

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КЛИМАТА И УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА В 20–21 ВВ. ПО РАСЧЕТАМ С ГЛОБАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ*

И. И. МОХОВ, А. В. ЕЛИСЕЕВ, А. А. КАРПЕНКО

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

e-mail: mokhov@ifaran.ru

The IAP RAS climate model is extended by the carbon cycle module. The climate-carbon cycle feedback leads to an additional storage of carbon dioxide in the atmosphere. This additional storage amounts 67...90 mln⁻¹ in the 21st century with the possible scenarios of anthropogenic emissions (SRES A1B, A2, B1, and B2). Total content of the carbon dioxide in the atmosphere increases to 615...875 mln⁻¹ at the end of the 21st century with the appropriate increase in the global surface temperature about 2.4...3.4 K relative to the preindustrial state.

Введение

В последние десятилетия на планете наблюдается рост приповерхностной температуры как при глобальном осреднении, так и в различных регионах [1–4]. Одной из вероятных причин этого изменения является парниковый эффект — увеличение содержания в атмосфере углекислого газа (и других парниковых газов) [2, 5]. Так, начиная с доиндустриального периода концентрация углекислого газа $p\text{CO}_{2,a}$ в атмосфере с примерно 274...284 млн⁻¹ [6] возросла до 377 млн⁻¹ в 2004 г. [7]. В 21 в. ожидается продолжение роста антропогенных эмиссий парниковых газов [2, 7], что должно привести к дальнейшему увеличению содержания CO_2 в атмосфере.

До недавнего времени климатические эффекты увеличения содержания парниковых газов в атмосфере оценивались при предписанных изменениях их концентраций в атмосфере (см., например, [2, 4, 8]). Однако изменение концентрации парниковых газов в атмосфере определяется не только их эмиссиями, но и соответствующими их потоками между атмосферой и подстилающей поверхностью. На эти процессы влияют и климатические изменения. Так, поток углекислого газа из атмосферы в наземные экосистемы может измениться за счет отклика изменения биопродуктивности этих экосистем и интенсивности

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования науки России, Федерального агентства науки и инноваций, Российской академии наук, а также Президентской программы “Ведущие научные школы РФ” (грант № НШ-4166.2006.5) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 05-05-64907, 05-05-65034 и 05-05-65167).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

почвенного дыхания на вариации климата. Заметные изменения первичной биологической продуктивности в последние десятилетия были отмечены по результатам как обработки спутниковых данных [9, 10], так и моделирования первичной биологической продуктивности экосистем при задании сценариев климатических изменений [11, 12]. Зарегистрированы изменения потока углекислого газа между атмосферой и океаном в период между 1980 и 1990 гг. (см., например, [2, 13]). Все это может сказаться на тренде $p\text{CO}_{2,a}$, а следовательно, и на возможном отклике климата.

В последние несколько лет в ряд трехмерных климатических моделей были внедрены интерактивные блоки углеродного цикла [14]. При этом выявлена положительная обратная связь между климатом и углеродным циклом. Вариации климата приводят к дополнительному росту содержания углекислого газа в атмосфере (по сравнению со случаем, когда влияние климатических изменений на потоки между атмосферой и подстилающей поверхностью не учитывается). Однако интенсивность этой обратной связи существенно различается для разных моделей ($20 \dots 250 \text{ млн}^{-1}$) [14].

В настоящей работе описаны результаты включения нуль-мерного блока углеродного цикла в климатическую модель промежуточной сложности Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) [15–17] и анализа обратной связи между климатом и углеродным циклом для ансамбля четырех сценариев эмиссий SRES [2].

1. Описание модели климата с углеродным циклом и численных экспериментов

Детальное описание климатического блока модели (без углеродного цикла) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и ее сравнение с данными наблюдений для современного климата и с результатами расчетов по другим климатическим моделям приведены в [4, 18–21]. В частности, чувствительность модели к удвоению содержания концентрации углекислого газа в атмосфере составляет 2.2 K [4, 21] и расположена в нижней части диапазона, характерного для современных климатических моделей [2]. В настоящее время климатическая модель ИФА РАН дополнена блоком углеродного цикла, детальное описание и валидация для индустриального периода которого приведены в [15–17].

