

ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МИНИМАЛЬНОЙ БИОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ НА ПРОГНОЗ БИОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ

© 2009 С.И. Барцев, А.Г. Дегерменджи, Ю.Д. Иванова, А.Л. Щемель

Институт биофизики СО РАН, Красноярск; e-mail: bartsev@yandex.ru, ibp@ibp.ru, lulja@yandex.ru, andong.china@gmail.com

Принципиально неустранимая погрешность в оценке параметров любой биосферной математической модели приводит к вероятностному характеру сценариев, получаемых с ее помощью. Для принятия направленных на биосферу практических решений необходимо знать доверительные интервалы прогноза с беспрецедентным уровнем значимости. Принцип наихудшего сценария направлен сразу на поиск сочетаний параметров модели приводящих к наихудшим, но возможным сценариям развития биосферы. В данной работе рассматривается влияние варьирования (а по сути, погрешности оценок) параметров минимальной биосферной модели на ее динамику. Показано, что способность лесов накапливать углерод в биомассе, приводящая к снижению величины глобально-го потепления сегодня, повышает риск запуска необратимых катастрофических изменений в будущем.

Ключевые слова: *минимальные биосферные модели, устойчивость биосферы*

ВВЕДЕНИЕ

Экстраполяция наблюдаемых трендов глобальных параметров в будущее указывает на возможность существенных изменений параметров биосферы и климата Земли [8]. Становится все более очевидным, что оценка темпов, масштабов и степени обратимости этих изменений перестала быть чисто академической задачей, а перешла в разряд одной из наиболее важных практических задач.

Важно отметить, что любые вычисленные сценарии биосферной динамики могут быть только вероятностными. Причина заключается в том, что оценки почти всех параметров биосферы и климата имеют приближенный характер. Так, например, оценки количества углерода в атмосфере варьируют от 600 до 760 Гт; в биомассе - от 500 до 850 Гт; в почве - от 1080 до 2000 Гт, первичная продукция фотосинтеза варьирует в диапазоне 110-120 ГтС/год [2, 3, 6, 7]. Наиболее вероятное значение одного из важнейших параметров системы «биосфера-климат» - чувствительности климата, равного повышению глобальной температуры при удвоении атмосферной концентрации CO₂ равно 4,5°C [8], однако по некоторым оценкам этот параметр может достигать 11°C [11].

Обычно модели климата и биосферы направлены на вычисление наиболее вероятного сценария. Это заставляет разработчиков таких моделей учитывать максимально возможное количество факторов и строить большие распределенные модели климата и биосферы. Однако представляется необходимым подчеркнуть, что зна-

ние наиболее вероятного сценария развития биосферы мало что дает для принятия практических решений, поскольку необходимо еще знать доверительные интервалы для всех возможных траекторий, причем с беспрецедентным уровнем статистической надежности (значимости).

Так, например, грубые оценки показывают, что вероятность авиакатастрофы не превышает 10⁻⁴. «Цена» катастрофы примерно 100 человек. При этом люди соглашаются летать. Принимая равноценность жизни любого человека и вводя принцип обратной пропорциональности допустимого риска от числа подверженных риску, можно составить простую пропорцию для вычисления уровня надежности оценок биосферной катастрофы, которая для человечества не должна превышать 10⁻¹¹ за обозримое время его существования.

Из этих грубых оценок ясно, что для практических нужд требуется не вычисление наиболее вероятного сценария, а оценка условий и параметров, при которых, пусть и с малой вероятностью, но осуществляется наихудший сценарий. Такой сценарий возможен, когда реальные значения параметров модели будут находиться на неблагоприятных для нас концах доверительных интервалов, а вклад потенциально присутствующих компенсаторных механизмов равен минимальному из возможного.

Такое видоизменение конечной цели биосферного моделирования было ранее сформулировано в виде «принципа наихудшего сценария» [5]. Принцип наихудшего сценария заключается в выборе и изучении только тех процессов, которые могут максимально быстро привести к не-

гательным изменениям биосферы, и взвешенном игнорировании возможных компенсаторных механизмов.

Большинство математических моделей климата демонстрируют плавную динамику изменений атмосферного CO₂ и приземных температур с увеличением общего количества углерода в атмосфере вследствие сжигания ископаемых топлив [4, 8]. Однако постепенное глобальное изменение - это только возможный вариант будущего, и к тому же достаточно оптимистичный, поскольку в этом случае теоретически возможно ослабить негативные изменения путем уменьшения антропогенного воздействия и даже вернуться к начальному состоянию.

