

УДК 551.583

## МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА

© 2008 г.

*Е.С. Дубровина, А.Я. Моничев*

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

esd22@mail.ru

*Поступила в редакцию 16.06.2008*

Сформулирована модель, описывающая динамику глобальной численности населения, концентрации атмосферного  $\text{CO}_2$  и температуры приземного слоя воздуха. Сделан краткосрочный и долгосрочный прогноз развития парникового эффекта, предполагающий снижение темпов роста и последующую стабилизацию температуры в долгосрочном прогнозе. Выявлена запаздывающая реакция температуры на снижение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере и показано, что уменьшение температуры до современного уровня достигается лишь в дальней перспективе при 11-кратном снижении интенсивности антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$ , а в ближайшие 50 лет ее динамика мало зависит от скорости поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

*Ключевые слова:* парниковый эффект, антропогенный выброс, атмосфера.

Феномен роста температуры в результате парникового эффекта тесно связан с увеличением в атмосфере концентрации так называемых парниковых газов, поглощающих тепловую составляющую излучения поверхности Земли и задерживающих ее в нижних слоях атмосферы. Основная роль при этом отводится углекислому газу, выделение которого в окружающее пространство происходит во все нарастающих темпах благодаря производственной деятельности человека. Таким образом, при описании изменения концентрации углекислого газа и связанного с ним роста температуры атмосферы необходимо учитывать вызывающий их рост мировой численности населения. В данном варианте модель парникового эффекта должна представлять собой объединение описаний трех взаимосвязанных процессов: рост численности населения, увеличение концентрации углекислого газа, изменение температуры атмосферы. При этом для более или менее обоснованной оценки и прогноза этих сложных и взаимозависимых явлений желательно их динамическое описание. Однако в большинстве моделей, построенных для прогноза последствий парникового эффекта, принимаются либо детерминированные частные прогнозы изменения численности населения [1], либо его отдельные сценарии [2]. Кроме того, с точки зрения динамики, как правило, рассматривается только один из взаимосвязанных процессов (изменение температуры атмосферы либо нарушение углеродного цикла) [2–4]. В отличие от этих работ предлагаемая модель описывает взаимодинамику численно-

сти населения, концентрации атмосферного углекислого газа и температуры приземного слоя воздуха и включает в себя все три уравнения, описывающие изменение этих характеристик.

Динамика численности населения планеты рассматривается согласно модельным представлениям о ее саморегуляции, предложенным в работе [5]. Она описывается уравнением:

$$\frac{dN}{dt} = \left( \frac{B_m}{1 + aN^\gamma} - \frac{D_m}{1 + bN^\delta} \right) N, \quad (1)$$

где  $N$  – численность населения планеты;  $B_m$  – максимально возможная рождаемость;  $D_m$  – максимально возможная смертность;  $a$ ,  $b$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  – коэффициенты, определяющие процессы конкуренции и кооперации во внутривидовой регуляции рождаемости и смертности.

Согласно этим модельным представлениям, увеличение численности человеческой популяции, сопровождающееся развитием медицины и ростом уровня жизни, приводит к снижению рождаемости и смертности. Это, с одной стороны, связано с существованием конкурентных отношений в популяции, а, с другой стороны, с наличием сознательной регуляции рождаемости и смертности. Параметры  $\gamma$  и  $\sigma$  в уравнении (1) отражают размер социальных групп, участвующих в этой регуляции.

Динамику изменения концентрации углекислого газа в приземном слое воздуха можно представить как разность между скоростью его поступления в этот слой с антропогенными выбросами, которая линейно зависит от глобальной численности населения, и скоростью его удале-

ния в другие резервуары, которая пропорциональна концентрации углекислого газа в атмосфере. При этом в качестве основной составляющей углеродного обмена, способной поглощать  $\text{CO}_2$  из атмосферы, рассматривается океан.

В результате получается следующее уравнение:

$$\frac{dC}{dt} = mN - qC, \quad (2)$$

где  $C$  – концентрация углекислого газа в атмосфере;  $m$  – удельная (на душу населения) скорость роста концентрации углекислого газа, определяемая удельными выбросами его в атмосферу;  $q$  – удельная (на единицу концентрации) скорость поглощения углекислого газа океаном.