В блоке расчета интенсивности обмена между углекислым газом в атмосфере и наземными экосистемами F_1 учитывается эффект фертилизации продуктивности наземных экосистем углекислым газом согласно зависимости Михаэлиса — Ментон. Влияние климата на интенсивность фотосинтеза и дыхание растений и почвы описывается экспоненциальными зависимостями с коэффициентами, рекомендованными в [22]. Кроме того, в блоке учитываются потери биомассы из-за сельскохозяйственной деятельности; эта потеря биомассы считается пропорциональной эмиссиям за счет землепользования [22].

В модели поток углекислого газа из атмосферы в океан F_{oc} описывается билинейной зависимостью от скорости изменения концентрации углекислого газа в атмосфере и среднегодовой глобальной температуры поверхности океана.

В настоящей работе в блоке углеродного цикла климатической модели ИФА РАН учитывается только углекислый газ. Циклы других углеродсодержащих соединений (в частности, метана) не принимаются во внимание.

С помощью модели проведены численные эксперименты по различным сценариям изменения эмиссий углекислого газа для 1860–2100 гг. Для периода 1860–2000 гг. во всех сценариях были заданы эмиссии за счет сжигания топлива и промышленной деятельно-

сти [23] и землепользования [24]. Для 2001–2100 гг. оба этих типа эмиссий задавались по одному из четырех сценариев SRES (A1B, A2, B1, B2) [2].

Для каждого сценария проведено по два типа экспериментов. В одном из них (REF) использовалась полная модель с интерактивным углеродным циклом. В другом (NOCLIM) в блоке углеродного цикла учитывались только фертилизация фотосинтеза углекислым газом и влияние изменения углекислого газа на обмен между атмосферой и океаном, тогда как соответствующие климатические изменения не учитывались.

При этом во всех сценариях исследовались только эмиссии углекислого газа без учета изменения других антропогенных радиационно-активных примесей в атмосфере. Данные по суммарным (за весь период 1860–2100 гг.) эмиссиям E_{ff+lu} для этих сценариев приведены в таблице, кроме того, в ней представлены концентрация углекислого газа в атмосфере

Основные характеристики использованных сценариев антропогенных эмиссий и результаты модельных расчетов

Параметр	A1B	A2	B1	B2
E_{ff+lu} , ГтС	$1.98 \cdot 10^3$	$2.23 \cdot 10^3$	$1.66 \cdot 10^3$	$1.52 \cdot 10^3$
$pCO_{2,a}$, млн ⁻¹	762 (83)	875 (90)	615 (67)	669 (69)
$\Delta T_{s,g}$, К	3.05 (0.34)	3.38 (0.31)	2.43 (0.35)	2.65 (0.34)
f	1.21	1.18	1.25	1.22
r_a	0.56 (0.46)	0.57 (0.48)	0.54 (0.43)	0.55 (0.45)
r_l	0.10 (0.26)	0.09 (0.25)	0.13 (0.31)	0.12 (0.28)
r_{oc}	0.34 (0.28)	0.34 (0.29)	0.33 (0.26)	0.33 (0.27)

