

Главным средством изучения как климатической системы в целом, так и протекающих в ней процессов является математическое (численное) моделирование, базирующееся на иерархии моделей — от глобальных, основу которых составляют модели общей циркуляции атмосферы и океана, до многомасштабных моделей геофизической турбулентности. Об этом рассказывается в публикуемой ниже статье.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА И ЕГО ИЗМЕНЕНИЙ: СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

В.П. Дымников, В.Н. Лыкосов, Е.М. Володин

К важнейшим проблемам современного этапа развития науки относится решение задачи прогноза изменений климата. Согласно оценкам межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), в последние десятилетия значительный вклад в эти изменения вносит антропогенное воздействие [1]. Не менее важна и естественная изменчивость климата. К наиболее значимым проявлениям собственной изменчивости климатической системы Земли следует отнести Эль-Ниньо — Южное колебание, Северо-Атлантическое колебание, Арктическую осцилляцию.

Математически климат определяется как статистический ансамбль состояний, принимаемый климатической системой за достаточно большой интервал времени [2]. Согласно Всемирной метеорологической организации, классический период осреднения составляет 30 лет. 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 [1].

На проблеме определения климата следует остановиться более подробно, так как многочисленные дискуссии вызываются тем, что люди

имеют в виду разные его дефиниции. Вышеприведённое определение подразумевает, что к климатическим характеристикам относятся любые параметры, осреднённые по вероятностной мере (статистические характеристики). В частности, если рассматривать прогноз погоды как расчёт траектории системы на конечном промежутке времени, а под предсказуемостью траектории понимать характерное время сходимости локализованного начального распределения точек в фазовом пространстве, характеризующего ошибки исходного состояния, к равновесному (климатическому) распределению, то эта характеристика, усреднённая по всему ансамблю начальных данных, будет климатической характеристикой. Характерное время определяет чувствительность системы к малым внешним воздействиям. В этом смысле понятия “климатическая модель” и “модель прогноза погоды” должны совпадать. В настоящее время при естественных ограничениях, обусловленных большой разницей во временных масштабах интегрирования, модели сильно различаются точностью пространственно-временной аппроксимации (выбором пространственного и временного разрешения) и, как следствие, также описанием процессов подсеточного масштаба.



Авторы работают в Институте вычислительной математики РАН. ДЫМНИКОВ Валентин Павлович — академик, главный научный сотрудник. ЛЫКОСОВ Василий Николаевич — член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник. ВОЛОДИН Евгений Михайлович — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник.

Проблемы воспроизведения и прогноза изменений климата, в отличие от классических проблем физики, имеют свою особенность: они не допускают прямого физического эксперимента. Более того, в силу специфических характеристик климатической системы (например, атмосфера и океан — это тонкие плёнки), лабораторные эксперименты представляются также весьма проблематичными. Для детального изучения реальной климатической системы имеется лишь ограниченный набор параметров траектории системы протяжённостью в несколько десятков лет, в течение которых проводились достаточно полные натурные измерения.

КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Математическое моделирование в физике атмосферы началось с постановки и решения задачи о гидродинамическом численном прогнозе погоды. Впервые проблема прогноза погоды как задача математики и механики была сформулирована в опубликованной в 1904 г. статье В. Бьеркнеса [3], где она рассматривалась как задача с начальными условиями для уравнений гидромеханики бароклинной жидкости. В начале 20-х годов XX в. Л. Ричардсоном была предложена методология численного прогноза погоды [4]. Поскольку в качестве начальных условий требуется использовать информацию о реальном состоянии атмосферы во всей её толще, он разработал приборы для атмосферных измерений на высотах, достигающих нескольких километров над подстилающей поверхностью. При построении теории численного прогноза погоды Ричардсон исследовал турбулентность пограничного слоя атмосферы, радиационных процессов и термодинамики атмосферы.

Однако попытка практического прогноза на один день (на 20 мая 1910 г. для района Нюрнберг—Аугсбург, Германия) численным методом (с помощью существовавших тогда вычислительных средств типа логарифмических линеек и механических калькуляторов) не удалась: рассчитанное приземное давление выросло за 6 часов на 145 гПа, что в 50 раз превысило наблюдавшуюся тенденцию. Причины следующие: в качестве начальных условий были использованы лишь наземные данные небольшой сети метеорологических станций в Европе; применённый Ричардсоном конечно-разностный метод оказался вычислительно неустойчивым (критерий Куранта—Фридрихса—Леви для соотношения пространственного и временного шагов был установлен позже [5]); уравнения гидродинамики атмосферы, использованные в прогностической схеме, наряду с относительно медленными движениями, ответственными за синоптические процессы, описывали также всевозможные “шумы” типа акустических

и гравитационных волн, фильтрация которых в начальный момент времени не была проведена.

Одна из причин неудачной попытки Ричардсона, связанная с наличием “шумов” в синоптических движениях, была устранена И.А. Кибелем [6]. Предложенный им фундаментальный принцип упрощения уравнений гидродинамики атмосферы (асимптотическое “квазигеострофическое разложение”) позволил разработать процедуру фильтрации из решений уравнений несущественных для погоды метеорологических шумов и послужил основой для создания гидродинамической теории краткосрочных прогнозов погоды [7]. Появление электронно-вычислительных машин дало возможность в начале 50-х годов XX в. осуществить первый “практический” численный прогноз погоды (использовалась модель, основанная на баротропном уравнении вихря [8]). Это была реализация первого этапа плана исследовательской метеорологической группы в Институте перспективных исследований (Принстон, США) по созданию серии моделей, шаг за шагом всё лучше и лучше воспроизводящих действительное состояние атмосферы. Важным выводом стало заключение о принципиальной возможности оперативного решения задачи прогноза погоды численными методами с использованием более совершенной (в частности, за счёт исключения не арифметических операций) вычислительной техники.

