

**ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ БИОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ**  
**Д.В. Ерохин, С.И. Барцев, А.Г. Дегерменджи**

*Институт Биофизики СО РАН,  
660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 50, [the\\_greatest\\_idea@rambler.ru](mailto:the_greatest_idea@rambler.ru)*

*В результате данного исследования была проведена оценка антропогенных потоков и вклада океана в многолетнюю и сезонную динамику углекислого газа. Были определены ключевые параметры системы «биосфера-климат», «ответственные» за характер лавинообразных изменений. Наиболее важными из них являются: температурная зависимость распада мёртвого органического вещества, глобальная температурная чувствительность к росту концентрации углекислого газа, а также способность растений поглощать избыточный углерод. Наиболее важным результатом является демонстрация возможности появления в будущем негативных и необратимых изменений в системе «биосфера-климат».*

Система «климат-биосфера», внутри которой мы все живём, подвергается постоянному влиянию широкого спектра неблагоприятных факторов. Среди них антропогенный поток углекислого газа и других загрязнителей в атмосферу, вырубка лесов, неэффективное землепользование, уменьшение количества видов, увеличение солнечной радиации и многих других. Есть все основания рассматривать эти неблагоприятные факторы, как причину изменений глобальных параметров, таких как, концентрация углекислого газа в атмосфере, температура, распределение осадков, частота природных катаклизмов, уменьшение биоразнообразия, эрозия почв и др. [1]. Таким образом, перед нами встаёт жизненно важный вопрос: **«Могут ли данные неблагоприятные воздействия привести к необратимым негативным изменениям в системе «климат-биосфера» или к глобальной экологической катастрофе?»** Нет никаких оснований считать вероятность необратимых изменений априорно равной нулю.

**Исходя из этого, цель исследования формулируется следующим образом: рассмотреть возможные механизмы и будущую динамику необратимых изменений.**

Почему представляется необходимым уделять внимание необратимым негативным процессам? Все определяется «ценой вопроса». Рассмотрим пример. Существующая вероятность авиационной катастрофы составляет примерно  $10^{-5}$  на рейс, и считается приемлемой. В случае катастрофы гибнет около 100 пассажиров. Глобальные необратимые изменения биосферы и последующие процессы, в принципе, могут привести к гибели почти всего человечества (глобальные недород, голод, эпидемии, погодные катаклизмы и т.п.). То есть речь идет о гибели  $10^9$  человек. Тогда приемлемой следует рассматривать вероятность глобальных необратимых изменений порядка  $10^{-12}$ . Согласно некоторым климатическим моделям вероятность очень серьезных климатических изменений составляет примерно  $10^{-2}$  [2]. Легко видеть, что эта вероятность намного превышает приемлемую и должна уже привлечь внимание лиц принимающих решение. Наша модель тоже предназначена для привлечения внимания к одной из фундаментальных проблем, стоящих перед человечеством.

Изучение биосферы представляет собой весьма сложную задачу. Ни с технической, ни с морально-этической точки зрения невозможно провести традиционный эксперимент над уникальной планетарной экосистемой. Одним из возможных и эффективных способов изучения систем подобного масштаба и значимости является применение подходов математического моделирования. Данный подход развивается уже несколько десятилетий. Сложившиеся в этой области знания традиции определяют путь к адекватности модели через её максимальную детализацию. Чем подробнее будет представлено функциональное и пространственное разнообразие исходной системы, тем более достоверными будут результаты работы системы модельной. Но высокий уровень детализации, а, следовательно, большое количество уравнений и параметров системы неизбежно приводят к ряду трудностей. Прежде всего, это появление артефактов в результате ошибок компьютерного программирования

(компьютерные «баги»), Самой же главной проблемой является накопление неопределённостей в прогнозах, в результате неизбежной неопределённости в экспериментальной оценке модельных параметров.

Минимальные модели [3] в значительной степени лишены этих недостатков. Большое практическое значение имеет исследование лимитирующих (но возможных) версий моделей, в которых влияние возможных компенсирующих и сглаживающих механизмов минимально. Исключая данные механизмы, мы приходим к созданию минимальных моделей. Так же очень важно оценить времена необратимых изменений, вызванных различными механизмами.

