

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ЛАТИНСКАЯ АМЕРИКА И ГЛОБАЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

А.М. Тарко¹, Д.К. Монтеро², В.П. Зволинский³,
А.И. Курбатова²

¹Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН
ул. Вавилова, 40, Москва, Россия, 119333

²Экологический факультет
Российский университет дружбы народов
Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 113093

³Российский государственный технологический университет
им. К.Э. Циолковского (МАТИ)
ул. Оршанская, 3, Москва, Россия, 121552

На основе пространственной математической модели глобального цикла двуокиси углерода в биосфере рассчитано поглощение выбросов двуокиси углерода от сжигания органических топлив с учетом вырубки лесов и эрозии почв в странах Латинской Америки и мира. Расчеты последствий ограничений выбросов CO₂ в атмосферу на основе различных сценариев выполнения Киотского протокола к Рамочной конвенции о стабилизации климата показали, что экосистемы Коста-Рики поглощают CO₂ атмосферы больше других стран региона, а промышленные выбросы с ее территории практически равны поглощению.

Ключевые слова: математическое моделирование, глобальный биосферный цикл двуокиси углерода, глобальное потепление, антропогенные воздействия, биосфера, чистая первичная продукция.

Основной целью работы являлось определение роли биосферы в компенсации воздействия антропогенных выбросов CO₂ на глобальное изменение климата для стран Латинской Америки. Особое внимание уделено Коста-Рике, которая для авторов являлась страной для отработки методики и получения компьютерных расчетных данных.

Расчеты динамики биосферных процессов с учетом влияния хозяйственной деятельности для всего мира и отдельных стран были проведены с помощью пространственной математической модели глобального цикла углерода в системе «ат-

мосфера—экосистемы суши—океан» [3]. В модели территория всей планеты разделена на ячейки размером $0,5 \times 0,5^\circ$ географической сетки (приблизительно 50×50 км). Предполагается, что в каждой ячейке суши находится растительность одного типа согласно мировой классификации [1]. Каждая ячейка характеризуется следующими переменными: количество углерода в массе растительности, в массе мертвого органического вещества почвы (гумус и подстилка). Происходит обмен углеродом в форме CO_2 с атмосферой, общее количество углерода также является переменной. Модель описывает процессы роста и отмирания растительности, накопления и разложения гумуса в терминах обмена углеродом между атмосферой, растениями и гумусом почвы в каждой ячейке суши. Климат в каждой ячейке характеризуется среднегодовой температурой воздуха у поверхности земли и количеством осадков за год. Значения температуры и осадков для каждой ячейки в зависимости от количества углерода в атмосфере (парниковый эффект) рассчитываются с помощью пространственной климатической модели общей циркуляции атмосферы и океана [2]. Модель была дополнена моделью цикла углерода в системе «атмосфера—океан» [4]. Предполагается, что в отсутствие антропогенных выбросов CO_2 в атмосферу количество углерода в системе «атмосфера—растения—почва—океан» постоянно и что до начала антропогенных воздействий система была в положении равновесия.

Индустриальные выбросы CO_2 в результате сжигания ископаемых органических топлив (каменный уголь, нефть, газ), происходящего на территории государств мира в течение двух недель перемешиваются в широтном направлении и в течение 2—3 месяцев — в меридиональном. В течение одного года каждая страна испытывает воздействие изменения климата, зависящее от суммарных выбросов всех стран мира в течение года с учетом своего географического расположения. Это обстоятельство определяет необходимость расчета изменений климата, происходящих при глобальном потеплении в одной данной области, учета суммарных выбросов стран всего мира и применения пространственной модели климата для всей планеты.

Модель содержит более 100 тысяч дифференциальных уравнений и реализована на ЭВМ. Рассчитанные компьютерные карты годичной продукции растительности суши и количества углерода в мертвом органическом веществе почвы адекватно воспроизводят данные измерений.

