

Модель климатической системы Земли



1 Earth climate system model

Earth climate system model is important instrument for climate study and climate change prediction. Such model includes solving equations of atmospheric and oceanic dynamics, parameterization of soil and vegetation processes, modeling of atmospheric chemistry and oceanic biogeochemistry, atmospheric electric phenomena, evolution of sea ice and land icesheets. Climate model developed in INM RAS was used to reproduce of past climate and to estimate future climate changes.

Key words: model, climate, change, atmosphere, ocean, greenhouse effect.

AUTHORS:

E. M. Volodin — doctor of physics and mathematics, leading researcher of INM RAS
e-mail: volodinev@gmail.com

V. N. Lykossov — Corresponding member of RAS, main researcher of INM RAS, Head of laboratory in RCC, MSU
e-mail: lykossov@yandex.ru

Модель климатической системы Земли

1

В настоящее время одним из основных инструментов исследования климата и прогноза его изменений являются модели климатической системы Земли. Такая модель включает в себя решение уравнений динамики атмосферы и океана, учет процессов в почве и растениях, моделирование химии атмосферы и биохимии океана, атмосферных электрических явлений, эволюции морского льда и ледниковых щитов. С помощью модели климатической системы, разработанной в ИВМ РАН, воспроизведены климаты прошлого и сделаны оценки изменения климата в будущем.

Ключевые слова: модель, климат, изменение, атмосфера, океан, парниковый эффект

АВТОРЫ:

Е. М. Володин — д. ф.-м. н., в. н. с., Институт вычислительной математики РАН (ИВМ РАН)
e-mail: volodinev@gmail.com

В. Н. Лыков — чл.-корр. РАН, г. н. с., Институт вычислительной математики РАН (ИВМ РАН),
зав. лабораторией НИВЦ МГУ имени М. В. Ломоносова
e-mail: lykossov@yandex.ru

Климатические модели являются одним из основных современных инструментов исследования климата и прогноза его будущих изменений. В моделях климата решаются уравнения динамики атмосферы и океана и учитываются все основные процессы, влияющие на климат. Это образование облаков и выпадение осадков, влияние атмосферной и океанической турбулентности, перенос радиации, эволюция тепла и влаги в почве и растениях, гидротермодинамика морского льда и континентальных ледниковых щитов, химия и динамика аэрозолей и малых газовых составляющих, биохимия океана, электрические явления.

Для исследования климата требуются расчеты с климатической моделью продолжительностью от десятков до тысяч лет, а шаг по времени при решении уравнений составляет обычно несколько минут. Поэтому численное решение такой задачи невозможно без использования массивно-параллельных компьютеров. Несколько сотен или тысяч процессоров, требующихся для численного эксперимента с моделью, разбиваются на группы, рассчитывающие динамику атмосферы, химию атмосферы, динамику океана, биохимию океана. Вся расчетная область разбивается на подобласти и каждый процессор проводит расчеты в своей подобласти. Решение уравнений обычно требует обмена данными между процессорами, решающими задачи в смежных подобластях. Реже происходят обмены между группами процессоров, решающими задачу, например, динамики атмосферы и динамики океана. Использование массивно-параллельных компьютеров позволяет на сегодняшний день решать задачу моделирования климата в атмосфере с шагом в 100 км, а в океане — 10–20 км, и с таким разрешением проводить численные эксперименты на десятки лет.

Под климатом обычный человек понимает в первую очередь температуру приземного воздуха и количество осадков. Однако, чтобы в модели правильно воспроизвести эти параметры климатической системы, нужно рассчитывать динамику атмосферы от поверхности Земли до высоты 50–90 км. На рис. 1 представлена зависимость средней температуры воздуха в модели климата от широты и высоты для января. Большинство явлений погоды — циклоны и антициклоны, атмосферные фронты, осадки — образуются в нижнем 15-километровом слое атмосферы — тропосфере, где температура, как правило, падает с высотой, что хорошо видно на рисунке. Однако на климат заметно влияют и более высокие слои атмосферы. В стратосфере, расположенной на высотах от 15 до 50 км, температура растет с высотой из-за того, что находящийся там озон поглощает ультрафиолетовое солнечное излучение. Современный прогноз погоды на срок более 4–5 суток, а также прогноз изменений климата невозможен без учета процессов, происходящих в стратосфере. Еще выше, от 50 до 85 км,