Наихудшим сценарием, является катастрофический пороговый вариант глобальных изменений, когда до определенного порога постепенные изменения являются обратимыми, но при превышении этого порога в системе «биосфера-климат» запускаются лавиноподобные и необратимые изменения глобальных параметров. В данной статье термин «катастрофический» по значению соответствует скорее термину, принятому в теории катастроф, чем обыденному значению, когда любой серьезный природный катаклизм вос-

принимается как катастрофа.

Вследствие вышеизложенного наибольшее практическое значение имеет знание наиболее неблагоприятного, но возможного при данных доверительных интервалах сценария. Однако из-за существенной нелинейности модели наихудшее сочетание параметров модели может оказаться контринтуитивным. Поэтому целью данной работы был прямой расчет и визуализация сценариев развития биосферы при различных сочетаниях параметров и выбор из них наихудшего сценария.

МИНИМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ БИОСФЕРЫ С УЧЕТОМ ВКЛАДА ОКЕАНА

Для целей данной работы обобщенная (включающая сушу и океан) минимальная модель биосферы подверглась упрощению по сравнению с вариантом, опубликованным ранее [5]. Из рассмотрения был исключен блок океанической биоты, вкладом которой в развитие катастрофического биосферного режима, как показали модельные эксперименты, можно пренебречь.

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, пятое – динамику углерода в глубинных слоях океана.

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

где x – количество углерода в биомассе растительного компартмента (ГтС); A – атмосферный углерод (ГтС); T – среднегодовая глобальная приповерхностная температура; V_p – масштабный фактор (1/(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

Ограничения места заставляют нас отсылать читателя, интересующегося предположениями, принятыми при построении модели, к более ранним публикациям [1, 5]. Здесь только будут описан вид функций, использованных в уравнениях.

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

возможность растений увеличить количество биомассы.

Функция $V(A)$ описывает рост биомассы по отношению к атмосферной концентрации CO₂ в виде хорошо известной функции Моно.

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

Уравнение Моно обычно включает концентрации, но поскольку объем реакционного про-

странства (атмосфера) остается неизменной, модель использует общее количество атмосферного углерода как единицы, чтобы упростить подстройку данных. Параметр K_A выбран равным 900 ГтС на основе экспериментальных данных [9, 10].

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 была взята из опубликованных данных:

$$T(A) = T_o + T_{del} \cdot \log_2 \left(\frac{A}{A_0} \right). \quad (9)$$

где A – текущее количество углерода в атмосфере; A_0 – количество углерода в атмосфере в момент измерения среднегодовой приповерхностной температуры T_o , которая равна $15.5^\circ C$ в настоящее время; T_{del} – чувствительность 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 $fuel(t)$ выбрана линейная зависимость, соответствующая сценарию A2 выброса парниковых газов [8] с соответствующими значениями параметров.

В уравнениях (1) и (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 по концентрации CO_2 в воде при различной температуре [2].

В уравнении (5) слагаемое $C_{d_up} U$ описывает апвеллинг, а $C_{f_down} B$ – даунвеллинг.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для удобства визуализации влияния вариации (ошибок оценок) параметров биосферной модели на ее динамику на рисунках показаны семейства траекторий при одновременном изменении уже обсуждаемых выше параметров модели T_{del} и G .

На рис. 1 можно видеть, что траектории динамики биомассы (как и не приведенные в статье траектории других существенных переменных) группируются в своеобразные пучки, соответствующие конкретному значению T_{del} , причем чем больше это значение, тем ближе нисходящий участок пучка к началу координат. Внутри пучка разные ветви соответствуют разным значениям G , причем на нисходящем участке ветвь, соответствующая большему значению, располагается ближе к началу координат. Важно отметить, что на восходящем участке всех траекторий большее значение G соответствует более благоприятному ходу биосферной динамики, а именно растет биомасса, что приводит к меньшей концентрации CO_2 в атмосфере, а значит и меньшему потеплению климата. Но на нисходящих участках траекторий именно большие значения G оказываются более неблагоприятными, поскольку соответствуют большей скорости гибели биоты.

