

УДК 551.513.1

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ

© 2015 г. В. П. Дымников\*, \*\*, В. Н. Лыкосов\*, \*\*\*, Е. М. Володин\*

\*Институт вычислительной математики РАН

119333 Москва, ул. Губкина, 8

\*\*Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова

129128 Москва, Ростокинская ул., 9

\*\*\*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1

E-mails: [dymnikov@inm.ras.ru](mailto:dymnikov@inm.ras.ru), [lykosov@inm.ras.ru](mailto:lykosov@inm.ras.ru), [volodin@inm.ras.ru](mailto:volodin@inm.ras.ru)

Поступила в редакцию 02.10.2014 г.

Рассматривается проблема математического моделирования Земной системы, динамика которой определяется физическими, химическими, биологическими и другими процессами, что требует междисциплинарных подходов при ее исследовании. Термин “Земная система” расширяет понятие “климатическая система” как введением в рассмотрение дополнительных геосфер (литосфера, гелиосфера и др.), так и за счет описания более широкого круга физических, химических, биологических и социальных взаимодействий. Обсуждается современный уровень климатического моделирования и с этой целью представлены некоторые результаты, полученные в Институте вычислительной математики РАН. Рассматриваются перспективы дальнейшего развития климатических моделей в направлении создания моделей Земной системы на основе “бесшовного” (seamless) подхода, подразумевающего использование единой модели для целей краткосрочного (на несколько суток) и долгосрочного (климатического) прогноза.

**Ключевые слова:** прогноз погоды, парниковые газы, глобальное потепление, климат, климатические изменения, Земная система, математическое моделирование.

DOI: 10.7868/S0002351515030049

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В 2015 г. исполняется 90 лет со дня рождения выдающегося ученого и организатора науки Гурья Ивановича Марчука. С его именем связаны многие научные достижения в области физики атмосферы и океана, среди которых разработка численных методов решения задач геофизической гидродинамики, создание первых в СССР математических моделей численного прогноза погоды и глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана и многое другое. В 1984 г. Г.И. Марчуком с соавторами была опубликована монография [1], в которой впервые в мире с единых позиций были рассмотрены все аспекты проблемы моделирования атмосферы и океана — от постановки задачи до реализации алгоритмов ее решения на доступных в то время вычислительных системах. Разработка этой модели стала началом длинного (с 1980 г.) пути создания в Институте вычислительной математики (ИВМ) РАН, организатором и многолетним директором которого был Г.И. Марчук, серии климатических мо-

делей, базирующихся на совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана.

Математически климат определяется как статистический ансамбль состояний, принимаемый климатической системой (под которой обычно понимаются взаимодействующие между собой атмосфера, океан, суша, криосфера и биосфера) за достаточно большой интервал времени (см., например, [2]). В общем случае под ансамблем понимается не только множество состояний, но и некоторая вероятностная мера, заданная на этом множестве и определяющая вероятность того, что система может находиться на некотором подмножестве данного множества. Это определение подразумевает, что к климатическим характеристикам относятся любые параметры, осредненные по вероятностной мере (статистические характеристики). В частности, если рассматривать прогноз погоды как расчет траектории системы на конечном промежутке времени, а под предсказуемостью траектории понимать характерное время сходимости локализованного начального распре-

деления точек в фазовом пространстве, характеризующего ошибки исходного состояния, к равновесному (климатическому) распределению, то эта характеристика, усредненная по всему ансамблю начальных данных, будет характеристикой климатической.

Показано [3], что это характерное время определяет и чувствительность системы к малым внешним воздействиям. В этом смысле понятия “климатическая модель” и “модель прогноза погоды” должны совпадать. Кроме того, и формально модели прогноза погоды должны удовлетворять многим требованиям, накладываемым на климатические модели, поскольку это непосредственно следует из самого определения климата. Ключевой проблемой современной геофизической гидродинамики является, таким образом, разработка методов прогноза погоды и изменений климата на основе единой модели. Сезонный прогноз можно рассматривать как одно из направлений создания такой единой модели.

В настоящее время при естественных ограничениях, обусловленных большой разницей во временных масштабах интегрирования, эти модели сильно различаются точностью пространственно-временной аппроксимации (выбором пространственного и временного разрешения) и, как следствие, также описанием процессов подсеточного масштаба. При этом следует иметь в виду, что для моделей прогноза погоды характерна непрерывная зависимость точности их результатов от пространственно-временного разрешения, в то время как в климатических моделях высокое разрешение требуется в основном для описания региональных аспектов и для рассмотрения новых климатообразующих факторов. Весь опыт построения климатических моделей говорит о том, что чем более мелкомасштабные процессы вовлекаются в рассмотрение, тем успешнее удается воспроизводить региональные климатические характеристики.

Прогресс в развитии вычислительной техники позволяет строить все более точные модели конкретных физических процессов и тем самым не только совершенствовать модели климата и технологии прогноза погоды, но и формулировать новые задачи и в соответствии с этим новые требования к вычислительным системам. Глобальные климатические модели создаются “параллельно” в различных странах и различными научными группами. Такой подход необходим как для контроля воспроизводимости получаемых с их помощью результатов, так и в силу того, что обработка результатов численных экспериментов по воспроизведению современного климата в рамках международных программ показала любопытную закономерность. Выяснилось, что основные климатические характеристики, полученные

с помощью различных моделей и затем усредненные по всему набору моделей, оказываются ближе к реально наблюдаемым, чем характеристики, полученные с помощью отдельных, даже лучших моделей.

В рамках международных программ AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project), CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) и др., описание и результаты которых можно найти в Интернете (см. <http://www-pcmdi.llnl.gov>), проведено целенаправленное сравнение моделей, разработанных различными группами исследователей в разных странах мира как между собой, так и с данными наблюдений [4]. Модели ИВМ РАН представляли и представляют в настоящее время Россию в международных программах сравнения климатических моделей в рамках Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Следует заметить, что в ходе проведения численных экспериментов с современными глобальными климатическими моделями генерируется большой объем данных, что хотя и требует специальных усилий по их визуализации, обработке и анализу, но дает и возможность исследовать систематические ошибки в воспроизведении современного климата и оценить диапазон возможных его изменений, обусловленных, например, антропогенными воздействиями.

Вместе с тем наблюдается естественный переход от моделей климата, целью которых является воспроизведение и прогноз чисто термогидродинамических характеристик, к моделям Земной системы. Термин “Земная система” расширяет понятие “климатическая система” как введением в рассмотрение дополнительных геосфер (литосфера, гелиосфера и др.), так и за счет описания более широкого круга физических, химических, биологических (а также социальных) взаимодействий. С помощью таких моделей возможно воспроизводить и прогнозировать многие другие компоненты состояния Земной системы, в частности, концентрации малых газовых примесей, концентрации заряженных частиц, характеристики электрических и магнитных полей и др. Такого рода модели позволяют решать целый класс новых задач, связанных, например, с проблемой деградации придонного слоя метаногидратов в Арктике [5], солнечно-земными связями, космической погодой и др.

Спустя 30 лет после опубликования работы [1] совершенно естественно проанализировать современные основные направления развития проблемы климатического моделирования. К ним относятся: объединение моделей прогноза погоды и моделей климата в единую модель, переход от моделей климата к моделям Земной системы, проблема мультимодельных расчетов и динамико-стохастическое моделирование, математиче-

ские проблемы теории прогноза погоды и теории климата, отображение моделей прогноза погоды и климата на архитектуру вычислительных систем. Не претендуя на полноту анализа, в данной работе рассмотрены лишь некоторые аспекты рассматриваемой проблемы, причем все обсуждаемые ниже примеры и результаты получены с помощью моделей ИВМ РАН.

