

=====МАТЕРИАЛЫ ВТОРОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ=====
===== «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭКОЛОГИИ» =====

УДК: 519.6

К оценке влияния качества жизни населения на биосферную динамику

©2012 Барцев С.И.^{*}, Иванова Ю.Д.^{**}, Щемель А.Л.^{***}

Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, 660036, Россия

Аннотация. На сегодняшний день ключевым вопросом для развития цивилизации и роста качества жизни является оценка способности биосферы нейтрализовать антропогенную эмиссию CO₂, обусловленную производством энергии с помощью тепловых машин. С практической точки зрения, важно знать не наиболее вероятный сценарий развития биосферы, на построение которого направлено большинство моделей биосферы, а возможный (в рамках доверительных интервалов) худший вариант ее развития. В работе с помощью малоразмерной модели биосферы построены наихудшие сценарии биосферной динамики при различных темпах сжигания ископаемых топлив. Модель описывает глобальный цикл углерода, который предполагается замкнутым до начала антропогенной эмиссии, и учитывает положительные обратные связи, существующие в системе «биосфера–климат». Дополнительное количество углерода, попадающего в атмосферу при горении ископаемых топлив, вызывает увеличение поверхностной температуры вследствие парникового эффекта. Были рассмотрены различные варианты динамики биосферы, соответствующие разным темпам сжигания ископаемых топлив. Показано, что обеспечение минимального соответствующего качества жизни, базирующегося на существующих технологиях энергоснабжения, связано со значительным риском развития необратимых катастрофических процессов, которые могут сделать сомнительным дальнейшее существование высокоорганизованной жизни на Земле.

Ключевые слова: малоразмерная модель, качество жизни, глобальный цикл углерода.

ВВЕДЕНИЕ

Негативные тенденции развития системы «климат–биосфера» и в первую очередь, глобальное потепление, вызванное, по мнению межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) антропогенными выбросами парниковых газов [1], могут, при сохранении этих тенденций, привести к серьезным экологическим, социальным, экономическим и как следствие к политическим проблемам. Предпринимаемые попытки предотвратить эти негативные явления с помощью международных соглашений об ограничении производств, которые являются источником парниковых газов, являются в существенной степени декларативными и их эффективность вызывает сомнение. Низкая эффективность предпринимаемых мер обусловлена рядом причин, одна из которых состоит в том, что простое понижение

* bartsev@yandex.ru

** lulja@yandex.ru

*** andong.china@gmail.com

энергопотребления, приведет падению качества жизни населения [2, 3], на что население вряд ли готово согласиться. Как же связаны качество жизни и энергопотребление?

Несмотря на то, что качество жизни – многогранное понятие, имеются подходы, которые позволяют оценить показатели этого понятия достаточно объективно и провести сравнение качества жизни жителей различных стран [4]. Показано, что качество жизни существенным образом зависит от потребления энергии. Так, например, для обеспечения приемлемого уровня жизни требуется ~4000 кВт*ч электроэнергии на душу населения [3]. Это количество энергии получается при сжигании 1000 литров нефти при 30% к.п.д. Согласно данным Института Мировых ресурсов (<http://www.wri.org/>) приблизительно 86% расходуемой энергии получено при сжигании ископаемого топлива.

Следовательно, обеспечением достойного качества жизни при современной структуре производства и потребления электроэнергии сопровождается эмиссией ~900 кг углерода в год на душу населения. Для сравнения, в настоящее время среднемировой ежегодный выброс углерода составляет ~1.8 тонны на душу населения. Тот же показатель в развитых странах составляет ~6 тонн на человека. Дальнейший рост народонаселения и обеспечение достойного качества жизни всем людям планеты приведут к дальнейшему увеличению эмиссии CO₂.

Отсюда становится понятной важность определения допустимого уровня антропогенных выбросов углерода и получение прогнозов ожидаемых изменений в системе «биосфера–климат» при различных стратегиях сжигания ископаемых топлив. Единственным инструментом построения прогнозов являются математические модели климата и биосферы. Однако традиционные биосферные модели, направленные на прогнозирование наиболее вероятного сценария очень сложны для верификации и анализа ведущих механизмов возможных изменений. Кроме того, даже надежное знание наиболее вероятного сценария не может быть использовано для принятия практических решений, потому что доверительные интервалы сценария будут очень широки [5] вследствие неустранимой неопределенности модельных параметров. Так например, оценки глобального количества углерода в почве варьируют с 1000 до 2000 ГтС [6], а оценки чувствительности климата, численно равной изменению глобальной температуры при удвоении атмосферной концентрации CO₂ различаются более, чем в пять раз [7].

