

## МАЛОРАЗМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТУНДРОВОЙ ЭКОСИСТЕМЫ И СИСТЕМЫ «БИОСФЕРА-КЛИМАТ»

Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Бархатов Ю.В., Белолипецкий П.В.

*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*

[bartsev@yandex.ru](mailto:bartsev@yandex.ru)

Прогнозирование реакции биосферы и региональных экосистем на наблюдаемые и ожидаемые изменения климата при различных сценариях антропогенного воздействия или под действием естественных причин является фундаментальной проблемой, имеющей очевидное прикладное значение. Прогноз состояния системы «биосфера-климат» (СБК) осложняется ее принципиальной нелинейностью, способной порождать множественные стационарные состояния системы и пороговые переключения между этими состояниями.

Наглядным примером проявления нелинейных свойств СБК может служить так называемая «пауза» роста глобальной температуры, которая интерпретируется как результат перехода климатической системы в другое состояние [1]. Статистический анализ показывает, что наблюдаемая динамика глобальной температуры может быть описана как длительное пребывание СБК в состояниях с постоянной глобальной температурой с быстрыми переходами между этими состояниями [2-5]. При этом стохастический характер глобальной температуры есть следствие естественной природной изменчивости, не оказывающей влияние на долговременный тренд температурной динамики [6].

Эти быстрые переключения между стационарными состояниями вызывают особые опасения, поскольку момент переключения сложно предсказать, и кроме того, есть вероятность, что следующий стационарный уровень температуры может существенно ухудшить качество жизни большей части человечества. Наихудшим вариантом проявления нелинейности СБК является пороговый запуск самоускоряющихся процессов, способных привести к разрушению существующих экосистем. Ранее было показано, что подобный процесс возможен при усилении положительных обратных связей, существующих в СБК [7]. При этом можно оценить «дату необратимости» после достижения которой даже полное прекращение сжигания ископаемых топлив уже не в состоянии остановить дальнейшее потепление климата, которое будет сохраняться из-за стимулируемого температурой окисления органики почвы.

Приведенные аргументы заставляют усомниться в адекватности, а значит и эффективности использования регрессионных моделей для прогноза динамики СБК. Единственным инструментом осуществления такого прогноза являются механизменные или процессные математические модели СБК и региональных экосистем. Однако построение детальных моделей региональных экосистем, не говоря уже о СБК, наталкивается на практически непреодолимый барьер сложности. Действительно, невозможно за ограниченное время, отпущенное для принятия практических мер по адекватному реагированию на климатические изменения построить математическую модель региональной экосистемы, описывающую все входящие в нее виды организмов, включая микробов и беспозвоночных.

Единственным приемлемым подходом к решению этой проблемы видится в построении ряда предельно простых, но последовательно усложняющихся концептуальных моделей СБК и региональных экосистем. Этот подход позволяет выделить ключевые свойства изучаемой системы и тем самым получить представление

о возможных последствиях изменений климата и антропогенного воздействия, а также сформулировать принципиальные вопросы для экспериментального исследования этих систем, не отвлекаясь на многочисленные детали.

Тундровые экосистемы представляют собой очень важный объект для исследования процессов взаимодействия, СБК целом и входящих в нее региональных экосистем. Дело в том, что с одной стороны, полярные регионы подвергаются наибольшему воздействию глобального изменения климата, а значит волею природы являются модельным объектом для изучения экологических последствий таких воздействий. С другой стороны, огромные залежи органического углерода в грунтах вечной мерзлоты (более 1000 Гт [8]), в сочетании с повышенными темпами изменения климата в полярных регионах, могут способствовать активизации потенциально опасной обратной связи, которая может оказать значительное влияние на темпы глобальных изменений. Учет этих фактов практически формулирует "техническое задание" на концептуальную модель тундровой экосистемы в нулевом приближении – модель должна оценить возможность обратного влияния потепления в полярных регионах на ход глобальных процессов.