Рисунки 2 и 3 демонстрируют пороговый характер катастрофического процесса. Видно, что при значениях $T_{del} < 6^\circ C$ существенных изменений в динамике биосферы нет, если эмиссия углерода полностью прекращается спустя 60 лет от настоящего времени. В противном случае, можно видеть существенную деградацию биоты, причем, чем больше параметр G , тем тяжелее изменения в биоте. Вариации параметра G могут приводить к качественному изменению динамики температуры в системе «биосфера-климат». На рис. 3 видно, что при больших значениях G ($T_{del} = 6^\circ C$) возникают участки «само-разогрева» системы «биосфера-климат», когда эмиссия парниковых газов полностью прекращается.

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам моделирования, способность растений (преимущественно древесных) поглощать двуокись углерода и, как кажется, ослаблять остроту проблемы избыточного антропогенного производства CO_2 (Киотский протокол)

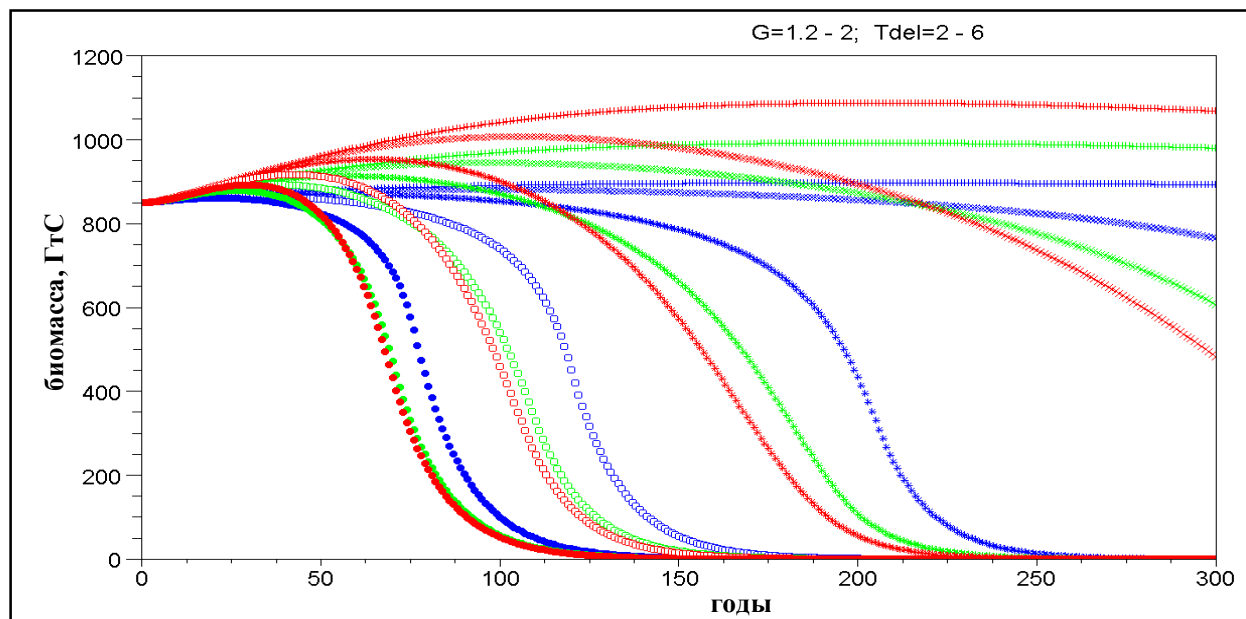


Рис. 1. Ансамбль траекторий количества углерода в биомассе в обобщенной (суша-океан) модели при различных значениях T_{del} и G и линейном росте темпов сжигания углеродсодержащих топлив (сценарий A2 по IPCC)