Центральной проблемой теории климата, поставленной в первой половине XX в., стало воспроизведение основных характеристик атмосферной циркуляции с помощью математических моделей [9]. В этой работе под математической теорией общей циркуляции понималась возможность её описания с помощью уравнений геофизической гидродинамики. В 1956 г. были опубликованы результаты первого численного эксперимента по воспроизведению основных характеристик общей циркуляции атмосферы с помощью двухслойной, квазигеострофической, “полусферной” модели [10], а в начале 1960-х годов появилась первая девятиуровневая модель, основанная на полных (неупрощённых) уравнениях [11]. Параллельно с атмосферными моделями разрабатывались и модели общей циркуляции океана [12, 13]. В 1969 г. были опубликованы результаты численных экспериментов с первой совместной моделью общей циркуляции атмосферы и океана [14].

В России в 1973 г. по инициативе Г.И. Марчука Отделение океанологии, физики атмосферы и географии АН СССР приняло решение о создании математических моделей климата, основанных на моделях общей циркуляции атмосферы и океана. Одна из таких моделей, вычислительная технология которой базировалась на использовании законов сохранения и неявных методов расщепления, была построена в Вычислительном

центре СО АН СССР. Впервые проблема моделирования общей циркуляции атмосферы и океана обсуждалась во всём её многообразии — от физической постановки и её математической формулировки до вычислительной технологии [15].

Ограниченные возможности вычислительной техники того времени и недостаточная детальность параметризаций физических процессов в атмосфере и океане не позволили добиться необходимого качества воспроизведения климата, которое отвечало бы современным требованиям (в частности, проявлялся так называемый “дрейф” климата — всё нарастающее отклонение расчётных характеристик от наблюдаемых). Тем не менее, перечисленные выше работы положили начало дальнейшему развитию климатического моделирования как в мире, так и в России. Кроме того, было продемонстрировано, что прогресс в развитии вычислительной техники даёт возможность строить всё более точные модели конкретных физических процессов и тем самым не только совершенствовать модели климата и технологии прогноза погоды, но и формулировать новые задачи и новые требования к вычислительным системам.

В настоящее время климатические модели интенсивно развиваются благодаря совершенствованию вычислительной техники. Этот “параллелизм” в развитии необходим для понимания механизмов, ответственных за воспроизведение различных климатических характеристик. Обработка результатов численных экспериментов по созданию модели современного климата в рамках международных программ показала: основные характеристики, полученные с помощью различных моделей и затем усреднённые по всему набору моделей, оказываются ближе к реально наблюдаемому, чем характеристики, полученные с помощью отдельных, даже лучших моделей.

В рамках международных программ AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project), CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) и других проводится целенаправленное сравнение моделей, разработанных группами исследователей в разных странах мира, как между собой, так и с данными наблюдений. Это даёт возможность исследовать систематические ошибки в воспроизведении современного климата и оценить диапазон его возможных изменений, обусловленных, например, антропогенным воздействием. В России, в частности, такого рода климатические модели создаются в Институте вычислительной математики (ИВМ) РАН и Главной геофизической обсерватории (ГГО) [16]. Совместная модель атмосферы и океана [17] Института физики атмосферы (ИФА) РАН для исследования долгопериодной изменчивости климата относится к классу моделей промежуточной сложности.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Согласно определению Всемирной метеорологической организации, климатическую систему планеты Земля образуют следующие взаимодействующие компоненты: атмосфера — газовая оболочка Земли сложного состава (кислород, азот, углекислый газ, водяной пар, озон и т.д.), воздействующая на перенос к поверхности Земли солнечной радиации, поступающей на её верхнюю границу, и являющаяся наиболее изменчивой составляющей рассматриваемой системы; океан — главный водный резервуар в системе, состоящий из солёных вод Мирового океана и прилегающих к нему морей, поглощающий основную часть поступающей на его поверхность солнечной радиации и представляющий собой, благодаря высокой теплоёмкости воды, мощный аккумулятор энергии; суша — поверхность континентов с её гидрологической системой (внутренние водоёмы, болота и реки) и почва (в том числе с грунтовыми водами); криосфера — континентальные и морские льды, горные ледники, снежный покров и криолитозона (“вечная мерзлота”); биота — растительность на суше и океане, а также живые организмы в воздухе, море и на суше, включая человека (рис. 1).