Отсюда целью данной работы является рассмотрение наиболее неблагоприятных возможных последствий инициации процессов, начинающихся происходить в экосистемах вечной мерзлоты, и оценка их возможного влияния на глобальную динамику.

Ход глобальных процессов в первую очередь характеризуется постепенным ростом атмосферной концентрации углекислого газа, сопровождающейся более сложной динамикой глобальной температуры, итоговый тренд которой за последнее столетие является положительным. Взаимодействие между этими двумя факторами рассматривалось в ряде моделей [9, 10], отмечались эффекты положительной обратной связи между ними. Возможность развития необратимого катастрофического процесса в результате положительной обратной связи, основанной на парниковом эффекте, была отмечена при анализе малоразмерной модели СБК, построенной в соответствии с принципом наихудшего сценария [7].

Позднее была описана модель "компостной бомбы", в которой исследуется возможность локального саморазогрева почвы вследствие активизации микробного разложения почвенной органики [11]. Однако совместное исследование локальной динамики "компостной бомбы" и процессов на глобальном уровне не проводилось.

Другим эффектом, способным играть важную роль в глобальной динамике является повышение выделения метана из почвы с ростом атмосферной концентрации углекислого газа [12]. Этот эффект основан на влиянии атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  на транспирацию растений, которая падает с ростом этой концентрации, что приводит к увеличению увлажненности почвы, ухудшению аэрируемости и как следствие интенсификации метаногенеза. Поскольку парниковый эффект вызываемый метаном по минимальным оценкам в 25 раз превышает парниковый эффект от углекислого газа, то интенсификация эмиссии метана приведет к усилению парникового эффекта, что в свою очередь через температурную активацию разложения почвенной органики будет интенсифицировать эмиссию  $\text{CO}_2$ .

Из вышесказанного следует, что именно эти два механизма должны быть рассмотрены в объединенной концептуальной модели СБК и тундровой экосистемы. Важно оценить возможный вклад этих положительных обратных связей в глобальную динамику.

Для оценки возможного вклада экосистем вечной мерзлоты в глобальную динамику были использована ранее опубликованная малоразмерная модель СБК, которая включает в себя интегральное описание содержания углерода в атмосфере,

океане и экосистемах суши [7]. Ранее было показано, что, несмотря на то, что поток углерода через океанические экосистемы сравним с потоком через наземные экосистемы, его вклад в глобальную динамику является незначительным, поскольку количество углерода в океанических экосистемах является быстрой переменной, вследствие относительно малой массы ( $\sim 3$  Гт) планктона и высокой скорости обмена. Поэтому в модели учитывается только физическое растворение и выделение углекислого газа из океана, а также его обмен с глубинными слоями океана.

Базовая модель была модифицирована для оценки вклада аэрозолей в изменения температуры и дополнена простой моделью мерзлотной почвы и углекислотно-зависимого метаногенеза:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dA}{dt} = (v_s f_s(T)Y + p_s(T_s)Y_s)(1 - v_{met}F(A)) + m(T)c_{jU}B + 0.1M - p(X, A, T)X - c_{aD}A + e(t) \\ \frac{dX}{dt} = p(X, A, T)X - v_d X \\ \frac{dY}{dt} = 0.99v_d X - v_s f_s(T)Y \\ \frac{dB}{dt} = c_{aD}A + c_{dU}U - [c_{jD} + m(T)c_{jU}]B \\ \frac{dU}{dt} = c_{jD}B - c_{dU}U \\ \mu \frac{d(\Delta T)}{dt} = r(A) + r_M(M) + k_A f_A(t) + f_B \Delta T \\ \mu_s \frac{dT_s}{dt} = h_s p_s(T_s)Y_s - \lambda(T_s - T) \\ \frac{dY_s}{dt} = 0.01v_d X - p_s(T_s)Y_s \\ \frac{dM}{dt} = (v_s f_s(T)Y + p_s(T_s)Y_s)v_{met}F(A) - 0.1M \\ T = T_0 + \Delta T \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{I} \\ \text{II} \end{array}$$