В соответствии с принципом 15 (принцип предосторожности) Декларации ООН по окружающей среде и развитию (1992 г.) [8] в первую очередь необходимо исследовать наихудший, но возможный вариант сценария глобальных изменений, в котором вклад компенсаторных и смягчающих механизмов является наименьшим, а значения параметров модели лежат на неблагоприятных для нас границах доверительных интервалов. Следуя здравому смыслу и вышеупомянутому принципу предосторожности, был сформулирован «принцип наихудшего сценария» [9, 10], который заключается в выборе и изучении **только** тех процессов, которые могут максимально быстро привести к негативным изменениям биосферы, взвешенно игнорируя возможные компенсаторные механизмы.

Массовые расчеты возможных климатических изменений вследствие выбросов парниковых газов, проведенные группой из Оксфорда [5], показали, что из всего ансамбля возможных сценариев около 1% приходится на долю сценариев с экстра-катастрофическим повышением температуры на 11°C. Эти вычисления были сделаны на основе варианта климатической модели, используемой для прогноза погоды и при реалистичных значениях параметров, что заставляет серьезно относиться к полученным результатам. Более того, вследствие огромной сложности биосферных и климатических моделей и принципиально неустранимой погрешности определения некоторых модельных параметров **никто** не может дать гарантию, что такое катастрофическое

повышение температуры имеет пренебрежимо малую вероятность.

Следовательно, учитывая вышесказанное, допустимый уровень эмиссии CO₂ (а значит и вклад тепловых машин, работающих на ископаемом топливе в производство энергии) должен выбираться настолько низким, чтобы предотвратить возможные катастрофические события в будущем.

Обычные модели системы «биосфера–климат» [5, 6], представляют события будущего как гладкие и обратимые. Эти представления могут быть классифицированы как оптимистичные, так как согласно им, теоретически возможно уменьшить отрицательные изменения в биосфере, уменьшая антропогенные воздействия, вплоть до возвращения биосферы в начальное состояние. Истинность этой точки зрения не подтверждена надежными основаниями. Напротив, нелинейность экологических систем позволяет говорить о существовании порогов стабильности локальных экосистем и биосферы в целом. Один из таких возможных механизмов необратимости изменений в системе «биосфера–климат» обсуждался ранее [9].

Тогда вариант достижения и перехода через порог необратимости, когда до определенного момента происходящие изменения обратимы, но после этого момента в системе «биосфера–климат» начинаются необратимые и лавинообразные изменения, и следует признать наихудшим возможным сценарием.

Предыдущие публикации [9–10] были посвящены обоснованию принципа наихудшего сценария, обсуждению малоразмерных моделей биосферы, являющихся конструктивным следствием этого принципа и оценке границ необратимости при различных значениях параметров и модели.

Цель этой работы состоит в том, чтобы получить оценки необходимого сокращения антропогенной эмиссии CO₂ и, следовательно, сокращения уровня использования ископаемых топлив в глобальной энергетике, способного предотвратить развитие событий по наихудшему сценарию.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для целей данной работы обобщенная (включающая сушу и океан) минимальная модель биосферы подверглась упрощению, по сравнению с вариантом, опубликованным ранее [10]. Из рассмотрения был исключен блок океанической биоты, вкладом которой в развитие катастрофического биосферного режима, как показали модельные эксперименты, можно пренебречь. Однако водная толща океана содержит огромное количество растворенного углекислого газа и постоянно обменивается этим газом с атмосферой. Поэтому даже в минимальной модели этим процессом пренебрегать нельзя.