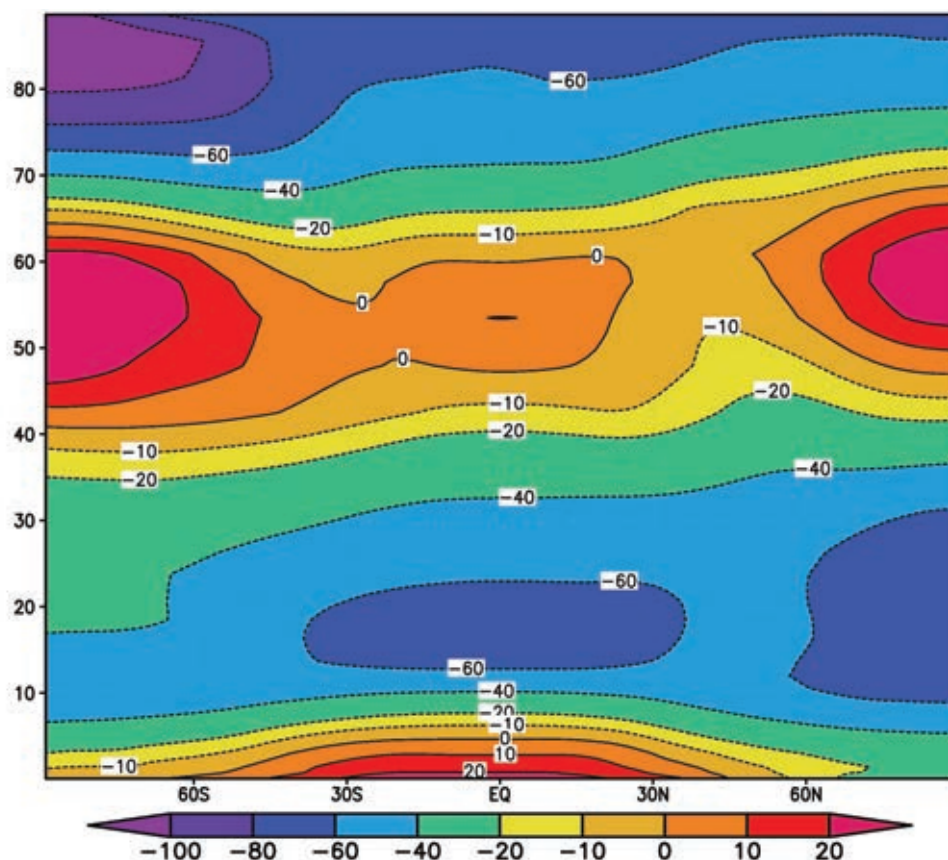


Рис. 1.

Температура воздуха (C) в январе, осредненная вдоль круга широты, рассчитанная в модели. По оси абсцисс отложена географическая широта, по оси ординат — высота (км)

находится мезосфера, где температура снова падает с высотой. Обращает на себя внимание удивительное свойство мезосферы, хорошо видимое на рис. 1: на высотах от 80 до 90 км температура в летнем полушарии заметно ниже, чем в зимнем, а в условиях полярного дня, который в январе наблюдается над Антарктидой, температура в верхней мезосфере опускается ниже -100 градусов по Цельсию. Именно при таких условиях образуются серебристые облака, которые можно наблюдать невооруженным глазом.

