

Точность численного прогноза погоды существенным образом зависит от пространственного разрешения применяемой для этого модели атмосферы, а также от сложности и подробности использованных параметризаций процессов подсеточного масштаба (т.е. процессов, характерный масштаб которых меньше шага пространственной сетки). Возможности увеличения разрешения модели и уточнения ее параметризаций определяются как имеющейся вычислительной техникой, так и оптимальностью алгоритмов и программной реализации. С целью увеличения точности прогноза погоды созданы тестовые версии спектральной модели атмосферы с повышенным пространственным разрешением. Для этих версий проведены работы по оптимизации и распараллеливанию вычислений с помощью MPI. Использована одномерная декомпозиция области расчетов по широте в физическом пространстве и по спектральным числам в спектральном пространстве. Проведены тестовые расчеты по параллельной версии спектральной модели (в разных ее вариантах) и получены оценки ускорения счета на разном числе процессоров на нескольких вычислительных платформах. Рассмотрены различные способы передачи данных между процессорами и оценена их эффективность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (коды проектов 04-05-64530а и 05-05-64575а). Статья подготовлена по материалам доклада авторов на международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ-2007; <http://agora.guru.ru/pavt>).

**Ключевые слова:** глобальная модель атмосферы, численный прогноз погоды, параллельные вычисления, технология MPI, декомпозиция области расчетов.

**1. Введение.** Прогноз погоды является одной из наиболее актуальных задач метеорологии, решение которых имеет большое значение для экономики. Численный прогноз погоды (ЧПП) основан на использовании так называемой модели атмосферы, которая 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 как точностью исходной информации о состоянии атмосферы и подстилающей поверхности, так и точностью используемой модели атмосферы — ее пространственно-временным разрешением, точностью численных схем и адекватностью параметризаций физических процессов подсеточного масштаба.

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.

Спецификой задачи ЧПП является необходимость получения конечного продукта (прогностических полей) 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: с метеорологических станций, кораблей, самолетов, спутников и т.п.; с другой стороны, потребитель должен получить прогноз в строго определенный момент времени. Обычно на численное интегрирование модели атмосферы отводится не более 20 минут на сутки прогноза.

<sup>1</sup> Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Б. Предтеченский пер., 11-13, 123242, Москва; e-mail: [alferov@mecom.ru](mailto:alferov@mecom.ru)

Из вышесказанного понятно, что выбор модели атмосферы для численного прогноза погоды всегда основан на компромиссе между ее точностью (а значит, сложностью) и временем, необходимым для ее интегрирования за требуемые сроки. Таким образом, оптимизация программного комплекса модели атмосферы с целью сокращения времени ее счета является чрезвычайно важной задачей, 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 около 50) по начальным данным, возмущенным в пределах ошибки наблюдений.

Современная тенденция в развитии вычислительной техники — это не только увеличение производительности одного процессора, но и создание многопроцессорных систем различных архитектур. Поэтому задачу оптимизации программного кода можно рассматривать в двух аспектах: уменьшение времени счета на одном процессоре и организацию параллельного счета отдельных частей программы на нескольких процессорах [2].

В данной работе рассмотрены способы и результаты решения задачи оптимизации программного комплекса спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России [4, 5, 9].

**2. 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 бароклинической атмосферы, записанных в сферической сигма-системе координат, а именно уравнений движения

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} + \dot{\sigma} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \sigma} + f \cdot \mathbf{k} \times \mathbf{v} + \nabla \Phi + RT_v \nabla \ln p = P_H, \quad (1)$$

гидростатики

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT_v}{\sigma}, \quad (2)$$

неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right) + \nabla \cdot \left( \mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \dot{\sigma} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right) = 0, \quad (3)$$

притока тепла

$$\frac{\partial T'}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} T') - (\nabla \cdot \mathbf{v}) T' + \dot{\sigma} \frac{\partial T_v}{\partial \sigma} - \frac{\kappa \omega}{p} T_v = P_T, \quad (4)$$