$$F(A) = \frac{0.01 \cdot r_{\max} e^{\beta(A-A_0)}}{r_{\max} + (e^{\beta(A-A_0)} - 1) \cdot 0.01}$$

$$p_s(T_s) = c_s e^{\alpha(T_s - T_0)}$$

$$p(X, A, T) = v_p (X_{\max} - X) f_p(T) \frac{A}{K_{0.5} + A}$$

$$r(A) = r_0 \ln\left(\frac{A}{A_0}\right) \quad f_i = \begin{cases} T^d (T_{\max} - T) \\ 0, T < 0 \\ 0, T > T_{\max} \end{cases}$$

$$m(T) = e^{k_s(T-T_0)}$$

где  $A$  – углерод в атмосфере;  $X$  – углерод в биомассе наземных растений;  $Y$  – углерод в органике почвы;  $B$  – углерод в верхних слоях океана;  $U$  – углерод в водах, расположенных ниже термоклина;  $T$  – глобальная поверхностная температура;  $\Delta T$  – равновесное приращение температуры;  $T_s$  – температура мерзлотной почвы;  $Y_s$  – углерод в мерзлотной почве;  $M$  – метан в атмосфере;  $v_i$  и  $c_j$  – соответствующие коэффициенты;  $p(X, A, T)$  – функция скорости прироста биомассы;  $r(A)$  – форсинг;  $m(T)$  – скорость выделения  $\text{CO}_2$  из океана;  $e(t)$  – антропогенная эмиссия  $\text{CO}_2$ ;  $f_A(t)$  – эмпирическая и предсказываемая концентрация аэрозолей;  $f_B$  – феноменологический

коэффициент температурной обратной связи;  $\mu_s$  – теплоемкость почвы;  $h_s$  – теплопродукция почвенного дыхания;  $\lambda$  – теплопроводность;  $T_0$  – начальная температура почвы. Красный штриховой прямоугольник (I) выделяет блок мерзлотной почвы, соответствующий модели "компостной бомбы" [11]. Синий пунктирный прямоугольник (II) выделяет блок метаногенеза. В модели конкретными числами учтено, что вклад тундровых экосистем в глобальную ЧПП составляет около 1%, что среднее время жизни метана в атмосфере около 10 лет, что влечет за собой оценку доли метаногенеза в общем круговороте углерода около 1%.

Для подстройки модели к известным экспериментальным данным был разработан СБК симулятор в среде SciLab 5.4 (открытое ПО, GPL-2 совместимая лицензия). Для минимизации суммы квадратов отклонений модели от экспериментальных данных был использован метод Гаусса-Зейделя с одномерным поиском по известному методу ДСК. Для определения параметров модели были использованы данные по глобальной температуре, атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$ , а также данные по поглощению углекислого газа сушей и океаном [13-15]. Кроме того, были использованы эмпирические данные и ожидаемые тренды антропогенной эмиссии  $\text{CO}_2$  (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) и атмосферной концентрации аэрозолей (<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>). Концентрации метана, время жизни молекул метана и величина эмиссии метана взяты из литературы [13, 16].

В модели были зафиксированы следующие параметры:  $A_0=588$ ,  $X_0=550$ ,  $Y_0=2000$ ,  $B_0=268$ ,  $U_0=36730$ ,  $M_0 = 4$  (все в ГтС),  $r_0=5.3$  Вт/м<sup>2</sup>,  $c_{dU} = 10^{-4}$  год<sup>-1</sup>,  $c_{fD} = 0.016$  год<sup>-1</sup>,  $\mu=31.8$ ,  $\mu_s=12.5$ ,  $k_s=0.0423$ . Все коэффициенты, ассоциированные со скоростями превращения вещества -  $v_i$  и  $c_i$  вычисляются таким образом, чтобы обеспечить стационарное состояние переменных модели и суммарную ЧПП фотосинтеза равную 65 ГтС/год в 1850 году, который берется за начало отсчета, при условии, что отсутствует антропогенная эмиссия  $\text{CO}_2$ . Вследствие этого моделируемая динамика представляет собой отклик исходно стабильной модели СБК-тундра на антропогенное воздействие. Остальные параметры модели подстраивались с помощью фитинга.