В климатической модели должна правильно получаться не только средняя температура, но и все многообразие явлений, наблюдающихся в реальной

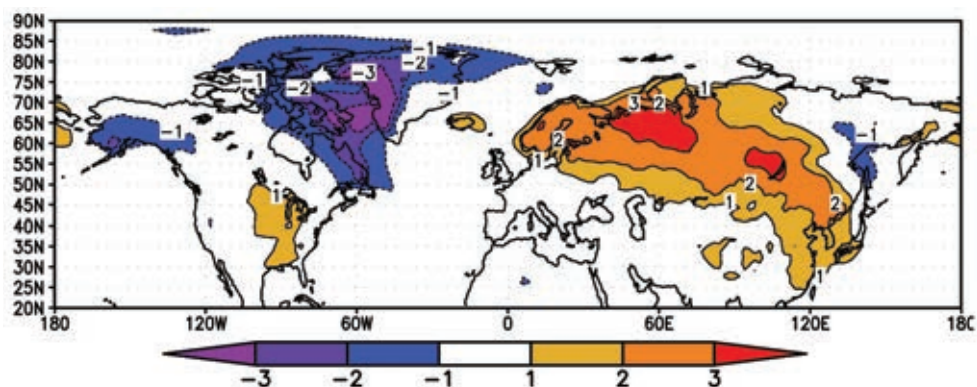


Рис. 2.

Аномалия температуры приземного воздуха (С) в зимние месяцы с положительным индексом Арктического колебания

климатической системе. В качестве примера приведем одно из таких явлений — так называемое Арктическое колебание. Его суть состоит в том, что атмосферное давление может перераспределяться между различными географическими регионами, в данном случае — между Арктикой и субтропиками Северного полушария. Если в Арктике давление ниже обычного, то в субтропиках оно, как правило, выше (тогда говорят, что имеет место положительный индекс Арктического колебания), и наоборот. Такое перераспределение давления приводит и к перераспределению ветров, что непосредственно сказывается на температуре воздуха. Так, теплые зимы или отдельные зимние месяцы на большей части территории России, а также зарубежной Европы бывают связаны обычно именно с положительным индексом Арктического колебания (рис. 2). В Гренландии и на северо-востоке Канады при этом бывает холоднее обычного.

Одно из применений климатических моделей — воспроизведение климатов прошлого. На рис. 3 представлено географическое распределение отклонения приземной температуры от современного состояния для эпохи оптимума голоцена (6 тыс. лет назад) и для максимума последнего оледенения (21 тыс. лет назад). В качестве примера изображены данные для лета Северного полушария (июнь—август). В эпоху оптимума голоцена на континентах Северного полушария было на 1–2 градуса теплее, чем сейчас, из-за того что параметры орбиты Земли немного отличались от современных. В эпоху оледенения было существенно холоднее, чем сейчас, из-за наличия ледников на Севере Америки и Европы, а также из-за меньшего количества парниковых газов в атмосфере по