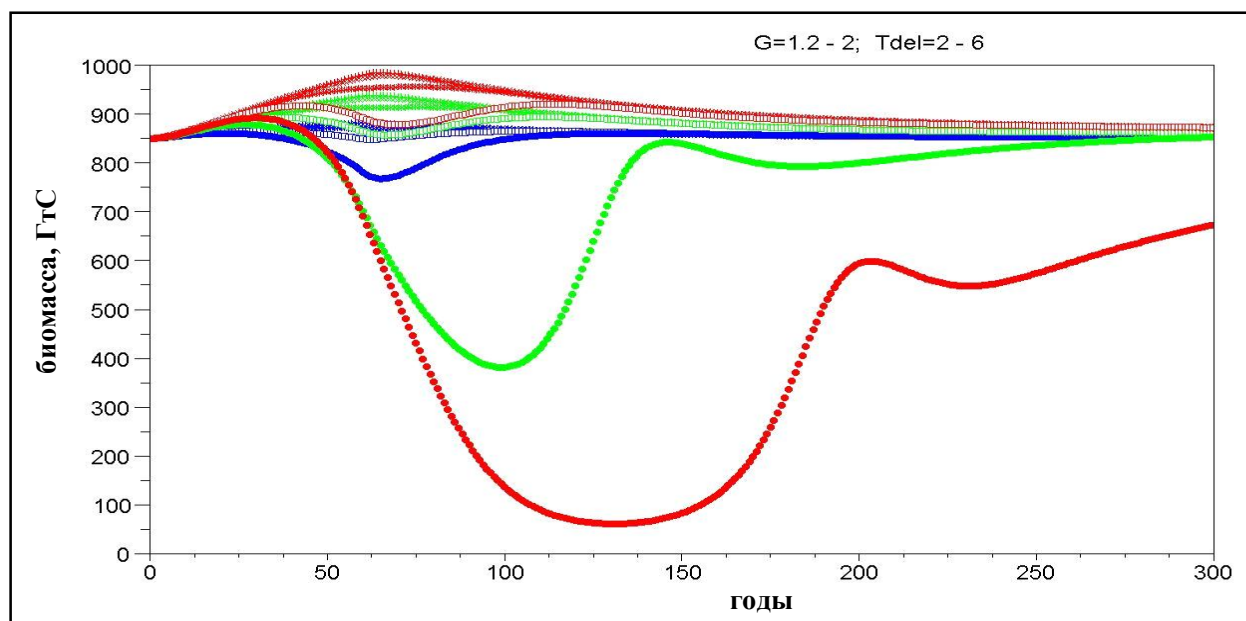


Рис. 2. Ансамбль траекторий количества углерода в биомассе обобщенной (суша-океан) модели в случае полного прекращения сжигания топлив через 60 лет от настоящего времени при различных значениях T_{del} и G

с точки зрения развития катастрофических процессов не является столь однозначной. Так, при относительно малой длительности (дозе) антропогенных выбросов большая поглотительная способность растений действительно приводит к меньшему потеплению и играет компенсирующую роль. Однако если рост CO_2 в атмосфере продолжается, то углерод, накопленный в растениях и перешедший потом в мертвую органику начинает все с большей скоростью, по мере рос-

та температуры, выходить в атмосферу. Причем океан уже не успевает компенсировать такой поток углерода, кроме того с ростом температуры поглотительная способность океана уменьшается.

Кроме того, вследствие наличия нелинейностей компонентов биосферной модели и инерционности океана (вернее системы «фотический слой – глубинные слои») после прекращения антропогенного воздействия возможно падение ко-