## 2. КОМПЛЕКС КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИВМ РАН

В настоящее время в Институте вычислительной математики РАН имеется комплекс различных версий модели климатической системы, каждая из которых включает в себя модель общей циркуляции атмосферы, модель общей циркуляции океана и может быть дополнена другими блоками, например, расчетом углеродного цикла (бюджета содержания углерода растений, почвы, океана и атмосферы). Моделирование климата является проблемой, которая требует огромных вычислительных ресурсов, доступных только при использовании высокопроизводительных параллельных компьютеров. При этом программная реализация модели должна учитывать особенности параллельной архитектуры этих компьютеров [6]. Комплекс климатических моделей ИВМ РАН включает следующие версии, реализованные на институтском кластере и суперкомпьютере “Ломоносов” Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Версия INMCM3.0 (Institute of Numerical Mathematic Climate Model, версия 3.0), подробно представленная в статье [7], имеет разрешение в атмосферном блоке  $5 \times 4$  градуса по долготе и широте соответственно и 21 уровень по вертикали, в океане разрешение составляет  $2.5 \times 2$  градуса и 33 уровня по вертикали. Она участвовала в проекте CMIP3 и ее результаты среди данных других моделей приведены в 4-м отчете МГЭИК [8]. Наиболее полно анализ воспроизведения климата моделью INMCM3.0 представлен на сайте <http://kvn.inm.ras.ru/index.html> ИВМ РАН. В этой версии модели атмосферы и океана считаются последовательно, оптимальное количество процессоров для атмосферы равно 8, для океана — 1. Шаг по времени для атмосферы составляет 12 мин, для океана — 6 ч. На кластере ИВМ РАН расчет на 25 лет занимает одни сутки астрономического времени.

Версия INMCM3.2 имеет то же самое пространственное разрешение, что и INMCM3.0, но при этом: 1) используется модель океана с полюсами, сдвинутыми на сушу, что позволяет избежать вычислительных проблем, связанных с использованием географической сетки, для которой имеет место сходимости меридианов у полюсов; 2) применяется изопокиническая параметризация

горизонтальной диффузии, что дает возможность избежать коррекции потока пресной воды в Арктике и уменьшить там систематические ошибки; 3) эволюция атмосферы и океана рассчитывается на разных группах процессоров. Оптимальное количество процессоров равно 24 (16 — для атмосферы и 8 — для океана). На суперкомпьютере МГУ “Ломоносов” за сутки проводится расчет на 70 лет. Эта версия предположительно будет использоваться для длительных климатических расчетов — на период времени от нескольких сотен до нескольких тысяч лет.

Версия INMCM4.0 представлена в статьях [9, 10]. Она имеет разрешение в атмосферном блоке  $2 \times 1.5$  градуса и 21 уровень по вертикали, шаг по времени равен 5 мин. В океане разрешение составляет  $1 \times 0.5$  градуса и 40 уровней, а шаг по времени равен 2 ч. Эта модель участвовала в CMIP5, ее данные среди результатов других моделей приведены в 5-м отчете МГЭИК [11]. Запускается в виде двух независимых задач (модель атмосферы и модель океана), которые обмениваются данными через жесткий диск. Оптимальное количество процессоров в численных экспериментах на кластере ИВМ равно 32 для атмосферы и 8 для океана. За одни сутки расчет проводится на 6 лет.

Версия INMCM4.2 аналогична по разрешению и используемым сеткам версии INMCM4.0, но запускается в виде одной задачи, причем модели атмосферы и океана рассчитываются на разных группах процессоров. Оптимальное количество процессоров на суперкомпьютере “Ломоносов” равно 96 для атмосферы и 64 для океана (всего 160). За одни сутки расчет проводится на 12 лет.

Версия INMCM5 имеет разрешение в атмосфере  $1.25 \times 1$  градус и 128 уровней по вертикали до высоты 60 км (шаг по вертикали составляет 50 м в нижних 1.5 км и 500 м выше). В океане разрешение составляет  $0.167 \times 0.125$  градуса и 40 уровней по глубине. Шаг по времени в атмосфере равен 1 минуте, в океане — 6 мин. Оптимальное количество процессоров на суперкомпьютере “Ломоносов” равно 240 для атмосферы и 512 для океана. Расчет на 1 год требует одни сутки астрономического времени.

При разработке представленного выше комплекса необходимо было определиться с ответом на вопрос: должны ли климатические модели (в перспективе — модели Земной системы) иметь высокое пространственное и временное разрешение и, как следствие, требовать высокопроизводительных вычислений? Несомненно, что это требование является обязательным, если необходимо воспроизводить региональные особенности климата. Более фундаментальный аспект связан с вопросом о чувствительности климата к внешним воздействиям. Существует много глобальных фи-

зических процессов, которые для адекватного описания требуют высокого пространственного разрешения. К их числу относятся, например, квазидвухлетнее колебание (воспроизведение критических слоев и экваториально захваченного волновода, отклик на увеличение концентрации углекислого газа), формирование подынверсионной облачности в пограничном слое атмосферы (отрицательная обратная связь на увеличение концентрации углекислого газа), явление Эль-Ниньо (экваториально захваченный волновод в океане, формирование удаленного отклика) и др.

### 3. РОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В качестве примеров, характеризующих роль пространственного разрешения, ниже приводятся некоторые результаты, полученные с версией INMCM5, относящиеся к воспроизведению: 1) квазидвухлетних колебаний в экваториальной атмосфере, 2) облачности нижнего яруса в пограничном слое атмосферы и 3) океанских вихрей.

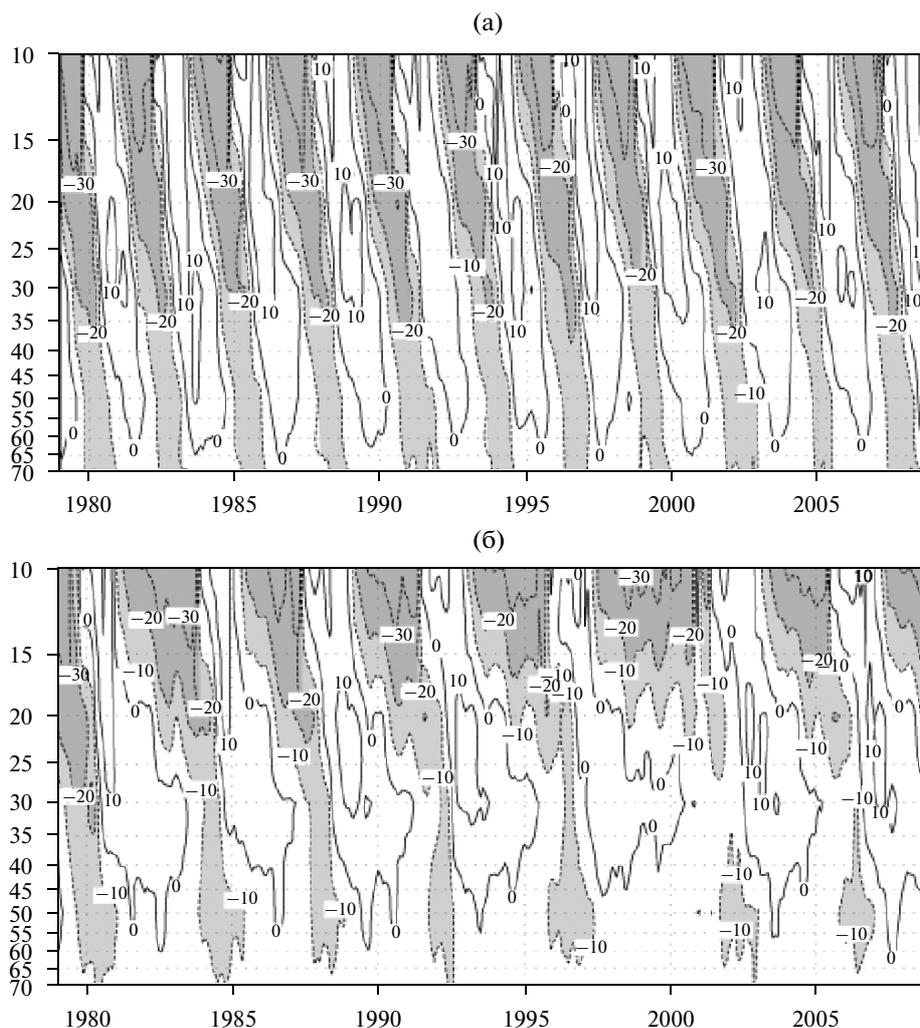
**3.1.** Квазидвухлетние колебания (КДК) зонального ветра в экваториальной стратосфере на высотах примерно 16–50 км принадлежат к классу атмосферных процессов, имеющих глобальное значение. Это явление может быть описано как медленно распространяющиеся вниз западная и восточная фазы зонального ветра, сменяющие друг друга с периодом около 28 мес. Основной механизм воздействия КДК на динамику атмосферы связан с модуляцией переноса (в основном стационарными волнами) волновой активности во внутритропической стратосфере, что может приводить к внезапным стратосферным потеплениям [12, 13] и к взаимодействию КДК с другими низкочастотными процессами, например, с явлением Эль-Ниньо [14]. Отмечены и региональные связи КДК с процессами в тропиках, в частности, с длительностью сезонных дождей и активностью ураганов в Атлантике [15]. Несмотря на всю значимость КДК, лишь немногие климатические модели способны в настоящее время воспроизводить это явление (см., например, [16]).