Моделировалась динамика биосферы с 1860 по 2100 гг. Был принят следующий базовый сценарий. Антропогенное поступление CO_2 в атмосферу начинается в 1860 г., оно происходит в результате индустриальных выбросов CO_2 от сжигания ископаемых органических топлив вырубки лесов и эрозии почв. После 2008 г. темпы роста индустриальных выбросов сохраняются такими же, какими были в предыдущем десятилетии (1,62% в год) [7]. С 1950 по 2100 гг. идет вырубка и последующее уничтожение тропических лесов. В этот период масса тропических лесов каждый год уменьшается на 0,6%, соответствующее количество CO_2 по-

ступает в атмосферу. Эрозия почв связана прежде всего с сельскохозяйственной эксплуатацией земель, соответствующее количество CO_2 также поступает в атмосферу. Эрозия начинается в 1860 г. и составляет 0,15% в год [8]. Территория вырубки и эрозии задается соответствующими пространственными распределениями для каждой ячейки модели.

Расчет динамики биосферных параметров на основе принятых допущений (базовый сценарий) показывает рост CO_2 в атмосфере, что способствует увеличению продуктивности растительности суши и росту фитомассы растений (рис. 1). Экосистемы суши и океан поглощали часть излишков CO_2 и в целом замедляли его рост, проявляя компенсаторные свойства биосферы. В результате количество мертвого органического вещества почвы сначала снижалось, а затем увеличилось.

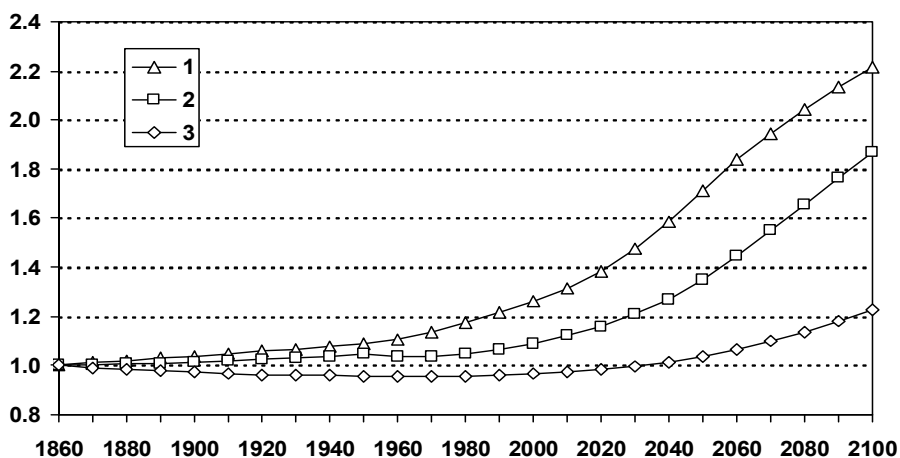


Рис. 1. Расчет динамики относительных значений углерода в атмосфере [1], в фитомассе растений [2]), гумусе почв [3] в 1860—2100 гг.

Согласно расчету к 2100 г. следует ожидать рост концентрации углекислого газа в атмосфере Земли в 2,2 раза и средней температуры атмосферы на 2,7 °С по сравнению с их значениями в 1860 г.

Расчеты показывают, что в течение всего индустриального периода экосистемы средних и высоких широт Северного полушария поглощали CO_2 , а экваториальных — выделяли. Наибольшее поглощение происходило в широтах 53—65° с.ш. Северного полушария, где сосредоточено большое количество лесных экосистем. Если двигаться от высоких и средних широт к экватору, то в целом чем ближе к экватору была экосистема, тем в меньшей степени она поглощала CO_2 , а начиная с 22° с.ш. и далее до 25° ю.ш. происходило выделение CO_2 .

В модели возможно рассмотрение стран, размеры которых превышают пространственное разрешение 50 × 50 км. Рассмотрим данные индустриальных выбросов и поглощения экосистемами этих стран за 2008 г., имеющих наибольшие выбросы (рис. 2).

