

УДК 551.583.2, 551.50

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ КЛИМАТА И ПРОГНОЗА ПОГОДЫ

Е. М. Володин¹, М. А. Толстых¹

Представлены результаты массовых расчетов на параллельных вычислительных системах для задач моделирования изменений климата XX–XXII столетий и численного прогноза погоды. Рассматриваются результаты численных экспериментов с совместной моделью общей циркуляции атмосферы и океана ИВМ РАН по воспроизведению изменений климата двадцатого столетия и моделированию возможных изменений климата в XXI–XXII столетиях. Представлены особенности технологии и приводятся результаты использования параллельного программного комплекса глобальной полулагранжевой модели прогноза погоды. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (коды проектов 05–07–90355, 04–05–64638, 06–05–64331). Статья подготовлена по материалам доклада авторов на международной научной конференции “Параллельные вычислительные технологии” (ПаВТ-2007; <http://agora.guru.ru/pavt>).

1. Введение. Моделирование изменений климата, так же как и численный прогноз погоды, является задачей, требующей огромных вычислительных ресурсов. Моделирование климата требует многократных численных экспериментов с моделью сравнительно невысокого пространственного разрешения, каждый из которых имеет продолжительность порядка столетия модельного времени. Прогноз погоды же требует максимально достижимой детализации расчетов по пространству, при этом оперативные требования налагают ограничения на время расчета прогноза (как правило, не более 20 мин астрономического времени для прогноза на 24 часа). Таким образом, обе эти задачи требуют применения параллельных вычислений для ускорения расчетов. В данной работе представлены результаты применения параллельных программных комплексов моделей климата и прогноза погоды, разработанных в Институте вычислительной математики (ИВМ) РАН.

2. Моделирование изменений климата XX–XXII столетий с помощью параллельной версии совместной модели циркуляции атмосферы и океана.

2.1. Параллельная версия модели. Совместные модели общей циркуляции атмосферы и океана являются одним из наиболее мощных инструментов в исследовании климата, его прошлых и возможных будущих изменений. Современная тенденция развития таких моделей состоит во все более детальном учете всех физических механизмов, влияющих на климат. Созданная в ИВМ РАН совместная модель общей циркуляции атмосферы и океана имеет в атмосферном блоке разрешение 5×4 градуса по долготе и широте и 21 уровень по вертикали. В океане разрешение составляет $2,5 \times 2$ градуса по долготе и широте и 33 уровня по вертикали. Основным отличием рассматриваемой здесь последней версии модели от описанной в [1, 2] является включение интерактивной модели морского льда вместо заданного климатического распределения [3]. Кроме этого, введен учет речного стока с континентов при расчете солёности в океане. Включение этих блоков привело к необходимости введения коррекции потока пресной воды на поверхности в Норвежском, Гренландском, Баренцевом и Карском морях. В остальных районах какой-либо коррекции потока пресной воды, а также потока тепла и импульса при стыковке атмосферного и океанского блоков не используется. Кроме того, расчет динамики океана происходит на сетке S вместо сетки V , в атмосферном блоке более точно настроены параметризации облачности и конвекции.

В конечно-разностной модели общей циркуляции атмосферы (ОЦА) используется полунеевная схема интегрирования по времени и прямой метод решения уравнения Гельмгольца, которое возникает при такой дискретизации по времени. Применяется смещенная сетка типа S по горизонтали. Кроме того, для большинства вычислений в данной точке сетки ijk необходимы данные из части расчетной области $[i-1 : i+2] \times [j-1 : j+2] \times [1 : k]$. Расчетная область разбивалась по долготе и широте на подобласти, каждая из которых обрабатывалась отдельным процессором. Однако для решения уравнения Гельмгольца, которое решается в пространстве коэффициентов Фурье по долготе прогонкой по широте параллельно

¹ Институт вычислительной математики РАН (ИВМ РАН), ул. Губкина, д. 8, 119333, Москва; e-mail: volodin@inm.ras.ru, tolstykh@inm.ras.ru

для каждого коэффициента, необходимо выполнить транспозицию данных. Подробнее распараллеливание динамического блока модели ОЦА описано в [4]. На основе распараллеленной версии модели ОЦА была создана параллельная версия совместной модели атмосферы и океана. Для этого в параллельную версию модели ОЦА была включена модель океана, которая считалась на одном процессоре. Для использованного разрешения при счете на одном процессоре время, затрачиваемое на расчет океана, составляет около 5% от времени счета всей модели. Для счета модели атмосферы в параллельном режиме при выбранном разрешении оптимальное количество процессоров составляет от 8 до 16. Для 8 процессоров ускорение составляет около 5,5. Следовательно, если считать совместную модель атмосферы и океана на 8 процессорах, причем модель океана считать на одном, то время расчета океана составит не более 25% от времени счета всей модели. Поэтому использование одного процессора для модели океана можно считать оправданным. Ускорение, полученное для всей совместной модели на 8 процессорах, составляет около 3,5. Совместная модель реализована на 32-процессорном кластере на процессорах Intel Itanium2, находящемся в ИВМ РАН. За сутки реального времени модель считает на 10 лет.

С этой моделью были выполнены численные эксперименты по моделированию климата и его изменений в XX–XXII столетиях. Эти эксперименты проводятся в рамках международного сравнения моделей климата, результаты которого используются при написании четвертого отчета IPCC.

Сначала были проведены эксперименты по моделированию климата XX столетия с наблюдавшимся временным ходом всех внешних воздействий (эксперимент XX), а также расчеты по моделированию изменений климата в XXI–XXII столетиях согласно сценариям A1B и A2, и, кроме того, контрольный эксперимент, в котором все концентрации газов фиксированы и соответствуют 1871 г. (эксперимент CNT). Затем был проведен эксперимент по моделированию изменения климата согласно сценарию B1. Это самый умеренный из трех рассматриваемых сценариев, в нем концентрация CO_2 к концу XXI столетия составляет 570 промилле. Кроме того, проведен эксперимент по моделированию климата XXI столетия в предположении, что концентрации всех газов равны наблюдавшимся в 2000 г. (эксперимент XXI), и эксперимент, в котором содержание CO_2 увеличивается на 1% в год в течение 140 лет до учетверения, плюс 150 лет с учетверенной концентрацией CO_2 (эксперимент 4CO_2). Проведено также моделирование изменений климата XX столетия с помощью ансамбля экспериментов. Ансамбль состоял из пяти расчетов, начинавшихся с немного отличающихся друг от друга начальных состояний. Наконец, было проведено три контрольных эксперимента на отрезке 130 лет, в которых концентрация всех газов равна наблюдавшейся в 1871 г. Расчеты отличались только начальными данными. Проведение ансамблевых расчетов для моделирования климата двадцатого столетия было необходимо для того, чтобы сделать более определенные выводы о том, в какой мере наблюдаемые и модельные изменения климата в двадцатом столетии являются случайными и обусловленными внутренней изменчивостью климатической системы, а в какой определяются изменением внешних воздействий. Таким образом, проведены расчеты более чем на 1500 модельных лет, что требует не менее пяти месяцев реального времени на 8 процессорах.