Важным является вопрос о том, каким требованиям должна удовлетворять модель, чтобы КДК воспроизводились. Основная трудность решения этого вопроса заключается в реализации сложного механизма формирования КДК, связанного с нелинейным взаимодействием среднего зонального потока и вертикально распространяющихся волн различного масштаба. Оказалось, что ключевую роль в становлении периода КДК и амплитуды в нижних слоях атмосферы играют планетарные волны. В то же время короткие гравитационные волны переносят энергию и опре-

деляют характеристики КДК в ее верхних слоях [17]. Используя эти обстоятельства, удалось построить модель общей циркуляции атмосферы, воспроизводящую реалистичные КДК зонального ветра в экваториальной стратосфере [18]. С этой целью в качестве основы была взята разработанная в ИВМ РАН модель общей циркуляции атмосферы с горизонтальным разрешением  $2^\circ$  по широте и  $2.5^\circ$  по долготе, но достаточно грубым разрешением в 39 уровней. При стандартных значениях параметров эта модель не воспроизводит КДК в экваториальной стратосфере, однако воспроизводит полугодовые колебания (ПГК) в верхней стратосфере и мезосфере. Модификация данной модели за счет увеличения количества уровней до 80 и выбора вертикального шага сетки в стратосфере равным примерно 0.5 км позволила успешно воспроизвести в численных экспериментах КДК и ПГК с характеристиками, близкими к наблюдаемым.

Модель совместной циркуляции атмосферы и океана INMCM5 также воспроизводит особенности КДК (рис. 1а). Их период составляет около 2.5 лет. Необходимыми условиями воспроизведения КДК оказались не только хорошее вертикальное разрешение (не хуже 500 м), но и низкие значения горизонтальной вязкости. В условиях учетверения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере период колебаний увеличился (рис. 1б) и составил более 4 лет (см. в связи с этим также работу [19]). При этом значительное похолодание в стратосфере и потепление в тропосфере привело к изменению частоты плавучести и условий обрушения гравитационных и других волн. По данным наблюдений, при внезапном стратосферном потеплении за 30–60 дней аномалия скорости ветра распространяется из верхней стратосферы в нижнюю ее часть и в некоторые дни достигает поверхности Земли, приводя к аномалиям индекса Арктического колебания (АК). Аналогичным образом распространяются аномалии скорости зонального ветра после стратосферного потепления и по данным модели, приводя к отрицательному индексу АК через 1–2 мес. после стратосферного потепления.

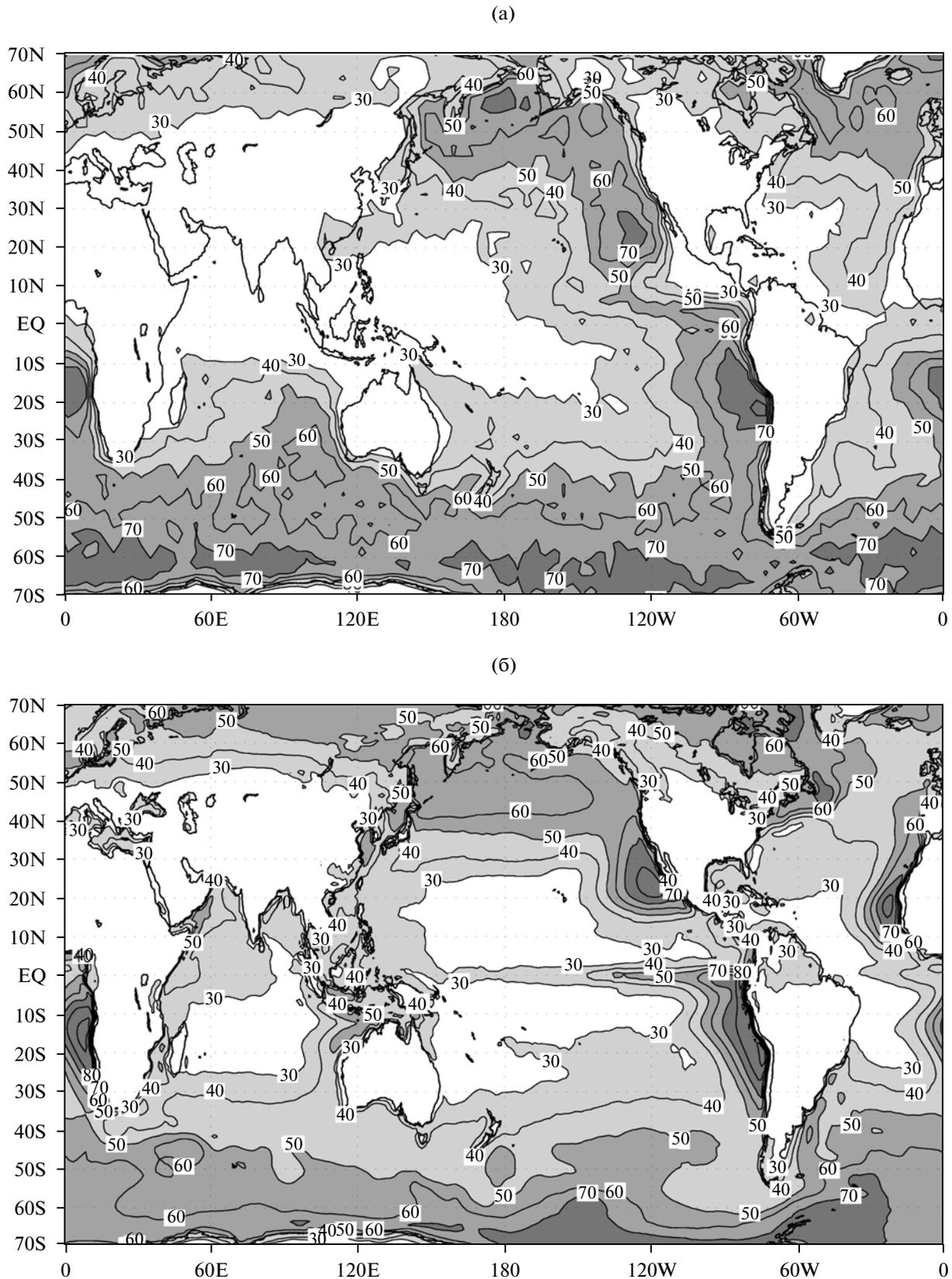
**3.2.** Согласно данным исследований, проведенных под эгидой NASA (США) в рамках проекта CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation, [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/calipso/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/calipso/main/index.html)), наибольшее среднегодовое количество облачности (60–80%) наблюдается в восточных районах тропических и субтропических океанов в условиях температурной инверсии в пограничном слое [20] (рис. 2а). Большое количество облаков нижнего яруса образуется также начиная с 50 градуса Северной и Южной широты в основном за счет теплого полу-