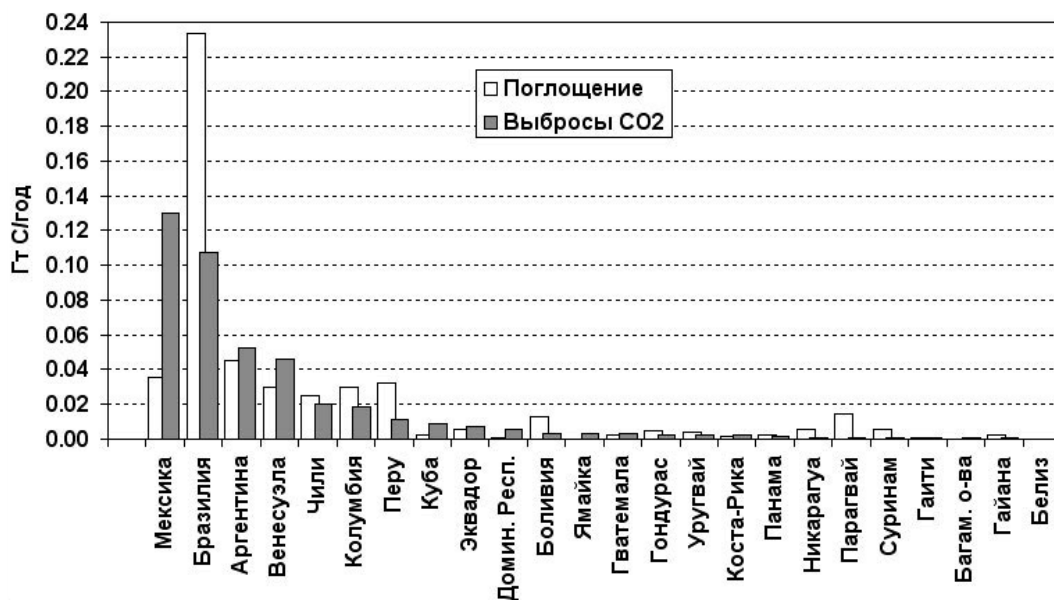


Рис. 2. Расчет бюджета CO₂ в странах Латинской Америки в 2008 г.

Данные расчета бюджета CO₂ для Коста-Рики (рис. 3) показывают, что в целом поглощение двуокиси углерода экосистемами страны не превышает индустриальных выбросов CO₂ при сжигании топлив. Видно, что развитие экономики страны было неравномерным в отдельные годы: темпы роста выбросов CO₂ повышались в 2002 и в 2007 гг., а в 2000, 2005 и 2008 г. резко уменьшались.

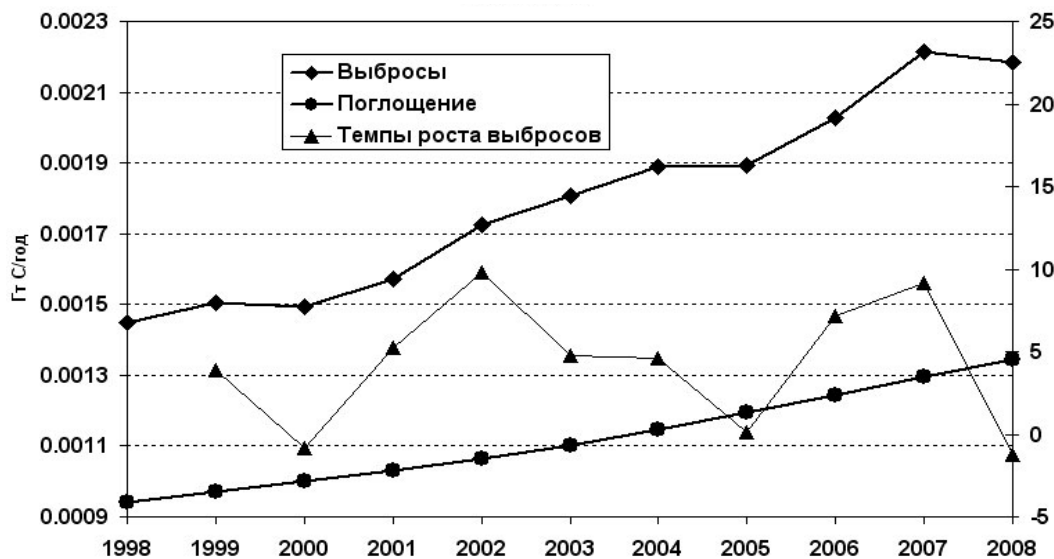


Рис. 3. Поглощение двуокиси углерода экосистемами Коста-Рики и индустриальные выбросы CO₂ при сжигании топлив (левая ось). Приведены темпы роста выбросов CO₂, в процентах (правая ось)

Согласно Киотскому протоколу к Рамочной конвенции ООН об изменении климата страны к 2010 г. должны были уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу до уровня на 5% ниже промышленных выбросов CO₂ 1990 г. Не все страны участвуют в выполнении Протокола. Выбросы стран, участвовавших в подписании Протокола, в 1990 г. составляли около 61% всех выбросов CO₂. Как известно, США отказались участвовать в выполнении Протокола, а страны ЕС пообещали к 2020 г. довести свои выбросы до значений на 20% меньше уровня 1990 г.