В основу построения современных моделей климата положен ряд принципов. Предполагается, что локально справедливы уравнения классической равновесной термодинамики и что для описания динамики атмосферы и океана справедливы уравнения Навье–Стокса для сжимаемой жидкости. Поскольку в современных моделях в силу главным образом вычислительных возможностей используются уравнения Рейнольдса — осреднённые по некоторым пространственным и временным масштабам уравнения Навье–Стокса, то считается, что существует принципиальная возможность их замыкания. Процедура замыкания предполагает, что эффекты процессов подсеточных масштабов (масштабов меньших, чем масштаб осреднения) могут быть выражены через характеристики процессов больших масштабов. К последним относятся: перенос излучения (коротковолновой и длинноволновой радиации); фазовые переходы влаги и локальное осадкообразование; конвекция; турбулентность в пограничных слоях (некоторые характеристики этих слоёв описываются явно); мелкомасштабные орографические возмущения; волновое сопротивление (взаимодействие мелкомасштабных гравитационных волн с основным потоком); мелкомасштабная диссипация и диффузия; перенос тепла, влаги, метана и других газов в деятельном слое суши, в том числе при наличии водоёмов. Наконец, для описания крупномасштабных атмосферных и океанических движений справедливо приближе-

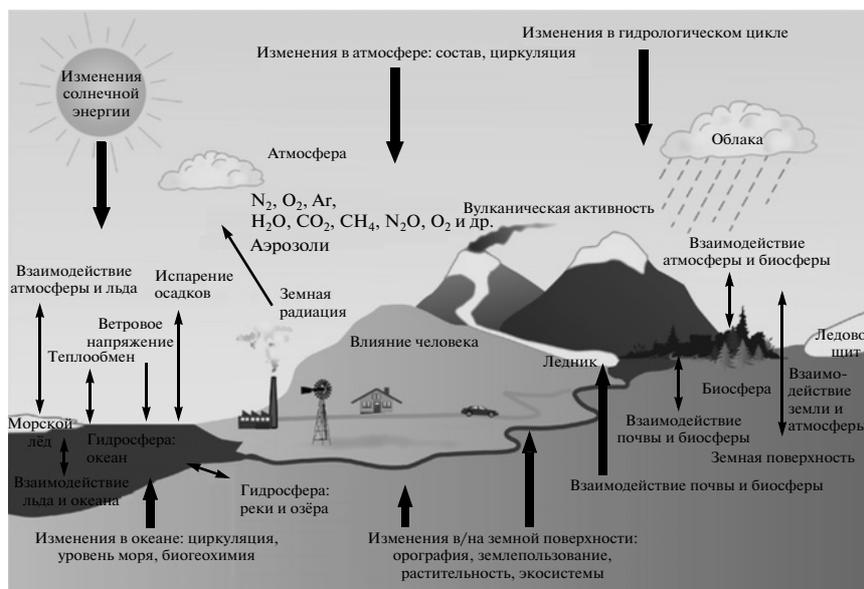


Рис. 1. Схематическое изображение компонентов климатической системы, их взаимодействий и основных процессов

ние гидростатики: вертикальный градиент давления уравнивается силой тяжести. Использование такого приближения требует дополнительных упрощений (постоянный радиус Земли, пренебрежение составляющими силы Кориолиса с вертикальной компонентой скорости), с тем чтобы в системе уравнений при отсутствии внешних источников энергии и диссипации выполнялся закон сохранения энергии. Уравнения гидротермодинамики атмосферы и океана, замыкания процессов подсеточных масштабов и краевые условия подробно рассмотрены в работе [18].

Очевидно, что получить аналитические решения при произвольных начальных данных сложных нелинейных уравнений гидротермодинамики атмосферы и океана невозможно, и потому пытаются найти их приближённые решения с помощью разного рода конечномерных аппроксимаций. Аппроксимации должны строиться так, чтобы при отсутствии диссипации и источников энергии выполнялся закон сохранения — аналог исходного закона. Данный закон автоматически приводит к вычислительной устойчивости решения разностной задачи, если под устойчивостью понимается непрерывная зависимость нормы решения от нормы правой части и нормы начальных данных.

Вместе с тем приведённого выше требования при построении разностных схем для климатических моделей недостаточно. Важно отметить, что в отличие от задач прогноза погоды, где необходимо воспроизвести решение на конечном промежутке времени, в задачах моделирования климата требуется аппроксимировать аттрактор исходной модели как множество и меру на нём или

статистическое стационарное решение. Доказательство глобальной разрешимости конечномерных моделей климата и существования для них глобального аттрактора не вызывает особых затруднений [2]. Проблема состоит в доказательстве сходимости аттракторов конечномерных аппроксимаций к аттрактору исходной модели при стремлении параметров аппроксимации к нулю. Сложность здесь заключается ещё и в выборе метрики, в которой исследуется сходимость. Конструктивные оценки упомянутой выше сходимости в “полезных” (хаусдорфовых) метриках в настоящее время отсутствуют, что представляет собой важную и интересную проблему вычислительной математики. Поскольку теорем сходимости нет, то при моделировании климатической системы используется подход, связанный с аппроксимацией наиболее значимых физических процессов, участвующих в формировании климата. Можно привести некоторые примеры.

Так как атмосфера и океан квазидвумерны, то перенос энергии по спектру в этих средах определяется законами двумерной жидкости. Известно, что в идеальной несжимаемой двумерной жидкости имеются два квадратичных инварианта — энергия и энстрофия (квадрат завихренности). При этом распределение энергии в инерционном интервале масштабов, в котором диссипация и генерация энергии практически отсутствуют и основным процессом является передача энергии по спектру, по существу, определяется переносом энстрофии в сторону высоких волновых чисел. Чтобы выполнить это условие в численной модели, необходимо строить конечномерные аналоги таким образом, чтобы в двумерной асимптотике

также существовали конечномерные аналоги энергии и энтропии, которые были бы инвариантами при отсутствии диссипации и источников.