В результате исследований были созданы минимальные модели многолетней и сезонной динамики CO<sub>2</sub>. Данные модели учитывали современные представления о механизмах накопления и высвобождения углерода, данные о его круговороте, о величине потоков и запасов в различных депо [4,5,6,7](рис.1).

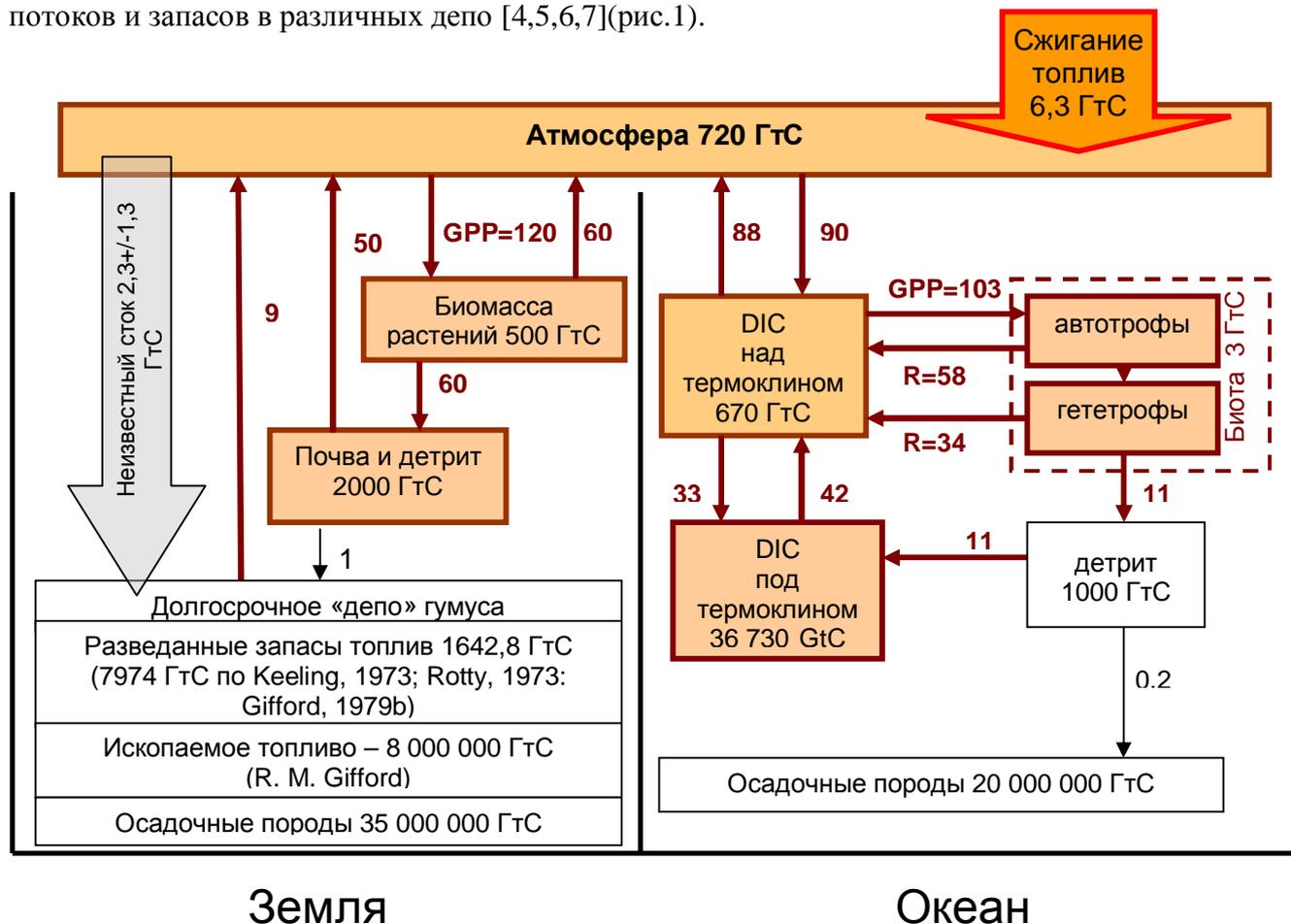


Рис - 1. Схема круговорота углерода, которая использовалась для создания минимальной модели ВАО (биота-атмосфера-океан). Выделенные элементы схемы отражают структуру минимальной модели.