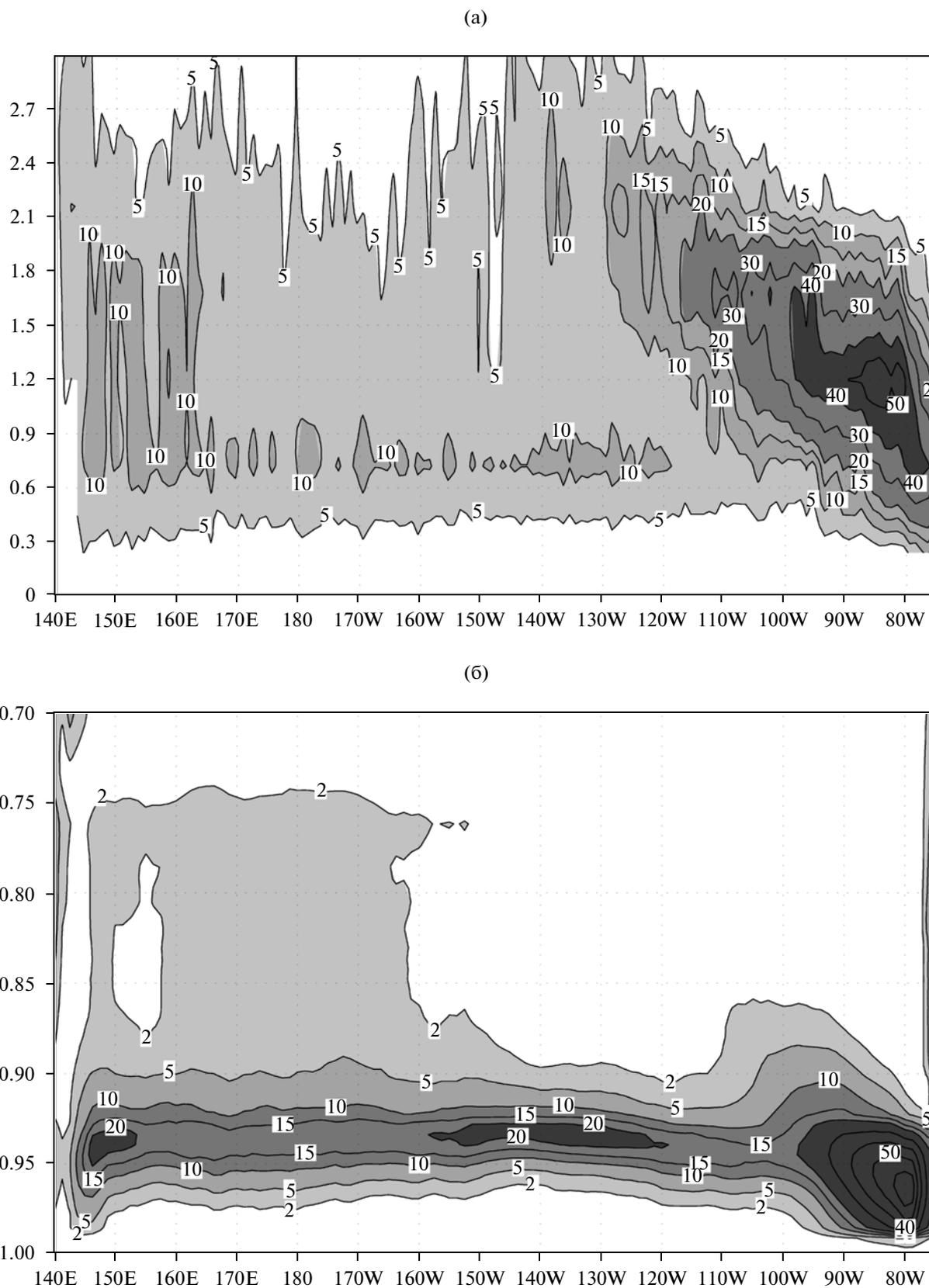
**Рис. 1.** Квазидвухлетнее колебание скорости ветра в экваториальной стратосфере: а – при современном климате, б – при учетверении концентрации  $\text{CO}_2$ .

годия, когда создаются благоприятные условия для формирования температурной инверсии. Над тропическими и субтропическими континентами, где днем возникают условия для конвекции, а также в районах глубокой конвекции над океанами количество облаков нижнего яруса не превосходит 30–40%. В модели описанная климатология нижней облачности неплохо воспроизводится (рис. 2б). Однако высота этой облачности над поверхностью Земли, как и высота пограничного слоя при устойчивой или нейтральной стратификации, в модели, как правило, занижена. Разрез вдоль  $15^\circ \text{S}$  поля балла среднегодовой облачности над Тихим океаном в нижнем трехкилометровом слое тропосферы показывает занижение высоты образования облачности на востоке океана, где почти постоянно происходит мелкая конвекция, в результате которой образуется наиболее плотная облачность (рис. 3).

**3.3.** Важным показателем качества климатической модели является ее способность воспроизводить океанские вихри. Параметром, надежно измеряемым с хорошим пространственным и временным разрешением, по которому можно было бы судить о качестве воспроизведения вихрей в океане, является уровень моря по данным спутника TOPEX/POSEIDON [21] (<http://science.nasa.gov/missions/topex-poseidon/>). Наблюдаемое среднеквадратичное отклонение (СКО) уровня моря (рис. 4а) характеризуется наличием максимумов после отрыва от берегов Куроисио, Гольфстрима, Бразильского и Агульясского течений, обусловленных интенсивным образованием вихрей в этих районах. По данным модели, величина СКО уровня моря также имеет максимумы в этих районах (рис. 4б). В среднем, модельное СКО в этих местах примерно равно наблюдаемому или же несколько меньше.



**Рис. 2.** Среднегодовое широтно-долготное распределение балла облачности нижнего яруса (в процентах): а – по данным наблюдений [Stephens et al., 2002], б – по результатам модели.



**Рис. 3.** Высотно-зональное распределение среднегодового балла облачности (в процентах) вдоль  $15^\circ \text{S}$ : а – по данным наблюдений [Stephens et al., 2002], б – по результатам модели.

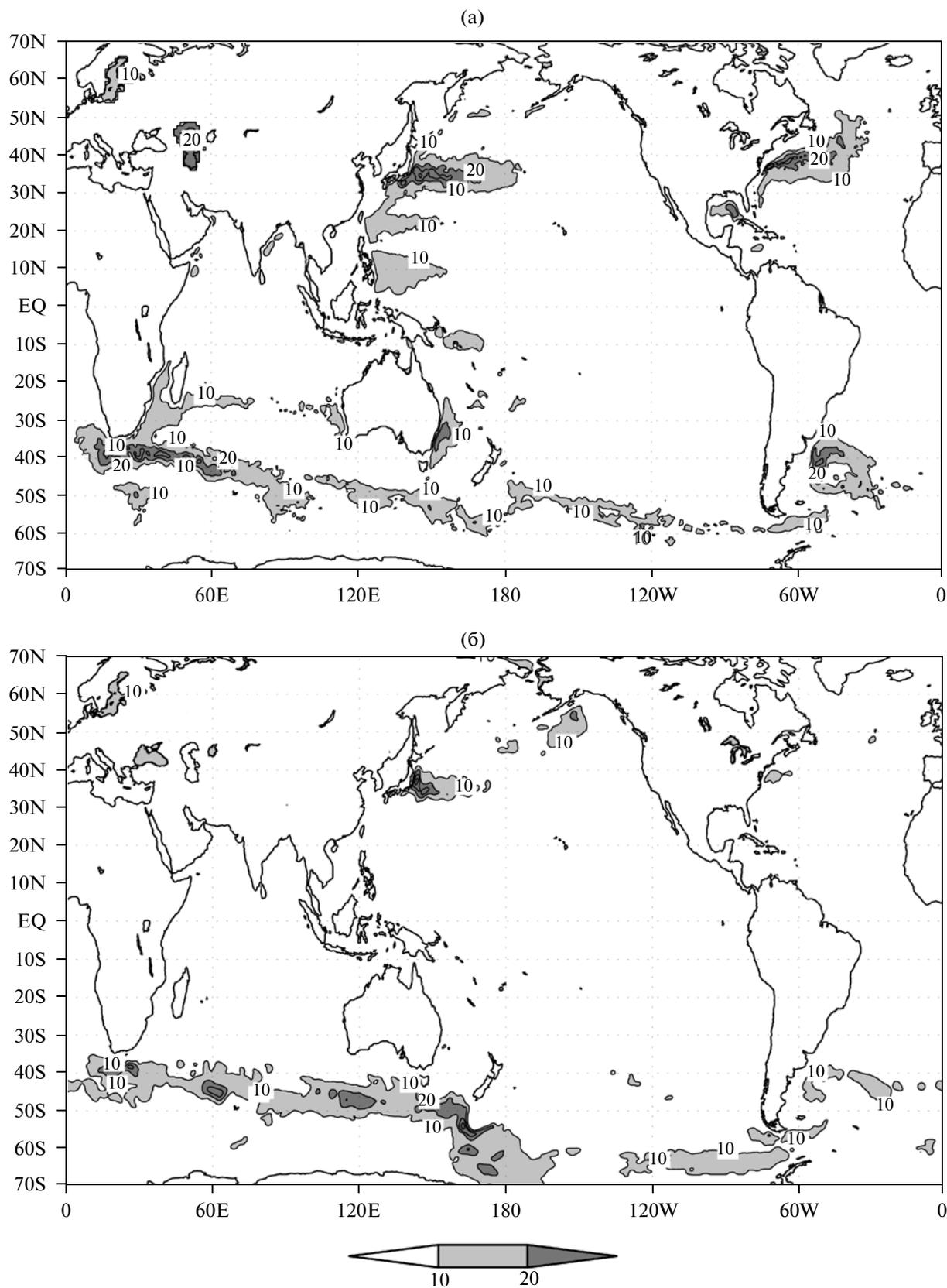


Рис. 4. Пространственное распределение среднеквадратичного отклонения уровня моря: а – по данным спутника TOPEX/POSEIDON [Tapley et al., 1994], б – по результатам модели.