Отметим, что Протокол содержит конкретные ограничения на выбросы CO₂ лишь для некоторых стран и не предусматривает их для многих других. Весьма вероятно, в будущем в развивающихся странах рост экономического развития и численность населения станут настолько высокими, что не будет другой альтернативы, кроме развития энергетики и более значительного увеличения роста выбросов CO₂. Если принять, что темпы роста выбросов в указанных девяти странах Латинской Америки сохранятся, то к 2060 г. их суммарный выброс будет равным 5,2 Гт С/год, что приближается к величине суммарного выброса всех стран мира в 2008 г. — 8,7 Гт С/год.

В связи с этим нами проведены расчеты эффектов, которые могут возникнуть при различных ограничениях, приводящих к уменьшению выбросов CO₂. На рис. 4 представлены результаты расчетов динамики двуокиси углерода в 1860—2060 гг. Рассматривались следующие сценарии:

- 1 — изложенный выше базовый сценарий антропогенных воздействий;
- 2 — сценарий 1, при этом начиная с 2010 г. вырубка лесов и эрозия почв прекращаются;
- 3 — сценарий 1, при этом после 2010 г. Киотский протокол выполняется всеми участвующими в нем странами за исключением США, которые отказались участвовать в выполнении Протокола;
- 4 — сценарий 1, при этом после 2010 г. Киотский протокол выполняется только участвующими в нем странами (выполнение Киотского протокола);
- 5 — сценарий 1, при этом после 2010 г. всеми странами мира выполняется Рамочная конвенция ООН об изменении климата;
- 6 — сценарий 1, при этом после 2010 г. Киотский протокол выполняется всеми участниками, кроме США; рост выбросов CO₂ в упомянутых странах Латинской Америки каждый год составляет указанные выше темпы роста.

Согласно расчетам в соответствии со сценарием 1 концентрация CO₂ в атмосфере к 2060 г. повысится в 1,73 раза, по сравнению с 1860 г. Влияние прекращения вырубки лесов и эрозии почвы дает самый слабый эффект: рост CO₂ составит 1,70, т.е. сокращение будет на 0,03 меньше, чем по базовому сценарию.

Выполнение Киотского протокола приведет к тому, что концентрация CO₂ в атмосфере повысится в 1,55 раза, т.е. эффект снижения по отношению к базовому сценарию составит 0,18 (т.е. спад всего лишь на 10% по отношению к базовому сценарию), что не очень велико. Отказ США участвовать в выполнении протокола приведет к еще меньшему снижению кривой CO₂ — соответственно до значения 1,61, что на 0,12 ниже базового сценария.