Многолетняя модель описывает динамику следующих резервуаров углерода: атмосферы, живых растений, отмершего органического вещества в почве, в фотическом и глубинных слоях океана, в автотрофах и в гетеротрофах океана.

Модель представляется следующей системой уравнений:

$$\frac{dA}{dt} = S(B_g, V_s, T(A)) + C_{atm\_up} \cdot O \cdot Des(A) - P(B_T, B_{MAX}, V_B, A, T(A)) - C_{atm\_down} \cdot A \cdot Sorb(A) + fuel(t) + (1 - gum) \cdot def(t) + X(t) \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = P(B_T, B_{MAX}, V_B, A, T(A)) - D(B_T, V_D) - def(t) \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = D(B_T, V_D) - S(B_g, V_S, T(A)) + gum \cdot def(t) \quad (3)$$

$$\frac{dO}{dt} = [Re \cdot Out(K_{an}, B_{an}, V_{Dm}) + C_{atm\_down} \cdot A \cdot Sorb(A) + C_{deep\_up} \cdot G] - [C_{fot\_down} \cdot O + C_{atm\_up} \cdot O \cdot Des(A) + N(K_{pl}, O, B_{lim}, T(A), V_{Bm}, B_{pl}, B_{an})] \quad (4)$$

$$\frac{dN}{dt} = N(K_{pl}, O, B_{lim}, T(A), V_{Bm}, B_{pl}, B_{an}) - Dm(K_{an}, B_{an}, B_{pl}, V_{Sa}) \quad (5)$$

$$\frac{dDm}{dt} = Dm(K_{an}, B_{an}, B_{pl}, V_{Sa}) - Out(K_{an}, B_{an}, V_{Dm}) \quad (6)$$

$$\frac{dG}{dt} = C_{fot\_down} \cdot G - C_{deep\_up} \cdot G + (1 - Re) \cdot Out(K_{an}, B_{an}, V_{Dm}) \quad (7)$$

, где первое уравнения описывает динамику количества углерода в атмосфере, второе в биомассе живых растений, третье в отмершем органическом веществе, четвертое в фотическом слое океана, пятое в биомассе океанических автотрофов, шестое в биомассе океанических гетеротрофов и седьмое в глубинном слое океана.

В уравнении (1) аппроксимированная по экспериментальным данным функция  $fuel(t)$  задаёт интенсивность антропогенной эмиссии углерода в атмосферу. В качестве данных для аппроксимации использовалась широкая известная информация об интенсивности сжигания топлив в течении индустриальной эры.

В уравнении (2) для описания скорости роста биомассы растений, исходя из принципа Либиха, используется функция в мультипликативной форме:

$$P(x, A) = V_x x(x_{max} - x)V(A)f_p(T(A)), \quad (8)$$

где  $x$  – количество углерода в биомассе растений;  $A$  – количество углерода в атмосфере;  $T$  – температура;  $V_x$  – масштабный множитель;  $x_{max}$  – максимально возможное количество углерода в биомассе(ограничено разного рода лимитирующими факторами – площадью, азотом, фосфором, и т.п.)  $V(A)$  – функция, описывающая зависимость роста биомассы от атмосферной концентрации  $CO_2$  в виде зависимости Моно(пересчитана на колчество углерода в атмосфере);  $f_p(T)$  – функция, описывающая эмпирическую зависимость скорости прироста биомассы растений от среднегодовой глобальной температуры:

$$f_p(T) = T^d (T_p - T)q(T)q(T_p - T), \quad (9)$$

где  $T_p$  – температура, при которой рост растений полностью прекращается,  $\theta(x)$  – ступенчатая функция, равная 1 при положительных значениях аргумента и 0 при отрицательных.

Зависимость глобальной температуры от количества углерода выражается следующим образом:

$$T(A) = T_0 + T_{del} \log_2 \frac{A}{A_0}, \quad (10)$$

где  $A$  – количество углерода в атмосфере в ГтС;  $A_0$  – количество углерода в начале исследуемого периода;  $T_0$  – глобальная среднегодовая температура в начале исследуемого периода;  $T_{del}$  – прирост температуры при удвоении концентрации  $CO_2$  [1].