Динамика температуры приземного слоя воздуха определяется двумя процессами. С одной стороны, интенсивность поглощения атмосферой длинноволнового излучения, идущего от поверхности Земли, линейно связана с содержанием в атмосфере углекислого газа, являющегося одним из основных поглотителей излучения в длинноволновом диапазоне. С другой стороны, скорость переизлучения атмосферой полученной энергии должна возрастать с повышением ее температуры. Считая эту зависимость линейной, можно записать уравнение следующим образом:

$$\frac{dT}{dt} = rC - sT, \quad (3)$$

где  $T$  – средняя температура приземной атмосферы;  $r$  – удельная (на единицу концентрации  $\text{CO}_2$ ) скорость разогрева атмосферы;  $s$  – удельная (в расчете на градус) скорость высвечивания.

В уравнении (1) параметры  $B_m$  и  $D_m$  определяются из демографических данных и соответственно равны 40 и 37.5. Значения коэффициентов  $\gamma$  и  $\sigma$  были получены путем аппроксимации динамики мировых демографических характеристик с помощью модели глобального изменения численности населения. Они принимают значения  $\gamma = 6$ ,  $\sigma = 2$  [5]. Коэффициенты  $a$  и  $b$  были найдены на основе данных о рождаемости и смертности за 2000 г. и составляют, соответственно, 0.16 и 0.29.

Коэффициент  $m$  в уравнении (2) был определен с использованием данных об изменении численности населения планеты и концентрации углекислого газа в атмосфере за период с 1985 по 1995 гг. В качестве данных о содержании  $\text{CO}_2$  в атмосфере использовались результаты измерений в обсерватории Мауна-Лоа, а значения численности глобального населения были взяты из работы [6].

Параметры уравнения (2) можно найти, зная примерное соотношение количества углекислого газа, поступающего в атмосферу и поглощаемого океаном ( $\lambda$ ). Тогда, выразив второй член уравнения (2) через первый, получаем:

$$\frac{dC}{dt} = mN - \lambda mN = (1 - \lambda)mN. \quad (4)$$

Далее, определив изменение концентрации диоксида углерода в атмосфере ( $\Delta C$ ), его среднюю концентрацию ( $C_{cp}$ ) и среднюю численность населения ( $N_{cp}$ ) за рассматриваемый промежуток времени, можно вычислить параметры  $m$  и  $q$  по формулам:

$$\begin{aligned} m &= \frac{\Delta C}{\Delta t N_{cp} (1 - \lambda)} = \frac{15}{11 \cdot 5.1 \cdot (1 - \lambda)} = \\ &= \frac{0.27 \text{ ppm}}{1 - \lambda \text{ год} \cdot \text{чел}}, \\ q &= \frac{\lambda m N_{cp}}{C_{cp}} = \frac{0.27 \cdot 5.1 \cdot \lambda}{354 \cdot (1 - \lambda)} = \\ &= \frac{0.004 \cdot \lambda}{(1 - \lambda) \text{ год}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Принимая во внимание данные, согласно которым в настоящее время океаном поглощается 50% выбросов углекислого газа [6–8], выбираем  $\lambda = 0.5$ . При этом, согласно формулам (5), получаем:  $m = 0.54$ ,  $q = 4 \cdot 10^{-3}$ .

Коэффициент  $r$  в уравнении (3) можно отыскать, используя данные о средней концентрации диоксида углерода  $C_{cp}$  и об изменении приземной температуры атмосферы  $\Delta T$  (по результатам измерений на американской метеорологической станции NOAA) за тот же период времени. Отбросив в уравнении (3) второй член, влияние которого мало на данном коротком промежутке времени, найдем  $r$  по формуле:

$$r = \frac{\Delta T}{\Delta t C_{cp}} = \frac{0.32}{11 \cdot 354} = 8.2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{град}}{\text{год} \cdot \text{ppm}}. \quad (6)$$

Поскольку у нас отсутствуют данные, которые бы позволили точно вычислить параметр  $s$ , для него было рассмотрено 3 различных значения:  $5 \cdot 10^{-2}$ ,  $10^{-2}$  и  $10^{-3}$  1/год. Им соответствует 3 сценария роста приземной температуры атмосферы.

Результаты интегрирования уравнений (1)–(3) показывают, что изменения во времени всех рассматриваемых переменных имеют вид логистических кривых (рис. 1–3). Численность мирового населения, концентрация углекислого газа и средняя температура приземного слоя атмосферы характеризуются, в конечном итоге, снижением скорости их роста и стабилизацией на некотором относительно постоянном уровне.