переноса влаги

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} q) - (\nabla \cdot \mathbf{v}) q + \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} = P_q, \quad (5)$$

а также диагностических соотношений для вертикальных составляющих скорости ветра в  $p$ - и  $\sigma$ -системах координат

$$\frac{\omega}{p} = \mathbf{v} \cdot \nabla \ln p_s - \frac{1}{\sigma} \int_0^\sigma (\nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \ln p_s) d\sigma, \quad (6)$$

$$\dot{\sigma} = \sigma \int_0^1 (\nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \ln p_s) d\sigma - \int_0^\sigma (\nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \ln p_s) d\sigma, \quad (7)$$

где  $\mathbf{v} = \{v_\lambda; v_\theta\}$  — вектор горизонтальной скорости ветра;  $t$  — время;  $R$  — универсальная газовая постоянная сухого воздуха, 287,05 Дж/кг;  $p$  — давление,  $\sigma = p/p_0$  — вертикальная координата модели ( $p_0$  — приземное давление);  $\dot{\sigma}$  — вертикальная скорость в  $\sigma$ -системе координат;  $f$  — параметр Кориолиса;  $\mathbf{k}$  — вертикальный единичный вектор;  $\Phi$  — геопотенциал;  $T_v$  — виртуальная температура воздуха;  $T'$  — отклонение температуры  $T$  от стандартного вертикального профиля  $\hat{T}(\sigma)$ ;  $\omega = dp/dt$  вертикальная скорость в  $p$ -системе координат;  $q$  — массовая доля водяного пара.

Переменные  $P_H$ ,  $P_T$  и  $P_q$  в правых частях уравнений (1), (4), (5) характеризуют воздействие на исследуемые движения неадиабатических процессов, а также динамических и физических явлений, имеющих характерные пространственные масштабы много меньшие, чем шаг сетки (процессов подсеточного масштаба).

Пусть  $[0, t_F]$  — интервал прогноза;  $G$  — слой атмосферы, заключенный между поверхностью Земли ( $\sigma = 1$ ) и верхним уровнем ( $\sigma = 0$ );  $\lambda$  — долгота;  $\theta$  — широта;  $\mu = \cos \theta$ . Задача численного прогноза погоды решается в области  $G_t = \{G \times [0, t_F]\}$ , где  $G = \{0 \leq \lambda \leq 2\pi; -1 \leq \mu \leq 1; 0 \leq \sigma \leq 1\}$ .

На поверхностях  $\sigma = 0$  и  $\sigma = 1$  ставятся кинематические условия  $\dot{\sigma} = 0$ . Кроме того, на верхней границе потоки тепла, влаги и импульса полагаются нулевыми.

Сигма-уровни расположены нерегулярно по высоте, их положение определяется с помощью процедуры, основанной на вычислении корней соответствующего полинома Чебышева–Лагерра [8].

Исходными данными для модели являются поля температуры, влажности, составляющих скорости ветра, приземного давления, климатические данные на поверхности земли (температура и влажность почвы, высота снежного покрова, шероховатость, альbedo, орография) и маска суша–море. Прогностическими переменными в модели являются температура, вихрь и дивергенция скорости, приземное давление.