Скорость отмирания биомассы(ГтС/год) в уравнениях (2) и (3) представлена следующей простой зависимостью:

$$D(x) = V_d x. \quad (11)$$

Скорость разложения неживой органики почв и поступления углерода в атмосферу (уравнения (3) и (1)) описывается в виде:

$$S(y, T) = V_s y f_M(T), \quad (12)$$

Где  $f_M(T)$ - функция вида (9), описывающая зависимость микробного почвенного дыхания от температуры с предельным значением  $T_M$ . Функция (12) представляет собой интегральную кривую, описывающую процесс смены микробных сообществ при повышении температуры, вплоть до термофилов. Вид функции был определён следующим образом (рис. 2), исходя из предположения о том, что при росте температуры почвы, дыхание микрофлоры будет оставаться на максимальном уровне в результате смены одного микробного сообщества другим, более теплолюбивым.

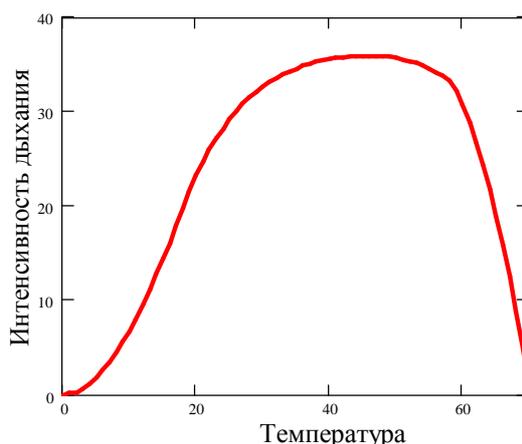


Рис. - 2. Температурная зависимость интенсивности дыхания почвенной микрофлоры от температуры.

Уравнения, описывающие динамику роста автотрофов и гетеротрофов, а также разложение неживой органики в океане, созданы по такому же принципу, что и уравнения для наземных процессов, естественно с поправками, учитывающими особенности биологических процессов в океане.

Верификация построенной модели проводилась на основе керновых данных о концентрации углекислого газа в атмосфере прошлого, начиная с 1700 года и до наших дней. В качестве второго участка верификации выступали данные об атмосферной концентрации углекислого газа, полученные на обсерватории Мауна-Лоа (рис. 3).

Результаты вычислений многолетней модели, основанной на данных о темпах роста сжигания топлив и обезлесивания, расходились с экспериментальными данными о росте концентрации углекислого газа в атмосфере [1,8] (рис. 3). Скорости роста  $fuel(t)$  сжигания оказалось не достаточно, чтобы обеспечить наблюдаемую сегодня атмосферную динамику углекислого газа. Процесс дефорестации (обезлесивания)  $def(t)$  значительно не влияет на рост атмосферной концентрации, поскольку данный процесс является одной из «петель» круговорота углерода.

Для того, чтобы привести в соответствие модельные и экспериментальные данные в модельную систему был добавлен ещё один поток  $X(t)$ , через который в атмосферу поступал углекислый газ (1). Величина этого потока согласуется с уже существующими оценками, так называемого, потока Хоутона [9], связанного с изменением типа и способов землепользования.

Первоначальное несоответствие модельных и экспериментальных данных поставило вопрос о распределении антропогенного углерода, поступившего в атмосферу почти за триста лет индустриальной эры? По некоторым оценкам [5] за это время в атмосферу поступило от

240 до 300 ГтС. Более детальное рассмотрение вопроса о распределении углерода привело к изучению стационарного состояния модельной системы многолетней динамики.