2.2. Результаты численных экспериментов. Чувствительность модели климата к увеличению содержания парниковых газов принято характеризовать прежде всего следующими числами: повышением глобально осредненной температуры приземного воздуха при увеличении содержания CO_2 на 1% в год до удвоения, а также равновесным увеличением приземной температуры при удвоении содержания CO_2 в модели с 50-метровым однородным океаном. В модели ИВМ РАН, по данным эксперимента, с увеличением содержания CO_2 на 1% в год потепление при удвоении CO_2 (годы 1961–1980) по сравнению с этими же годами контрольного эксперимента составляет 1,57 К. Это близко к среднему по всем моделям, участвовавшим в подобном эксперименте в рамках программы CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) [3, 5], для которых среднее потепление составляло 1,61 К. Разброс между моделями довольно велик. Так, минимальное потепление составляет всего 0,75 градуса, а максимальное 3,77 К. Однако эксперименты с моделями в рамках программы CMIP были проведены в основном в 2000–2001 гг.

Согласно последним данным для 12 моделей, участвовавших в таком эксперименте в 2004 г., среднее потепление составляет 1,81 К, минимальное 1,46 К, а максимальное 2,2 К (Meehl, 2005, частное сообщение). Это означает, что среднее потепление в моделях немного возросло, а разброс между моделями сильно уменьшился. Модель ИВМ дает потепление в этом эксперименте несколько меньше среднего по всем моделям. Для этих же 12 моделей известна величина равновесного потепления в модели с верхним слоем океана при удвоении содержания CO_2 . Среднее потепление составляет 2,95 К, а для разных моделей оно изменяется от 2,10 до 3,95 К. В модели ИВМ равновесное потепление составляет 2,10 К, т.е. оно наименьшее среди рассматриваемых моделей. Сравнение равновесного и неравновесного откликов модели позволяет предположить, что в модели ИВМ с полным океаном в потеплении задействован более тонкий слой океана по сравнению с другими моделями. Это уменьшает расхождение между моделью ИВМ и сред-

ним значением по всем моделям в неравновесном эксперименте. Причины того, что чувствительность к удвоению содержания CO_2 в модели ИВМ значительно меньше средней по всем моделям, анализируются в [5]. Основной причиной является увеличение при потеплении количества нижней облачности в условиях более частого образования инверсии. В этой же работе оценивается вероятная чувствительность реальной климатической системы.

По сравнению с предыдущей версией совместной модели ИВМ [1], где потепление в модели с полным океаном при росте содержания CO_2 на 1% в год составляло 1,0 К, чувствительность модели возросла более чем в 1,5 раза. Это обусловлено, прежде всего, введением интерактивной модели морского льда.

Потепление в полной модели в конце счета с удвоенным содержанием CO_2 (эксперимент 2CO_2 , годы 201–220) составляет 2,1 К по сравнению с аналогичными годами контрольного эксперимента, что совпадает с величиной равновесного потепления в модели с полным и 50-метровым океаном. Это говорит о возможности исследования равновесной чувствительности с помощью моделей с 50-метровым океаном. Потепление в конце эксперимента по учетверению CO_2 (эксперимент 4CO_2 , годы 271–290) составляет 4,1 К по сравнению с аналогичными годами контрольного эксперимента. В этом случае потепление у поверхности также можно считать практически установившимся. Сравнение с потеплением в эксперименте 2CO_2 показывает, что зависимость величины равновесного потепления от логарифма роста концентрации CO_2 почти линейная.

Рассмотрим временной ход глобально осредненной температуры воздуха у поверхности в контрольном эксперименте, а также в экспериментах, моделирующих климат XX–XXII столетий (рис. 1). Средняя температура в контрольном эксперименте составляет 12,6 К, что на 1,4 К меньше оценки по данным наблюдений [6] для 1961–1990 гг. и примерно на 0,8–1,0 градуса меньше оценки для второй половины XIX столетия, для условий которого был выполнен контрольный эксперимент. Тренд температуры в контрольном эксперименте положительный, его величина за 330 лет не превосходит 0,2 К. В эксперименте, моделирующем климат XX столетия, уже к середине XX столетия заметно потепление по сравнению с контрольным экспериментом. К концу XX столетия повышение температуры достигает 0,7 градуса, что близко к наблюдаемому потеплению, которое составляет около 0,6–0,7 градуса. В данных контрольного эксперимента не удается найти такого временного отрезка, где потепление было бы столь же велико. Из этого можно сделать вывод о том, что потепление XX столетия, вероятнее всего, обусловлено не внутренней изменчивостью системы атмосфера–океан, а внешними по отношению к ней воздействиями. Аналогичный вывод делается и по результатам других моделей, результаты которых использованы в [6].

Согласно модели, в течение XXI столетия даже при фиксировании всех воздействий на уровне 2000 г. (эксперимент XXI) за счет термической инерции океана ожидается потепление примерно на 0,6 К. Повышение температуры в экспериментах В1, А1В и А2 более заметно и достигает к концу XXII столетия по данным модели соответственно 2, 3 и 5 К по сравнению с 2000 г. Небольшое добавочное потепление в эксперименте А2 в годы 2145–2165 обусловлено изменением в эти годы шага по времени в атмосферном блоке модели.

Временной ход глобально осредненных осадков в проведенных экспериментах представлен на рис. 1 внизу. В контрольном эксперименте количество осадков составляет около 2,80 мм/сут. В эксперименте XX к 2000 году количество осадков увеличивается до 2,84 мм/сут. К концу эксперимента XXI осадки увеличиваются до 2,89 мм/сут, а к концу экспериментов В1, А1В и А2 количество осадков составляет соответственно 2,95, 2,99 и 3,10 мм/сут. Увеличение количества осадков в экспериментах, моделирующих потепление, происходит в основном пропорционально увеличению средней температуры у поверхности.