Следует, однако, отметить, что измерения, проведённые в последние десятилетия (см., например, [19]), показали: атмосфера имеет принципиальные особенности, отличающие её эволюцию от поведения квазидвумерной жидкости. Генерация энергии в атмосфере происходит на синоптических масштабах вследствие реализации бароклинной неустойчивости. На масштабах, превышающих синоптические, инерционный интервал отсутствует и распределение энергии по спектру определяется относительным соотношением между характерным временем диссипации энергии в пограничном слое и характерным временем нелинейных взаимодействий. На масштабах меньше синоптических инерционный интервал существует, и там, согласно теории двумерной турбулентности, распределение энергии имеет вид k^{-3} (k – пространственное волновое число). Однако, начиная с масштаба примерно 800 км, распределение энергии подчиняется закону $k^{-5/3}$ как в трёхмерной турбулентности Колмогорова, хотя на этих масштабах атмосфера, очевидно, квазидвумерна.

Далее, закон сохранения момента количества движения относительно оси вращения Земли определяет распределение скорости ветра у поверхности Земли (наличие пассатов). Важным также является закон сохранения энтропии в адиабатическом приближении. Кроме того, следует отметить физические явления типа циклогенеза, правильное воспроизведение которого требует хорошей аппроксимации по спектру некоторых линейных операторов (по собственным и сингулярным числам), 30–60-дневных колебаний в тропиках, распространения квазистационарных волн и многих других процессов, ответственных за климатические характеристики. Особое значение имеет решение уравнений переноса малых примесей с большими пространственными градиентами, что накладывает обязательное требование на условие монотонности разностных схем.

Необходимо отметить также проблему отображения вычислительных алгоритмов на суперкомпьютерную архитектуру. В настоящее время развитие вычислительной техники и вычислительных алгоритмов связано с параллельными вычислениями. Современные оценки вычислительных алгоритмов могут существенно отличаться от устоявшихся оценок, связанных с оценками последовательных вычислений. Часто исследователь, использующий массивные параллельно-вычислительные системы, вынужден выбирать алгоритм, возможно, не эффективный для последовательных вычислений, но легко распараллеливаемый. По-

скольку в процессе решения климатических задач количество арифметических операций огромно, целесообразно конструировать вычислительные системы, непосредственно ориентированные на решение этих задач.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА И ЕГО ИЗМЕНЕНИЙ

В начале 2000-х годов был заявлен международный проект CMIP3 по воспроизведению современного климата и прогнозу его изменений с помощью совместных моделей атмосферы и океана. В 2004–2005 гг. проводились эксперименты по сценариям, предложенным МГЭИК [1]. Всего в проекте принимали участие 23 совместные модели, созданные в разных странах и имеющие различные параметры. Результаты, полученные с помощью этих моделей, положены в основу прогноза изменений климата в XXI в. в 4-м оценочном докладе МГЭИК [1], получившем большой общественный резонанс. Единственной российской моделью, участвовавшей в этом проекте, была совместная модель общей циркуляции атмосферы и океана, разработанная в ИВМ РАН, которая получила название INMCM3.0 (Institute of Numerical Mathematic Climate Model, версия 3.0) [1]. Расчёты современного климата и его изменений в XX в., а также вероятных изменений климата в XXI–XXII вв. с помощью версии модели INMCM3.0 представлены в статье [20].

К настоящему времени разработана версия модели INMCM4 [21], участвующая в программе CMIP5, по результатам которой будет подготовлен 5-й отчёт МГЭИК, публикация которого запланирована на 2013 г. Наряду с блоками расчёта общей циркуляции атмосферы и океана, модель INMCM4 содержит и блок углеродного цикла. Кроме этих двух версий, создаётся также модель земной системы, включающая вместе с перечисленными выше блоками и блок, описывающий химию атмосферы [22].

Модель INMCM4 и воспроизведение ею современного климата подробно описаны в работе [21]. В атмосфере разрешение составляет $2 \times 1.5^\circ$ по долготе и широте и 21 уровень по вертикали до высоты около 30 км. Шаг по времени в динамическом блоке равен 5 минутам. В модели океана – разрешение $1 \times 0.5^\circ$ по долготе и широте и 40 уровней по вертикали. Шаг по времени составляет 2 часа. На каждом шаге модели океана происходит обмен граничными условиями между атмосферой и океаном. В модели также рассчитываются процессы, происходящие в криосфере, деятельном слое суши и на её поверхности, в том числе в растительном покрове, а также учитывается углеродный цикл, включающий в себя эволюцию углерода растений, почвы, океана и атмосферы. Модель реализована на параллельных

компьютерах средствами MPI и OPEN MP. На кластере ИВМ РАН счёт на 48 процессорах на 8 модельных лет занимает сутки реального времени.

Программа CMIP5 предусматривает всестороннее сравнение всех существующих климатических моделей при воспроизведении климата прошлого, настоящего и будущего. Численные эксперименты, предлагаемые CMIP5, основываются на расчётах реалистичных и методических. В реалистичных расчётах моделируется климат настоящего либо прошлого или будущего согласно предписанному сценарию. По этим расчётам строятся прогнозы вероятных будущих изменений. Методические расчёты содержат идеализированный сценарий и позволяют лучше понять причины, по которым модели дают те или иные результаты. Кроме того, у каждого предлагаемого численного эксперимента имеется приоритет, то есть желательнее провести с моделью эксперименты с наивысшим приоритетом, а потом, если позволяют ресурсы и имеется научный интерес, эксперименты с более низким приоритетом.