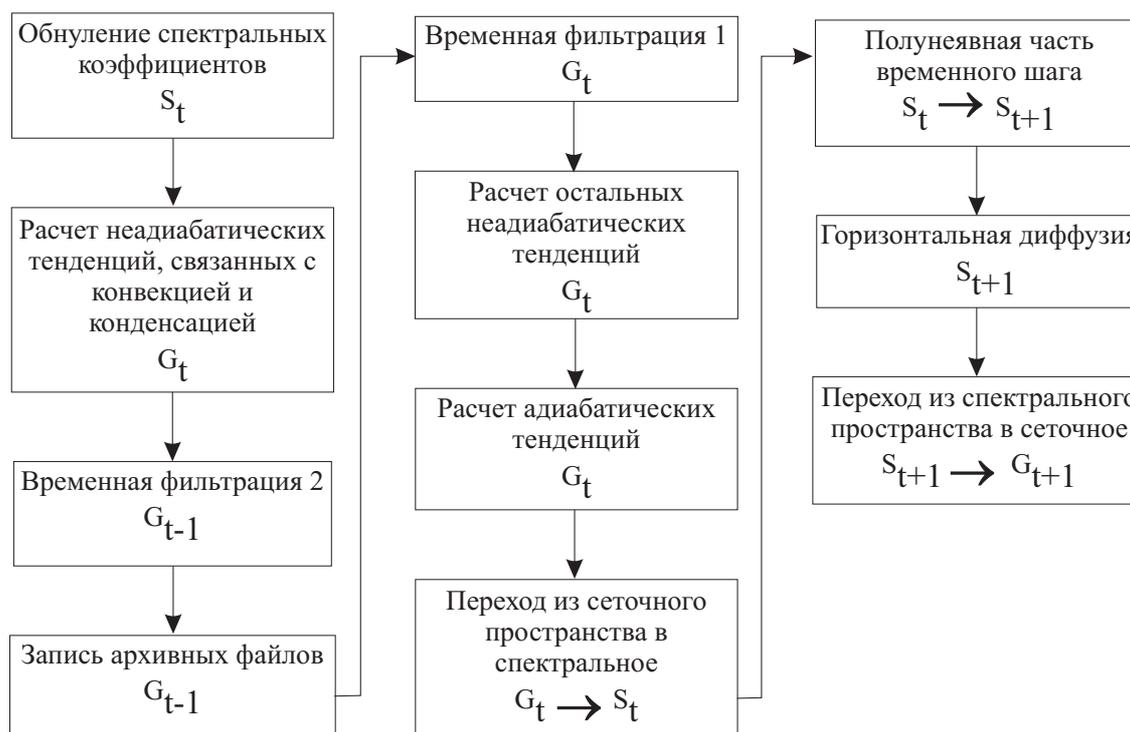


Рис. 1. Структура временного шага модели

Система (1)–(7) решается с помощью спектрально-сеточного метода. Дискретизация по горизонтали осуществляется с помощью спектрального метода, по вертикали используется конечно-разностная дискретизация. Основные переменные модели и высота земной поверхности аппроксимируются усеченными сходящимися рядами, построенными на базисе ортогональных функций, определенных во всей области решения. Часть вычислений проводится в спектральном пространстве (т.е. со спектральными коэффициентами), а часть, включая вычисление нелинейных динамических слагаемых основных прогностических уравнений и эффектов физических процессов подсеточного масштаба, — в сеточном пространстве (в узлах сетки). В модели используется так называемая гауссова сетка, регулярная по долготе и слабо нерегулярная по широте. 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 с помощью диффузионной линейной схемы четвертого порядка. Применяется полунедневная схема интегрирования по времени. Структура временного шага модели условно изображена на рис. 1. На рисунке буквы  $G$  или  $S$  показывают, что на данном этапе вычисления проводятся в сеточном или спектральном пространстве. Запись  $G \rightarrow S$  (или  $S \rightarrow G$ ) 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  $t-1$ ,  $t$ ,  $t+1$ .

Программное обеспечение модели написано на Фортране; в целом это 128 программ, или около

Таблица 1

Характеристики различных версий спектральной модели атмосферы  
Гидрометцентра России

Параметры	Оперативный вариант (Т85L31)	Исследовательский вариант 1 (Т169L31)	Исследовательский вариант 2 (Т339L31)
Спектральное разрешение	85 гармоник	169 гармоник	339 гармоник
Пространственное разрешение	150 км	75 км	37 км
Шаг по времени	900 с	900 с	450 с
Число уровней по вертикали	31	31	31

20 000 строк.

Программы модели реализованы так, что можно менять разрешение модели без существенного изменения кода. Для работ по оптимизации использовались версии Т169L31 и Т339L31. В отличие от оперативной версии Т85L31, они в настоящее время эксплуатируются в исследовательском режиме. Сравнительные характеристики всех трех перечисленных версий модели приведены в табл. 1.