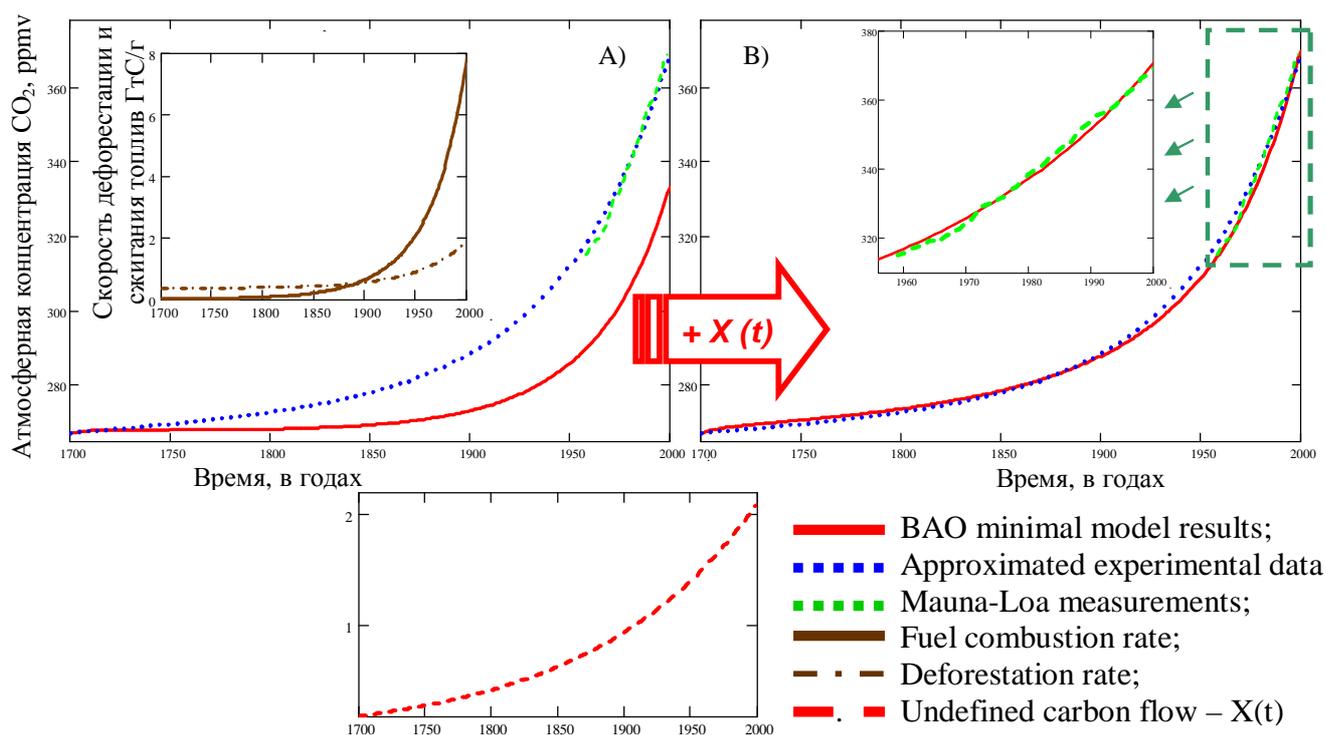


Fig - 3. Сравнение результатов работы модели: А) модель, учитывающая только сжигание топлив и дефорестацию; В) модель, так же учитывающая неопределённый поток углерода –  $X(t)$ .

фотосинтез, было получено представление о поведении системы в момент резкого изменения её основных параметров. Для этого сравнивались отклики двух систем (рис. 4). Одна из них – объединённая – описывала динамику и океанской, и наземной части углеродного цикла. Вторая не включала в себя океанские компартменты. На рисунке 4 видно, что объединённая модель (с океаном), «изымает» образовавшийся в атмосфере излишек углерода гораздо быстрее, чем модель наземной части углеродного цикла. Хотя и для «океанской» модели время реакции составило несколько сотен лет. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что на протяжении изучаемого периода времени (с 1700 по 2000 годы) пренебрегать вкладом океана в многолетнюю динамику углекислого газа нельзя.

Иначе складывается ситуация при изучении сезонных колебаний концентрации углекислого газа. Проведённый нами сравнительный эксперимент (рис. 5), с использованием объединённой и наземной моделей сезонной динамики  $CO_2$ , позволяет сделать вывод, что для изучения процессов в масштабе от нескольких сезонов до несколько лет, достаточно применять модель только лишь наземной части углеродного цикла. Различия между данными сравниваемых моделей составляют всего несколько долей процента. Поэтому проще и эффективней при расчётах использовать модель всего из семи уравнений (одно и два для каждой из широтных групп – северной, тропической и южной), а не из четырнадцати, как это было бы в случае с объединённой моделью.