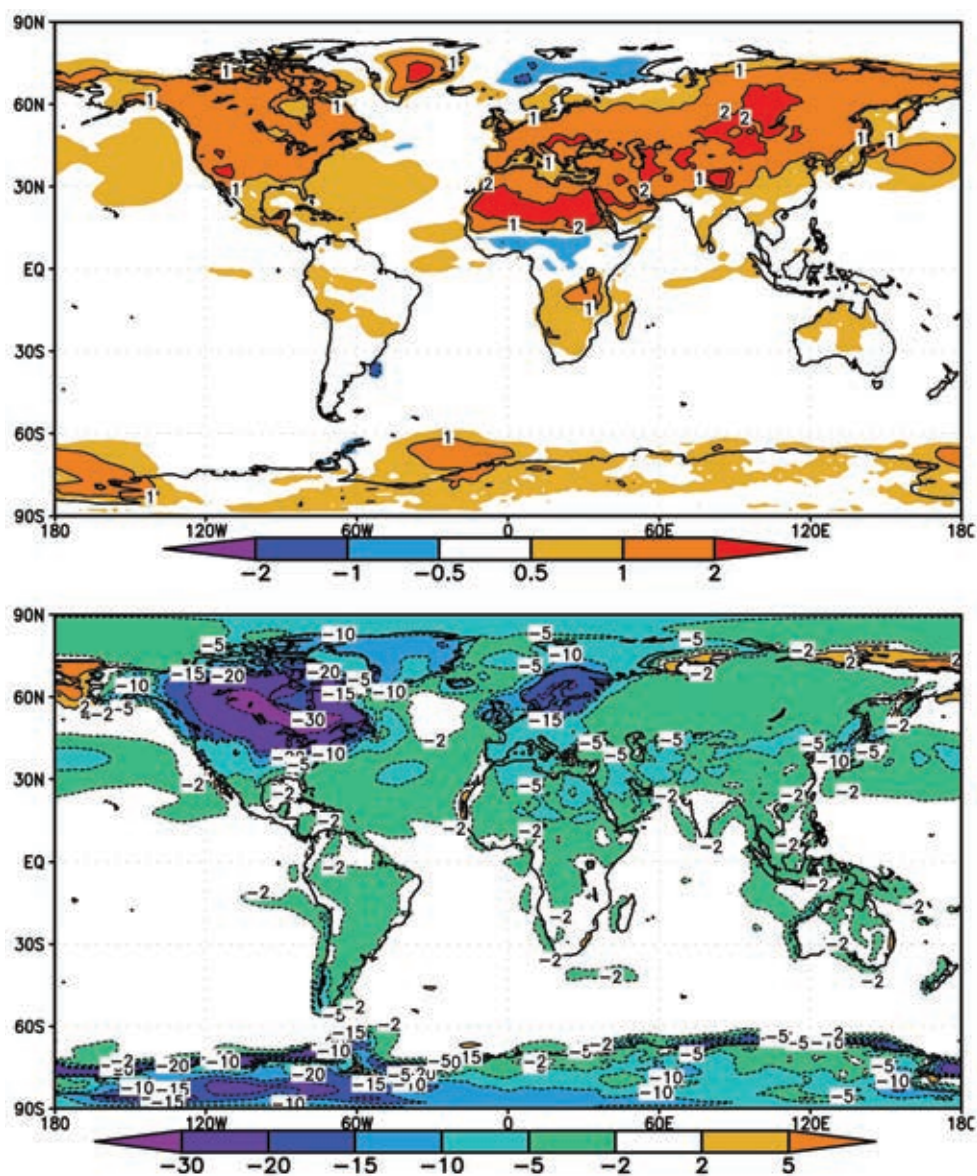


Рис. 3.

Отклонение приземной температуры воздуха в июне–августе от современной во время оптимума голоцена 6 тыс. лет назад (вверху) и во время максимума последнего оледенения 21 тыс. лет назад (внизу) по данным модели