**3. Оптимизация программного кода на одном процессоре.** Оптимизация программного кода на одном процессоре была 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 MKL (Intel Math Kernel Library);
- переписывание отдельных фрагментов программы.

Результаты представлены в табл. 2. 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 году применение аналогичной директивы, обозначающей в этом случае отсутствие векторной зависимости 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 Т40L15 [1]. Для сравнения результаты по оптимизации программ модели для векторной ЭВМ CRAY YMP/8E, на которой оперативная технология среднесрочного и краткосрочного прогноза функционировала с 1999 г. по 2005 г., приведены в табл. 2. Для суперскалярных ЭВМ, основанных на процессорах XEON и Itanium, удалось добиться общего уменьшения времени счета Т169L31 в 9,6 раз по сравнению с первоначальным вариантом. При анализе таблицы следует также обратить внимание на важность оптимизации программ быстрого преобразования Фурье (БПФ). Использование программы БПФ из CRAY Scientific Library и программы БПФ, специально разработанной компанией Intel, дало ускорение счета почти в 2 раза на ЭВМ CRAY и в 1,5 раза на ЭВМ Tiger.

**4. Методика распараллеливания программного кода.** Основной задачей при оптимизации программного комплекса спектральной модели атмосферы являлось создание варианта, способного функционировать с одновременным использованием нескольких процессоров на многопроцессорной ЭВМ. Для этого решено было использовать технологию MPI (Message Passing Interface) [3, 6]. Эта технология позволяет выполнять параллельные вычисления на многопроцессорных системах как с памятью, разделяемой между процессорами, — SMP (Symmetric Multiprocessing) машины, — так и с распределенной памятью.

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

Таблица 2

Время интегрирования спектральной модели атмосферы на сутки на одном процессоре.  
Частота вызова радиационного блока — один 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	9,6
Cray YMP/8E	T40L15, Полусфера	Отсутствует	10,40	1
		+Векторизация**	2,42	4,43
		+CRAY Scientific Library	0,93	11,1
* Конвейеризация циклов осуществлялась путем введения в текст директивы компилятора CDIR\$ IVDEP. Кроме того, использовались другие директивы, а часть текстов была переписана				
** Векторизация осуществлялась 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				

Вычисления на временном шаге модели проводятся в два этапа. Сначала рассчитывается вклад в тенденции прогностических переменных модели от нелинейных слагаемых и параметризаций процессов подсеточного масштаба. Вычисления проводятся в основном на сетке, а их результат с помощью преобразований Фурье (используется быстрое преобразование Фурье) и Лежандра переводится в пространство спектральных коэффициентов. В этой части программы мы использовали одномерную декомпозицию области, при которой каждый процессор обрабатывал определенное число широт. Единственным ограничением при “раздаче” широт процессорам явилось требование парности северной и южной широты, связанное с тем, что некоторые вычисления для северной широты используются в расчетах для симметричной ей относительно экватора южной широты. Таким образом, каждый процессор может обрабатывать, как минимум, две широты; максимально возможное число процессоров, используемых для вычислений, определяется как половина числа модельных широт. Используемая в сеточном пространстве декомпозиция представлена на рис. 2, из которого видно, что каждый процесс выполняет вычисления для двух одинаковых широтных зон, расположенных симметрично относительно экватора. Заметим, что полюса не включены в расчетную сетку модели.

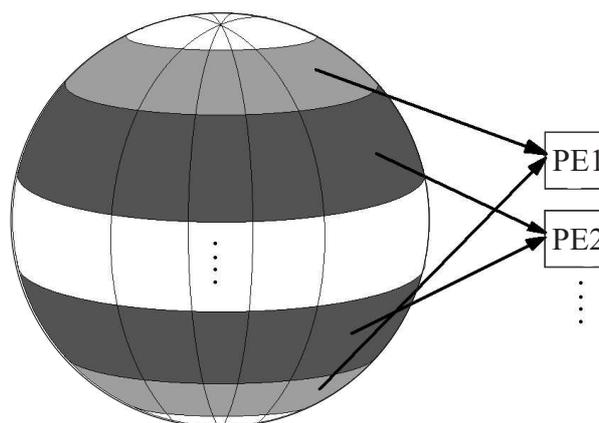


Рис. 2. Декомпозиция области вычислений в сеточном пространстве; PE — процессорный элемент