Для изучения будущей динамики биосферы были проведены две серии вычислительных экспериментов. В первой рассматривались сценарии, представленные в отчете ИРСС [1] (рис 6). Во второй рассматривалась будущая динамика функции сжигания, полученной на основе аппроксимации исторических и экспериментальных данных. Метод исследования заключался в определении для каждого сценария «точек необратимости», то есть момента времени, после которого система «разрушалась», даже при условии полного прекращения поступления антропогенного углерода.

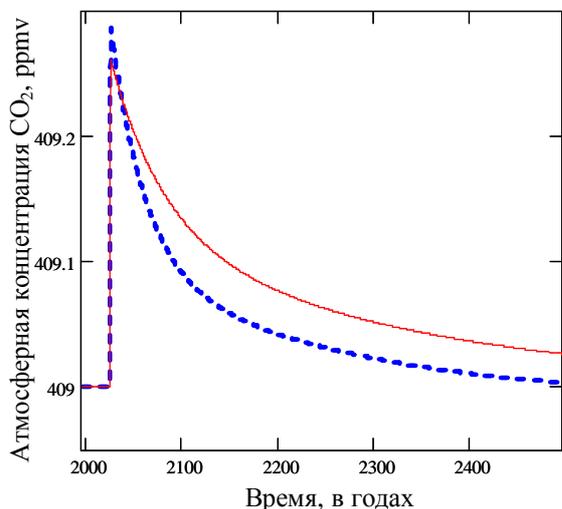


Рис. - 4. Реакция моделей на импульсное воздействие:

- модель «Биота-Атмосфера»;
- - - модель «Биота-Атмосфера-Океан».

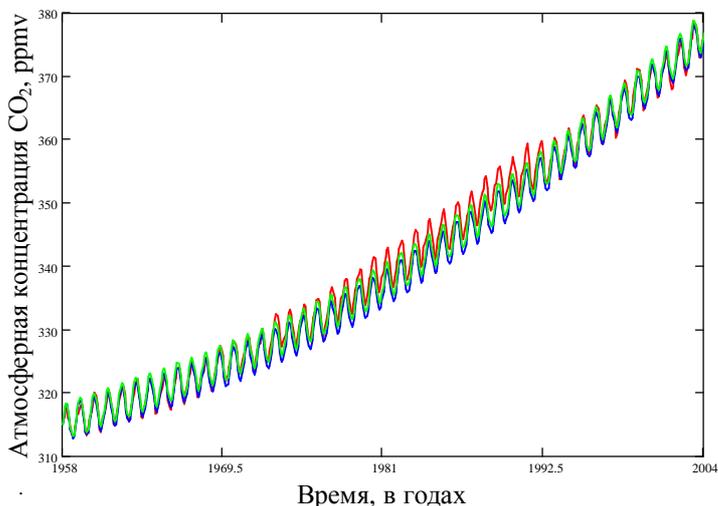


Рис - 5. Результаты вычислений минимальных моделей

- Измерения Мауна-Лоа;
- - - данные модели «Биота-Атмосфера-Океан»;
- ... данные модели «Биота-Атмосфера».

Вычисления показали, что один из сценариев, рассматриваемых в отчёте ИРСС и имеющий максимальную скорость роста сжигания, опережает по темпу роста аппроксимированную функцию, полученную на основе исторических данных о сжигании, и имеет «точку необратимости» в районе 2080 года. Остальные сценарии не приводят к резким и необратимым изменениям в течение периода прогнозирования, то есть до 2100 г.

Функция сжигания, полученная после аппроксимации исторических и экспериментальных данных, так же приводит в будущем к значительным изменениям. Как показано на (рис. 7), разрушение системы наступают в начале двадцать второго века, даже при условии, что антропогенное воздействие полностью заканчивается в 2075 году. В 2055 году система, достаточно легко выходит на стационар. Таким образом, можно сделать вывод, что «точка необратимости» находится между этими двумя датами, в районе 2070 года. Данный результат, лежащий в рамках современных представлений о будущих изменениях, оправдывает выбор в качестве инструмента исследования минимальных математических моделей.