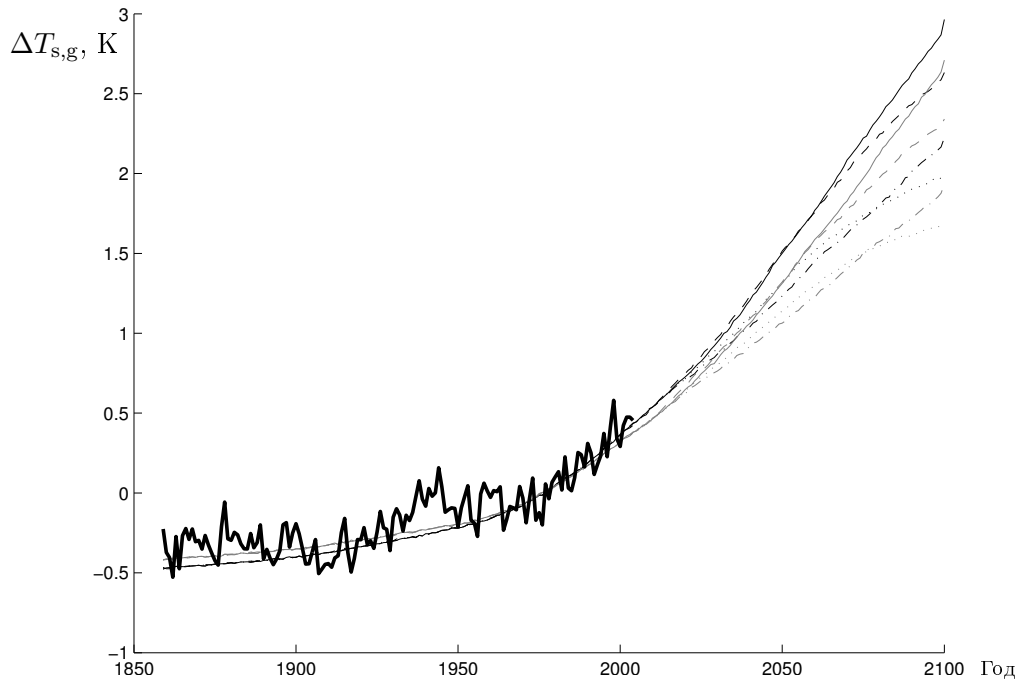


Рис. 1. Аномалии глобальной температуры относительно среднего значения в 1961–1990 гг. для сценариев SRES A1B (штриховые линии), A2 (тонкая сплошная кривая), B1 (пунктир) и B2 (штрихпунктир) для экспериментов REF (соответствующие черные линии) и NOCLIM (серые кривые) в сравнении с данными наблюдений [1] (сплошная жирная кривая).

$p\text{CO}_{2,a}$, (достигаемая к 2100 г.), рост глобальной температуры $\Delta T_{s,g}$ к этому времени относительно доиндустриального значения для экспериментов REF (в обоих последних случаях в скобках указано превышение этих величин относительно соответствующих значений для экспериментов NOCLIM), параметра обратной связи между климатом и углеродным циклом для экспериментов REF, а также доли антропогенных эмиссий, накапливающихся в атмосфере r_a , наземных экосистемах r_l и океане r_{oc} к концу 21 в. в этих экспериментах (в последних трех случаях в скобках приведены соответствующие величины для экспериментов NOCLIM). Все величины (кроме $p\text{CO}_{2,a}$) оценены для периода 1860–2100 гг.

В качестве начальных условий для всех численных экспериментов принято равновесное состояние модели с доиндустриальными значениями управляющих параметров. Следует отметить, что это состояние весьма близко к равновесному для климатической модели ИФА РАН.

Для второй половины 20 в. максимальное отличие концентрации углекислого газа в атмосфере, рассчитанной с использованием климатической модели ИФА РАН, от данных наблюдений обсерватории Мауна Лоа [7] не превышает 7 млн⁻¹. Подобная точность в целом характерна для современных климатических моделей с углеродным циклом. Рост глобальной температуры $T_{s,g}$ в 20 в. в эксперименте REF составляет 0.76 К (рис. 1), неплохо согласуясь с эмпирической оценкой 0.6...0.7 К [1]. Кроме того, модель удовлетворительно воспроизводит и интенсивность обмена углекислого газа между атмосферой, океаном и наземными экосистемами для последнего двадцатилетия 20 в. и за индустриальный период в целом.

2. Оценки изменения климата и углеродного цикла в 20–21 вв.