С моделью INMCM4 проведены лишь те численные эксперименты, которые имеют наивысший приоритет. Реалистичные эксперименты были следующими: 1.1 – воспроизведение изменений климата в 1850–2005 гг. с использованием наблюдавшихся концентраций парниковых и других газов, вулканических и антропогенных аэрозолей, вариаций солнечного излучения; 1.2 – моделирование изменений климата в 2006–2100 гг. с использованием сценария RCP8.5 (очень тёплый) и RCP4.5 (наиболее вероятный) концентрации парниковых и других газов; 1.3 – моделирование изменений климата в 1850–2100 гг. с использованием антропогенных эмиссий углекислого газа в результате сжигания топлива и землепользования, в отличие от концентрации, принятой в экспериментах 1.1 и 1.2, что предусматривает интерактивный расчёт углеродного цикла; в остальном условия эксперимента соответствуют экспериментам 1.1 и 1.2 (сценарий RCP8.5); 1.4 – моделирование прединдустриального климата на срок 500 лет; 1.5 – воспроизведение климата 1979–2008 гг. с предписанными наблюдаемыми температурой океана и количеством морских льдов, то есть без использования модели океана.

Кроме того, были проведены следующие методические эксперименты: 2.1 – моделирование климата для условий, при которых концентрация CO₂ увеличивается, начиная с прединдустриального уровня на 1% в год в течение 140 лет, то есть до её четвертения; 2.2 – моделирование климата для ситуации, когда в начальный момент времени происходит мгновенное четвертение концентрации CO₂, после чего она остаётся постоянной в течение 150 лет; 2.3 – ситуация такая же, как в предыдущем случае, но с предписанным состоянием океана.

Результаты всех проведённых экспериментов загружены в базу данных CMIP5 и занимают объём около 8 Тб. По результатам методических экспериментов, равновесная чувствительность модели к учетверению концентрации CO₂ составляет 4.1°, что, по-видимому, является одной из самых низких среди современных моделей. Результаты CMIP5 пока не опубликованы, но согласно данным CMIP3, равновесная чувствительность к удвоению CO₂ для всех моделей укладывается в диапазон 2.1–4.4° [1]. При этом величина глобального потепления зависит от увеличения концентрации CO₂ логарифмическим образом. Уровень потепления спустя 150 лет после мгновенного учетверения CO₂ составляет в модели лишь 3.1 градуса в силу термической инерции океана.

Воспроизведение современного климата подробно описано в работе [21], здесь же приводится лишь краткий анализ среднегодовых полей температуры, давления и скорости ветра. Сравнение высотно-широтных распределений зонально-осреднённой температуры, рассчитанных по данным реанализа NCEP [23] за 1971–2000 гг. и результатам модельного эксперимента 1.3 (те же годы) показало, что в тропосфере отличие модельной температуры от наблюдавшейся не превосходит 1–2°. Исключение составляет нижняя тропосфера в Арктике, где модель завышает температуру на 3–4°. Нижняя стратосфера в высоких широтах обоих полушарий в модели на 4–6° холоднее, чем по данным реанализа, а вблизи тропической тропопаузы – на 2–4° теплее.

Сравнительный анализ географического распределения температуры воздуха у поверхности Земли по данным реанализа NCEP [23] и результатам модели показал, что в целом модель верно воспроизводит наблюдаемую температуру. Ошибки в основном не превосходят 2°. Исключение составляет лишь северная часть Африки и юго-запад Азии, где температура занижена на 3–5°, а также некоторые районы вокруг Южного полюса, где температура завышена на 3–6°.

Из сравнения наблюдаемой и модельной скорости зонального ветра следует, что в модели хорошо воспроизводятся области пассатов и западных ветров умеренных широт, субтропические максимумы скорости вблизи тропопаузы. В тропосфере ошибка скорости ветра в модели не превосходит 2 м/с, а в стратосфере достигает 4–8 м/с в умеренных широтах Южного полушария.

Анализ среднегодового распределения давления показал, что в модели хорошо воспроизводятся известные из наблюдений субтропические антициклоны Северного и Южного полушарий, Алеутский и Исландский минимумы давления, а также минимум давления вокруг Южного полюса и максимумы над Антарктидой и Гренландией. В основном ошибки не превосходят 1–2 гПа,

исключение составляет занижение давления на 4–5 гПа над северо-востоком Азии, Аляской и прилегающими районами Тихого и Северного Ледовитого океанов.

Моделирование изменений климата. Анализ результатов эксперимента даёт возможность выделить основные моды естественной климатической изменчивости в модели. С этой целью вычислены эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) температуры поверхности, осреднённой за каждое пятилетие предындустриального эксперимента 1.4, в различных географических регионах. Эти функции представляют собой собственные векторы ковариационной матрицы временного ряда поля соответствующей климатической переменной и характеризуют их вклад во временную изменчивость этой переменной.