Сравним изменение температуры в конце XXI столетия по данным модели ИВМ РАН с данными других моделей из [7]. При сценарии В1 потепление в 2091–2110 гг. по отношению к 1991–2010 гг. составляет в модели ИВМ 1,7 градуса. По данным всех моделей потепление при этом сценарии составляет от 1,1 до 2,5 К (среднее значение 1,8 К). Для сценария А1В аналогичное потепление по данным модели ИВМ составляет 2,3 К, а по данным всех моделей от 1,8 до 3,8 К (среднее 2,8 К). Для сценария А2 потепление по данным модели ИВМ составляет 3,2 К, а по данным всех моделей от 2,5 до 4,7 К (среднее 3,6 градуса). Для всех трех сценариев потепление в модели ИВМ немного меньше среднего по всем моделям, что согласуется с данными эксперимента по моделированию неравновесного отклика на удвоение CO_2 . В XXII столетии, несмотря на сохранение внешних воздействий на уровне 2100 г., потепление продолжается и составляет 0,3 К для сценария В1, 0,5 К для сценария А1В и 1,5 градуса для сценария А2. Небольшие изменения температуры в XXII столетии в экспериментах А1В и особенно В1 объясняются тем, что концентрация метана, вклад которого в парниковый эффект существенен, согласно этим сценариям во второй половине XXI столетия уменьшалась. Поэтому, несмотря на рост CO_2 , к 2100 году климатическая система была не очень далека от равновесия. В то же время, в сценарии А2 происходил рост концентрации

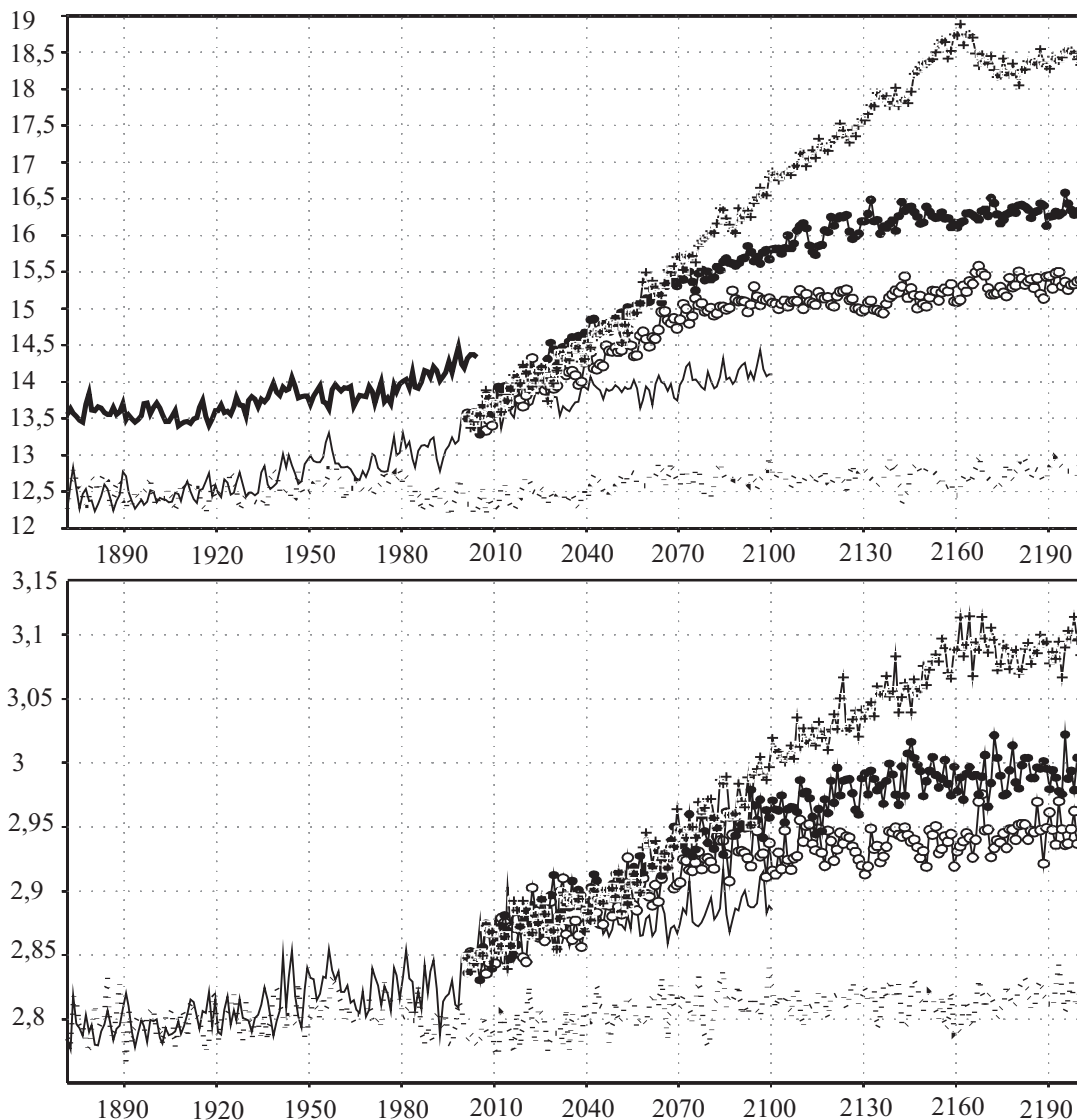


Рис. 1. Изменение интегральной температуры приземного воздуха в градусах Цельсия (вверху) и осадков в мм/сут (внизу) в контрольном эксперименте (пунктирная жирная линия), экспериментах XX и XXI (сплошная тонкая линия), B1 (открытые кружки \circ), A1B (черные кружки \bullet) и A2 (крестики $+$). Сплошной жирной линией показано наблюдаемое изменение температуры

CO_2 и метана вплоть до конца XXI столетия, поэтому к 2100 г. климатическая система была далека от равновесия, а потепление в XXII столетии при сценарии A2 было сильнее, чем для сценариев A1B и B1.

