
1 МОЖЕМ ЛИ МЫ ЗАТОРМОЗИТЬ ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ?

А.М. Тарко

ВВЕДЕНИЕ

Человеческая цивилизация всегда использовала природные ресурсы, во-первых, «по потребностям» – стремясь в наибольшей степени удовлетворять свои потребности в повышении уровня жизни, а во-вторых, «по способностям» – использование ресурсов на любой ступени развития цивилизации было ограничено техническими и экономическими возможностями. С течением времени технологическая мощность увеличивалась и приобрела глобальный масштаб.

В настоящее время стало ясно, что если сохранятся современные темпы и глобальные технологические методы использования ресурсов биосферы, то это приведет ее к катастрофе. Проблема состоит в том, чтобы найти технологические, экологические и демографические предпосылки преодоления кризиса. Одним из факторов, который все больше связывается с глобальной антропогенной деятельностью, является климат планеты. Здесь мы рассмотрим, какие факторы ответственны за современное изменение климата¹, а какие, напротив, не ответственны, и попытаемся определить, в какой степени человеческая цивилизация может влиять на климат, в частности – в какой степени способна затормозить происходящее глобальное потепление.

ЭНДОГЕННЫЕ И ЭКЗОГЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ КЛИМАТА. ЦИКЛЫ МИЛАНКОВИЧА

Земля получает излучение Солнца в широкой полосе коротковолнового диапазона со средней длиной волны около 0,5 мкм, это излучение почти все проходит атмосферу. Около 30% излучения Солнца отражается от системы «атмосфера–поверхность Земли» и уходит в космос, остальные 70% излучения поглощаются Землей. Земля отдает полученную энергию как почти абсолютно черное тело в длинноволновом инфракрасном диапазоне, со средней длиной волны около 10 мкм. В этом диапазоне у многих газов (диоксид угле-

¹ Вплоть до расчета роли отдельных стран.

Россия в окружающем мире – 2008. Устойчивое развитие: экология, политика, экономика: Аналитический ежегодник / Отв. ред. Н.Н. Марфенин; под общей редакцией Н.Н. Марфенина, С.А. Степанова. – М.: Изд-во МНЭПУ, 2008. – 328 с.

рода, метан, пары воды, окислы азота, фреоны и др.) есть многочисленные полосы поглощения, эти газы поглощают излучение, в результате выделяют тепло и большей частью разогревают атмосферу. Так, диоксид углерода интенсивно поглощает идущее от Земли излучение в диапазоне 12–18 мкм и является одним из основных факторов, обеспечивающих парниковый эффект. Климат планеты в большой степени определяется нагреванием атмосферы в результате взаимодействия излучения Земли с парниковыми газами.

Из парниковых газов самую большую массу и, соответственно, значение для климата имеют пары воды. Но они слабо связаны с результатами экономической деятельности, не способны вызвать глобальные колебания климата и при анализе влияния экономической деятельности на климат не считаются значимым фактором.

Также парниковыми газами являются диоксид углерода и метан. Увеличение количества этих газов в атмосфере является результатом прямого влияния экономической деятельности, и мы дальше рассмотрим их роль в формировании климата.

В целом климат планеты имманентно нестабилен. Его нестабильность определяется самой структурой атмосферных и океанских процессов (эндогенными факторами); эту нестабильность хорошо воспроизводят современные наиболее сложные и подробные модели климата – модели общей циркуляции атмосферы и океана. Также нестабильность климата, проявляющаяся в наличии долгопериодных колебаний, определяется экзогенными астрономическими факторами – прежде всего, изменением параметров орбиты Земли и нестабильностью излучения Солнца.

Из экзогенных факторов наиболее важными являются циклы Милутина Миланковича (1897–1958). В конце 30-х–начале 40-х годов XX века он разработал концепцию периодичности ледниковых периодов. В соответствии с его гипотезой циклические изменения трех важнейших астрономических характеристик движения Земли (прецессии, нутации и эксцентриситета орбиты) приводят к периодическим колебаниям как абсолютной величины, так и регионального распределения по поверхности нашей планеты солнечной радиации.

Прецессия – движение оси вращения Земли по круговому конусу (как у обычного волчка или гироскопа). Второе физическое явление, нутация, – это дополнительные «покачивания» земной оси, что также присуще волчку. Эти колебания обусловлены изменениями притяжения, оказываемого Луной, Солнцем и даже Юпитером на так называемый экваториальный избыток массы вращающейся Земли. И, наконец, третья составляющая, эксцентриситет, – изменения «вытянутости» земной орбиты, связанные с гравитационным воздействием на движение Земли других планет Солнечной системы. Орбита Земли циклически меняется от почти круговой до вытянутой эллиптической.

Согласно современным расчетам, характерные частоты этих трех циклов Миланковича составляют 26 тыс. лет для прецессии, 41 тыс. лет для нутации и 93 тыс. лет для эксцентриситета. Анализ керна с антарктической станции «Вос-

ток» показал, что наиболее серьезные изменения климата Земли за последние 500 тыс. лет происходили с периодичностью 100 тыс. лет (цикл эксцентриситета), менее выраженные – с периодичностью 42 тыс. лет (цикл нутации), а самые незначительные – с периодичностью 24 тыс. лет (цикл прецессии). Причем за 500 тыс. лет были отмечены четыре продолжительных ледниковых периода, разделенных сравнительно короткими периодами существенного потепления.