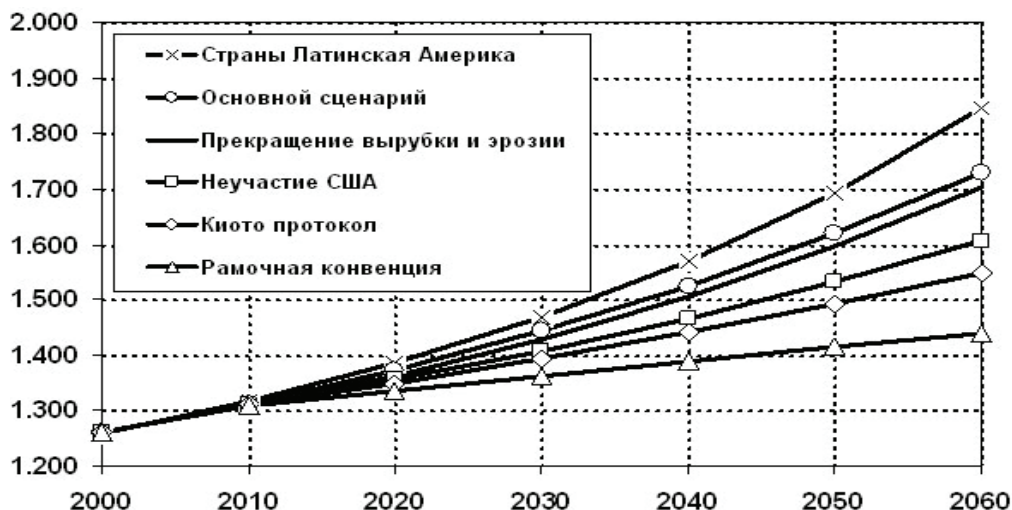


Рис. 4. Расчет изменения относительной (по отношению к величине 1860 г.) концентрации CO₂ в атмосфере при различных сценариях уменьшения выбросов CO₂ в атмосферу

Наиболее сильное влияние на замедление роста CO₂ дало бы выполнение Рамочной конвенции о стабилизации климата всеми странами. В этом случае к 2060 г. концентрация CO₂ повысилась бы только в 1,44 раза, т.е. на 0,29 меньше, чем при базовом сценарии. Однако этот сценарий мировое сообщество пока не планирует реализовывать.

В случае сценария 6 возможен быстрый рост выбросов CO₂ в странах Латинской Америки, что приведет к увеличению концентрации CO₂ по сравнению с базовым сценарием: к 2060 г. рост CO₂ составит 1,79, т.е. на 0,06 больше базового.

Для сравнения значения разных сценариев ограничений выбросов (рис. 5) примем за 100% сокращение роста CO₂ в случае выполнения Киотского протокола к 2060 г. («улучшение» по сравнению с базовым сценарием). Тогда выполнение Киотского протокола при неучастии США (сценарий 3) дает относительный рост углерода к 2060 г. — 68%. Это малая величина, и остается только надеяться на то, что США, выполняя свою собственную программу по ограничению выбросов, добьются более заметных успехов.

Прекращение вырубki лесов и эрозии почв даст лишь уменьшение концентрации CO₂ на 14% по сравнению с базовым сценарием. Это самое малое влияние ограничений выбросов диоксида углерода. Самый сильный эффект может дать выполнение Рамочной конвенции о стабилизации климата, при этом сокращение концентрации CO₂ достигло бы 162%. Неблагоприятный результат показывает учет роста CO₂ в латиноамериканских странах (сценарий 6) — минус 65%, т.е. рост CO₂ значительно больше, чем в базовом сценарии.

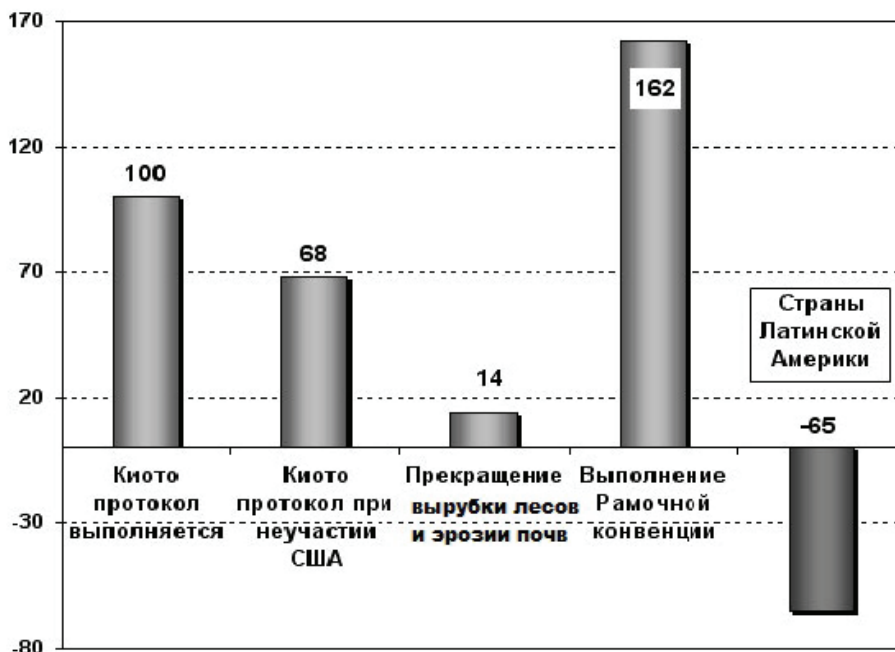


Рис. 5. Сравнение разных сценариев ограничений выбросов CO₂ в случае выполнения Киотского протокола к 2060 г.