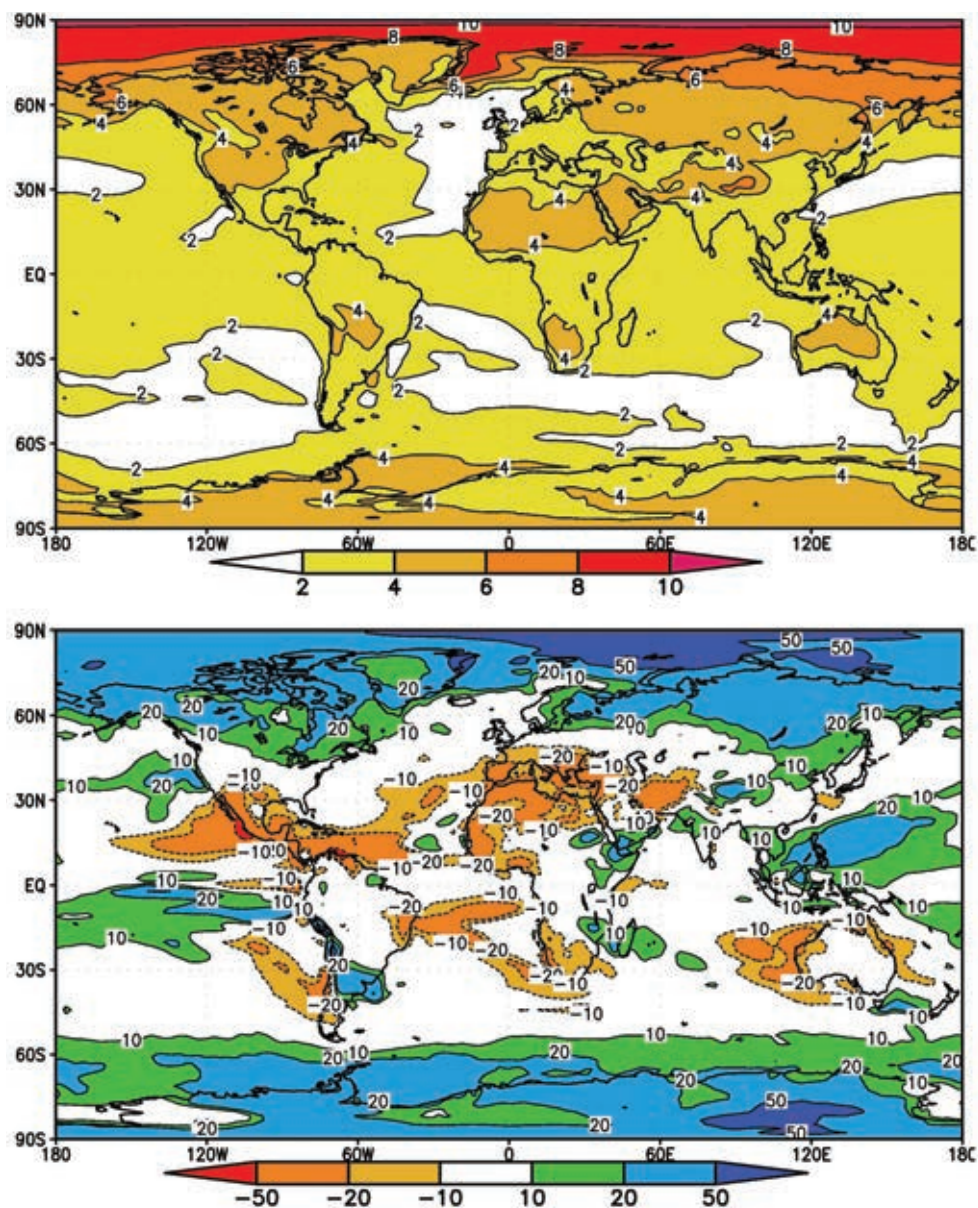


Рис. 4.

Отклонение приземной температуры воздуха, С (вверху), и осадков, % (внизу), в 2001–2100 гг. по сравнению с 1901–2000 гг. по данным модели