На рис. 2 изображена площадь морского льда в северном полушарии в марте и сентябре для контрольного эксперимента и экспериментов XX, B1, A1B, A2. В марте площадь льда в контрольном эксперименте остается почти постоянной и происходят лишь высокочастотные колебания; наблюдается небольшой отрицательный тренд. В экспериментах B1, A1B и A2 происходит уменьшение площади льда в марте. К концу XXII столетия уменьшение достигает соответственно 20, 30 и 50 %. В сентябре изменения площади морского льда еще сильнее. Уже к концу XX столетия площадь льда в эксперименте XX уменьшается на 20–25 % по сравнению с контрольным. В XXII столетии в эксперименте A2 льда в Арктике нет совсем, в эксперименте A1B он остается к сентябрю только в некоторые годы, а в эксперименте B1 лед остается, но его площадь составляет только 10–20 % от площади в контрольном эксперименте. Согласно данным наблюдений [8], в конце XX столетия в июле–сентябре площадь арктического морского льда была на 20–25 % меньше, чем в середине столетия, а площадь льда в январе–марте за последние полвека практически не изменилась. Это соответствует данным модели, приведенным на рис. 2. В Антарктике площадь льда

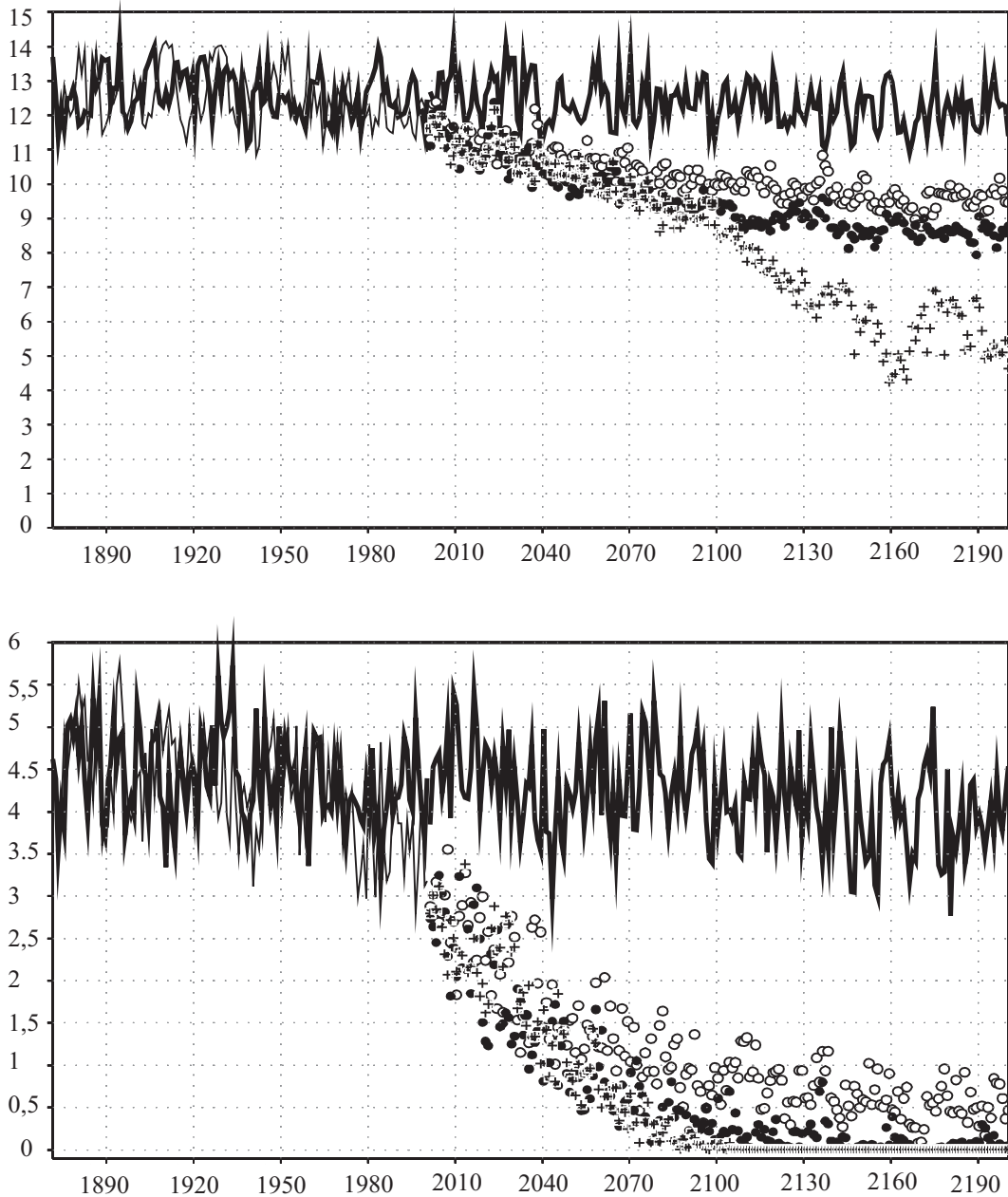


Рис. 2. Площадь морского льда в северном полушарии в млн кв. км в марте (вверху) и сентябре (внизу) по данным контрольного эксперимента (жирная линия), эксперимента XX (тонкая линия), экспериментов B1 (открытые кружки ○), A1B (черные кружки ●), A2 (крестики +)

уменьшается не так сильно, как в Арктике (не показано).

По данным экспериментов XX, XXI, B1, A1B и A2 вычислен отклик изменения уровня моря на изменения внешних воздействий, заданных в этих экспериментах. Считалось, что изменение уровня моря складывается из изменения плотности воды (термическое расширение) и изменения баланса накопления и таяния льда в Гренландии и Антарктике. Для вычисления термической составляющей считалось, что в 1871 г. уровень моря был равен 0 м, а распределение глубины соответствует заданной в модели океана. После этого вычислялось изменение средней плотности воды вследствие изменений температуры и солености в соответствии с уравнением состояния, используемым в модели океана, и обусловленное этим изменение уровня моря.

Изменение уровня моря в экспериментах XX, XXI, B1, A1B, A2 по сравнению с контрольным экспериментом изображено на рис. 3. По данным модели, в течение XX столетия повышение уровня моря

составило 4 см, что примерно в два раза меньше, чем оценка по данным наблюдений, приведенная в [7]. Занижение может быть связано с тем, что модель не учитывает таяние небольших горных ледников, а также с тем, что в глобальное потепление в модели вовлечен более тонкий слой океана, чем в реальной климатической системе. В эксперименте XXI повышение уровня моря продолжается и достигает к концу XXI столетия 11 см. Повышение уровня моря к концу XXII столетия для сценариев B1, A1B и A2 составляет соответственно 27 см, 36 см и 48 см. Повышение уровня моря вследствие термической инерции океанов продолжается в XXII столетии, когда внешние воздействия фиксированы, почти с такой же скоростью, как и в XXI столетии. Основной вклад в повышение уровня моря по данным модели вносит термическое расширение. Вклад изменения баланса льда Гренландии и Антарктиды не превосходит 2–3 см, причем для экспериментов XXI, B1 и A1B этот вклад в основном отрицателен, т.е. при сравнительно небольшом глобальном потеплении увеличение количества выпавшего снега превосходит увеличение таяния.