Система уравнений модели имеет следующий вид:

$$\frac{dA}{dt} = S(y, T(A)) + C_{a_up} BM_{out}(A) - P(x, A, T(A)) - C_{a_down} AM_{in}(A) + fuel(t) \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = P(x, A, T(A)) - D(x) \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dt} = D(x) - S(y, T(A)) \quad (3)$$

$$\frac{dB}{dt} = [C_{a_down} AM_{in}(A) + C_{d_up} U] - [C_{f_down} B + C_{a_up} BM_{out}(A)] \quad (4)$$

$$\frac{dU}{dt} = C_{f_down} B - C_{d_up} U \quad (5)$$

Первое уравнение описывает изменения количества углерода в земной атмосфере, второе – изменения количества углерода в биомассе живых растений, третье – динамику органических остатков, четвертое – динамику углерода в фотическом слое океана, над термоклинном, пятое – динамику углерода в глубинных слоях океана. Отметим, что углерод попадает в атмосферу из трех основных источников: сжигание ископаемых топлив, минерализация почвенной органики, дегазация поверхностных океанских вод из-за роста температуры.

Основаниям, на которых построена эта модель, включая выбор вида функций и значений параметров, посвящены более ранние публикации [9, 10]. Здесь только будут описан вид функций, использованных в уравнениях.

Функция скорости роста растительной биомассы (ГтС/год) имеет вид:

$$P(x, A, T) = V_p \cdot x \cdot (x_{max} - x) \cdot V(A) \cdot f_p(T(A)) \quad (6)$$

где x – количество углерода в биомассе растительного компартмента (ГтС); A – атмосферный углерод (ГтС); T – среднегодовая глобальная приповерхностная температура; V_p – масштабный фактор ($1/(\text{ГтС/год})$); x_{max} – предельное количество биомассы, зависящее от предельной допустимой плотности растительного покрытия (ГтС) и задается в модели как $x_0 G$, где x_0 – количество наземной биомассы растений в настоящее время, G – коэффициент, характеризующий возможность растений увеличить количество биомассы.

Функция $V(A)$ описывает рост биомассы по отношению к атмосферной концентрации CO_2 в виде хорошо известной функции Моно.

$$V(A) = \frac{A}{K_A + A} \quad (7)$$

Уравнение Моно обычно включает концентрации, но поскольку объем реакционного пространства (атмосфера) остается неизменной, модель использует общее количество атмосферного углерода как единицы, чтобы упростить подстройку данных. Эмпирическая зависимость скорости роста растительной биомассы от температуры T и максимальной температуры T_{max} имеет следующий вид:

$$f(T, T_{max}) = T^d (T_{max} - T), \text{ где } d = 1.5, \text{ и } 0 \leq T \leq T_{max}. \quad (8)$$

Эмпирическая зависимость роста среднегодовой глобально приповерхностной температуры от концентрации CO_2 представляет собой просто формализованное определение понятия чувствительность климата, сделанное в предположении, что коэффициент чувствительности климата является неизменной, по крайней мере на интервале моделирования, величиной:

$$T(A) = T_o + T_{del} \cdot \log_2 \left(\frac{A}{A_o} \right), \quad (9)$$

где A – текущее количество углерода в атмосфере; A_o – количество углерода в атмосфере в момент измерения среднегодовой приповерхностной температуры T_o , которая равна 15.5°C в настоящее время; T_{del} – коэффициент чувствительности климата.

Скорость отмирания биомассы (ГтС/год) записывается в простом виде:

$$D(x) = V_d \cdot x, \quad (10)$$

где V_d – масштабный фактор; x – количество углерода (Гт) в биомассе.

Скорость почвенного дыхания (разложение мертвой органики) и выделения CO_2 в атмосферу описывается следующей функцией:

$$S(y, T) = V_s \cdot y \cdot f_M(T), \quad (11)$$

где V_s – масштабный фактор; y – количество углерода в мертвой биомассе (Гт); $f_M(T)$ –

функция типа (8) выражающая температурную зависимость почвенного дыхания, но, при больших значениях максимальной температуры.

В соответствии с задачей данной работы в качестве функции $fuel(t)$ рассматривались: линейная зависимость интенсивности выбросов CO_2 от времени с угловым коэффициентом 6 Гт CO_2 за 10 лет, соответствующая сценарию A2 выброса парниковых газов по МГЭИК [1], линейные зависимости прироста эмиссии CO_2 с угловыми коэффициентами, составляющими 25% и 10% от сценария A2.