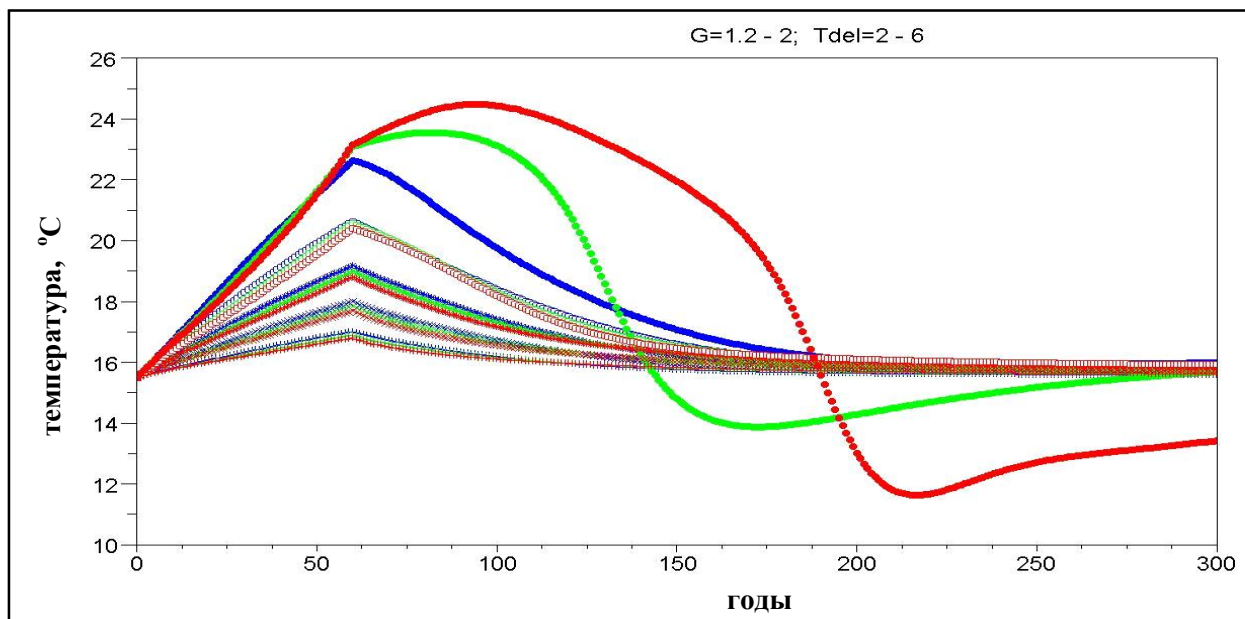


Рис. 3. Ансамбль траекторий глобальной приповерхностной среднегодовой температуры в обобщенной (суша-океан) модели в случае полного прекращения сжигания топлив через 60 лет от настоящего времени при различных значениях T_{del} и G

личества углерода в атмосфере, а значит, и температуры до значений меньших, чем это было перед началом катастрофического процесса. То есть, глобальное потепление, вызванное антропогенными выбросами двуокси углерода, может смениться глобальным похолоданием, если эмиссия углерода прекратится слишком резко.

Следует сказать о результатах, полученных в модели, но не представленных на рисунках. Вариации количества углерода в мертвой органике наиболее существенно проявляют себя при ограниченных длительностях эмиссии углерода в атмосферу. Временной порог запуска катастрофических процессов (дата необратимости) практически не зависит от количества углерода в органике, но тяжесть (максимальная температура, степень разрушения биоты) возрастают с ростом количества углерода. Вариация (ошибка оценки) количества углерода в биомассе приводит к незначительному изменению тяжести изменений, но оказывает влияние на длительность переходных процессов, которая уменьшается с уменьшением углерода в биомассе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В. Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере // 2005. Т.401. № 2. С. 233-237.
2. Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф. Моделирование глобального круговорота углерода. М.: Физматлит, 2004. 336 с.
3. Семёнов С.М. Парниковые газы и современный климат земли. М.: ИЦ «Метеорология и гидрология», 2004. 176 с.
4. Тарко А.А. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов, М.: Физматлит, 2005. 232 с.
5. 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. P. 160-171.
6. Brovkin V., Sitch S., Bloh von W. et al. Role of land cover changes for atmospheric CO₂ increase and climate change during the last 150 years // Glob. Change Biol. 2004. V. 10. P. 1253-1266.
7. IPCC, 2001. Climate Change. 2001: Scientific aspects, UNEP, 881 P. www.ipcc.ch
8. IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p. www.ipcc.ch
9. Morgan J.A., LeCain D.R., Mosier A.R., Milchunas D.G. Elevated CO₂ enhances water relations and productivity and affects gas exchange in C3 and C4 grasses of the Colorado shortgrass steppe // Global Change Biol. 2001. V. 7. P. 451-466.
10. Pritchard S.G., Davis M.A., Mitchell R.J. et al. Root dynamics in an artificially constructed regenerating longleaf pine ecosystem are affected by atmospheric CO₂ enrichment // Environmental and Experimental Botany. 2001. V. 46. P. 35-69.
11. Stainforth, D.A., Aina, T., Christensen, C. et al. 2005. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases // Nature. 2005. № 433, P. 403-406.

INFLUENCE OF EVALUATION UNCERTAINTY OF MINIMAL BIOSHERE MODEL PARAMETERS ON FORECAST OF BIOSPHERE DYNAMICS

© 2009 S.I. Bartsev, A.G. Degermendzhi, Y.D. Ivanova, A.L. Shemel

Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk;
e-mail: bartsev@yandex.ru, ibp@ibp.ru, lulja@yandex.ru, andong.china@gmail.com

The result of principal irremovable inaccuracy of evaluations of parameters of any biosphere mathematical model is probabilistic nature of scenario obtained by it. To make the practical decisions concerning biosphere it is necessary to know credence intervals of unprecedented level of significance. Principle of the worst scenario is immediately directed to the searching for parameter combinations causing the worst but possible scenarios of biosphere dynamics. The influence of variation (essentially, uncertainty of evaluations) of minimal biosphere model parameters on its dynamics is considered. It is shown the ability of forests to accumulate carbon in biomass causing some decreasing of global warming now increases the risk of starting irreversible catastrophic changes in future.

Key words: minimal biosphere models, stability of biosphere