Сравнение повышения уровня моря в модели ИВМ с данными других моделей, приведенными в [7], показывает, что эта величина в модели ИВМ является одной из самых низких среди всех моделей. Так, для всех моделей изменение уровня моря в 2100 году по сравнению с 1990 годом составляет для сценария B1 от 8 до 56 см, для сценария A1B от 13 до 69 см, для сценария A2 от 16 до 74 см. В модели ИВМ эти величины равны 11 см, 16 см и 18 см для экспериментов B1, A1B и A2 соответственно. Однако последнее сравнение моделей, результаты которого должны быть представлены в готовящемся четвертом отчете IPCC, показывает, что разброс между моделями по этому показателю уменьшился, в основном за счет уменьшения верхней границы оценки. Согласно данным 11 моделей, повышение уровня океана в 2100 г. по сравнению с 1990 г. может составить от 9 до 27 см при сценарии B1, от 12 до 36 см при сценарии A1B и от 15 до 36 см при сценарии A2. Повышение уровня в XX столетии, по данным всех моделей, согласно этому сравнению изменяется от 0 до 7 см, а для модели ИВМ оно составляет 4 см. Таким образом, по данным последнего сравнения повышение уровня моря в модели ИВМ находится в том же интервале, что и данные остальных моделей. Обратим внимание и на то, что разброс в оценке повышения уровня моря между моделями гораздо больше, чем разброс для одной и той же модели, но для разных сценариев. Подробное обсуждение результатов этих экспериментов приведено в [9].

3. Полулагранжева модель численного прогноза погоды. Одним из основных способов улучшения качества прогноза является повышение пространственного разрешения численных моделей. Это позволяет явно описывать процессы все более мелкого масштаба, особенно взаимодействие с неоднородной подстилающей поверхностью и передачу энергии по спектру. Численный гидродинамический прогноз погоды с пространственным разрешением, необходимым для соответствующего описания конвективных и мезомасштабных процессов, является проблемой, которая требует огромных компьютерных ресурсов. Кроме того, оперативный прогноз налагает ограничение на допустимое время счета модели. Полулагранжев метод (обратный метод характеристик) для описания адвекции (переноса) позволяет использовать шаг по времени в несколько раз больший, чем определяемый условием Куранта, что достигается ценой потери свойства сохранения нормы переносимой величины. В этом случае полная производная функции дискретизируется как производная вдоль траектории [10]. Полулагранжев подход позволяет в 3–5 раз сократить время расчета прогноза, однако при параллельной реализации требует существенно большего объема пересылаемой между процессорами информации. Это и мотивировало разработку параллельной реализации данной модели на основе сочетания технологий OpenMP и MPI.

Рассматриваемая модель, разработанная в ИВМ РАН совместно с Гидрометцентром РФ, подробно изложена в [11], а применяемые численные методы — в [12]. Отличительным свойством этой модели является применение компактных конечных разностей четвертого порядка на несмещенной сетке для аппроксимации неадвективных слагаемых в сочетании с использованием вертикального компонента абсолютного вихря и горизонтальной дивергенции в качестве прогностических переменных модели. В мо-

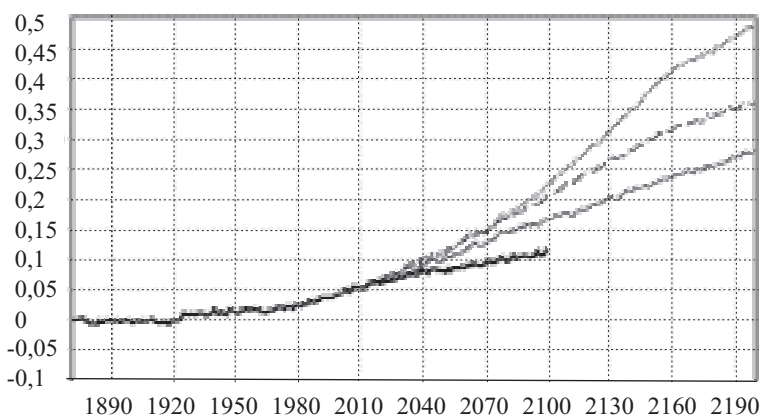


Рис. 3. Изменение уровня моря (м) в экспериментах XX и XXI (сплошная жирная линия), B1 (тонкая линия), A1B (штриховая линия) и A2 (пунктирная линия) по отношению к контрольному эксперименту

дели используется набор параметризаций процессов подсеточного масштаба из французской оперативной модели ARPEGE/IFS [13].

3.1. Создание параллельной версии модели численного прогноза погоды на основе подхода OpenMP. Ранее был распараллелен динамический блок полулагранжевой модели численного прогноза погоды [10] на основе технологии MPI. Эта работа описана в [4]. Был выполнен анализ масштабируемости данной параллельной реализации и был сделан вывод о ее недостаточности. Заметим, что в [4] применялось одномерное разбиение расчетной области по широте. Это вызвано тем, что внедрение двумерного разбиения расчетной области в полулагранжеву модель весьма затруднительно в силу большего (по сравнению с эйлеровыми моделями) объема пересылаемых данных. Фактически это означает, что суммарный объем пересылаемых данных будет увеличиваться по мере роста числа используемых процессоров, а общее число процессоров будет не превосходить размерности координаты, по которой производится разбиение, деленной на ширину шаблона зависимости. Однако современные вычислительные системы часто имеют узлы, содержащие несколько (2–32) процессоров, имеющих общую оперативную память. При наличии общей памяти на вычислительном узле можно воспользоваться технологией OpenMP и тем самым заметно повысить эффективность параллельной реализации модели.