В уравнениях (1, 4) слагаемое $C_{a_down}AM_{in}(A)$ описывает поглощение углекислого газа поверхностным слоем океана, а слагаемое $C_{a_up}BM_{out}(A)$ – эмиссию углекислого газа с поверхности океана в атмосферу. Переменные коэффициенты $M_{in}(A) = e^{-0.03[T(A)-T_0]}$ и $M_{out}(A) = e^{0.03[T(A)-T_0]}$ описывают физическое явление – падение растворимости газа в жидкости при повышении температуры. Эти коэффициенты получены путем простой эмпирической аппроксимации данных, приведенных в [6].

В уравнении (5) слагаемое $C_{d_up}U$ описывает перенос углерода с глубинных слоев океана в приповерхностные слои, а $C_{f_down}B$ – обратный процесс.

Заключая этот раздел, перечислим обратные связи, которые представлены в данной модели. В первую очередь это положительная обратная связь: «повышение концентрации CO_2 – рост температуры – интенсификация почвенного дыхания – повышение концентрации CO_2 ». Далее, положительная обратная связь: «повышение концентрации CO_2 – рост температуры – интенсификация дегазации поверхностных слоев океана – повышение концентрации CO_2 ». А также две отрицательные обратные связи, дающие в итоге положительную обратную связь: «рост температуры – падение фотосинтеза, вследствие смещения с температурного оптимума» и «падение скорости поглощения CO_2 – повышение концентрации CO_2 ».

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В соответствии с принципом наихудшего сценария из возможных оценок параметров модели следует выбирать значения, приводящие к наиболее неблагоприятным вариантам биосферной динамики. Ключевым параметром в модели является чувствительность климата к повышению атмосферной концентрации CO_2 выражаемый в приращении среднепланетарной температуры при удвоении концентрации углекислого газа. В модели используется наибольшая из существующих в литературе оценок чувствительности климата равная $11^\circ C$ [5].

В данной работе, для того чтобы нагляднее показать динамику количеств углерода в различных компонентах биосферы, период моделирования был увеличен на 100 лет по сравнению со сценарием A2 МГЭИК [1], с сохранением той же самой тенденции увеличения темпов сжигания углеродных топлив. Постоянное увеличение темпа сжигания топлив при сохранении существующей структуры системы производства энергии является неизбежным, так как для повышения качества жизни для все большего числа людей [4], требуется все большее использование энергетических ресурсов.

На рис. 1 показана модельная динамика количества углерода в биомассе при различных темпах сжигания углерод содержащих топлив. Динамика количества углерода в органическом веществе почвы подобна приведенной на рис. 1 и поэтому здесь не приводится.

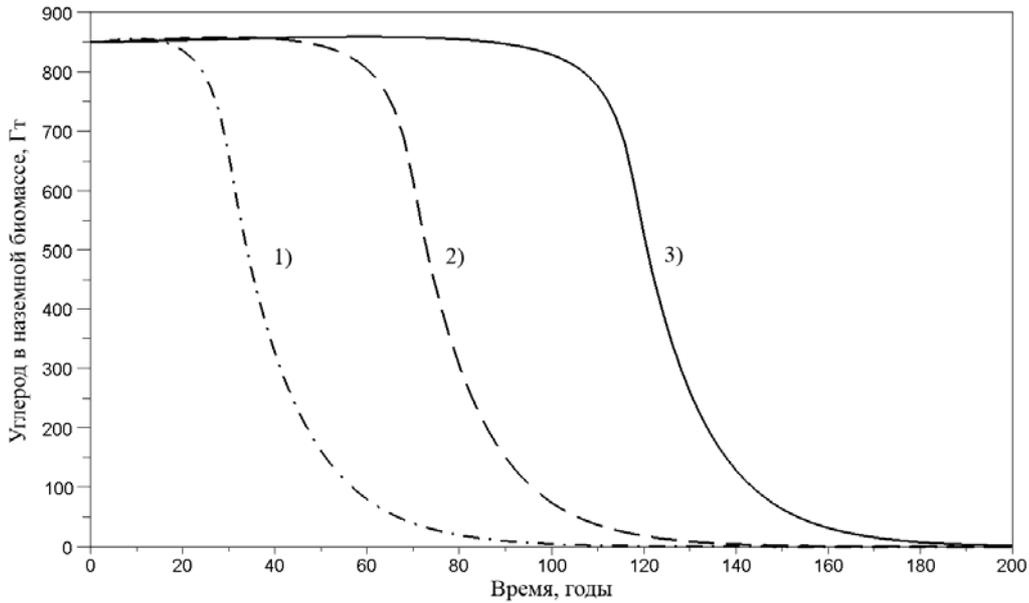


Рис. 1. Ансамбль траекторий количества углерода в биомассе в биосферной модели при различных темпах сжигания углеродсодержащих топлив. Кривая (1) соответствует сценарию A2 по МГЭИК, кривая (2) описывает 25% от темпов сжигания по сценарию A2, кривая (3) соответствует 10% от темпов сжигания по сценарию A2.