Наибольший интерес представляет регион Северная Атлантика–Арктика–Евразия, где, согласно данным наблюдений, проявляется Атлантическое десятилетнее колебание (см., например, [24]). Первая ЭОФ температуры над Северной Атлантикой, Арктикой и Евразией характеризует повышение температуры в высоких широтах Северного полушария с максимумом в атлантическом секторе Северного Ледовитого океана. Характерный период изменчивости в модели составляет 35–50 лет. Разность приземной температуры, осреднённой за последние 20 лет (1991–2010) и предыдущие 20 лет (1971–1990) по данным реанализа NCEP [23] характеризуется тем, что на фоне общего потепления хорошо видно более сильное потепление в атлантическом секторе Арктики. Таким образом, заметный вклад в наблюдаемое потепление Арктики в последние десятилетия может вносить естественная изменчивость, проектирующаяся на первую ЭОФ.

Изменение глобально осреднённой температуры в 1850–2100 гг., по данным экспериментов, а также в первую половину предындустриального эксперимента можно видеть на рисунке 2. Естественные колебания температуры в модельной климатической системе не превосходят 0.2° . Потепление в течение XX в. составило, по модельным данным, величину, равную примерно 0.7° . К концу XXI в. потепление достигает почти 1.9° при сценарии RCP4.5 и 3.5° при сценарии RCP8.5. Показатели глобального потепления в эксперименте 1.3, когда концентрация CO_2 рассчитывается по заданным антропогенным эмиссиям с помощью модели углеродного цикла, очень близки к данным экспериментов 1.1 и 1.2, где концентрация CO_2 предписана.

Роль углеродного цикла отражена на рисунке 3, где изображено увеличение массы углерода в растениях, почве, океане и атмосфере по сравнению с 1850 г. Прирост массы углерода в океане немного меньше, чем в атмосфере. В растениях и почве

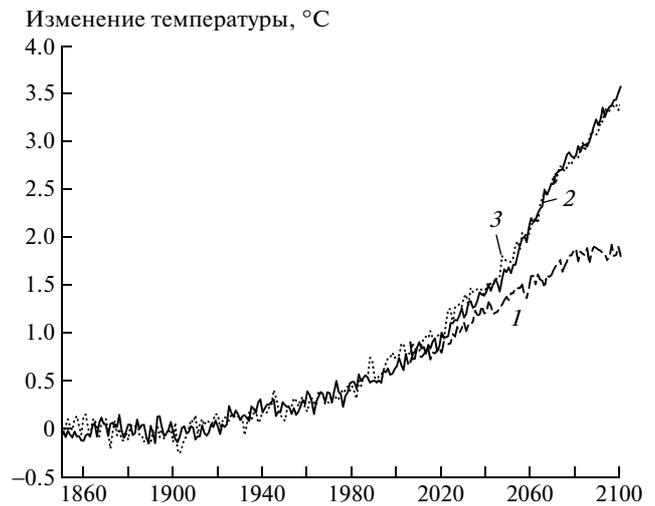


Рис. 2. Изменение температуры по сравнению с 1850–1899 гг. в экспериментах
1 – сценарий RCP 4.5; 2 – сценарий RCP8.5 и 3 – эксперимент 1.3

в течение 1850–2030 гг. происходит небольшое уменьшение массы углерода вследствие интенсивного землепользования, а в 2040–2100 гг. – небольшой рост, поскольку влияние потепления и фертилизации станет сильнее.

Модель земной системы включает атмосферный блок с разрешением $5 \times 4^\circ$ по долготе и широте и 39 уровней по вертикали до высоты 90 км [22]. Блоки океана и углеродного цикла полностью идентичны тем, что используются в модели INMCM4 и кратко описаны выше. Модель включает также химический блок, в котором учитывается изменчивость 74 малых газовых составляющих атмосферы, прямо или косвенно влияющих

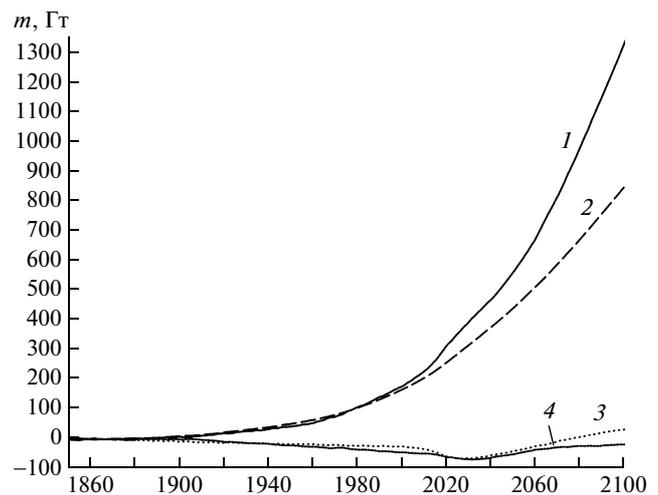


Рис. 3. Изменение массы углерода в эксперименте
1 – в атмосфере; 2 – в океане; 3 – в растениях и 4 – в почве в эксперименте 1.3



Рис. 4. Изменение общего содержания озона

на фотохимическое изменение концентрации озона. Приняты во внимание реакции кислородного, водородного, азотного, хлорного, бромного и серного циклов. Атмосферный перенос химически активных примесей осуществляется с использованием рассчитанных в динамическом блоке скоростей ветра, а скорости химических реакций оцениваются при помощи температуры, полученной из циркуляционного блока. Расчётные концентрации озона используются для вычисления скоростей лучистого нагрева атмосферы, а метана и водяного пара — для охлаждения атмосферы, учитываемых в циркуляционном блоке. Для учёта гетерогенных процессов рассматривается формирование и эволюция полярных стратосферных облаков. Взаимодействие химического и динамического блоков подробно описано в работе [25]. Такая модель необходима в первую очередь для моделирования ситуаций, в которых изменение климата и всей окружающей среды носит комплексный характер, например при оценке последствий гипотетических геоинженерных воздействий с целью смягчить глобальное потепление [26].