Если стабилизация численности населения (концентрации углекислого газа и температуры воздуха) на этом промежутке времени наблюдается практически линейный рост (рис. 2, 3). Их стабилизация значительно удалена во времени. При этом,

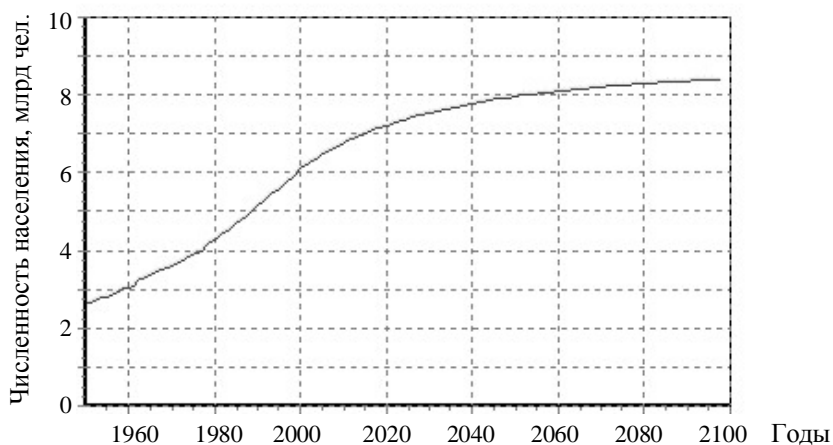


Рис. 1. Прогностическая кривая роста численности населения планеты

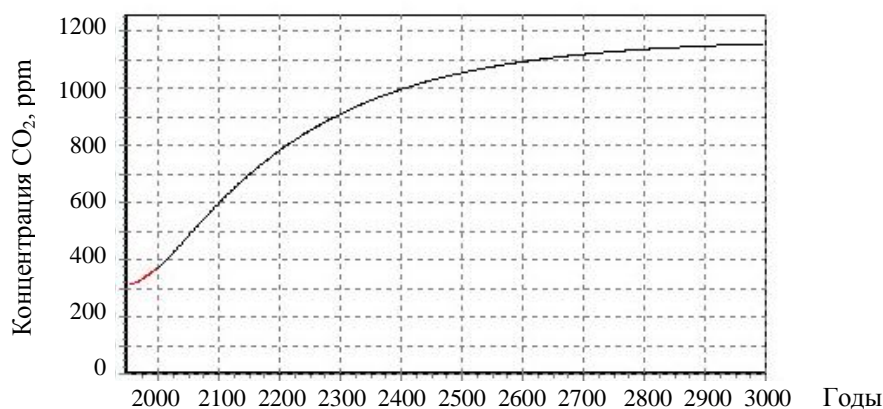


Рис. 2. Прогноз изменения концентрации  $CO_2$ :  $m = 0.54$ ,  $q = 4 \cdot 10^{-3}$

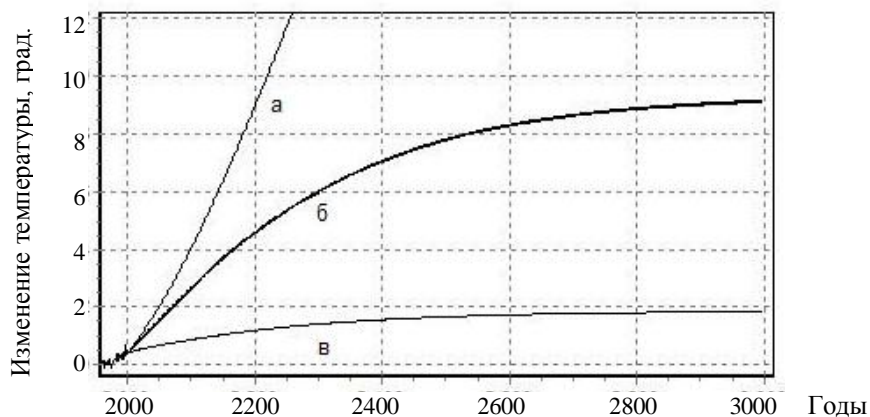


Рис. 3. Прогноз изменения средней температуры атмосферы при различных значениях параметра  $s$ : **а** –  $s = 10^{-3}$ ; **б** –  $s = 10^{-2}$ ; **в** –  $s = 5 \cdot 10^{-2}$

как показывают альтернативные вычисления с перебором параметров, значение верхнего предельного уровня определяется сочетанием всех параметров уравнений (2), (3), а время его достижения – значениями коэффициентов  $q$  и  $s$ .

На небольших промежутках времени разница между сценариями является относительно

небольшой, но в дальней перспективе ее траектории расходятся, достигая различных устойчивых состояний. При этом стабилизация температуры также происходит на различных уровнях, положение которых определяется значением параметра  $q$  и, в еще большей степени, параметра  $s$  (рис. 3).