Динамика приповерхностной среднегодовой температуры биосферной модели показана на рис. 2. Согласно результатам моделирования шоковый рост приповерхностной температуры приводит к исчезновению сложной органической жизни на Земле. Еще более драматический прогноз роста среднепланетарной температуры на 100–150°C был ранее получен в работе А.В.Карнаухова [11] на радиационно–адиабатической модели парникового эффекта. Однако в этой модели сценарии роста концентрации парниковых газов в атмосфере задавались функциями заданного вида. Автор отмечает, что в его модели не учитывается наличие положительных обратных связей «температура – концентрация CO₂ в атмосфере», которые могут привести к существенному сужению временных рамок существования на Земле условий, приемлемых для существования цивилизации. Предлагаемая в данной статье модель позволяет оценить вклад наиболее быстрых положительных обратных связей в ускорение темпов роста среднепланетарной температуры.

Характерный S–образный вид приведенных кривых указывает на наличие биосферных положительных обратных связей, определяющих резкое, лавинообразное нарастание изменений в биосфере. Когда включается этот катастрофический процесс, он уже практически не зависит от темпа сжигания топлив. Темпы сжигания углеродсодержащих топлив влияют только на дату начала катастрофического необратимого процесса. Модель позволяет наблюдать сценарии, которые невозможно реализовать на практике, но которые дают возможность очень наглядно наблюдать действие положительных обратных связей самих по себе. Имеется в виду полное прекращение сжигания ископаемых топлив в заданный момент времени. Такой прием позволяет оценить так называемую дату необратимости для выбранных значений параметров модели.