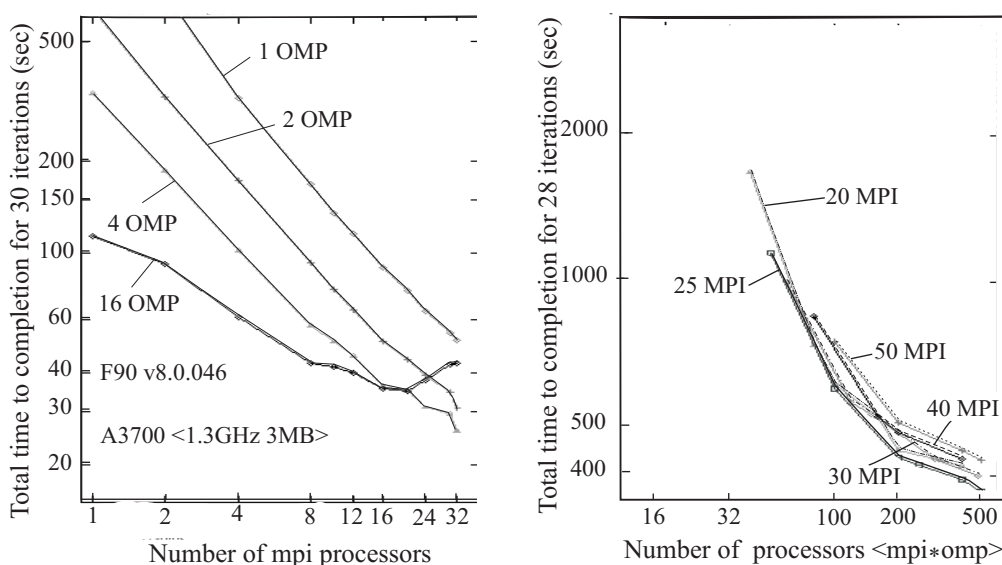


Рис. 4. Время, необходимое для выполнения 30 шагов полной модели с разрешением $0,9 \times 0,72$ градуса (слева) и 28 шагов модели с разрешением $0,225 \times 0,18$ градуса (справа), 28 вертикальных уровней на вычислительной системе Altix 3700 при различном сочетании числа процессоров MPI и OpenMP

Полная модель включает в себя помимо динамического блока набор параметризаций физических процессов подсеточного масштаба, которые занимают около 60% процессорного времени. Расчет параметризаций организован так же, как и вычисления динамического блока на сетке, — параллельный цикл по широте. Модель работает на платформе Итаниум2. На этой платформе под управлением ОС LINUX установлен компилятор Фортрана Intel, который допускает распараллеливание на общей памяти на основе подхода OpenMP. Эта технология распараллеливания была применена в программном комплексе модели, что позволило существенно уменьшить время расчета прогноза. При этом с помощью OpenMP распараллеливались циклы по широте, т.е. те же, что и распараллеленные с помощью MPI. Тем самым заметно снижаются накладные расходы на организацию и синхронизацию.

На 4-процессорном узле 16-процессорного кластера Итаниум2 Гидрометцентра РФ параллельное ускорение составляет 2,8, что вызвано ограниченной пропускной способностью набора микросхем Intel 8870, однако на двух процессорах ускорение составляет 1,88, а на трех — 2,6. Проверка эффективности реализации OpenMP в полной модели при большом числе процессов OpenMP была произведена на 512-процессорной вычислительной системе SGI Altix 3700, которая имеет архитектуру ccNUMA (cache coherent non-uniform memory access), обеспечивающую, с точки зрения пользователя, однородный доступ ко всей памяти вычислительной системы как к общей памяти. Оказалось, что при числе процессоров 16 достигнутое параллельное ускорение составляет 11,6, что является весьма неплохим результатом. Можно ожидать большего ускорения при использовании современной системы Altix 4700, имеющей в два раза большую скорость шины.

3.2. Создание параллельной версии полной модели численного прогноза погоды на основе

сочетания подходов OpenMP и MPI. В программном комплексе модели была выполнена реорганизация ввода-вывода данных для последующего применения MPI. А именно, весь ввод-вывод выполняется нулевым процессом MPI, который затем рассылает необходимые данные остальным процессам. Примерно так же организована предварительная обработка результатов модели (интерполяция по вертикали с модельных сигма-уровней на стандартные изобарические поверхности). Кроме того, был распараллелен расчет параметризаций, который не требует дополнительных обменов в параллельной реализации MPI и организован так же, как и вычисления динамического блока на сетке, — параллельный цикл по широте.

Реализация распараллеливания позволила при незначительном увеличении времени расчетов поднять горизонтальное разрешение модели выше первоначально запланированного. Была проведена оптимизация параллельной версии программы к 32-процессорному кластеру на процессорах Intel Itanium2 ИВМ РАН. На каждом узле кластера используется OpenMP, а обмен между узлами реализуется с помощью MPI. Параллельное ускорение на 16 процессорах кластера составляет около 11. Почти такое же ускорение получается, если для обменов между всеми процессорами использовать только MPI. Кластер ИВМ РАН состоит из двухпроцессорных узлов, и реализация MPI на этом кластере весьма эффективно работает на общей памяти узла. Кроме того, совместное использование OpenMP и MPI означает увеличение накладных расходов на распараллеливание по сравнению с использованием только MPI. Поэтому на кластере ИВМ РАН совместное использование технологий OpenMP и MPI не дает выигрыша по сравнению с MPI. Однако если вычислительная система поддерживает число процессоров на общей памяти большее четырех, то совместное использование технологий OpenMP и MPI дает заметный выигрыш. Для доказательства этого утверждения были выполнены тестовые расчеты на вычислительной системе SGI Altix 3700, имеющей 512 процессоров.

Тестовые расчеты выполнялись для двух вариантов модели. Первый вариант имел горизонтальное разрешение 0,9 градуса по долготе, 0,72 градуса по широте и 28 вертикальных уровней. Второй вариант имел горизонтальное разрешение в четыре раза больше. Результаты расчетов приведены на рис. 4.

При расчетах по первому варианту модели мы не можем ожидать выигрыша от использования более, чем 250 процессоров, так как масштабируемость параллельной реализации модели ограничена числом широт. Мы видим, что для первого варианта модели оптимальным является использование 4 процессоров OpenMP, при этом вычисления масштабируются до 128 процессоров, а для второго варианта наилучшим является использование 20 процессоров OpenMP (вычисления масштабируются до 512 процессоров). Таким образом, можно сделать вывод о том, что оптимальным является именно сочетание подходов OpenMP и MPI. В целом можно сделать вывод об удовлетворительной масштабируемости программного комплекса полной модели.