С моделью земной системы проведён численный эксперимент, условия которого аналогичны условиям эксперимента 1.4, но кроме того, задавались сценарии потоков с поверхности нескольких десятков малых газовых составляющих. Поскольку изменения собственно климата и углеродного цикла рассматривались выше, здесь целесообразно ограничиться анализом изменения общего содержания озона (СО) в XX–XXI вв. (рис. 4). Минимум СО в конце XX — начале XXI в. обусловлен максимальной эмиссией хлор- и фторсодержащих веществ. После уменьшения их эмиссий происходит восстановление, а в конце XXI в. и превышение СО по сравнению с 1970-ми годами, что связано с похолоданием

стратосферы вследствие парникового эффекта. Однако превышение СО уровня 1970-х годов велико лишь в умеренных и высоких широтах, особенно в конце зимы в каждом из полушарий. В тропиках СО в конце XXI в. не превосходит уровень 1971–1980 гг. Такая неоднородность обусловлена усилением циркуляции Брюера–Добсона, то есть более интенсивным подъёмом воздуха в тропической стратосфере и опусканием в высоких широтах. Подобные особенности изменения СО в XX–XXI вв. получены и в других химико-климатических моделях (см., например, [27]).

В настоящей работе внимание уделено лишь некоторым аспектам проблемы моделирования климата и его изменений, в рамках которой существует большое количество задач, требующих самостоятельного исследования. В частности, не рассмотрено новое направление — математическая теория климата. Одной из её главных задач является обоснование пригодности современных климатических моделей для анализа чувствительности реальной климатической системы к внешним воздействиям [2].

На компьютерах реализуется некоторая конечномерная аппроксимация исходной дифференциальной модели, и на первый взгляд кажется, что аналитические исследования асимптотических свойств моделей не слишком важны, поскольку свойства близости к реальности можно изучать непосредственно с помощью сравнительного анализа результатов численных экспериментов с данными наблюдений. Однако у некоторых учёных есть серьёзное возражение по поводу этого утверждения, связанное с проблемой чувствительности климатической системы к внешним воздействиям. Если нельзя провести целенаправленные эксперименты с климатической системой, то требуется убедительное обоснование того, что чувствительность разрабатываемых моделей к малым внешним воздействиям, близка к чувствительности реальной климатической системы.

Возникает вопрос: возможно ли, зная траекторию системы, вычислить её отклик на малые внешние воздействия? Каким условиям должна удовлетворять система, чтобы ответ на сформулированный вопрос был положительным? Более того, следствием исследований должно стать формулирование главного математического результата — метода построения оператора отклика.

Дальнейшее развитие климатических моделей и методов прогноза погоды связано с повышением пространственного разрешения и совершенствованием физических параметризаций процессов подсеточных масштабов. Уровень пространственного разрешения и в значительной степени сложность физических параметризаций лимитируются производительностью наиболее мощных вычислительных систем (суперкомпьютеров). Так, пи-

ковая производительность имеющихся в распоряжении разработчиков климатических моделей вычислительных комплексов (несколько сотен, в лучшем случае тысячи триллионов арифметических операций в секунду) позволяет вести длительные (на сотни лет) расчёты лишь на сетке с разрешением порядка 100 км. Это разрешение не даёт возможности оценивать эффекты изменения климата на региональном уровне, в то время как именно региональные различия в будущем климате представляют особенный интерес.

Для получения региональных прогнозов широко используются мезомасштабные модели с разрешением 1–10 км и размером расчётной области от нескольких сотен до нескольких тысяч километров. Мезомасштабные модели упомянутого разрешения, в свою очередь, не способны явно воспроизводить структуру атмосферных течений с пространственным масштабом менее нескольких километров. Такие течения могут быть воспроизведены методом вихререшающего моделирования, который позволяет явно описать нестационарную динамику крупных трёхмерных вихрей, вносящих основной вклад в энергию турбулентных потоков в пограничном слое атмосферы. Пространственное разрешение вихререшающих моделей пограничного слоя атмосферы, в зависимости от типа турбулентного течения, составляет от нескольких метров до нескольких десятков метров, а размеры расчётной области — до нескольких десятков километров.

В настоящее время всё более широкое распространение получают петафлопные (10^{15} арифметических операций в секунду) вычислительные системы, а в перспективе текущего десятилетия ожидается, что производительность суперкомпьютеров достигнет эксафлопного (10^{18} операций в секунду) уровня. Это означает, что глобальные атмосферные модели будут иметь разрешение, характерное для современных мезомасштабных моделей (1–10 км), а шаг сетки моделей, используемых для прогноза атмосферной циркуляции на региональном уровне, составит ~ 100 м. 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 3.5–10 км [28], заложил основу для активного экспериментирования с моделями очень высокого разрешения и привёл к необходимости разработать стратегию дальнейшего развития климатических моделей с учётом перспектив высокопроизводительных вычислений [29].