На рис. 2 приведены изменения концентрации углекислого газа для выбранных сценариев эмиссий. Во всех случаях $p\text{CO}_{2,a}$ монотонно растет со временем. Значения концентрации углекислого газа в атмосфере, достигаемые к 2100 г. в экспериментах REF, приведены в таблице. В экспериментах REF во всех случаях концентрация $p\text{CO}_{2,a}$ заметно (на 67...90 млн⁻¹ в зависимости от сценария) больше, чем в экспериментах NOCLIM. Значение, достигаемое в эксперименте A2-REF, а также его отличие от значения, достигаемого в эксперименте A2-NOCLIM, находится в средней части диапазона оценок для моделей, участвовавших в проекте C4MIP (730...1020 и 20...200 млн⁻¹ соответственно [14]). Следует, однако, отметить, что накопление углекислоты в атмосфере, определенное по климатической модели ИФА РАН, больше, чем для стандартной оценки, выполненной с моделью BernCC [2].

Рост глобальной температуры в конце 21 в. относительно доиндустриального значения в экспериментах REF варьируется от 2.4 К для сценария B1 до 3.4 К для сценария A2 (см. таблицу и рис. 1).

На рис. 3 приведено изменение со временем параметра обратной связи между климатом и углеродным циклом, определяемое как

$$f = \Delta p\text{CO}_{2,a}^{\text{REF}} / \Delta p\text{CO}_{2,a}^{\text{NOCLIM}}, \quad (1)$$

где верхний индекс указывает на версию модели. Экстремумы этой величины выделяют границы характерных интервалов сценариев эмиссий и изменения модельного климата. До

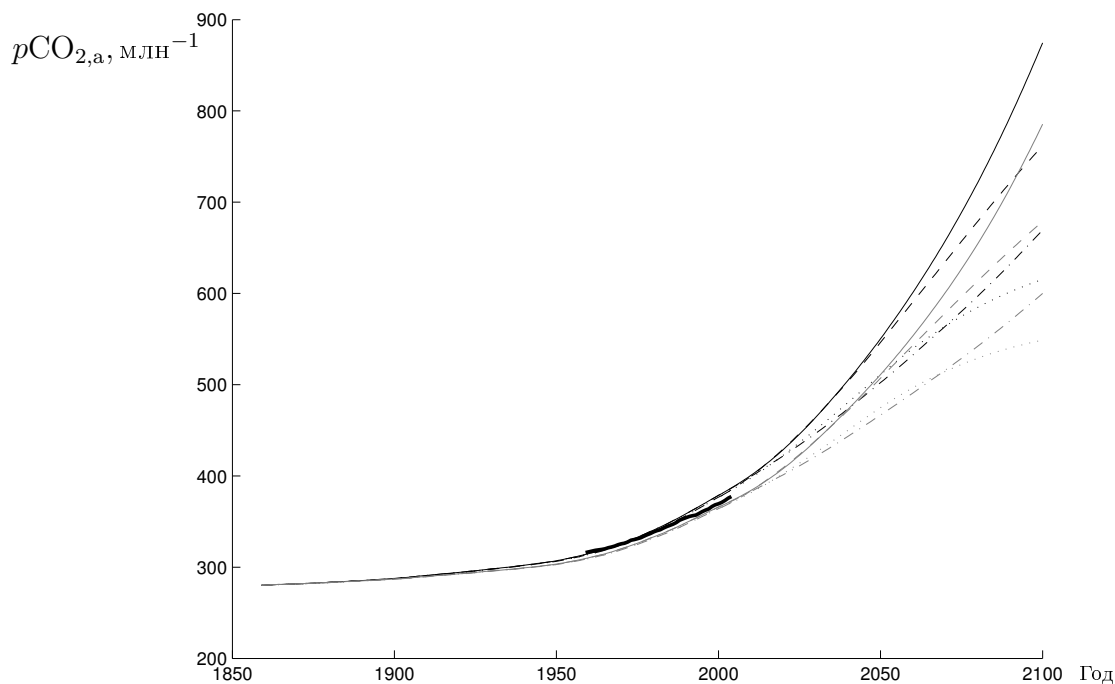


Рис. 2. Концентрация углекислого газа в атмосфере для сценариев SRES A1B (штриховые линии), A2 (тонкая сплошная кривая), B1 (пунктир) и B2 (штрихпунктир) для экспериментов REF (соответствующие черные линии) и NOCLIM (серые кривые) в сравнении с данными наблюдений обсерватории Мауна Лоа (сплошная жирная кривая).