При таких значительных превышениях требований Протокола для развивающихся стран Латинской Америки, которые не имеют развитой эффективной экономики и энергетики, очевидно, что политика развитых стран в торговле квотами, предусматриваемыми Киотским протоколом, не даст нужных результатов. Единственный приемлемый путь для ограничения предстоящего значительного роста CO₂ от выбросов — бесплатное распространение передовых энергетических технологий в этих странах.

Значение принятого ограничения становится особенно важным для преобразования экономики и увеличения эффективности расходования энергетических ресурсов в развитых странах.

С целью исследования региональных последствий глобального потепления для землепользования в странах Латинской Америки нами был проведен расчет изменения фитомассы, гумуса и общего количества углерода под воздействием индустриальных выбросов CO₂, вырубки лесов [5; 6; 11] и эрозии почвы [8—10]. Расчеты проводились для периода 1860—2060 гг. с использованием вышеупомянутой пространственной модели глобального цикла углерода на основе базового сценария антропогенного воздействия. Были выбраны страны Латинской Америки: Аргентина, Гватемала, Гондурас, Коста-Рика, Никарагуа, Панама, Уругвай, Чили.

Результаты расчетов за период с 2000 по 2060 гг. показывают рост фитомассы во всех странах (рис. 6). Из-за вырубки тропических лесов в этих странах и пожаров в первые годы происходит уменьшение массы лесов. При этом рост концентрации CO₂ и температуры постепенно приводит к увеличению годичной продукции в целом по стране и компенсирует эффект частичного сокращения фитомассы от вырубки деревьев.

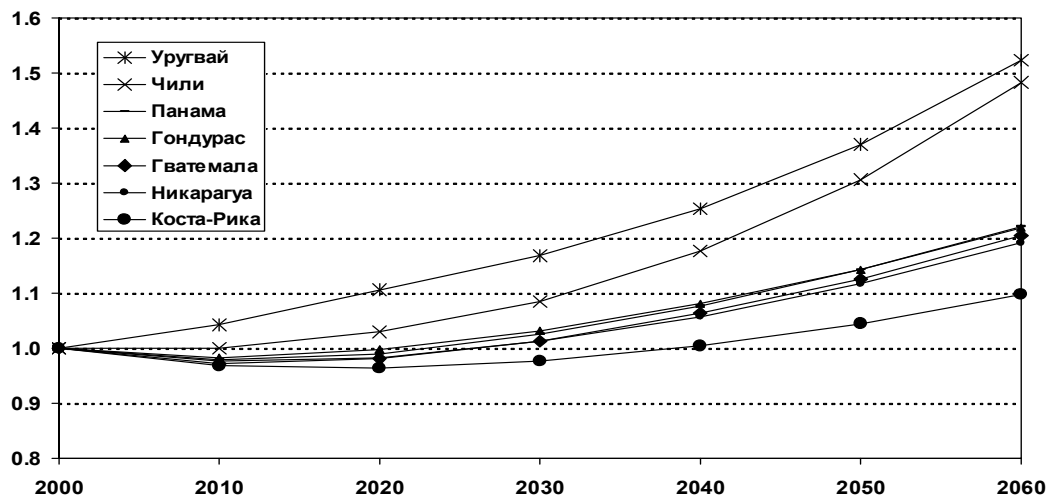


Рис. 6. Изменение количества углерода в фитомассе в странах Латинской Америки в течение 2000—2060 гг. Здесь 100% относится к 2000 г.

Наибольший относительный прирост фитомассы должен происходить в Уругвае, самый низкий — в Коста-Рике.

В течение 2000—2060 гг. в странах Латинской Америки в целом происходит уменьшение почвенного гумуса (рис. 7). Причины уменьшения: во-первых, эрозия почвы, связанная с неправильным использованием земли, во-вторых, влияние региональных последствий изменения климата. В первые годы (2000—2010 гг.) уменьшение гумуса происходит во всех странах, кроме Аргентины, однако по мере роста концентрации CO_2 и температуры, приводящих к увеличению годичной продукции и фитомассы происходит компенсация уменьшения гумуса и его количество начинает увеличиваться. В результате к 2060 г. во всех рассматриваемых странах, за исключением Гватемалы, количество гумуса превышает уровень 2000 г., Коста-Рика находится на четвертом месте к 2060 г.