3.3. Численные эксперименты с параллельной версией полулагранжевой модели численного прогноза погоды. С декабря 2004 г. по август 2005 г. в Гидрометцентре РФ проводились оперативные испытания данной модели. Оказалось, что данная модель превосходит нынешнюю оперативную модель Гидрометцентра по качеству прогноза большинства метеоэлементов, начиная с вторых-третьих суток прогноза (в зависимости от сезона), а по отдельным параметрам (давление на уровне моря, температура на поверхности 850 ГПа) — с первых суток прогноза. По результатам испытаний модель рекомендована к внедрению в Гидрометцентре. Вместе с тем испытания показали необходимость некоторых модификаций в модели. Такие модификации были выполнены, после чего потребовалась настройка пара-

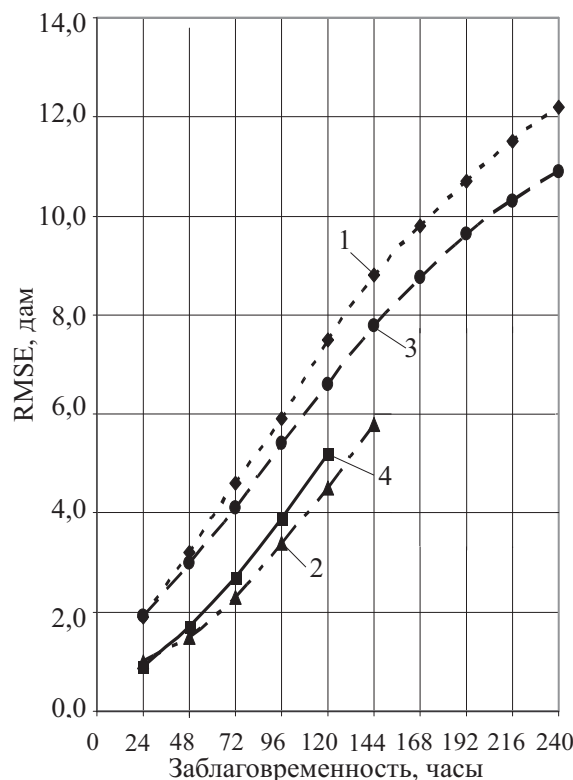


Рис. 5. График изменения осредненной среднеквадратической ошибки прогноза высоты поверхности 500 ГПа в зависимости от заблаговременности. Исходный срок 12 UTC. Регион: Северное полушарие. Период 2006 г. Оценка по сетке точек $OA\ 2,5 \times 2,5^\circ$. SMA (1), RED (2), PL-AV (3), EXE (4)

метров модели на реальных данных в рамках системы усвоения. Расчеты проводились на 16-процессорном кластере на процессорах Итаниум2 (четыре 4-процессорных узла Tiger4) Гидрометцентра РФ. Было осуществлено сопряжение параллельной версии модели с системой усвоения данных атмосферных наблюдений

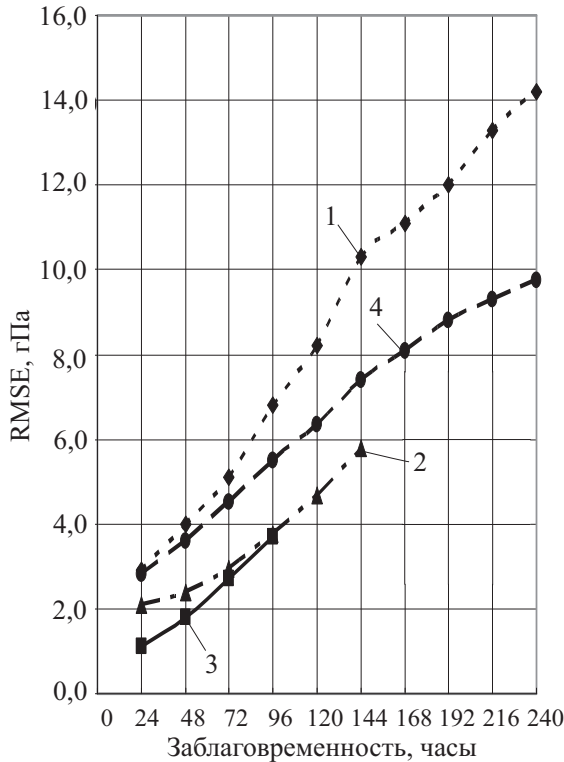


Рис. 6. График изменения осредненной среднеквадратической ошибки прогноза P_0 (давления на уровне моря) в зависимости от заблаговременности. Исходный срок 12 UTC. Регион: Северное полушарие. Период 2006 г. Оценка по сетке точек $OA\ 2,5 \times 2,5^\circ$ SMA (1), RED (2), EXE (3), PL-AV (4)

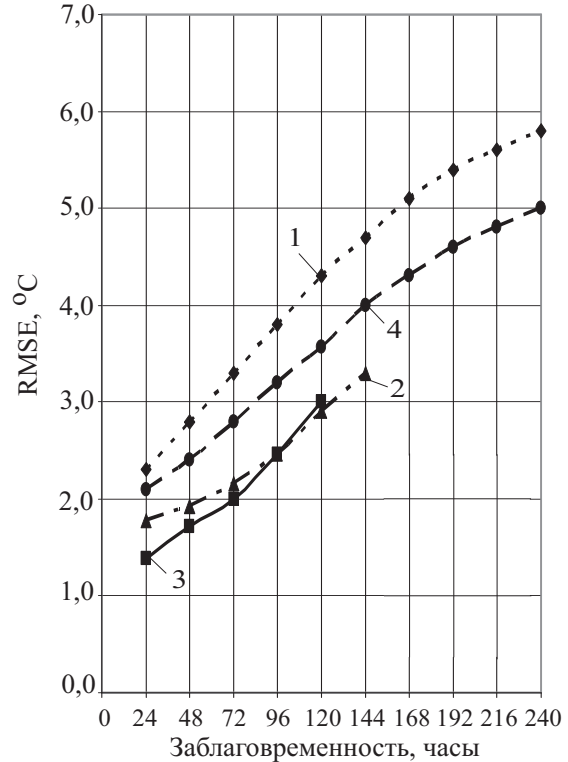


Рис. 7. График изменения осредненной среднеквадратической ошибки прогноза температуры на уровне 850 ГПа в зависимости от заблаговременности. Исходный срок 12 UTC. Регион: Северное полушарие. Период 2006 г. Оценка по сетке точек $OA\ 2,5 \times 2,5^\circ$. SMA (1), RED (2), EXE (3), PL-AV (4)