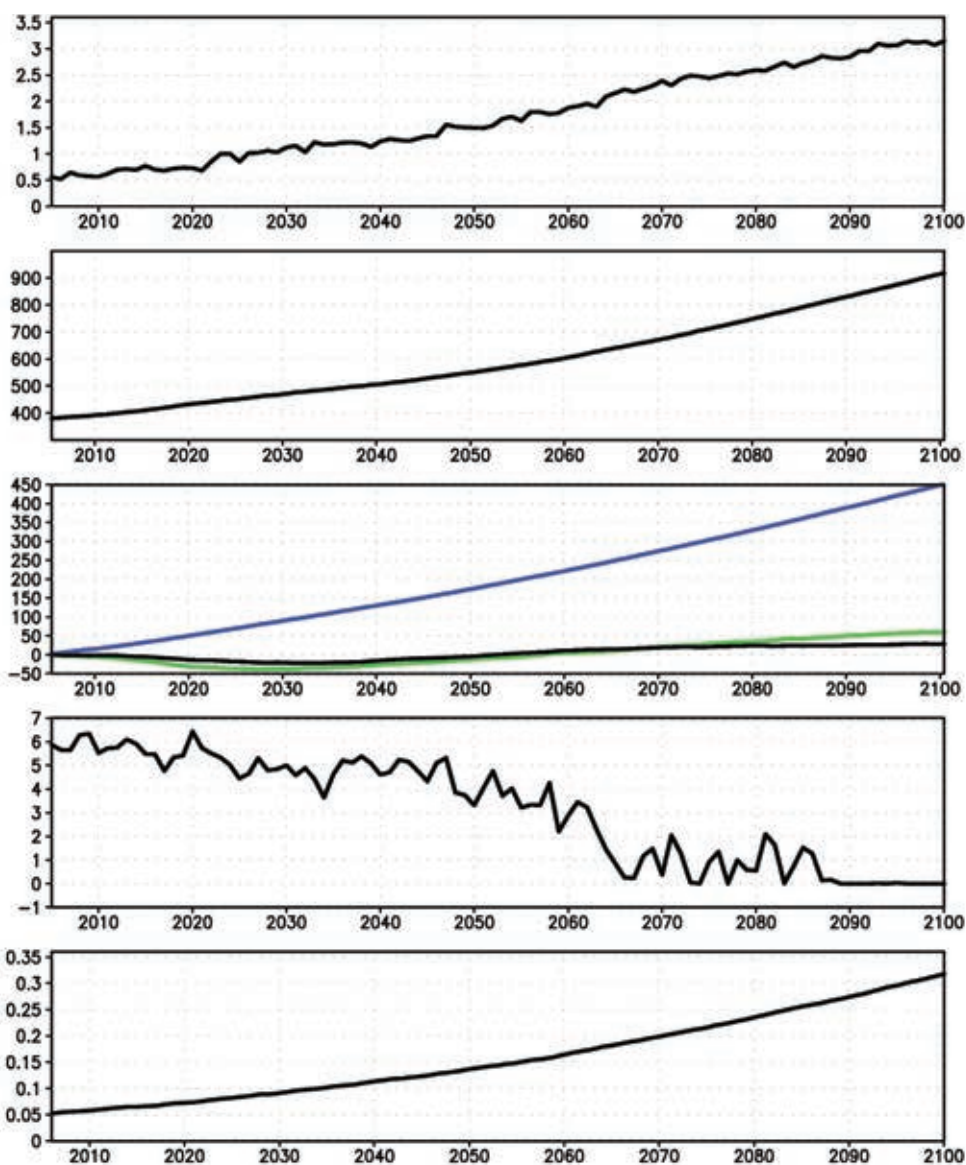


Рис. 5.

Временной ход глобально осредненных (сверху вниз): температуры воздуха у поверхности (°C); концентрации углекислого газа в атмосфере (млн⁻¹); количества углекислого газа (Гт C) — поглощенного океаном (синий), растениями (зеленый) и почвой (серый); площади морского льда в Арктике в сентябре (млн км²); уровня океана (м)

сравнению с современностью. Полученные данные моделирования в основном неплохо соответствуют имеющимся реконструкциям, хотя некоторые проблемы, связанные с реконструкцией палеоклиматов, все еще не решены.

Прогноз вероятных изменений климата в XXI веке вследствие увеличения парникового эффекта из-за деятельности человека — одна из актуальных задач не только климатологии, но и всей современной науки. На рис. 4 представлено вероятное изменение приземной температуры воздуха и осадков в конце XXI столетия по сравнению с данными за XX век. В целом, потепление составит около 3 градусов, однако на территории России повышение температуры будет примерно в 2 раза больше среднего, а в Арктике еще значительно, и может превысить 10 градусов. Наряду с этим, территории, испытывающие сейчас недостаток водных ресурсов (Северная Африка и Южная Европа, Центральная Америка и Юг США, Австралия), станут еще более засушливыми. В высоких широтах, наоборот, количество осадков увеличится.

В моделях климата наряду с температурой рассматривается множество параметров. Для примера на рис. 5 показано, как в XXI веке будут меняться глобально осредненная температура, концентрация углекислого газа в атмосфере, содержание углерода в океане, растениях и почве, площадь морского льда в Арктике, уровень моря. К концу XXI столетия содержание CO_2 может более чем в 2 раза превысить современную величину, а Арктика станет полностью свободной ото льда.

Подробнее о моделировании изменений климата можно прочесть в статьях (Володин и др., 2010; Володин и др., 2013; Дымников и др., 2015).

Работа выполнена в ИВМ РАН при поддержке Российского научного фонда, грант 14–17–00126.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володин Е.М., Гусев А.В., Дианский Н.А. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM4.0 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2010. — Т. 46. — № 4. — С. 448–466.
2. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Модель земной системы INMCM4: воспроизведение и прогноз климатических изменений в 19–21 веках // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2013. — Т. 49. — № 4. — С. 379–400.
3. Дымников В.П., Лыков В.Н., Володин Е.М. Математическое моделирование динамики Земной системы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2015. — Т. 51. — № 3. — С. 260–275.