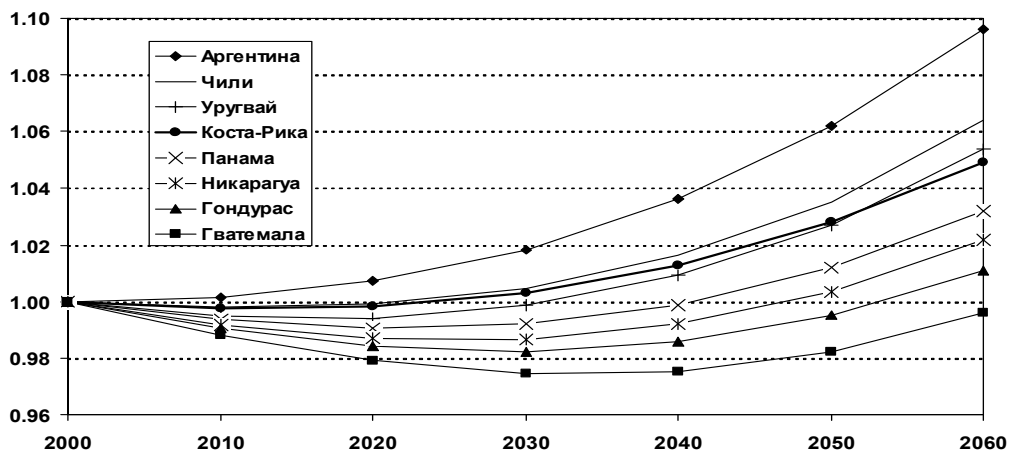


Рис. 7. Изменение количества углерода в гумусе в странах Латинской Америки в течение 2000—2060 гг. Здесь 100% относится к 2000 г.

Рассмотрим изменение общего количества углерода (в фитомассе и гумусе) в 2000—2060 гг. (рис. 8). Во всех странах Латинской Америки после нескольких лет снижения количество углерода начинает увеличиваться и в фитомассе и в гумусе. В этом случае рост концентрации CO_2 и температуры постепенно приводит к увеличению годичной продукции, что, в свою очередь, приводит к некоторой компенсации антропогенных воздействий — вырубке лесов и эрозии почв. Наибольший относительный прирост суммы фитомассы и гумуса в 2060 г. происходит в Чили и Аргентине, а самый низкий — в Коста-Рике.

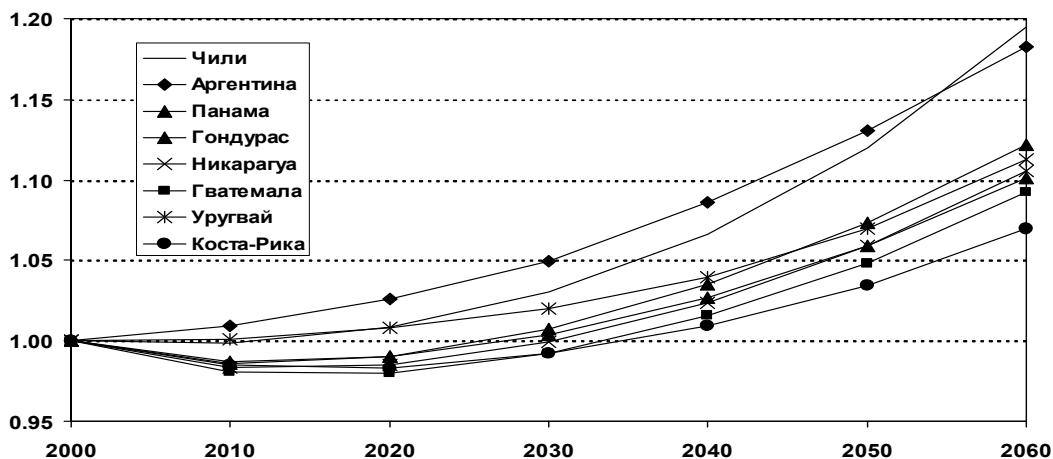


Рис. 8. Изменение общего углерода в странах Латинской Америки в течение 2000—2060 гг.