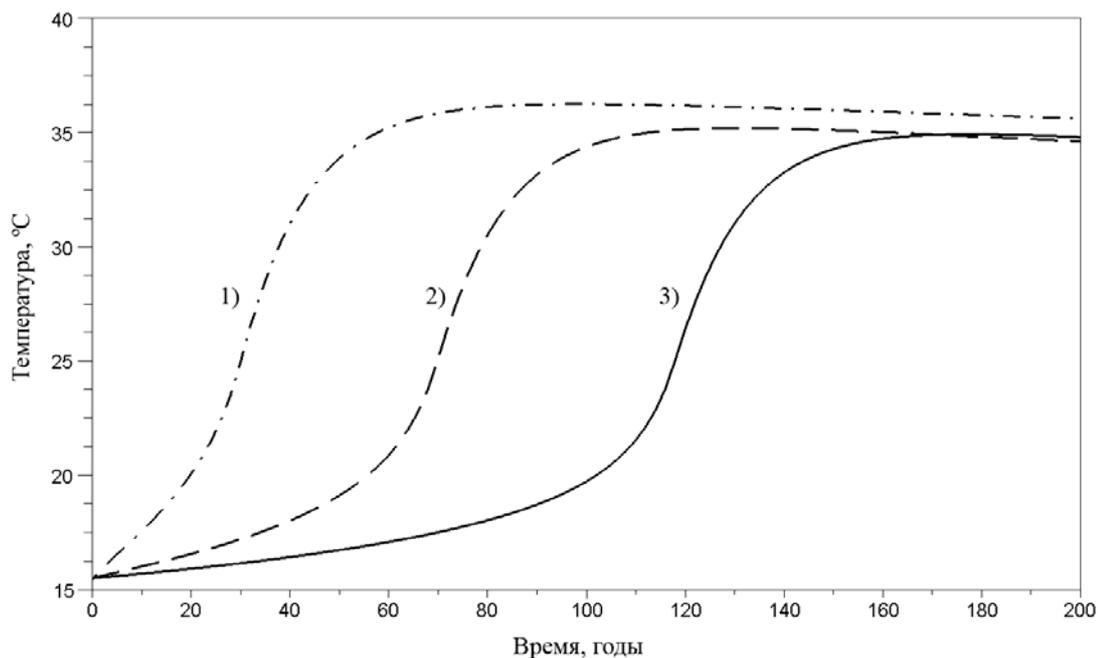


Рис. 2. Ансамбль траекторий приповерхностной среднегодовой температуры в биосферной модели при различных темпах сжигания углерод содержащих топлив. Кривая (1) соответствует сценарию А2 по МГЭИК, кривая (2) описывает 25% от темпов сжигания по сценарию А2, кривая (3) соответствует 10% от темпов сжигания по сценарию А2.

Определим с помощью модели, какие меры по прекращению сжигания ископаемых топлив будут достаточны, для предотвращения катастрофических режимов. На рис. 3–4 показаны ансамбли траекторий количества углерода в атмосфере в биосферной модели с различными датами полного прекращения горения ископаемого топлива для выбранных темпов роста сжигания ископаемого топлива

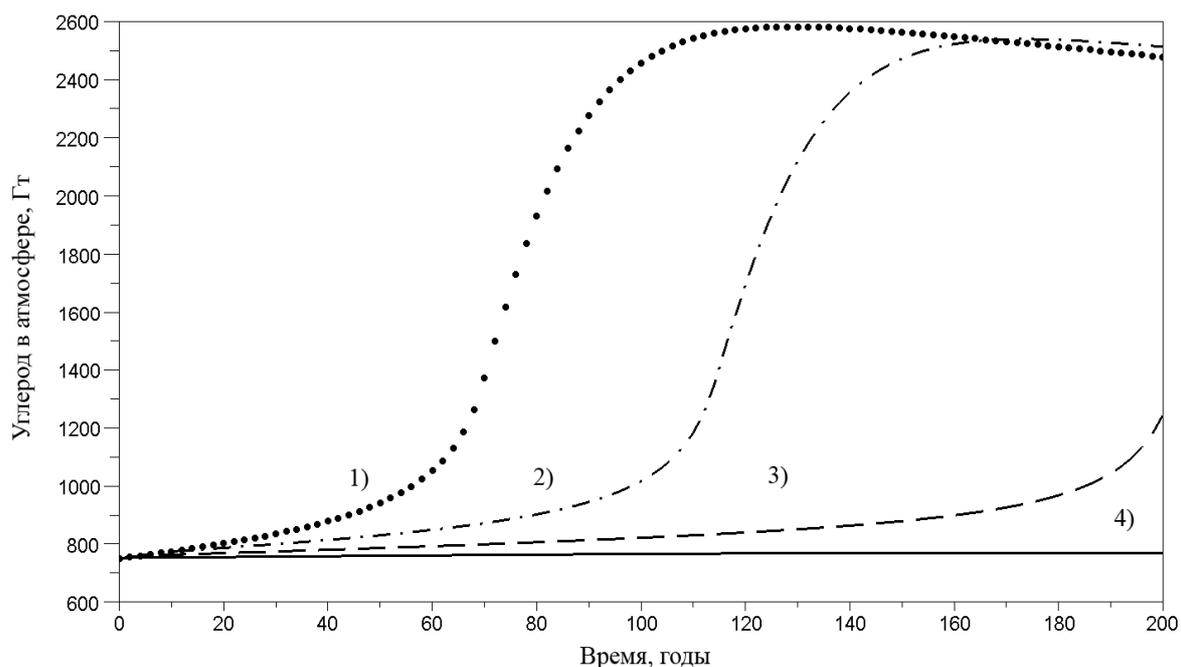


Рис. 3. Ансамбль траекторий количества углерода в атмосфере в биосферной модели при различных значениях для 25% темпа сжигания углерод содержащих топлив по сценарию А2 при

различных датах полной остановки сжигания топлива: (1) прекращение сжигания топлив в 2080г.; (2) прекращение в 2020г.; (3) прекращение в 2014г.; (4) — сплошная линия, прекращение в 2011г.