Разработанная версия программного кода основана на динамическом распределении памяти в зависимости от числа используемых процессоров. При запуске  $N$  процессов MPI каждый процесс считывает свою долю исходной информации о состоянии атмосферы и начинает проводить вычисления для своей порции широт. После расчетов эффектов физических процессов подсеточного масштаба и вычисления нелинейных динамических слагаемых 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 с помощью стандартной программы MPI\_ALLREDUCE. Массив спектральных коэффициентов достаточно большой (его размер более 27 Мбайт 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.

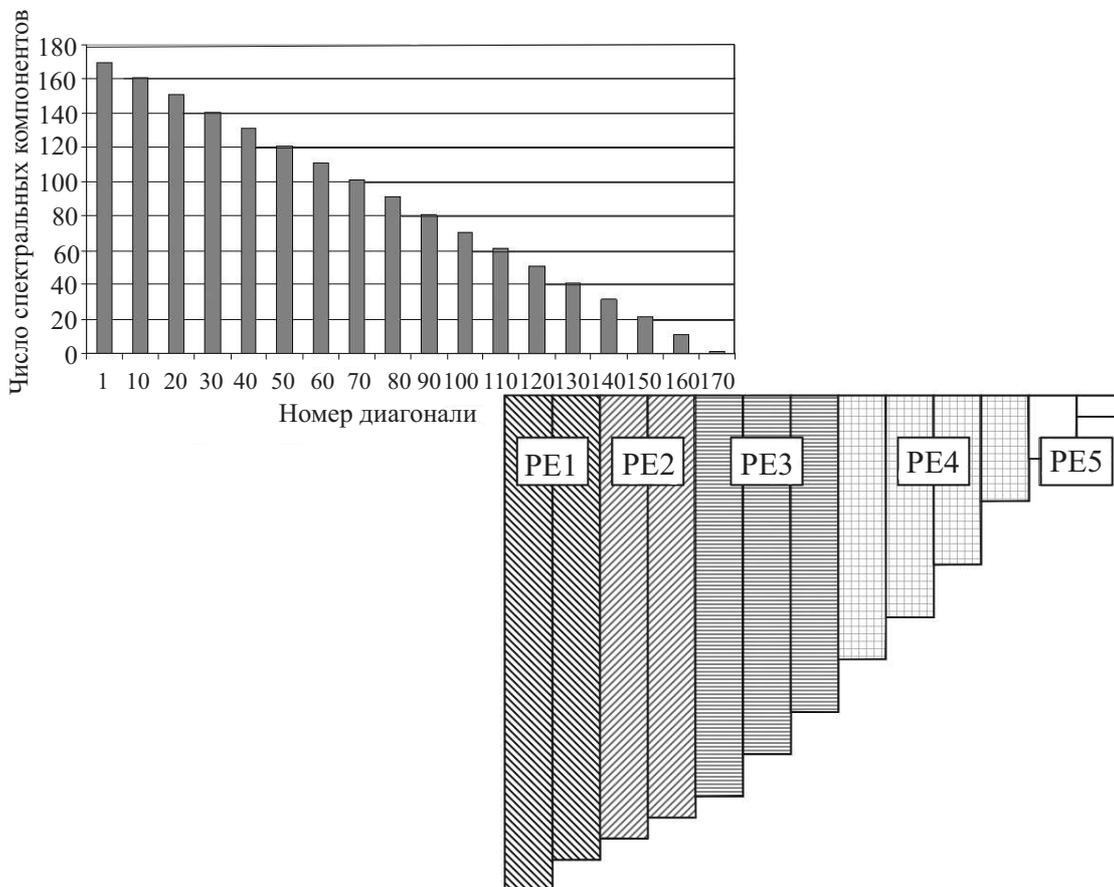


Рис. 3. Декомпозиция области вычислений в спектральном пространстве

Вторая часть вычислений на временном шаге модели осуществляется в пространстве спектральных коэффициентов. На этом этапе решается уравнение Гельмгольца и вычисляется полуневяная часть временных тенденций. В этой части программы была использована также одномерная декомпозиция, но по спектральным числам. Так как в модели используется треугольное усечение спектральных рядов, то объемы вычислений, производимых для различных спектральных коэффициентов, оказываются различными. Поэтому приходится перераспределять загрузку процессоров для достижения баланса. Декомпозиция, использованная в пространстве спектральных коэффициентов, представлена на рис. 3. Заметим, что распараллеливание в этой части программного кода не накладывает дополнительных ограничений 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 выбирается  $N_G$  всегда близким к минимальному значению, получаемому из этой формулы. Так,  $N_G=512$  для T339L31, а для T169L31 —  $N_G=256$ . Однако, к сожалению, здесь мы опять столкнулись с необходимостью больших обменов, что замедляет быстродействие программы.

Вклад горизонтальной диффузии рассчитывается всеми процессорами одновременно (т.е. этот кусок — последовательный), что, согласно закону Амдала, накладывает ограничения на уменьшение времени счета при увеличении числа используемых процессоров и является еще одним ограничением в нашей задаче. В конце временного шага производится восстановление сеточных функций для следующего момента времени с помощью обратного быстрого преобразования Фурье и преобразования Лежандра на основе спектральных коэффициентов. В этой части кода используется декомпозиция, аналогичная представленной на рис. 2.