Рис. 3. Параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом (см. уравнение (1)) для сценариев SRES A1B (штриховые линии), A2 (тонкая сплошная кривая), B1 (пунктир) и B2 (штрихпунктир).

середины 20 в. f монотонно растет. При этом величины эмиссий и отклонения температуры от равновесных значений относительно невелики. Далее до конца 1970-х гг. параметр обратной связи f уменьшается. В этот период заметен рост эмиссий, что ведет к заметному увеличению содержания $p\text{CO}_{2,a}$, тогда как изменение климата из-за инерционности климатической системы в целом “отстают” от изменения концентрации углекислого газа в атмосфере. Это соответствует относительно меньшей обратной связи между климатом и углеродным циклом в этот период.

В последующее столетие для всех сценариев наблюдается монотонный рост f , что связано с постепенным ускорением отклика климата на антропогенные эмиссии. Подобный рост наблюдается и для последнего двадцатилетия 21 в. при сценариях A1B, B1, B2. В последние два десятилетия расчетов для сценария эмиссий A2 (существенно более агрессивного, чем сценарии A1B, B1, B2) параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом снова уменьшается, поскольку большая величина эмиссий вызывает быстрое накопление углекислого газа в атмосфере. Однако эффект насыщения парникового форсинга приводит к относительно небольшим дополнительным изменениям температуры, снова уменьшая вклад обратной связи между климатом и углеродным циклом в общее изменение содержания CO_2 в атмосфере.

К концу 21 в. для рассмотренных сценариев параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом близок к величине 1.2. При этом он оказывается бóльшим для менее агрессивных сценариев по сравнению с более агрессивными.

Различие в изменении концентрации углекислого газа в атмосфере между вариантами модели REF и NOCLIM связано в основном с различием изменения запасов углерода в почве C_s . Так, в экспериментах REF C_s уменьшается (рис. 4). Для двух наиболее агрессивных сценариев A1B и A2 запасы углерода в почве к концу 21 в. увеличиваются.