Настройка параметров модели проводилась сначала на двух сериях прогнозов; первая серия соответствовала 30 прогнозам за август 2005 г., а вторая — 30 прогнозам за декабрь 2004 г. После предварительной настройки на прогнозах был осуществлен повторный запуск системы усвоения данных и прогнозов на ее основе. Благодаря распараллеливанию модели удалось провести все расчеты прогнозов и анализов за 9 месяцев в течение двух недель. Сутки прогноза на кластере Гидрометцентра считаются менее чем за 6 минут на четырех процессорах одного узла; как правило, параллельно работает система усвоения данных и расчет прогноза с предыдущего анализа; таким образом, эти расчеты занимают один узел кластера. На рис. 5–7 приведены оценки точности (среднеквадратичная ошибка) прогноза отдельных метеоэлементов по внетропической части Северного полушария за 2006 г. для полулагранжевой модели (PLAV). Для сравнения на графиках также приведены оценки для нынешней оперативной спектральной модели (SMA), модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (RED) и модели Метеорологической службы Великобритании (EXE). Можно сделать вывод о том, что по данной области полулагранжева модель имеет меньшие ошибки прогноза, чем модель SMA, но уступает зарубежным центрам. Это связано, в частности, с тем, что в России до сих пор напрямую не усваиваются спутниковые данные наблюдений. Примерно такие же оценки (но с большим преимуществом полулагранжевой модели по сравнению с SMA) получаются по регионам Европа и Азия.

4. Заключение. С моделью общей циркуляции атмосферы и океана ИВМ РАН, реализованной на 32-процессорном кластере, проведены эксперименты по моделированию изменений климата при удвоении и учетверении содержания CO_2 , по воспроизведению климата XX столетия при заданном наблюдаемом изменении внешних воздействий, моделирование изменений климата в XXI–XXII столетиях согласно сце-

нариям В1, А1В и А2, а также контрольный эксперимент для условий 1871 г. на отрезке в 330 лет. Неравновесная чувствительность к удвоению содержания CO_2 в модели ИВМ немного меньше средней по всем моделям и составляет 1,57 К. Однако равновесная чувствительность модели атмосферы с однородным 50-метровым океаном является самой низкой среди рассматриваемых моделей и составляет 2,1 К. Модель хорошо воспроизводит наблюдаемые изменения приповерхностной температуры воздуха в 1871–2000 гг. Потепление за XX столетие составляет в модели 0,7 К, что близко к оценке по данным наблюдений. В модели получаются такие особенности наблюдаемого временного хода температуры, как потепление в 1940–1950 гг. и замедление потепления в 1960–1970 гг. Повышение средней температуры воздуха у поверхности в конце XXII столетия по сравнению с концом XX столетия составляет по данным модели около 2 К, 3 К и 5 К для сценариев В1, А1В и А2 соответственно. Это немного меньше средней величины для всех моделей, выполнявших такие эксперименты [5]. Максимальное потепление происходит в Арктике. Для всех сценариев в модели характерно сильное уменьшение площади морского льда в Арктике в конце летнего сезона, а для сценариев А1В и А2 лед в Арктике в XXII столетии к концу лета растает практически полностью. Повышение уровня океана в модели в 2100 г. по сравнению с 1990 г. для сценариев В1, А1В и А2 составляет 11 см, 16 см и 18 см соответственно. Эти величины являются одними из самых низких для моделей, результаты которых приведены в [5], но они близки к средним согласно последнему сравнению моделей.

Реализована параллельная версия полулагранжевой модели атмосферы для численного прогноза погоды (разработанной в ИВМ РАН совместно с Гидрометцентром РФ) с комбинацией подходов OpenMP и MPI. Разрешение модели составляет $0,9 \times 0,72$ градуса по долготе и широте, 28 вертикальных уровней. Данная модель рекомендована Центральной методической комиссией Росгидромета к внедрению в Гидрометцентре РФ. С помощью параллельной версии модели удалось существенно сократить сроки расчетов по настройке усовершенствованного варианта модели. В дальнейшем предполагается продолжить расчеты с помощью параллельного программного комплекса модели прогноза погоды, а также выполнить его дальнейшую оптимизацию с целью повышения масштабируемости в рамках MPI.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володин Е.М., Дуанский Н.А. Отклик совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана на увеличение содержания углекислого газа // Известия РАН. ФАО. 2003. **39**, № 2. 193–210.
2. Володин Е.М., Дуанский Н.А. Воспроизведение Эль-Ниньо в совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Метеорология и гидрология. 2004. № 12. 5–14.
3. Covey C., AchutaRao K.M., Lambert S.J., Taylor K.E. Intercomparison of present and future climates simulated by coupled ocean-atmosphere GCMs. PCMDI Report N 66. Lawrence Livermore National Laboratory. Livermore, 2000. 1–20.
4. Tolstykh M.A., Gloukhov V.N. Implementation of global atmospheric models on parallel computers // Вычислительные технологии. 2002. **7**. Спец. выпуск. 100–110.
5. Володин Е.М. и др. Связь величины глобального потепления и баланса тепла на поверхности земли при увеличении содержания углекислого газа // Известия РАН. ФАО. 2004. **40**, № 3. 306–313.
6. Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor I.G. Surface air temperature and its changes over the past 150 years // Rev. Geophys. 1999. **37**. 173–199.
7. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J. et al. Climate Change 2001. The scientific basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, 2001.
8. Meehl G.A., Washington W.M., Ammann C.M., Arblaster J.M., Wigley T.M.L., Tebaldi C. Combination of natural and anthropogenic forcings in twentieth-century climate // J. Climate. 2004. **17**. 3721–3727.
9. Дуанский Н.А., Володин Е.М. Моделирование изменений климата в XX–XXII столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН. ФАО. 2006. **42**, № 3. 291–306.
10. Staniforth A., Côté J. Semi-Lagrangian integration schemes for atmospheric models. A review // Mon. Wea. Rev. 1991. **119**. 2206–2223.
11. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 2001. № 4. 5–16.
12. Tolstykh M. Vorticity-divergence semi-Lagrangian shallow-water model on the sphere based on compact finite differences // J. Comput. Phys. 2002. **179**. 180–200.
13. Geleyn J.-F., Bazile E., Bougeault P., Deque M., Ivanovici V., Joly A., Labbe L., Piedelievre J.-P., Piriou J.-M., Royer J.-F. Atmospheric parameterization schemes in Meteo-France's ARPEGE N.W.P. model // Proc. of the ECMWF Seminar on Parameterization of Subgrid-Scale Physical Processes. Reading (UK), 1994. 385–402.

Поступила в редакцию
25.03.2007