Таким образом, был 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,

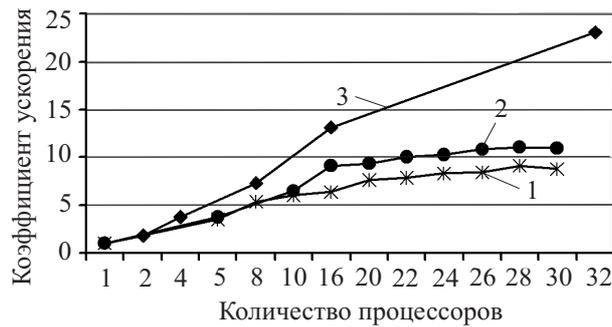


Рис. 4. Ускорение счета модели T339L31 при увеличении числа используемых процессоров. По оси ординат отложено отношение времени численного интегрирования модели на сутки на одном и на нескольких процессорах.  
MPI (SGI) — (1), MPI+SHMEM (SGI) — (2),  
MPI (IBM) — (3)

во-первых, из-за больших обменов данными между процессорами при расчете спектральных коэффициентов и, во-вторых, из-за наличия последовательного куска в итоговом коде. В следующем разделе будут показаны результаты и обсуждены возможности преодоления указанных ограничений.

**5. Анализ результатов.** Разработанный параллельный алгоритм был протестирован на ЭВМ с разделяемой памятью. Расчеты выполнялись на 4-, 12-, 32- и 64-процессорных SMP компьютерах, основанных на процессорах Itanium. Кроме того, ряд расчетов был выполнен на процессорах p575 фирмы IBM. Возможность проведения расчетов была любезно предоставлена нам компаниями Intel, Silicon Graphics и IBM.

Рис. 4 демонстрирует уменьшение времени счета модели T339L31 при увеличении числа используемых процессоров. По оси ординат отложено отношение времени численного интегрирования модели на сутки на одном и на нескольких процессорах, по оси абсцисс — число процессоров. Видно, что при числе процессоров менее 20 кривая растет достаточно быстро. Увеличение количества используемых процессоров свыше 30 в случае использования компьютеров SGI приводит лишь к небольшому ускорению программы, поскольку время, требуемое на обмены, оказывается сопоставимым со временем, затраченным на реальные вычисления. Ситуация оказывается лучше в случае использования процессоров фирмы IBM. Межпроцессорные обмены на ЭВМ использованной нами архитектуры (двухядерные процессоры p575, Federation switch, DDR2 память) достаточно быстрые, что позволило получить масштабируемость программы до 256 процессоров (ускорение составило примерно 63).