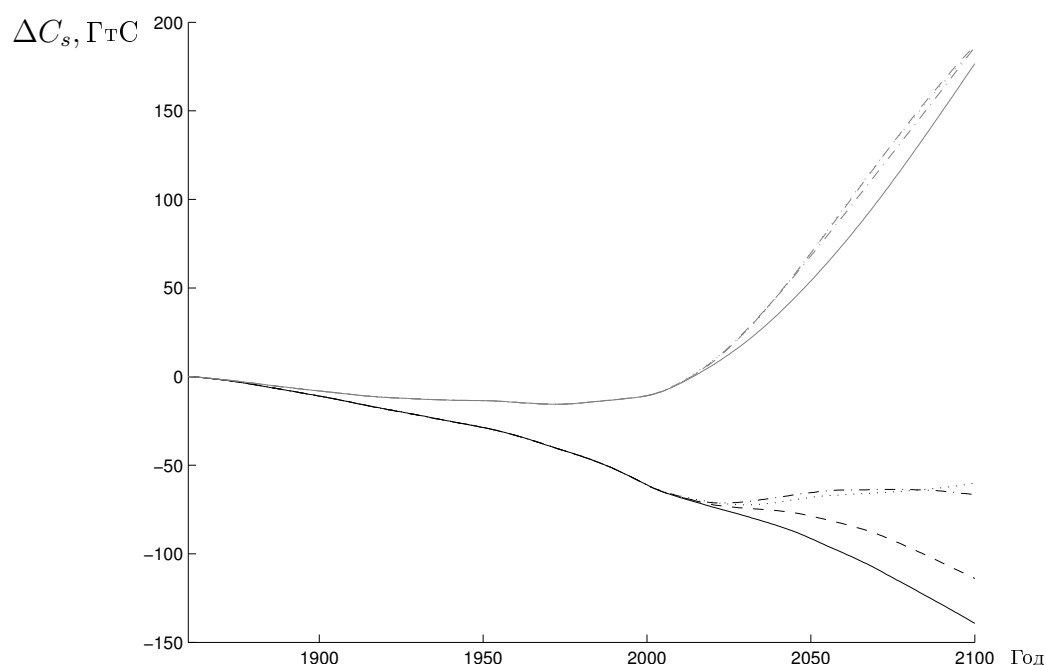


Рис. 4. Изменение (относительно равновесного доиндустриального значения) запаса углерода в почве для сценариев SRES A1B (штриховые линии), A2 (тонкая сплошная кривая), B1 (пунктир) и B2 (штрихпунктир) для экспериментов REF (соответствующие черные линии) и NOCLIM (серые кривые).

сивных сценариев эмиссий (A2 и A1B) это уменьшение отмечается для всего интервала расчетов, для двух менее агрессивных сценариев (B1 и B2) — до конца первой четверти 21 в. К концу этого века уменьшение запасов углерода в почве в зависимости от сценария составляет 60...140 ГтС. В экспериментах же NOCLIM уменьшение C_s проявляется только до конца 20 в., а затем содержание углерода в почве монотонно растет, увеличиваясь на 177...187 ГтС. Такое различие связано с доминированием разных эффектов в полном потоке углерода из атмосферы в наземные экосистемы в разные интервалы времени. Вплоть до конца 20 в. в атмосфере доминирует эффект прямой фертилизации углекислым газом, учитываемый как в варианте модели REF, так и в варианте NOCLIM, и различие между этими экспериментами мало. В 21 в. отмечается насыщение эффекта фертилизации, и вариации F_1 определяются в основном климатическими изменениями, что приводит к большим различиям между результатами экспериментов REF и NOCLIM.

Различие в изменении запасов углерода между экспериментами REF и NOCLIM заметно меньше, чем в изменении C_s . Так, изменение запаса углерода в живой наземной биомассе к концу 21 в. в первом случае в зависимости от сценария эмиссий составляет 104...111 ГтС, во втором — 140...145 ГтС. Изменение запаса углерода в океане составляет 440...765 ГтС и 351...651 ГтС соответственно.

Определяющее влияние динамики наземных экосистем на интенсивность обратной связи между климатом и углеродным циклом характерно и в целом для современных климатических моделей [14].

Доли r_a и r_{oc} кумулятивных эмиссий углекислого газа, накапливающиеся соответственно в океане и атмосфере в 20–21 вв., в целом увеличиваются. Доля эмиссий, накапливаемых в наземных экосистемах r_a , при этом уменьшается. Отклонение от монотонности r_a , r_{oc} и r_a отмечается только для второй половины 21 в. при сценарии эмиссий B1. Кроме того, примерно в этот же период отмечается заметное замедление изменения всех трех указанных переменных (но без нарушения монотонности) для сценария A1B. Особенностью сценария B1 (и в меньшей степени сценария A1B) является резкое уменьшение в это время эмиссий за счет землепользования, что способствует некоторому восстановлению способности наземных экосистем поглощать углекислый газ из атмосферы. Можно также отметить, что r_1 больше в экспериментах NOCLIM, чем в экспериментах REF. Величины же r_{oc} и r_a , наоборот, в экспериментах REF больше, чем в NOCLIM. Это связано с определяющим влиянием динамики наземных экосистем на положительную обратную связь между климатом и углеродным циклом.