Легко видеть, что общее количество углерода в модели величина постоянная, если не происходит поступление углерода в систему извне, в процессе сгорания ископаемых топлив.

Первый этап компьютерных экспериментов состоял в подстройке параметров объединенной модели к известным экспериментальным данным и оценкам. Поскольку важнейшее свойство модели – нахождение в стационарном состоянии 1850 года при условии отсутствия антропогенной эмиссии углерода в атмосферу, – то простое подключение дополнительных блоков "компостной бомбы" и метаногенеза в модель с последующим сравнением с исходной динамикой исключено. Поэтому фитинг модели производился при подключенных блоках, но действие самих эффектов саморазогрева и интенсификации метаногенеза с ростом  $\text{CO}_2$  было отключено. Результат фитинга приведен на Рис.1.

Включение стимуляции выделения метана повышенными концентрациями углекислого газа приводит к заметному, но не слишком существенному увеличению роста глобальной температуры (Рис.2). В то же время учет эффекта саморазогрева почвы при определенных параметрах, близких к рассмотренным в статье Люка и Кокса [11], способно привести к катастрофическому выделению парниковых газов из органики почв вечной мерзлоты и резкому повышению глобальной температуры (Рис.3А). Одновременное действие обоих рассмотренных механизмов приводит к более раннему запуску необратимых процессов объединенной системы СБК-тундровые экосистемы (Рис.3Б) и большему повышению глобальной температуры.

Следует отметить, что поскольку подключенные механизмы начинают проявлять себя сразу, то это оказывает влияние на глобальную динамику, что приводит к необходимости подстройки параметров модели (кстати, не очень существенных) для соответствия экспериментальным данным в каждом отдельном случае.

#### **Выводы.**

Результаты моделирования показывают, что эффект стимуляции эмиссии метана повышенной концентрацией углекислого газа, может привести к заметному, правда не очень существенному ускорению роста глобальной температуры, что тем не менее заставляет обратить на него внимание в дальнейших экспериментальных и полевых исследованиях тундровых экосистем.

Продемонстрированная возможность запуска необратимых глобальных изменений в результате локальной положительной обратной связи, работающей по типу "компостной бомбы", которые становятся возможными даже при небольших (соответствующих оценкам МГЭИК) значениях чувствительности климата ( $\sim 3^\circ\text{C}/(\text{удвоение CO}_2)$ ). Этот результат придает особую важность экспериментальной проверки возможности реализации такого механизма, и определения условий его запуска.

Одновременное действие рассмотренных механизмов ожидаемо усугубляет последствия глобального потепления. Отсюда следует, что наблюдаемое интенсивное потепление в полярных регионах несет в себе потенциальную опасность автономной инициализации положительной обратной связи и дальнейшей активизации глобальных обратных связей.