#### 4. МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЕЕ РАЗВИТИЯ

Дальнейшее развитие климатических моделей в направлении создания модели Земной системы требует решения ряда новых задач, к числу которых относится, например, проблема деградации метаногидратов морского дна в Арктике. Описание озонового цикла и исследование проблемы “озоновых дыр” также является одной из этих задач. Необходимо корректное воспроизведение динамики сульфатных аэрозолей в стратосфере, поскольку они в значительной степени ответственны за компенсацию нагревания вследствие увеличения концентрации углекислого газа. Наконец, важной задачей является расчет концентрации электронов в мезосфере в связи, в частности, с проблемой поглощения радиоволн. Здесь необходимо правильно рассчитывать температуру нейтральной (неионизированной) компоненты, радиационные притоки тепла, потоки внутренних гравитационных волн, турбулентную диффузию и другие процессы.

В Институте вычислительной математики РАН разработана модель INMESM [22], которая является прототипом модели Земной системы и включает в себя расчет химии атмосферы (описывается перенос 25 групп веществ, проводится расчет концентраций 74 веществ). В модели рассчитывается цикл углерода (приняты во внимание его запасы в почве, растительности, океане и атмосфере) и цикл метана (рассматривается его эмиссия из болот и вследствие разрушения метаногидратов морского дна, а также сопутствующие химико-динамические процессы в атмосфере). В аэрозольном блоке рассчитываются процессы, связанные с переносом таких аэрозолей, как пыль, морская соль, сульфаты, сажа, органический углерод. В параметризованном виде представлены некоторые электрические явления, в частности, рассчитываются количество молниевых вспышек, доли вспышек между облаком и поверхностью Земли, разность потенциалов между землей и ионосферой. Принято также динамическое описание растительности и ледниковых щитов.

На данный момент эта модель реализована с разрешением в атмосфере  $5 \times 4$  градуса и с 39 уровнями по вертикали до высоты 90 км, а в океане разрешение составляет  $1 \times 0.5$  градуса и 40 уровней по вертикали. Программный код модели запускается в виде трех независимых задач (атмосфера, океан, химия), обменивающихся данными через жесткий диск. На кластере ИВМ оптимальное количество процессоров равно 8 для атмосферы, 8 для океана

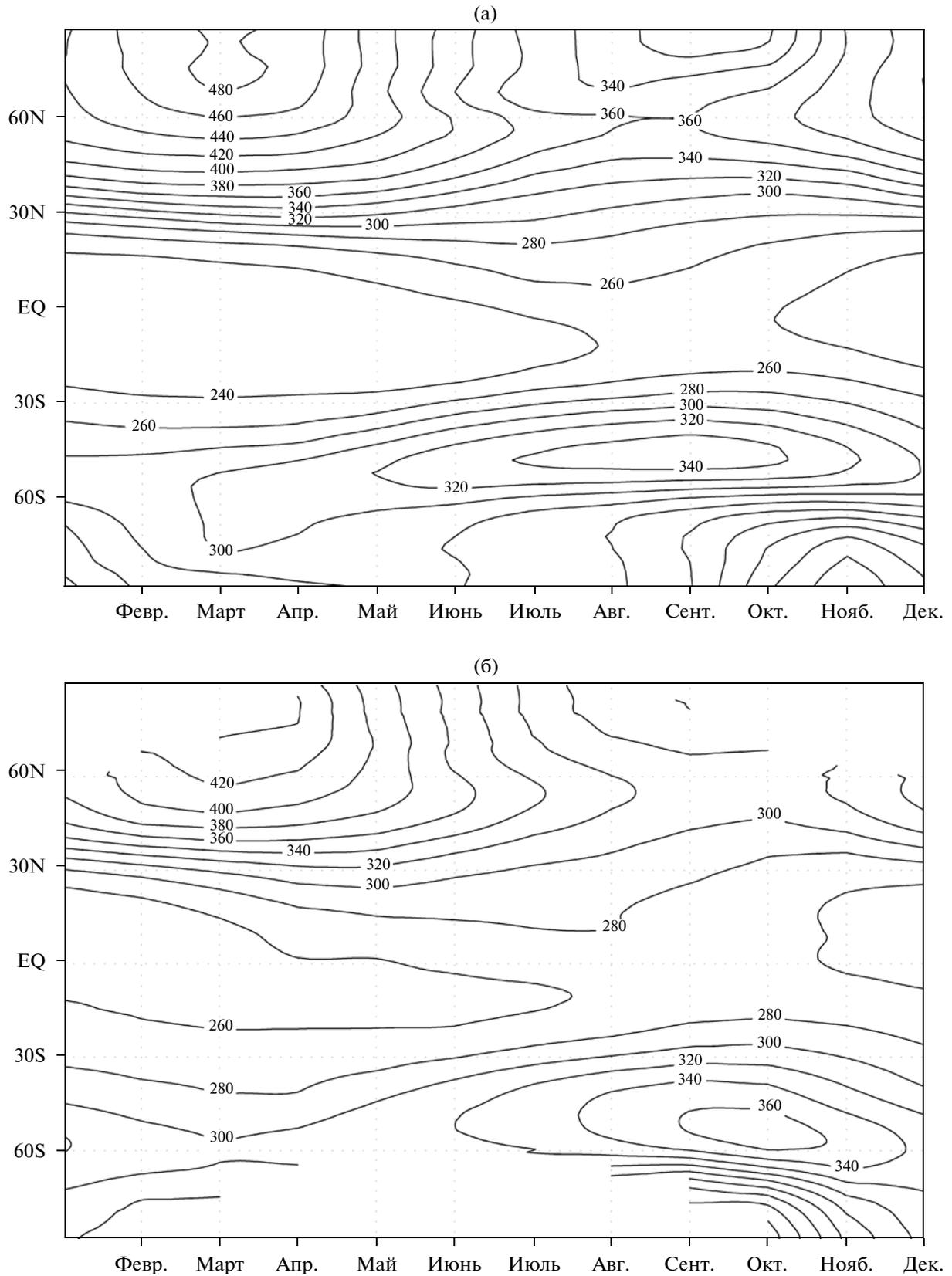
и 8 для химии (всего 24). За одни сутки астрономического времени расчет проводится на 5 лет.

В качестве иллюстрации на рис. 5 представлено широтное распределение годового хода общего содержания озона (в ед. Добсона), рассчитанного по результатам моделирования (вверху) и построенного по спутниковым данным TOMS [23]. Как видно из рисунка, имеется неплохое как качественное, так и количественное согласие между модельными и наблюдаемыми значениями этой характеристики состояния Земной системы.