Заключение

Приведенные результаты включения блока углеродного цикла в климатическую модель ИФА РАН свидетельствуют о том, что модель удовлетворительно воспроизводит глобальные характеристики углеродного цикла 20 в. [15]. При задании эмиссий углекислого газа для второй половины 19 в. и 20 в. модель неплохо (с точностью, характерной для существующих климатических моделей с углеродным циклом) воспроизводит наблюдаемое изменение содержания углекислого газа в атмосфере, а также эмпирические оценки для потоков углерода из атмосферы в океан и наземные экосистемы в конце 20 в. и соответствующие кумулятивные стоки за индустриальный период.

При сценариях SRES A1B, A2, B1 и B2 возможных антропогенных эмиссий для 21 в. в модели (как и в других современных климатических моделях с углеродным циклом)

обратная связь между климатом и углеродным циклом приводит к дополнительному (по сравнению со случаем неучета влияния изменений климата на обмен углеродом между атмосферой, океаном и наземными экосистемами) росту концентрации углекислого газа в атмосфере. Этот дополнительный рост зависит от сценария эмиссий и находится в диапазоне $67 \dots 90$ млн⁻¹. Он связан с существенно разными режимами запаса углерода в почве при учете влияния вариаций климата на динамику наземных экосистем, с одной стороны, и при неучете — с другой. В первом случае проявляется общее уменьшение C_s , тогда как во втором случае — общий рост в 21 в.

Параметр обратной связи между климатом и углеродным циклом меняется во времени немонотонно. Положения его экстремумов позволяют выделить характерные периоды изменения интенсивности антропогенных эмиссий и вариаций климата. Так, в начальный период относительно слабых эмиссий параметр обратной связи f монотонно растет. Далее, с началом интенсификации эмиссий (во второй половине 20 в.) отклик климата на эти эмиссии в течение нескольких десятилетий существенно запаздывает, что приводит к уменьшению f . Однако в последние десятилетия 20 в. скорость этого отклика начинает возрастать и параметр обратной связи также увеличивается. Для наиболее агрессивного сценария А2 в последние десятилетия 21 в. f снова снижается. Это связано с насыщением парникового радиационного форсинга.

К концу 21 в. для использованных сценариев антропогенных эмиссий концентрация углекислого газа возрастает до 615 млн⁻¹ для наименее агрессивного сценария В1 и до 875 млн⁻¹ для наиболее агрессивного сценария А2. В модели рост глобальной приповерхностной температуры относительно доиндустриального значения составляет 2.4...3.4 К в зависимости от сценария эмиссий.

В 20–21 вв. отмечены общий рост доли эмиссий, накапливающихся в атмосфере и океане, и уменьшение доли эмиссий, накапливающихся в наземных экосистемах. Отклонение от этой монотонности отмечается только для второй половины 21 в. при сценарии эмиссий В2, связано оно с особенностями эмиссий за счет землепользования.

Более агрессивные сценарии эмиссий к концу 21 в. характеризуются меньшим параметром обратной связи между климатом и углеродным циклом, меньшей чувствительностью климата к росту концентрации углекислого газа в атмосфере, большей долей эмиссий, накапливающихся в атмосфере и океане, и меньшей — накапливающихся в наземных экосистемах.

Список литературы

- [1] JONES P.D., NEW M., PARKER D.E. ET AL. Surface air temperature and its changes over the past 150 years // *Rev. Geophys.* 1999. Vol. 37, N 2. P. 173–199.
- [2] CLIMATE Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al. (Eds). Cambridge / N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2001. 881 p.
- [3] Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // *Метеорология и гидрология.* 2004. № 4. P. 50–66.
- [4] Мохов И.И., Елисеев А.В., Демченко П.Ф. и др. Климатические изменения и их оценки с использованием глобальной модели ИФА РАН // *Докл. РАН.* 2005. Т. 402, № 2. С. 243–247.