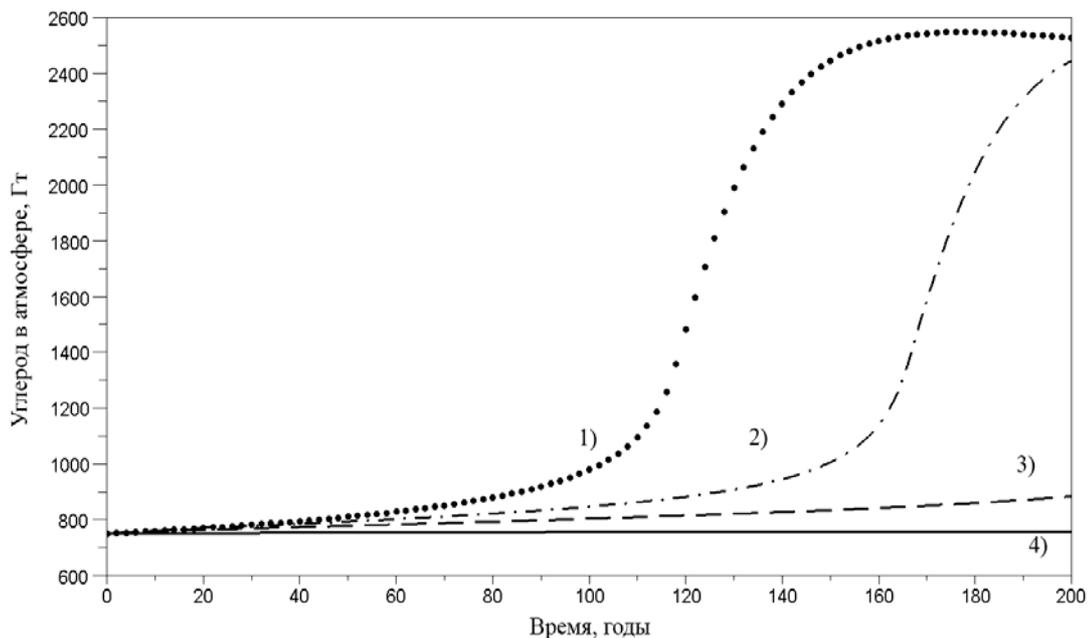


Рис. 4. Ансамбль траекторий количества углерода в атмосфере в биосферной модели при различных значениях для 10% темпа сжигания углерод содержащих топлив по сценарию А2 при различных датах полной остановки сжигания топлива: (1) прекращение сжигания топлив в 2080г.; (2) прекращение в 2020 г.; (3) прекращение в 2014 г.; (4) — сплошная линия, прекращение в 2011 г.

Полученные кривые показывают, что только полное прекращение сжигания ископаемых топлив может с достаточной надежностью предотвратить катастрофу. Однако в современном мире этот сценарий является самым фантастическим.

ОБСУЖДЕНИЕ

Данные моделирования показывают, что если чувствительность современного климата близка к 11°C , то мы уже находимся в фазе необратимых изменений в биосфере. В дальнейшем сжигание топлив только приближает фазу ускоренной эмиссии углерода в атмосферу. В этой ситуации серьезное сокращение выброса углерода предоставляет время, необходимое для осуществления мер, позволяющих сопротивляться катастрофическому процессу. Однако возникает вопрос о количестве необходимого сокращения антропогенной эмиссии углерода.

Вычисления показывают, что резкое четырехкратное сокращение сжигания углеродсодержащих топлив, по сравнению со сценарием А2, отодвигает дату значительного увеличения выброса углерода в атмосферу приблизительно на 40 лет. Есть шанс, что за это время некоторые меры (например, создание щита аэрозоля в атмосфере) могли бы предотвратить катастрофический сценарий.

В то же время, десятикратное сокращение выброса углерода по сравнению со сценарием А2 отодвигает время катастрофических перемен приблизительно на 80 лет, таким образом, появляется еще больше возможностей для принятия мер по предотвращению глобальных катаклизмов. Однако можно видеть (рис. 4), что продолжение сжигания топлив приводит к катастрофическим изменениям даже при этих низких уровнях эмиссии углерода. Соответствующий этому сценарию уровень сжигания топлива равен 180 кг углерода на человека ежегодно, что приблизительно в 5 раз меньше, чем эмиссия, вызванная энергоснабжением (~ 4000 кВтч ежегодно), обеспечивающим приемлемый уровень жизни.