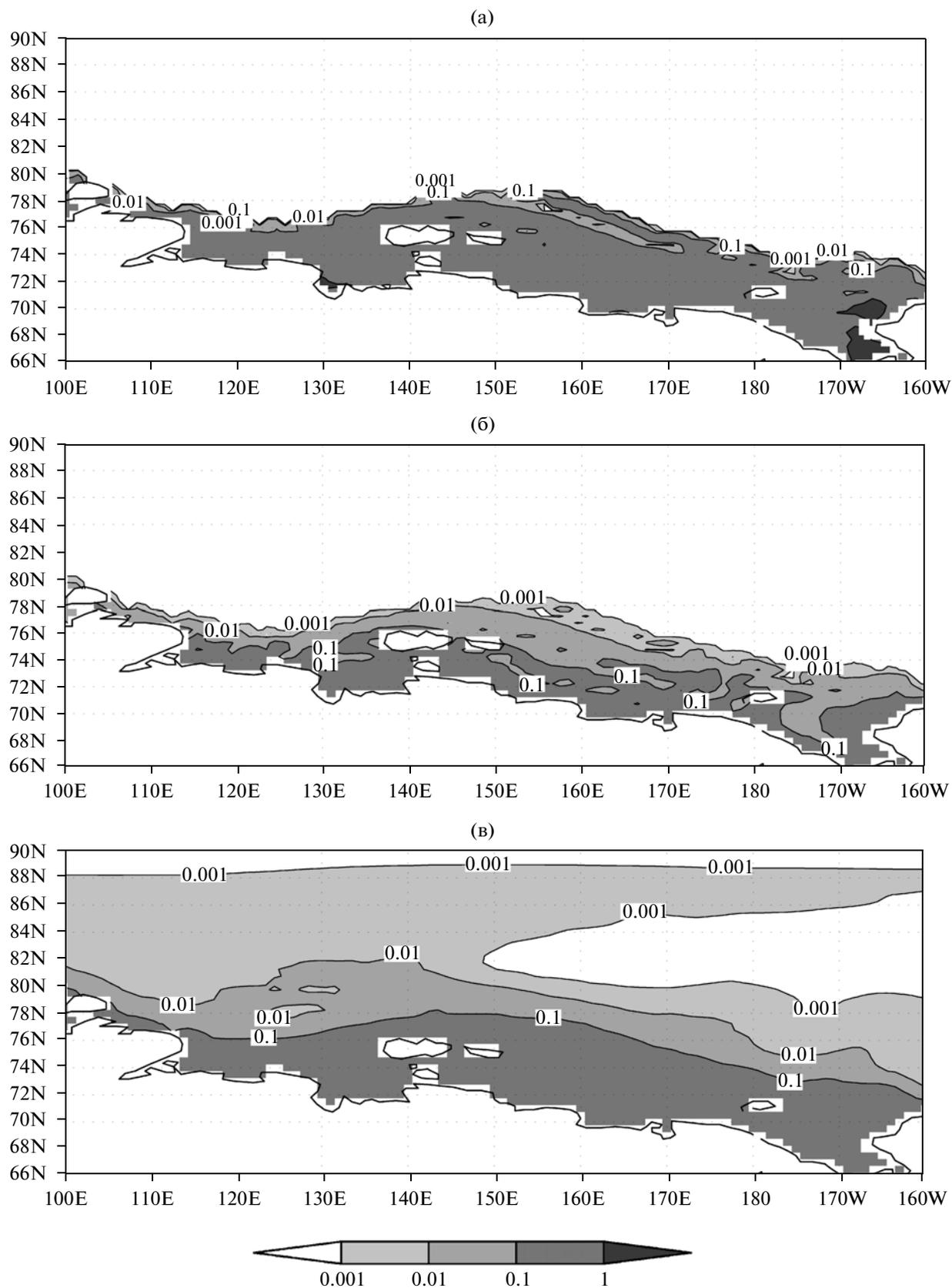
Рисунки 6 и 7 демонстрируют возможности модели для исследования роли метаногидратов морского дна в Арктике в общем метановом цикле. На рис. 6 представлены широтно-долготные распределения потока метана со дна и в атмосфере, а на рис. 7 изображены аналогичные поля его атмосферного содержания при гипотетическом катастрофическом разрушении метаногидратов на шельфе восточной Арктики. Представленные на рисунках результаты получены с помощью численного эксперимента, в котором предполагалось, что гидраты метана присутствуют в километровом слое морского грунта везде, где могут существовать теоретически, и составляют там 10% его массы. Разрушение метаногидратов происходит в результате приспособления распределения температуры в толще подводного грунта к современным условиям после оледенения, максимум которого наблюдался 21 тыс. лет назад.

Одно из направлений развития модели Земной системы связано с включением в рассмотрение динамики верхних слоев атмосферы, для чего построена [24] отдельная модель общей циркуляции термосферы (для высот 90–500 км) и создана [25] модель тропосферы–стратосферы–мезосферы и D-слоя ионосферы (для высот поверхность Земли – 90 км). В качестве фотохимической модели D-слоя ионосферы взята простая пятикомпонентная модель, основанная на ионизации оксида азота ультрафиолетовым солнечным излучением. Для модели нейтральной составляющей атмосферы на основе сравнения с данными наблюдений показано достаточно хорошее воспроизведение основных физических процессов, определяющих общую циркуляцию средней атмосферы. Получены количественные оценки относительной роли характеристик нейтральной атмосферы в формировании глобального распределения электронной концентрации и показано удовлетворительное воспроизведение климатических характеристик D-слоя ионосферы.

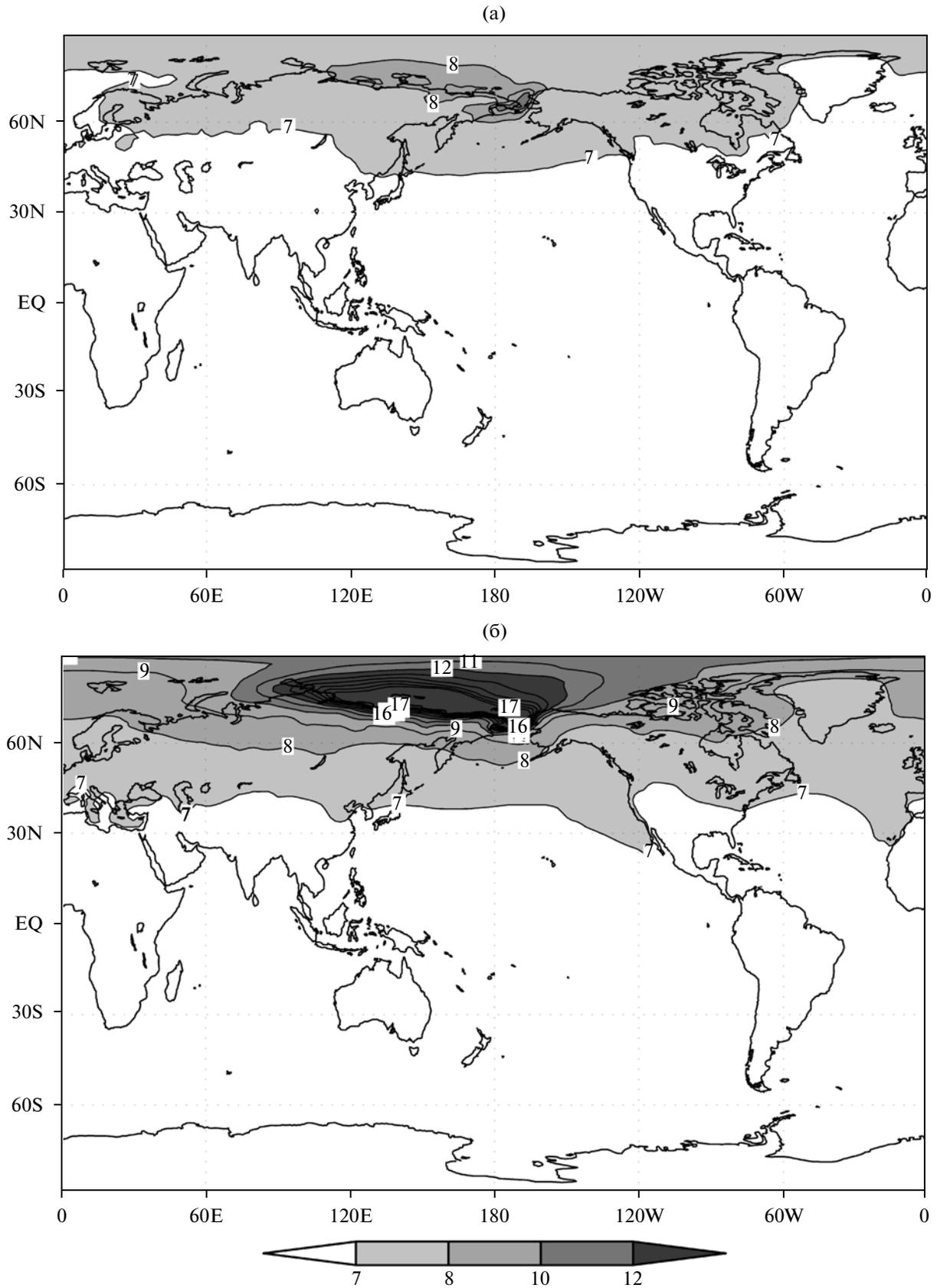
Вместе с тем проблема описания аномальных характеристик ионосферы (связанных с геомаг-



**Рис. 5.** Годовой ход общего содержания озона, рассчитанный по результатам модели (а) и построенный по спутниковым данным TOMS (б).