Была сделана попытка уменьшить время, затрачиваемое на обмены на ЭВМ с общей памятью, путем использования библиотек SHMEM, разработанных Silicon Graphics Inc. для своих SMP-машин. Средства SHMEM комбинируются со средствами MPI. Поэтому мы смогли перейти к использованию соответствующей программы из библиотек SHMEM только вместо MPI\_ALLREDUCE при сложении массивов (основной из которых — массив спектральных коэффициентов), не отказываясь от MPI-технологии в целом. Оказалось, что такое использование SHMEM дает возможность 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 показано сопоставление времени, используемого моделью на коммуникации (т.е. на пе-

Соотношение времени счета модели и коммуникаций при различных механизмах передачи данных для 32 процессоров

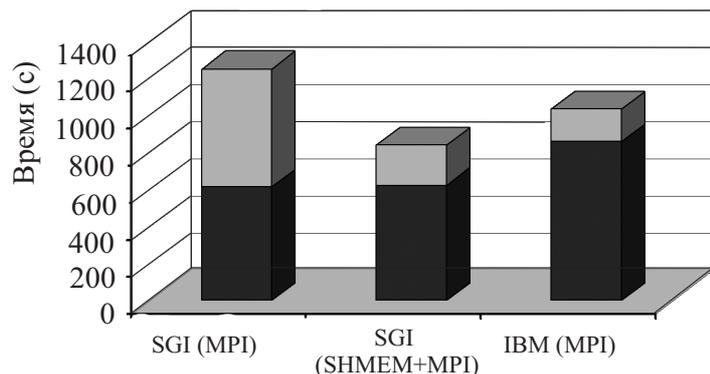


Рис. 5. Соотношение времени, используемого моделью на коммуникации (т.е. на передачу информации от процессора к процессору) и на вычисления в случае применения только MPI и комбинированного применения SHMEM и MPI.

■ — вычисления, □ — коммуникации

редачу информации от процессора к процессору) и на вычисления в случае применения только MPI и комбинированного применения SHMEM и MPI для компьютеров SGI. Видно, что во втором случае время, затрачиваемое на коммуникации, оказывается существенно меньше. На рисунке также представлены аналогичные характеристики, полученные при использовании MPI на IBM. Видно, что, несмотря на явное преимущество в скорости обмена, общее время счета модели на 32 процессорах p575 оказывается несколько бóльшим.

Заметим, что рассмотренные в наших тестах версии модели T169L31 и T339L31 являются исследовательскими вариантами. Необходимым этапом в дальнейшем развитии модели атмосферы высокого разрешения является усовершенствование параметризаций процессов подсеточного масштаба. Заметим также, что расчет эффектов подсеточного масштаба (так называемая “физика” модели) выполняется в той части программы, которая успешно распараллеливается. Это дает возможность сильно “утяжелить” 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. 6, на котором показано ускорение модели T169L31 при увеличении объема радиационных расчетов за счет изменения частоты вызова радиационного блока с одного раза в сутки до одного раза в 15 минут. Видно, что при увеличении объема вычислений в параллельной области программы ускорение становится близким к максимально возможному. Исходя из вышесказанного, мы надеемся, что новый, доработанный вариант спектральной модели (с более сложной “физикой”) покажет лучшее ускорение, чем представленное на рис. 4.

Заметим, что новый параллельный алгоритм позволяет получить прогноз на средние и краткие сроки (от двух до десяти дней) за время, требуемое для проведения оперативного численного прогноза. Так, версия T339L31 считается на сутки около 18 мин на 32 процессорах, причем это время получено при вызове радиационного блока каждый час, что 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 дважды в сутки, а суточный ход учтен с помощью приближенной методики.