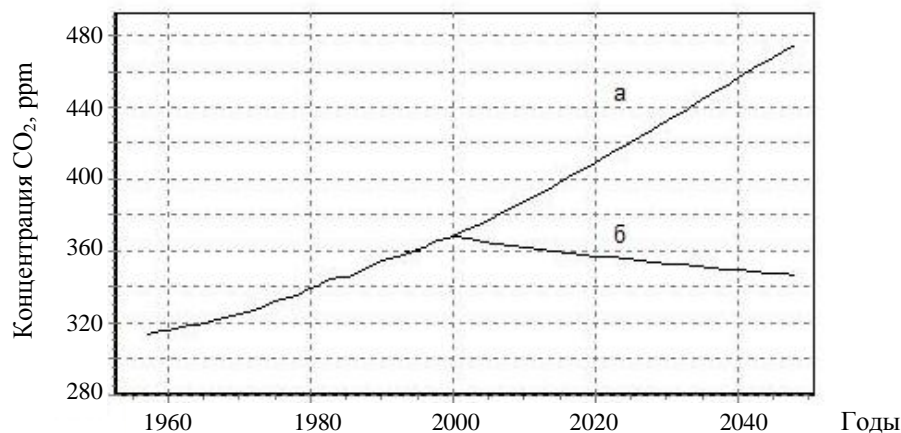


Рис. 4. Краткосрочный прогноз изменения концентрации  $\text{CO}_2$  при различных значениях коэффициента  $m$ : а –  $m = 0.54$  (современное значение); б –  $m = 0.135$

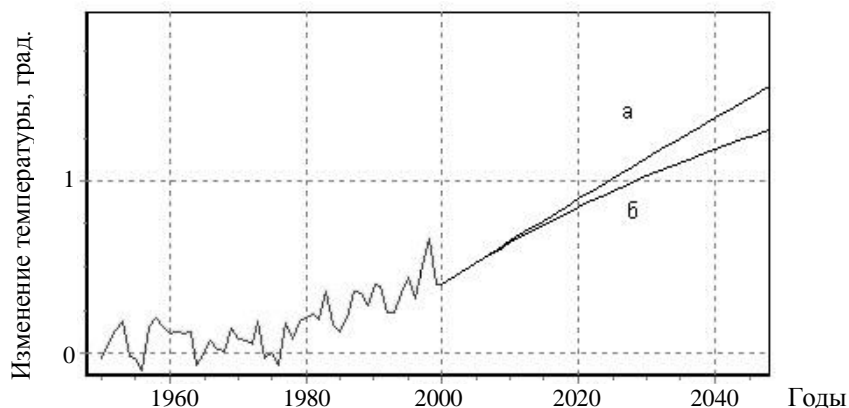


Рис. 5. Краткосрочный прогноз изменения средней температуры атмосферы: а –  $m = 0.54$ ; б –  $m = 0.05$

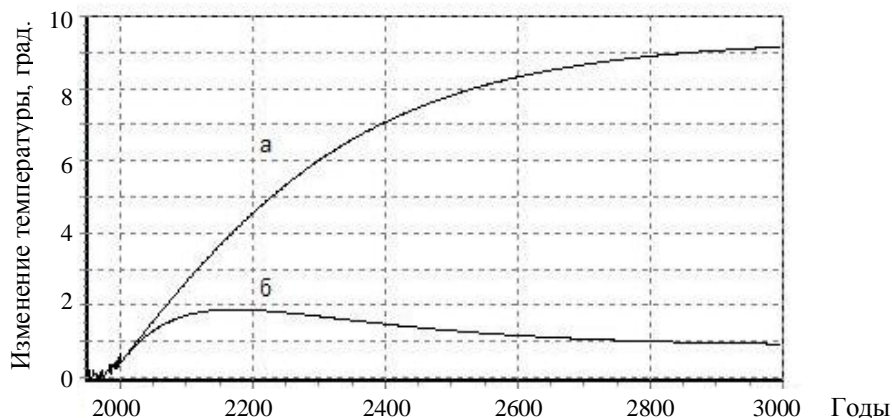


Рис. 6. Долгосрочный прогноз изменения температуры атмосферы: а –  $m = 0.54$ ; б –  $m = 0.05$

Принимая во внимание данные об изменении температуры в приземном слое атмосферы в прошлом [9], выбираем 2-й вариант роста температуры как наиболее удачно «сшивающий» данные до 2000 года с прогнозируемым участком.