**Рис. 6.** Поток метана ( $\text{кг}/\text{м}^2/\text{год}$ ) со дна (а), в атмосферу в виде пузырьков (б) и из растворенного в воде газа (в) при гипотетическом катастрофическом разрушении метаногидратов на шельфе восточной Арктики.



**Рис. 7.** Широтно-долготное распределение концентрации метана ( $\text{млн}^{-1}$ ) в атмосфере у поверхности в марте (а) и в июле (б) при гипотетическом катастрофическом разрушении метаногидратов на шельфе восточной Арктики.

нитными возмущениями, солнечными вспышками, вбросами частиц в полярной области и т.п.) требуют совершенствования локальной фотохимической модели D-слоя за счет включения дополнительных процессов ионизации и ионного преобразования, а также описания новых ионных компонентов. Отдельной задачей в данном направлении является расчет фотохимических процессов в более высоких областях ионосферы (E-слой ионосферы и выше).

Конечная перспективная цель таких работ состоит в создании единого вычислительного комплекса глобальных моделей Земной системы, атмосферный блок которой простирается от подстилающей поверхности до высоты в 500 км. Этот комплекс должен базироваться на согласованном расчете ключевых физических процессов (гидродинамических, радиационных, химических, фотохимических и др.) и быть направлен на решение сложных междисциплинарных проблем, связанных как с климатическими изменениями, так и с прогнозом погоды (в том числе, “космической погоды”).

## 5. МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В настоящее время все более широкое распространение получают петафлопсные ( $10^{15}$  арифметических операций в секунду) вычислительные системы, а в перспективе текущего десятилетия ожидается, что производительность суперкомпьютеров достигнет экзафлопсного уровня ( $10^{18}$  операций в секунду). В ближайшей перспективе глобальные атмосферные модели будут иметь разрешение, характерное для современных мезомасштабных моделей (1–10 км), а шаг сетки моделей, используемых для прогноза и диагноза атмосферной циркуляции на региональном уровне, составит ~100 метров. Такое же разрешение (от 1 км до 100 м) будет доступным и для дискретизации уравнений гидротермодинамики по вертикальной координате. Опыт, полученный японскими исследователями в моделировании глобальных климатических процессов с горизонтальным разрешением от 3.5 до 10 км [26], заложил основу для широкого экспериментирования с моделями очень высокого разрешения и привел к необходимости разработать стратегию дальнейшего развития климатических моделей с учетом перспектив высокопроизводительных вычислений [27]. Все большее внимание уделяется созданию “бесшовных” (с улучшенным локальным разрешением и физическим описанием) моделирующих систем, позволяющих в рамках единой вычислительной технологии воспроизвести как можно более широкий

спектр атмосферных движений (см., например, [28]). В частности, уже анонсированы расчеты с глобальной атмосферной моделью на субкилометровом разрешении [29].

Переход к высокому разрешению по всему Земному шару потребует как отказа от равномерной сетки в широтно-долготной системе координат, так и пересмотра физических параметризаций. В первую очередь, это касается параметризации конвекции, поскольку она начинает воспроизводиться явно при разрешениях в несколько километров и менее. В настоящее время довольно широко используется подход, получивший название “суперпараметризация” (см., например, [30]), при котором в каждой вертикальной колонке, связанной с горизонтальной ячейкой крупномасштабной модели, явно воспроизводится двумерная (в вертикальном сечении) локальная и мезомасштабная динамика течений. Радиационные процессы тоже, по-видимому, нельзя больше рассматривать как локально одномерные. Требуется своего внимания детализированное описание атмосферных процессов в пограничном слое над неоднородной поверхностью суши, а также русловых потоков в речной сети.

Это особенно важно в связи с тем, что необходимо оценить для конкретных регионов мира степень воздействия глобальных изменений климата на природную среду (состояние подстилающей поверхности, естественные экосистемы, водные ресурсы и т.д.) и возможности минимизации ущерба от неблагоприятных для человека последствий. Хотя глобальные численные гидродинамические модели являются наиболее мощным инструментом исследования климата (а также разработки методов прогноза погоды), все же их разрешение является в настоящее время недостаточным для воспроизведения локальных природно-климатических особенностей конкретных регионов. Вместе с тем параметризации процессов подсеточного масштаба требуют знания региональных особенностей процессов взаимодействия атмосферы с пространственно (термически, орографически, гидрологически и т.п.) неоднородной подстилающей поверхностью, наиболее ярко проявляющихся в пограничном слое атмосферы.

Одной из ключевых проблем, возникающих при переходе к высокому пространственному разрешению, является нарушение предположения о разделении временных и пространственных масштабов “подсеточной” и воспроизводимой явно динамики в нижней части тропосферы. До сих пор это предположение обоснованно использовалось для описания переноса тепла, импульса и влаги по вертикали в пограничном слое атмосферы при помощи локально-одномерных моде-

лей турбулентности. Однако наличие крупномасштабных организованных вихрей, например конвективных ячеек и валиков, имеющих размеры, сравнимые или превосходящие толщину пограничного слоя, приводит к тому, что при шагах сеток в несколько сотен метров такие циркуляции начинают частично воспроизводиться явным образом. Традиционные методы моделирования оказываются неприменимыми и приводят к дублированию явного и параметризованного перемешивания. Это препятствует улучшению точности численного прогноза, несмотря на увеличение вычислительных мощностей и детализацию сеток моделей [31]. При этом в диапазоне разрешения сетки, сопоставимого с масштабами крупных вихрей пограничного слоя атмосферы (100–1000 м), неприменимы не только параметризации, разработанные для крупномасштабных моделей, но и традиционные модели “подсеточной” турбулентности, применяющиеся в вихреразрешающих моделях. Эта проблема получила название проблемы “серой зоны” и ее исследования с привлечением моделей различного пространственного разрешения позволяют, с одной стороны оценить ошибки “старых” параметризаций, а с другой стороны, – выработать подходы к построению новых параметризаций для перспективных моделей общей циркуляции атмосферы.

При этом потребуются новые вычислительные алгоритмы, которые позволят эффективно использовать десятки и сотни тысяч процессорных ядер. Очевидно, что только локальные численные методы смогут обеспечить эффективное использование такого количества ядер. В то же время по мере увеличения количества ядер процессоров, находящихся на общей оперативной памяти, вероятно, следует учитывать грядущее изменение понятия “локальности” вычислительного алгоритма. Это означает развитие существующих и создание новых технологий параллельного программирования, оптимальное их сочетание. Так, например, параллелизм на уровне узлов с распределенной памятью можно реализовать с помощью MPI, внутри узла на общей памяти использовать нити OpenMP, а внутри каждой нити дополнительно применять векторные инструкции. Разработчикам перспективных моделей атмосферы и океана придется также учитывать ожидаемое относительное (в расчете на одно процессорное ядро) снижение в несколько раз скорости обмена данными между процессором и памятью и между вычислительными узлами.

Огромный объем информации, получаемый в ходе расчетов с моделями Земной системы (или ее компонентов, например, атмосферы и океана),

необходимо хранить и обрабатывать. Результаты, например, прогноза погоды выводятся в виде набора двумерных полей на стандартных поверхностях по высоте и давлению для прогностических величин (скорости ветра, температуры, влажности, осадков и др.). Для сокращения объема хранимой и записываемой информации в моделях применяется упаковка данных перед их записью. Уже сейчас, при разрешении около 20 км, объем записываемой запакованной информации для каждой заблаговременности прогноза составляет примерно 1 Гб, на что в последовательном режиме тратится время, почти равное времени расчета в параллельном режиме прогноза на один час. В будущем размер запакованной информации возрастет до 1000 Гб для одной заблаговременности прогноза. Для анализа таких объемов данных необходима соответствующая вычислительно-информационная поддержка на основе современных технологий [32].

Аналогичные проблемы возникают при создании и хранении файла начальных данных для модели прогноза. Применяемые в настоящее время стандартные для Всемирной метеорологической организации алгоритмы упаковки метеоданных GRIB-1 и GRIB-2 ([www.wmo.int/pages/prog/www/WDM/Guides/Guide-binary-2.html](http://www.wmo.int/pages/prog/www/WDM/Guides/Guide-binary-2.html)) имеют ограниченную плотность упаковки и невысокую степень параллельности алгоритма. Поэтому весьма актуальной является разработка массивно-параллельного алгоритма сжатия информации для представления метеорологических полей (см., в частности, материал, расположенный на сайте [http://exascaleresearch.labworks.org/uploads/dataforms/D\\_PSTR\\_LBNL\\_ExaHDF5\\_110316.pdf](http://exascaleresearch.labworks.org/uploads/dataforms/D_PSTR_LBNL_ExaHDF5_110316.pdf)).