**6. Заключение.** Разработана новая версия программного обеспечения спектральной модели атмосферы Гидрометцентра России, способная функционировать на многопроцессорных ЭВМ. Для этого использована технология MPI и выполнены одномерные декомпозиции области расчетов. Дополнительное привлечение средств SHMEM позволило сократить время на межпроцессорные взаимодействия на ЭВМ с общей памятью. С помощью полученного программного обеспечения можно выполнять расчеты на любом количестве процессоров, не превышающем половину числа гауссовых широт, используемых моделью. Программное обеспечение протестировано на многопроцессорных ЭВМ с разделяемой памятью, основанных на процессорах Intel Itanium, и на кластере IBM, основанном на процессорах p575. Время счета модели T339L31 на сутки на 32 процессорах составляло около 18 минут 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., Silicon Graphics Inc., IBM и КРОК за поддержку работы и предоставленную возможность проведения расчетов на многопроцессорных ЭВМ, Главному вычислительному центру Росгидромета (В. А. Анцыповичу, С. В. Лубову, В. Д. Жупанову) за содействие проведению вычислений, 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 и В. И. Цветкову за помощь в проведении расчетов.

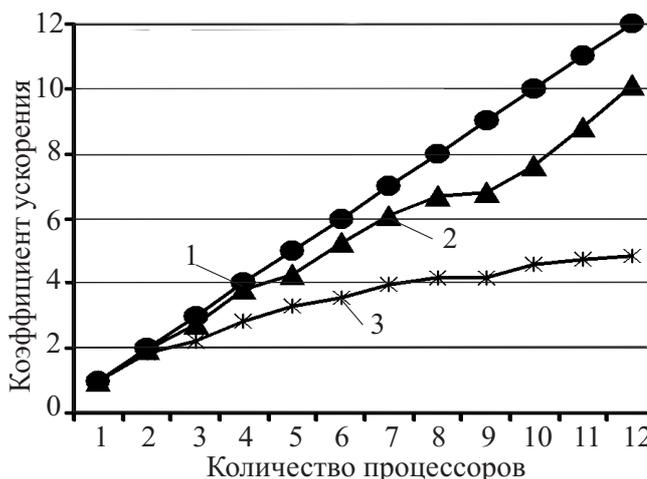


Рис. 6. Ускорение счета модели T169L31 при вызове радиационного блока на каждом временном шаге (2) и раз в сутки (3) в сравнении с идеальным ускорением (1)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Астахова Е.Д.* Исследовательская технология численного среднесрочного прогноза погоды в Гидрометцентре России // Тр. Гидрометцентра России. Вып. 338. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 107–118.
2. *Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.* Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
3. *Корнеев В.Д.* Параллельное программирование в MPI. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.
4. *Курбаткин Г.П., Астахова Е.Д., Крупчатников В.Н., Рабинин В.Э., Сальник В.А., Смирнов В.Д., Фролов А.В.* Модель среднесрочного прогноза погоды // Докл. АН СССР. 1987. **294**, № 2. 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.
6. *Оленев Н.Н.* Основы параллельного программирования в системе MPI. М.: Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, 2005.
7. *Розинкина И.А., Астахова Е.Д., Фролов А.В., Цветков В.И., Рузанова И.В., Пономарева Т.Я.* Особенности реализации новой версии спектральной модели Гидрометцентра России Т85L31 и технологии выпуска глобальных кратко- и среднесрочных гидродинамических прогнозов // Тр. Гидрометцентра России. Вып. 338. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 84–98.
8. *Фролов А.В., Вазник А.И., Цветков В.И., Астахова Е.Д.* Глобальная спектральная модель атмосферы с высоким разрешением по вертикали // Метеорология и гидрология. 2000. № 2. 10–21.
9. *Фролов А.В., Астахова Е.Д., Розинкина И.А., Цветков В.И., Пономарева Т.Я., Рузанова И.В.* О практической предсказуемости метеорологических величин с помощью глобальной спектральной модели Гидрометцентра России // Метеорология и гидрология. 2004. № 5. 5–20.

Поступила в редакцию  
31.03.2007

---