1. J. Tollefson. *Nature*, 2014, **505**, 276–278.
2. D.H. Douglass, R.S. Knox. *Physics Letters A*, 2012, **376**, 14, 1226–1229.
3. J.A. Rial, R.A.Sr. Pielke, M. Beniston, M.Claussen, J.Canadell, P.Cox, H.Held, R.Prinn, J.F.Reynolds, J.D. Salas, *Climatic Change*, 2005, **65**, 11–38.
4. D.B.Stephenson, A.Hannachi. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2004, **130**. P. 583–605.
5. С.И. Барцев, А.Г. Дегерменджи, А.М. Федотов, С.Б. Медведев, А.И. Пестунов, И.А. Пестунов. *ДАН*, 2012, **443**, 4, 500–503.
6. П. В. Белолипецкий, С. И. Барцев, А. Г. Дегерменджи. *ДАН*, 2015, **460**, 79–83.
7. S.I. Bartsev, A.G. Degermendzhi, D.V. Erokhin. *Ecological Modelling*, 2008, **216**, 2, 160–171.
8. A. Vaks, O.S. Gutareva, S.F.M. Breitenbach, E. Avirmed, A.J. Mason, A.L. Thomas, A.V. Osinzev, A.M. Kononov, G.M. Henderson. *Science*, 2013, **340**, 6129, 183–186.
9. T.M. Lenton. *Tellus* 52B, 2000, **5**, 1159–1188.
10. D.A. Stainforth, T. Aina, , C. Christensen, M. Collins, , N. Faull, D.J. Frame, J.A. Kettleborough, S. Knight, A. Martin, J.M. Murphy, C. Piani, D.L. Sexton, A.R. Smith, A.A. Spicer, J. Thorpe, M.R. Allen. *Nature*, 2005, **433**, 403–406.
11. C.M. Luke, P.M. Cox. *European Journal of Soil Science*, 2011, **62**, 5–12.
12. K.J. Groenigen, C.W. Osenberg, B.A. Hungate. *Nature*, 2011, **475**, 214–216.
13. A.P. Ballantyne, C.B. Alden, J.B. Miller, P.P. Tans, J.W.C. White. *Nature*, 2012, **488**, 70–73.
14. J.M. Gregory, C.D. Jones, P. Cadule, P. Friedlingstein. *J. Climate*, 2009, **22**, 5232–5250.
15. I.Y. Fung, S.C. Doney, K. Lindsay, J. John. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2005, **102**, 201–206.
16. А.В. Дзюба, А.В. Елисеев, И.И. Мохов. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2012, **48**, 3, 372–382.