Предложенная модель позволяет рассмотреть последствия различных сценариев энергопотребления в мире. Для этого необходимо варьировать коэффициент  $m$ , отражающий интенсивность антропогенных выбросов. При сохранении параметром  $m$  значения, соответствующего современным темпам ее роста (кривая а), к 2050 г. происходит увеличение содержания диоксида углерода до 480 ppm, а средней температуры – на 1.2°C в сравнении с 1995 г. (рис. 4, 5).

Во 2-ом сценарии, характеризуемом 4-кратным уменьшением выбросов, концентрация CO<sub>2</sub> снижается, относительно быстро достигая в пределе значений, меньших современного уровня (рис. 4). Несмотря на это, температура воздуха в краткосрочном прогнозе возрастает при любых значениях параметра  $m$ , и ее рост носит линейный характер (рис. 5). При этом видно, что в течение первых 50 лет скорость возрастания температуры практически одинакова в обоих сценариях.

Если же наблюдать за изменением температуры в долгосрочном прогнозе (рис. 6), то можно увидеть, что при 11-кратном снижении выбросов углекислого газа за участком роста следует ее снижение. Такое поведение, по-видимому, объясняется запаздывающей реакцией температуры на повышение в атмосфере концентрации углекислого газа. При этом время запаздывания определяется коэффициентами  $q$ ,  $r$  и  $s$ , а от интенсивности выбросов, выражаемой параметром  $m$ , зависит лишь тот уровень, до которого в итоге происходит снижение температуры.

Основные результаты работы показывают, что динамика роста концентрации углекислого газа и средней температуры атмосферы при парниковом эффекте характеризуется 2 фазами. Это – линейный рост в ближайшие 150 лет и снижение темпов прироста в последующем. Наиболее реалистичный прогноз предполагает предельный рост температуры атмосферы при

современных темпах индустриального развития на 9°C. Снижения уровня концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере Земли можно добиться лишь падением энергопотребления не менее чем в 4 раза, а уменьшение температуры атмосферы будет происходить с большим запаздыванием и только при 11-кратном снижении энергопотребления. При этом за счет снижения интенсивности выбросов можно добиться уменьшения температуры только в долгосрочном периоде, а возрастание температуры в течение ближайших 50 лет мало зависит от скорости поступления углекислого газа в атмосферу и составит 1.2°C.

#### Список литературы

1. Снытин С.Ю., Клименко В.В., Федоров М.В. Прогноз развития энергетики и эмиссии диоксида углерода в атмосферу на период до 2100 года // Доклады АН. 1994. Т. 336. № 4. С. 476–480.
2. Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В. Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере // Доклады АН. 2005. Т. 401. № 2. С. 233–237.
3. Израэль Ю.А., Семенов С.М. Пример вычисления критических границ содержания парниковых газов в атмосфере с помощью минимальной имитационной модели парникового эффекта // Доклады АН. 2003. Т. 390. № 4. С. 533–536.
4. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. М.: Физматлит, 2004. 336 с.
5. Монишев А.Я., Афонин В.М., Розенберг Г.С., Гелашвили Д.Б. Прогнозирование численности населения на основе модельного представления динамики рождаемости и смертности // Поволжский экологический журн. 2003. № 3. С. 232–238.
6. Шаманов Н.П. Цивилизация, энергетика, климат в XXI веке. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2002. 226 с.
7. Болин Б. Какое количество CO<sub>2</sub> остается в атмосфере? Углеродный цикл и прогнозы на будущее. В кн.: Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы. Л.: Гидрометеоздат, 1989. С. 134–195.
8. Монин А.С., Шишков Ю.А. Глобальные экологические проблемы. Ч. 1. М.: Знание, 1990. 47 с.
9. Борзенкова И.И. Эмпирическая палеоклиматология: состояние проблемы и методы исследований. В кн.: Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука, 2002. С. 75–92.

## MODEL ANALYSIS OF DYNAMIC PECULIARITIES OF GREENHOUSE EFFECT DEVELOPMENT

*E.S. Dubrovina, A.Ya. Monichev*

A model has been formulated to describe the dynamics of the global population size, atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and the surface air temperature. Short-term and long-term forecasts of the greenhouse effect development have been made. According to the long-term forecast, the temperature growth rate decrease and its subsequent stabilization are expected. Delayed temperature reaction to CO<sub>2</sub> decrease in the atmosphere has been found. It has been shown that the decrease of the temperature to the current level is achieved only in the long-term perspective in case of eleven-fold decrease of anthropogenic CO<sub>2</sub> emission intensity and its dynamics will weakly depend on the rate of CO<sub>2</sub> emission for the next 50 years.