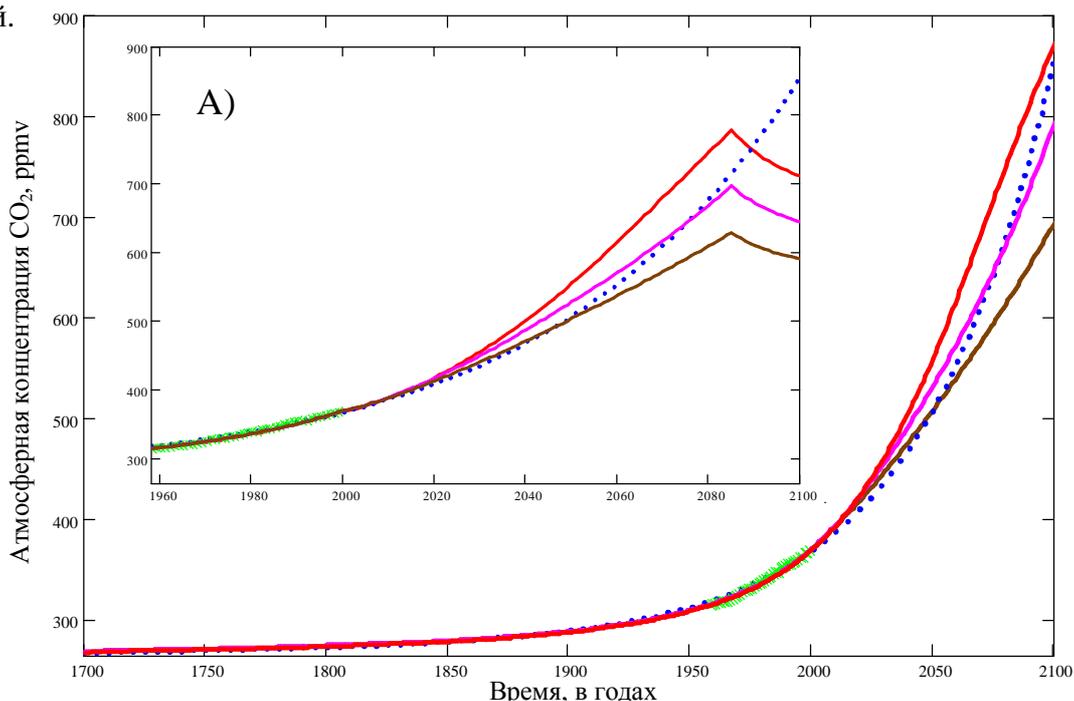


Рис. - 6. Влияние различных сценариев сжигания топлива в будущем на атмосферную концентрацию  $CO_2$ : - - - аппроксимированные экспериментальные данные; — сценарий «A1FI» [1]; — сценарий «A2» [1]; — сценарий «IS92A» [1].

Рис. - 6А. Динамика атмосферной концентрации  $CO_2$  после полного прекращения сжигания топлива.

В ходе данного исследования была проведена оценка антропогенных потоков углерода и вклада океана в многолетнюю и сезонную динамику углекислого газа. Были определены ключевые параметры системы «биосфера-климат», «ответственные» за характер лавинообразных изменений. Наиболее важными из них являются: температурная зависимость распада мёртвого органического вещества, глобальная температурная чувствительность к росту концентрации углекислого газа, а также способность растений поглощать избыточный углерод.

Но, бесспорно, главным результатом можно считать ответ на вопрос, обозначенный в самом начале статьи: «Может ли антропогенное воздействие на биосферу, привести к необратимым негативным изменениям в системе «климат-биосфера» или к глобальной экологической катастрофе?» Результаты данного исследования говорят о том, что ответ положительный.