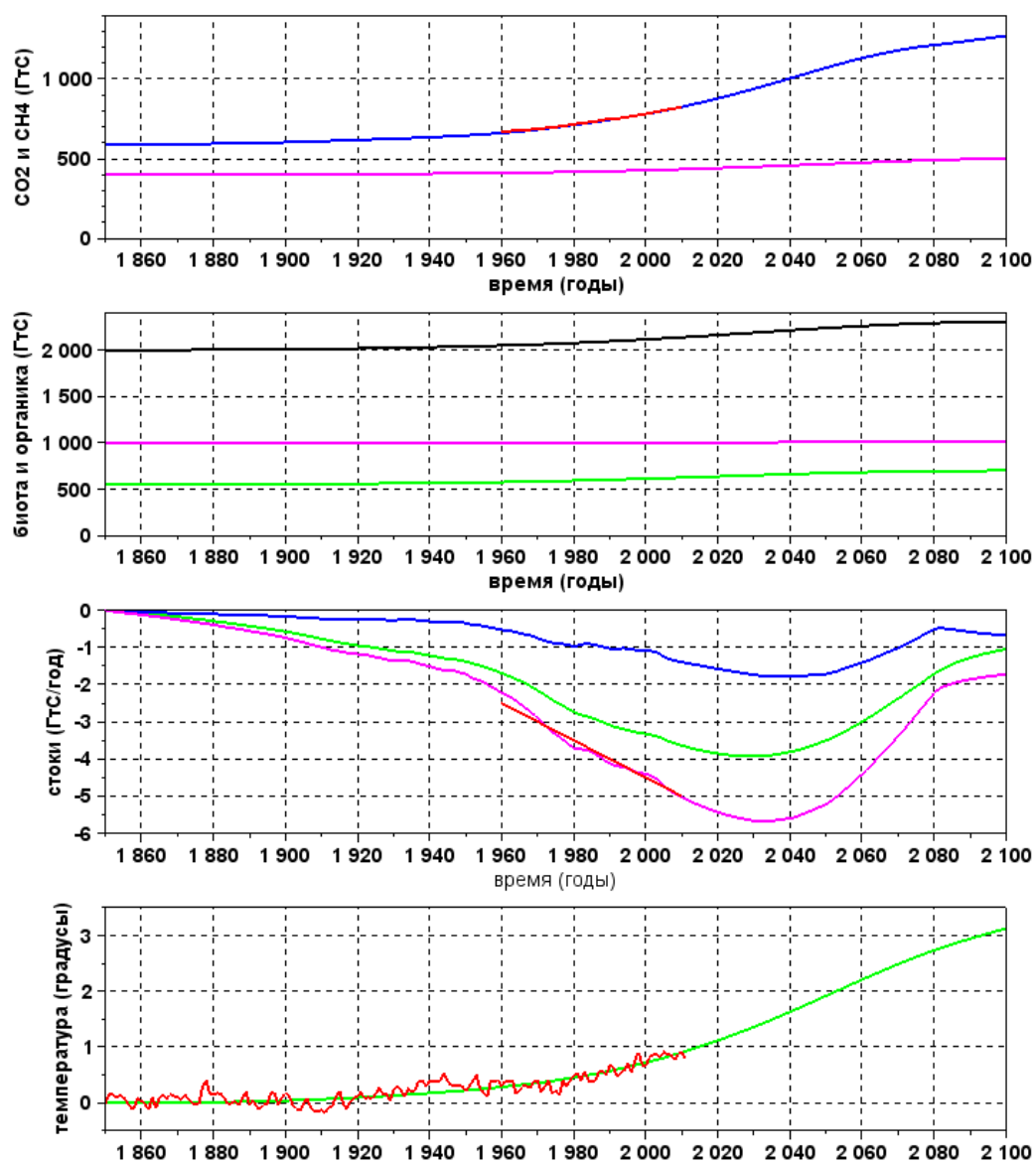


Рис.1. Результат подстройки модели к имеющимся экспериментальным данным. На рисунке красными линиями обозначены экспериментальные данные к которым происходила аппроксимация модели. На верхнем графике фиолетовая линия описывает концентрацию метана, увеличенную в 100 раз. На втором сверху рисунке зеленая кривая описывает динамику биомассы, черная – изменение органики в почве за исключением почв вечной мерзлоты, фиолетовая – динамика органики почве тундры. На графике стоков синяя линия описывает сток в океан, зеленая – в наземные экосистемы, фиолетовая суммарный сток.