Как относиться к полученному результату? Намеренное игнорирование **ВОЗМОЖНЫХ**

ослабляющих глобальное потепление механизмов сразу же относит ситуацию, описываемую данной моделью, к категории весьма маловероятных. Но полностью отрицать возможность такого развития событий нельзя – о чем свидетельствуют результаты ряда исследований [5, 7, 11]. Ненулевая вероятность реализации сценария подобного, описанному в данной работе, при потенциально крайне тяжелых последствиях означает, что согласно весьма разумному принципу № 15 Декларации ООН [8], уже сейчас нужно уменьшать долю энергетических источников, использующих ископаемое топливо. Относительно малый, по сравнению с потоками через наземную биоту и океан, приток углерода опасен тем, что важны не абсолютные величины потоков, а их рассогласование, нарушение замкнутости. Примерно 50% углерода, выделенного при сжигании ископаемых топлив, поступает в глобальный цикл углерода, что приводит к постепенному увеличению его количества в атмосфере. Поскольку надежных доказательств отсутствия парникового эффекта нет, то мы приходим к возможности сценариев, подобных рассмотренному в данной статье.

ВЫВОДЫ

Положительные обратные связи в системе «биосфера климат» могут превратить относительно медленное глобальное потепление, вызванное антропогенной эмиссией углерода при сжигании углеродных топлив, в резкое и необратимое насыщение атмосферы углеродом за счет выхода углерода из почвы и разлагающейся биомассы. В свете вышесказанного стремление к высокому качеству жизни при сложившейся структуре энергетики, работающей, в основном, за счет сжигания природных топлив с ненулевой вероятностью может привести к неблагоприятному сценарию развития и человечества и биосферы, включая гибель высокоорганизованной жизни на Земле.

Достаточно высокая (в контексте тяжести катастрофических последствий) вероятность неблагоприятного сценария климатического потепления делает сомнительными надежды на обеспечение достойного качества жизни посредством повышения энергопотребления за счет сжигания ископаемых топлив. Для понижения вероятности запуска неблагоприятных биосферно–климатических сценариев вклад тепловых машин в производство энергии должен быть существенно (в 10 раз) уменьшен по сравнению с современным уровнем.

Работа поддержана грантом РФФИ 11–04–01116–а и интеграционным проектом СО РАН №50.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. 996 P. URL: www.ipcc.ch (дата обращения: 18.11.2011).
2. Alam M.S., Bala V.K., Huo A.M.Z. and Matin M.A. A model for the quality of life as a function of electrical energy consumption. *Energy*. 1991. V. 16. P. 739–745.
3. Dekker P.–M., Meisen P., Bruton A.B. The GENI MODEL: The Interconnection of Global Power Resources to Obtain an Optimal Global Sustainable Energy Solution. URL: <http://www.geni.org/globalenergy/library/geni/simulation/the-GENI-model.shtml> (дата обращения: 18.11.2011).
4. United Nations. *World population to 2300*. Department of Economic and Social Affairs United Nations New York, 2004. P. 240.
5. Stainforth D.A., Aina T., Christensen C., Collins M., Faull N., Frame D.J., Kettleborough J.A., Knight S., Martin A., Murphy J.M., Piani C., Sexton D.L., Smith A.R., Spicer A.A., Thorpe J., Allen M.R. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature*. 2005. V. 433. P. 403–406.

6. Кондратьев К.Ю., Кравпивин В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. Москва: ФизМатЛит, 2004. 336 с.
7. Roe and Baker. Why is climate sensitivity so unpredictable? *Science*, 2007. V. 318. P. 629–632.
8. Декларация по окружающей среде и развитию, Рио-де-Жанейро, 3–14 июня 1992. URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/riodecl.shtml (дата обращения: 18.11.2011).
9. Bartsev S.I., Degermendzhi A.G., Erokhin D.V. Principle of the worst scenario in the modelling past and future of biosphere dynamics. *Ecological modeling*. 2008. V.10. P. 160–171.
10. Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В., Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере. *Доклады РАН*. 2005. Т. 401. №2. С.233–237.
11. Карнаухов А.В. Роль биосферы в формировании климата Земли. Парниковая катастрофа. *Биофизика*. 2001. Т. 46. Вып. 6. С. 1038–1049.

Материал поступил в редакцию 01.12.2011, опубликован 10.01.2012.