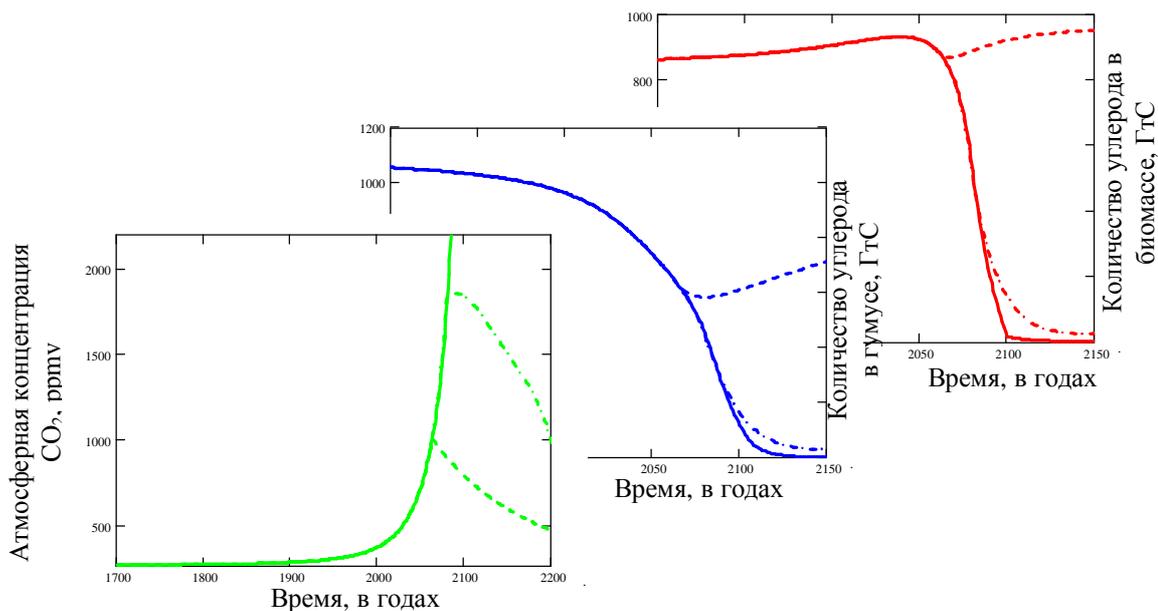


Рис. - 7. Сценарии будущих изменений количества углерода в биомассе ( — ) , гумусе ( — ) и в атмосфере ( — ) после полного прекращения сжигания: в ( ■■■■ ) 2055г.; в ( — ■ — ) 2075г.; в ( — ) 2100г.

#### Литература

1. IPCC. Изменение климата, 2001г.: Научные аспекты, ЮНЕП, ВМО, [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
2. Стейнфорт Д.А., и др. Неопределённость прогнозов реакции климата на увеличение концентрации парниковых газов // Nature. 2000. v. 433. p. 403-406.
3. Свирежев М.Ю., фон Блох В. // Ecological modeling. 1997. v.101 p.79-95
4. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
5. Семёнов С.М., Парниковые газы и современный климат земли. – М.: ИЦ «Метеорология и гидрология», 2004.
6. Falkowski P.G., Barber R.T., and Smetacek V. Biogeochemical controls and feedbacks ocean primary production, Science, vol. 281, 1998, pp. 200-206.
7. Brovkin V., Bendtsen J., Claussen M., Ganopolski A., Kubatzki C., Petukhov V., and Andreev A., Carbon cycle, vegetation and climate dynamics in the Holocene: Experiments with the CLIMBER-2 model, Global Biogeochemical Cycles, vol. 16, No. 4, 2002, pp. 86-1-86-20.
8. Киллинг К.Д., Орф Т.П., Группа по изучению оксида углерода, The Scripps Institution of Oceanography (SIO). La Jolla (Calif.) Univ. California, 2001.

9. Houghton R.A. and Hackler J.L., Carbon flux to the atmosphere from land-use changes, in: Trends: A Compendium of Data on Global Change, Carbon Dioxide Information Analysis Centre, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn.? USA? 2002, <http://cdiac.esd.ornl.gov>.

**FORECAST OF BIOSPHERE DYNAMICS USING SMALL-SCALE  
(LOW-DIMENSIONAL) MODELS**

*D.V.Erokhin, S.I.Bartsev, A.G.Degermendzhy* (IBP SB RAS)

*Obtained scripts of global dynamics specify an opportunity of catastrophic changes (double increase of temperature, extreme CO<sub>2</sub> concentration, biota destruction). Achieved model's results reveal the contribution of sea biota in seasonal CO<sub>2</sub> dynamics is insignificant (two order less than terrestrial one), but in long period of time ocean influence becomes more important. Key parameters of model responsible for avalanche-like biosphere changes were fixed. These are temperature dependency of organic matter destruction rate, global temperature sensitivity to CO<sub>2</sub> concentration, ability of plants to accumulate superfluous carbon and the physical CO<sub>2</sub> pump in the ocean.*