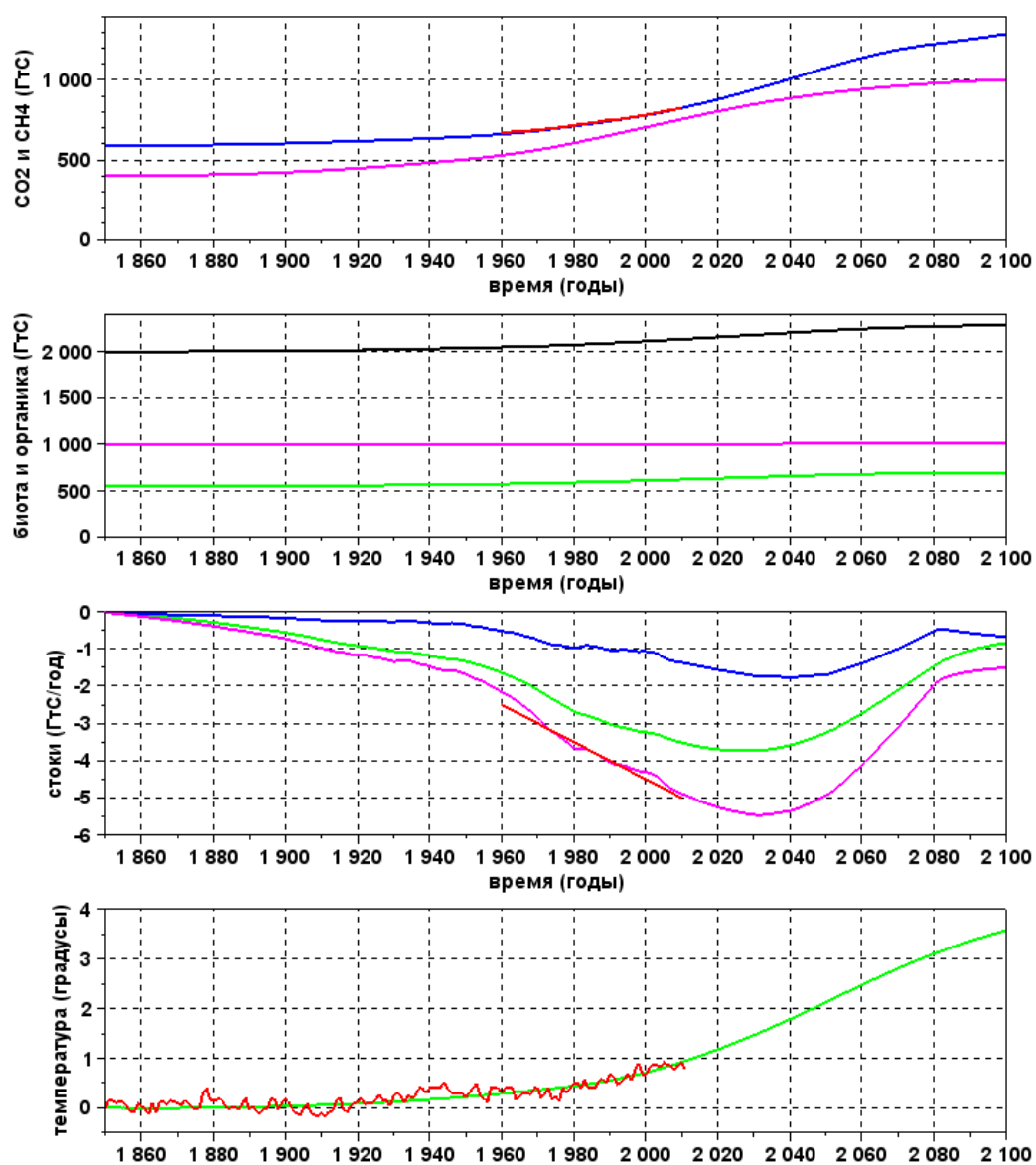


Рис.2. Результаты моделирования эффекта стимуляции эмиссии метана повышенными концентрациями углекислого газа. Интервал изменения доли эмиссии метана в общей эмиссии углерода в атмосферу составляет от 1% до 2%. Обозначения как на Рис.1.