- [5] THE INTERNATIONAL ad hoc detection and attribution group. Detecting and attributing external influences on the climate system: A review of recent advances // *J. Climate*. 2005. Vol. 18, N 9. P. 1291–1314.
- [6] ETHERIDGE D.M., STEELE L.P., LANGENFELDS R.L. ET AL. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn // *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101, N D2. P. 4115–4128.
- [7] GLOBAL Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World / C. Field, M. Raupach (Eds). Washington D.C.: Island Press, 2004. 526 p.
- [8] JOHNS T.C., GREGORY J.M., INGRAM W.J. ET AL. Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emission scenarios // *Clim. Dyn.* 2003. Vol. 20. P. 583–612.
- [9] CAO M., PRINCE S.D., SMALL J., GOETZ S.J. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981–2000 // *Ecosystems*. 2004. Vol. 7. P. 233–242.
- [10] ZENG N., QIAN H., ROEDENBECK C., HEIMANN M. Impact of 1998–2002 midlatitude drought and warming on terrestrial ecosystem and the global carbon cycle // *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32, N 22. P. L22709.
- [11] ТАРКО А.М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. М.: Физматлит, 2005. 408 с.
- [12] ГОЛУБЯТНИКОВ Л.Л., МОХОВ И.И., ДЕНИСЕНКО Е.А., ТИХОНОВ В.А. Модельные оценки влияния изменений климата на растительный покров и сток углерода из атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. Т. 41, № 1. С. 22–32.
- [13] MANNING A.C., KEELING R.F. Global oceanic and land biotic carbon sinks from the Scripps atmospheric oxygen flask sampling network // *Tellus*. 2006. Vol. 58B, N 2. P. 95–116.
- [14] FRIEDLINGSTEIN P., COX P., BETTS R. ET AL. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C⁴MIP model intercomparison // *J. Climate*. 2006. Vol. 19, N 22. P. 3337–3353.
- [15] МОХОВ И.И., ЕЛИСЕЕВ А.В., КАРПЕНКО А.А. Чувствительность к антропогенным воздействиям глобальной климатической модели ИФА РАН с интерактивным углеродным циклом // *Докл. РАН*. 2006. Т. 407, № 3. С. 400–404.
- [16] ЕЛИСЕЕВ А.В., МОХОВ И.И., КАРПЕНКО А.А. Вариации климата и углеродного цикла в XX–XXI веках в модели промежуточной сложности // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. (в печати).
- [17] ELISEEV A.V., МОКHOV I.I. Carbon cycle-climate feedback sensitivity to parameter changes of a zero-dimensional terrestrial carbon cycle scheme in a climate model of intermediate complexity // *Theor. Appl. Climatol.* 2006. (в печати).
- [18] ПЕТОУКHOV V.K., МОКHOV I.I., ELISEEV A.V., SEMENOV V.A. The IAP RAS Global Climate Model. М.: Dialogue-MSU, 1998. 110 p.
- [19] HANDORF D., ПЕТОУКHOV V.K., DETHLOFF K. ET AL. Decadal climate variability in a coupled atmosphere-ocean climate model of moderate complexity // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, N D22. P. 27253–27275.

- [20] МОХОВ И.И., ДЕМЧЕНКО П.Ф., ЕЛИСЕЕВ А.В. и др. Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX–XXI веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 5. С. 629–642.
- [21] ПЕТУКHOV V., CLAUSSEN M., BERGER A. ET AL. EMIC intercomparison project (EMIP–CO₂): Comparative analysis of EMIC simulations of current climate and equilibrium and transient reponses to atmospheric CO₂ doubling // Clim. Dyn. 2005. Vol. 25, N 4. P. 363–385.
- [22] LENTON T.M. Land and ocean carbon cycle feedback effects on global warming in a simple Earth system model // Tellus. 2000. Vol. 52B, N 5. P. 1159–1188.
- [23] MARLAND G., BODEN T.A., ANDRES R.J. Global, regional, and national CO₂ emissions // Trends: A Compendium of Data on Global Change Oak Ridge, Tenn.: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2005.
- [24] HOUGHTON R.A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000 // Tellus. 2003. Vol. 55B, N 2. P. 378–390.

Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.