Здесь 100% относится к 2000 г.

Страны Латинской Америки играют заметную роль среди стран, поглощающих индустриальные выбросы CO_2 в атмосферу. В этом отношении они сравнимы с лесами умеренного пояса северного полушария.

Можно надеяться, что предпринимаемые развитыми странами усилия по преобразованию экономики и повышению эффективности использования энергетических ресурсов уменьшат долю антропогенного воздействия на биосферу и климат без снижения уровня жизни населения этих стран. Однако пренебрежение развитием в странах, не входящих в «золотой миллиард», таких как страны Латинской Америки, может дать противоположный эффект — значительный рост концентрации углекислого газа в атмосфере и дальнейшее нарушение климата и биосферы. Политика торговли квотами CO_2 не будет эффективной, поскольку быстрый рост выбросов CO_2 в таких странах, как страны Латинской Америки, может превысить потенциал этого ограничения. Вклад стран Латинской Америки в связи с последствиями глобального потепления будет заметным в 2020—2060 гг., что будет сопровождаться значительным ростом выбросов CO_2 .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Базилевич Н.И., Родин Л.Е.* Картограммы продуктивности биологического круговорота главных типов растительности суши // Изв. Всесоюзного Географического о-ва. — 1967. — Т. 99. — № 3. — С. 190—194.
- [2] *Пархоменко В.П.* Верификация климатической модели. — М.: ВЦ АН СССР, 1988.
- [3] *Тарко А.М.* Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. — М.: Физматлит, 2005.
- [4] *Chan Y.H., Olson J.S., Emanuel W.R.* Simulation of land-use patterns affecting the global carbon cycle // Environmental Sciences Division. Publication N 1273, Oak Ridge National Laboratory, 1979. — 173 pp.
- [5] Country Deforestation Data. Food and Agriculture Organization of the U.N.: The State of the World's Forests 2008. — URL: http://www.mongabay.com/deforestation_tropical.htm
- [6] Deforestation Figures for Selected Countries. Mongabay.com, 2012. — URL: <http://rainforests.mongabay.com/deforestation/>
- [7] *Marland G., Boden T., and Andres B.* Global CO₂ Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751—2008. NDP-030. // Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 2010.
- [8] Soil Properties Database. Estimate SWCC with 6000 soils. — URL: <http://www.soilvision.com>
- [9] *Tiessen K.H.D., Sancho F.M., Lobb D.A., Mehuiys G.R.* Assessment of tillage translocation and erosion by the disk plow on stepland Andisols in Costa Rica // 2010. — Vol. 65. — No. 5. — P. 316—328. — URL: www.jswconline.org
- [10] *Veihe A., Rey J., Quinton J.N., Strauss P., Sancho F.M., Somarriba M.* Modelling of event-based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: evaluation of the EUROSEM model. *Catena*, 2011, 44 (3). pp. 187—203.
- [11] Wood removal (cubic meter). Food and Agriculture Organization, FAO, 2012. — URL: <http://www.fao.org/forestry/sofo/en/>

LATIN AMERICA AND THE GLOBAL CLIMATE CHANGE

**A.M. Tarko¹, D.K. Montero², V.P. Zvolinski³,
A.I. Kurbatova²**

¹Dorodnicyn Computing Centre of RAS
Vavilov str., 40, Moscow, Russia, 119333

²Ecological Faculty
Peoples' Friendship University of Russia
Podolskoye shosse, 8/5, Moscow, Russia, 113093

³MATI—Russian State Technological University
named after K. E. Tsiolkovsky
Orshanskaya str., 3, Moscow, Russia, 121552

Based on the spatial mathematical model of global carbon dioxide cycle in the biosphere calculated absorption of carbon dioxide emissions from the burning of fossil fuels, including deforestation and soil erosion in Latin America and the world. Calculations of the effects of restrictions in CO₂ emissions based on different scenarios of the Kyoto Protocol to the UN Framework Convention on climate stabilization showed that ecosystems of Costa Rica absorb atmospheric CO₂ more than other countries in the region, and industrial emissions from its territory almost equal absorption.

Key words: mathematical modeling, the global biosphere cycle of carbon dioxide, global warming, human impacts, biosphere, net primary production.