В связи с этим потребуются пересмотр многих параметризаций подсеточных процессов, используемых в современных моделях общей циркуляции атмосферы и океана. В первую очередь это

касается параметризации конвекции, поскольку она начинает воспроизводиться явно при разрешениях несколько километров и менее. Всё большее внимание уделяется созданию “бесшовных” (с улучшенным локальным разрешением и физическим описанием) моделирующих систем, позволяющих в рамках единой вычислительной технологии создать более широкий спектр атмосферных движений (см., например, [30]). Переход на очень детальное разрешение не может быть осуществлён “механически” (только за счёт отказа от гидростатического приближения), без масштабной переработки существующих вычислительных технологий и в некоторых случаях переформулировки параметризаций и систем уравнений, используемых в настоящее время для приближённого описания гидротермодинамики климатической системы, а в перспективе — Земной системы.

В заключение необходимо подчеркнуть, что современные климатические модели и модели перспективного будущего можно с уверенностью отнести к классу высоких технологий. Имея в виду, что прогноз климатических изменений является проблемой государственной важности, такие технологии следует рассматривать как необходимые элементы государственной безопасности. В этой связи трудно объяснить тот факт, что, несмотря на наличие Климатической доктрины, в России отсутствует Национальная климатическая программа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-05-12018-офи-м-2011, 11-05-00435, 11-05-01190, 09-05-00681, 09-05-01231), гранта Президента России для поддержки ведущих научных школ НШ-3521.2010.5, Госконтракта № 07.514.11. 4044, а также программы 16 фундаментальных исследований РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. IPCC. Fourth Assessment Report // Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S.D., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.). N.Y.: Cambridge University Press, 2007.
2. Дымников В.П., Филатов А.Н. Основы математической теории климата. М.: ВИНТИ, 1994.
3. Bjerknes V. Das Problem von der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik // Meteor. 1904. В. 21.
4. Richardson L.F. Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge University Press, 1922.
5. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differentialgleichungen der mathematischen Physik // Math. Ann. 1928. В. 100.
6. Кибель И.А. Приложение к метеорологии уравнений механики бароклинной жидкости // Известия АН СССР. Серия география и геофизика. 1940. № 5.

7. *Кибель И.А.* Введение в гидродинамические методы краткосрочного прогноза погоды. М.: Гостехиздат, 1957.
8. *Charney J.G., Fjörtoft R., von Neumann J.* Numerical integrations of the barotropic vorticity equations // *Tellus*. 1950. V. 2.
9. *Дородницын А.А., Извеков Б.И., Швец М.Е.* Математическая теория общей циркуляции // *Метеорология и гидрология*. 1939. № 4.
10. *Phillips N.* The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 1956. V. 82.
11. *Smagorinsky J.* General circulation experiment with the primitive equations. I. The basic experiment // *Mon. Wea. Rev.* 1963. V. 91.
12. *Саркисян А.С.* Основы теории и расчёт океанических течений. Л.: Гидрометеоздат, 1966.
13. *Bryan K.A.* Numerical method for the study of the circulation of the World Ocean // *J. Comput. Phys.* 1969. V. 4.
14. *Manabe S., Bryan K.* Climate and the ocean circulation // *Mon. Wea. Rev.* 1969. V. 97.
15. *Марчук Г.И., Дымников В.П., Залесный В.Б. и др.* Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана. Л.: Гидрометеоздат, 1984.
16. *Мелешко В.П., Катцов В.М., Спорышев П.В. и др.* Изучение возможных изменений климата с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана // *Изменения климата и их последствия. Материалы специальной сессии Учёного совета Центра международного сотрудничества по проблемам окружающей среды, посвящённой 80-летию академика М.И. Будыко (19–20 мая 1999 г.)*. СПб, 2002.
17. *Мохов И.И., Демченко П.Ф., Елисеев А.В. и др.* Оценки глобальных и региональных изменений в климатической модели ИФА РАН в XIX–XXI веках с учётом антропогенных воздействий // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2002. № 5.
18. *Дымников В.П., Лыков В.Н., Володин Е.М. и др.* Моделирование климата и его изменений // *Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования*. Т. 2. Математическое моделирование. М.: Наука, 2005.
19. *Gage K.S., Nastrom G.D.* On the spectrum of atmospheric velocity fluctuations seen by MST/ST radar and their interpretation // *Radio Sci.* 1990. V. 20.
20. *Володин Е.М., Дианский Н.А.* Моделирование изменений климата в XX–XXII столетиях с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т. 42.
21. *Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В.* Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4.0. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2010. Т. 46.
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. № 5.
23. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. Met. Soc.* 1996. V. 77.
24. *Semenov V.A., Latif M., Dommenget D. et al.* The impact of north Atlantic-Arctic multidecadal variability on northern hemisphere surface air temperature // *Journ. Climate*. 2010. V. 23.
25. *Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М.* Совместная химико-климатическая модель атмосферы // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43.
26. *Володин Е.М., Кострыкин С.В., Рябошапка А.Г.* Моделирование изменения климата вследствие введения серосодержащих веществ в стратосферу // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47.
27. *Зубов В.А., Розанов Е.В., Розанова И.В. и др.* Моделирование глобальных изменений озона и атмосферной динамики в XXI веке с помощью химико-климатической модели SOCOL // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47.
28. *Satoh M., Tomita H., Miura H. et al.* Development of a global cloud resolving model. A multi-scale structure of tropical convections // *Journ. Earth Simulator*. 2005. V. 3.
29. *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.
30. *Tao W.-K., Chern J.-D., Atlas R. et al.* A multiscale modeling system // *Bull. Amer. Met. Soc.* 2009. V. 90.