Как отмечалось во введении, в настоящее время наблюдается переход от моделей климата к моделям Земной системы. В связи с этим актуальной является необходимость разработки национальной экспертной системы оценки и прогноза климатических изменений на основе модели Земной системы. Такая национальная экспертная система может быть использована для получения независимых оценок состояния Земной системы (на глобальных и региональных масштабах) при различных сценариях антропогенного воздействия на систему и для оценки влияния долгосрочных изменений климата на отрасли народного хозяйства, подверженных влиянию климатических факторов. Применение “бесшовного” (seamless) подхода должно обеспечить использование модели Земной системы для целей как краткосрочного (на несколько суток), так и долгосрочного (климатического) прогноза с разной пространственной детализацией.

Необходимым представляется объединение на основе такой модели также технологий прогноза земной погоды и прогноза космической погоды, что потребует развития существующей системы усвоения данных. Обоснованием этого объединения служит востребованность прогноза нейтральной компоненты для расчета концентрации заряженных частиц в верхней атмосфере и возможность исследования проблемы солнечно-земных связей. В качестве основы такой прогностической технологии планируется (проект РФФИ «Исследование климата Земли с помощью перспективной модели Земной системы») использование глобальной модели атмосферы ПЛАВ, разработанной в Институте вычислительной математики РАН и внедренной (в качестве основного метода численного прогноза погоды) в оперативную практику Гидрометцентра России. Ее применение (подробное описание модели приведено в работе [33]) позволило существенно повысить качество среднесрочного прогноза погоды на территории России. В настоящее время модель ПЛАВ оперативно применяется также для расчета вероятностных сезонных прогнозов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-27-00126). Авторы благодарны Павлу Феликсовичу Демченко за конструктивные замечания по содержанию статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б. и др. Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 320 с.
2. Дымников В.П., Филатов А.Н. Основы математической теории климата. М.: ВИНТИ, 1994. 254 с.
3. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. Моделирование климата и его изменений: современные проблемы // Вестн. РАН. 2012. Т. 82. С. 227–236.
4. Covey C., Abe-Ouchi A., Boer G.J. et al. The seasonal cycle in coupled ocean-atmosphere general circulation models // *Climate Dynamics*. 2000. V. 16. P. 775–787.
5. Archer D. Methane hydrate stability and anthropogenic climate change // *Biogeosciences*. 2007. V. 4. P. 521–544.
6. Лыкосов В.Н., Глазунов А.В., Кулямин Д.В. и др. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы. М.: Изд.-во МГУ, 2012. 408 с.
7. Володин Е.М., Дианский Н.А. Моделирование изменений климата в XX–XXII столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 3. С. 291–306.
8. IPCC. Fourth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: Solomon S.D., Qin D., Manning M. et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
9. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4.0 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. С. 448–466.
10. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение и прогноз климатических изменений в XIX–XXI веках с помощью модели Земной климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 4. С. 379–400.
11. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis / Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1552 p.
12. Dunkerton T.J., Baldwin M.P. Quasi-biennial modulation of planetary-wave fluxes in the Northern Hemisphere winter // *J. Atmos. Sci.* 1991. V. 48. P. 1043–1061.
13. Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J. et al. The quasi-biennial oscillation // *Rev. Geophys.* 2001. V. 39. P. 179–229.
14. Baldwin M.P., Dunkerton T.J. Quasi-biennial modulations of the Southern Hemisphere stratospheric polar vortex // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 3343–3346.
15. Knaff J.A. Evidence of a stratospheric QBO modulation of tropical convection. Dep. of Atmos. Sci. Colo. State Univ. Fort Collins. 1993. Pap. № 520. 91 p.
16. Giorgetta M.A., Manzini E., Roeckner E. et al. Climatology and forcing of the quasi-biennial oscillation in the MAECHAM5 model // *J. Climate*. 2006. V. 19. P. 3882–3901.
17. Кулямин Д.В., Володин Е.М., Дымников В.П. Моделирование квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере. Часть I. Малопараметрические модели // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 5–20.
18. Кулямин Д.В., Володин Е.М., Дымников В.П. Моделирование квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере. Часть II. Модели общей циркуляции атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 1. С. 43–61.
19. Kawatani Y., Hamilton K., Watanabe S. The quasi-biennial oscillation in a double CO<sub>2</sub> climate // *J. Atmos. Sci.* 2011. V. 68. P. 265–283.
20. Stephens G.L., Vane D.G., Boain R.J. et al. The CloudSat mission and the A-TRAIN: A new dimension to space-based observations of clouds and precipitation // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2002. V. 83. P. 1771–1790.
21. Tapley B.D., Chambers D.P., Shum C.K. et al. Accuracy assessment of the large-scale dynamic ocean topography from TOPEX/POSEIDON altimetry // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № C12. P. 24605–24617.

22. *Volodin E.M., Galin V.Ya., Gusev A.V. et al.* Earth System model of INM RAS // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2010. V. 25. P. 419–429.
23. *McPeters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J. et al.* Nimbus-7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) data products user's guide. NASA Reference Publication 1384. NASA. 1996. 73 p.
24. *Kulyamin D.V., Dymnikov V.P.* A three-dimensional model of general thermospheric circulation // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2013. V. 28. P. 353–380.
25. *Kulyamin D.V., Dymnikov V.P.* Atmospheric general circulation model with hybrid vertical coordinate // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2014. V. 29. P. 355–373.
26. *Sato H., Tomita H., Miura H. et al.* Development of a global cloud resolving model. A multi-scale structure of tropical convections // J. Earth Simulator. 2005. V. 3. P. 1–9.
27. *Shukla J., Hagedorn R., Hoskins B. et al.* Revolution in climate prediction is both necessary and possible. A declaration at the World Modelling Summit for Climate Prediction // Bull. Amer. Met. Soc. 2009. V. 90. P. 175–178.
28. *Tao W.-K., Chern J.-D., Atlas R. et al.* A multiscale modeling system // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2009. V. 90. P. 515–534.
29. *Miyamoto Y., Kajikawa Y., Yoshida R. et al.* Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 4922–4926.
30. *Grabowski W.W.* An improved framework for superparameterization // J. Atmos. Sci. 2004. V. 61. P. 1940–1952.
31. *Wyngaard J.C.* Toward numerical modeling in the “Terra Incognita” // J. Atmos. Sci. 2004. V. 61. P. 1816–1826.
32. *Гордов Е.П., Лыкозов В.Н., Крупчатников В.Н. и др.* Вычислительно-информационные технологии мониторинга и моделирования климатических изменений и их последствий. Новосибирск: Наука, 2013. 199 с.
33. *Толстых М.А.* Глобальная полулагранжева модель численного прогноза погоды. М.—Обнинск: ОАО ФОП, 2010. 111 с.

## Mathematical Simulation of Earth System Dynamics

V. P. Dymnikov<sup>a, b</sup>, V. N. Lykosov<sup>a, c</sup>, and E. M. Volodin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina 8, Moscow, 119333 Russia

<sup>b</sup> Fedorov Institute of Applied Geophysics, Rostokinskaya ul. 9, Moscow, 129128 Russia

<sup>c</sup> Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

Received October 2, 2014

**Abstract**—The mathematical simulation of the Earth system, the dynamics of which depends on physical, chemical, biological, and other processes and which requires interdisciplinary approaches to studying this problem, is considered. The term “the Earth system” extends the concept “the climatic system,” since additional geospheres (lithosphere, heliosphere, etc.) are taken into account and a wider range of physical, chemical, biological, and social interactions is described. The present-day level of climate modeling is discussed, and some data obtained at the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences (INM RAS), are presented for this purpose. The prospects for further development of climate models toward the creation of the Earth system models based on a seamless approach, according to which a unified model is used to make short-term (several days) and long-term (climatic) prediction, are considered.

**Keywords:** weather forecast, greenhouse gases, global warming, climate, climate changes, the Earth system, mathematical simulation.