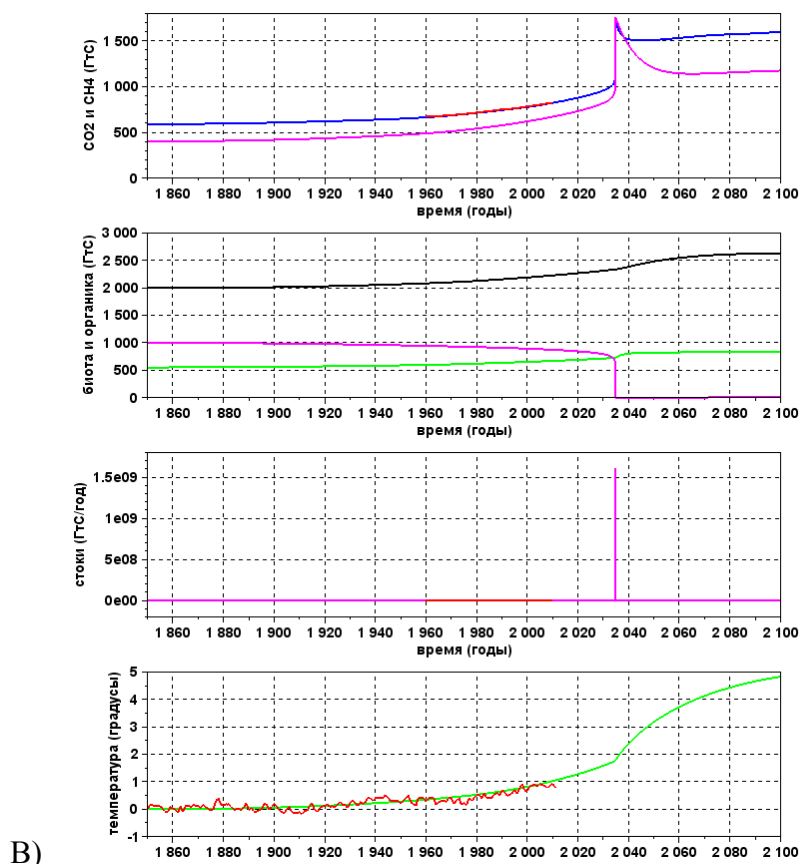
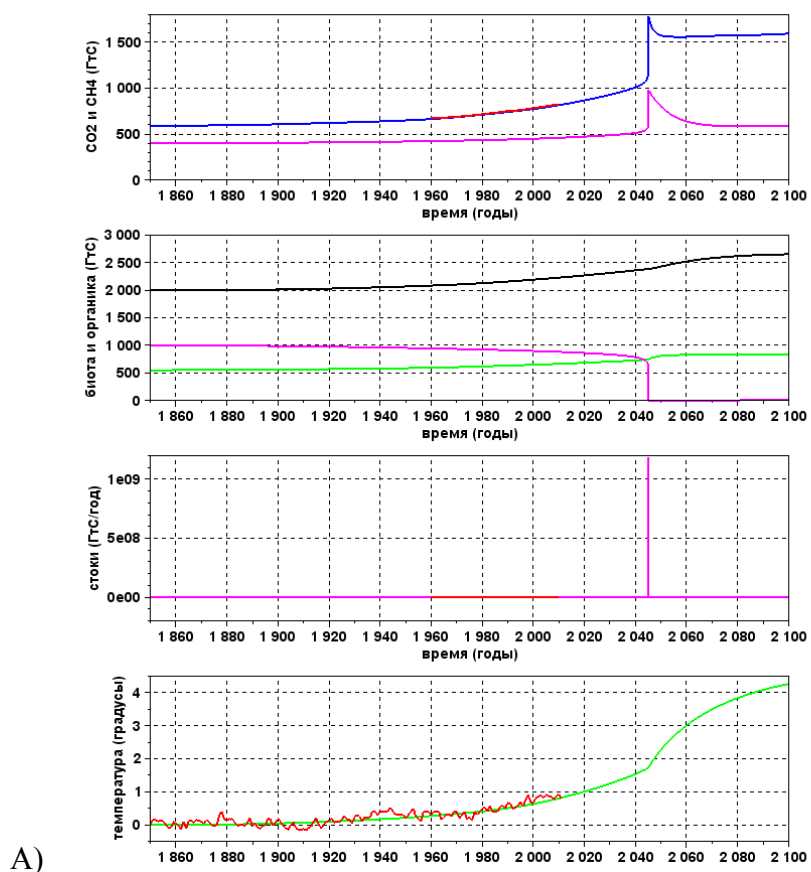


Рис.3. Результаты моделирования эффекта саморазогрева тундровой почвы (А) и совместного действия обоих рассмотренных механизмов (Б).