Несомненно, периодические изменения формы орбиты нашей планеты и ее «осевое покачивание» могут влиять на климат и эволюционную динамику различных форм живых организмов на отрезках времени в десятки тысяч и сотни тысяч лет. Однако нас интересует исключительно быстрый рост температуры атмосферы, происходящий последние несколько десятилетий – то, что называется глобальным потеплением. Данных о том, что долгопериодные циклы способны вызвать весьма быстрый рост температуры (флуктуации), мы не имеем, а возможность того, что случайное соединение фаз нескольких циклов может вызвать быстрый подъем температуры атмосферы, также считаем сомнительной и не подтвержденной данными расчетов или измерений. Следовательно, циклы Миланковича, как и другие долгопериодные циклы, мы не можем рассматривать как определяющие современное глобальное потепление. В то же время до сих пор не зарегистрированы короткопериодные глобальные циклы климата, следовательно, мы не можем утверждать, что глобальное потепление имеет отношение к циклической активности климата Земли.

Рассмотрим глобальное потепление: факторы, его подтверждающие, и факторы, его вызывающие.

ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ

Если рассмотреть изменения климата за последний миллион лет, то последние 10–15 тысяч лет относятся к одному из наиболее теплых и благоприятных для жизни периодов [4]. При этом история цивилизации знает немало примеров существенных изменений климата. Достаточно достоверно установлен теплый период времени в IX–XIV вв. н.э., который сменился относительно холодным климатом (малый ледниковый период) приблизительно с 1400 по 1850 гг.

На фоне инструментально зарегистрированных изменений климата в течение последних 150 лет (рис. 1-1) климатологи выделяют достоверное потепление 1904–1944 гг., достоверное похолодание 1944–1976 гг. и, наконец, достоверное потепление 1976–1999 гг.

По мнению МГЭИК² [6, 7], до 1976 г. изменчивость климата не превышала

² Межправительственная группа экспертов по изменению климата – МГЭИК (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) была учреждена в 1988 г. Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО) и Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП). Обязанность группы состоит в том, чтобы проводить оценку научно-технической и социально-экономической информации об изменении климата для мирового сообщества. МГЭИК выпустила несколько научных докладов.

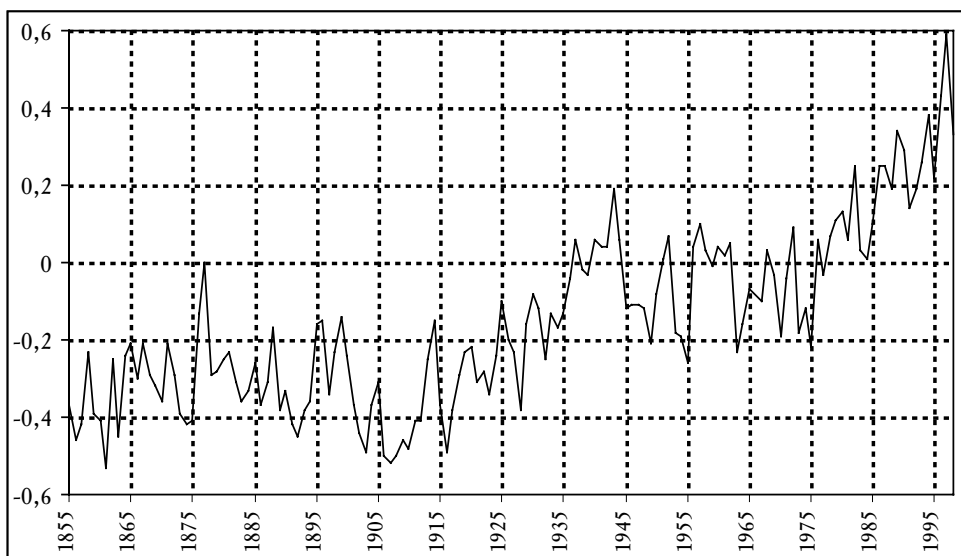


Рис. 1-1. Аномалии приземной глобальной температуры атмосферы ($^{\circ}\text{C}$) в 1856–1999 гг. по данным [8]

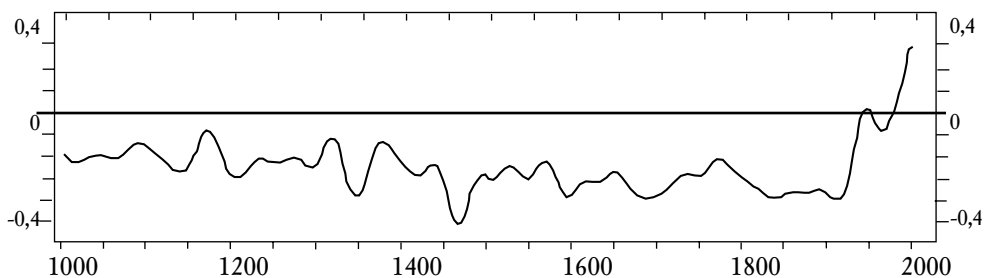


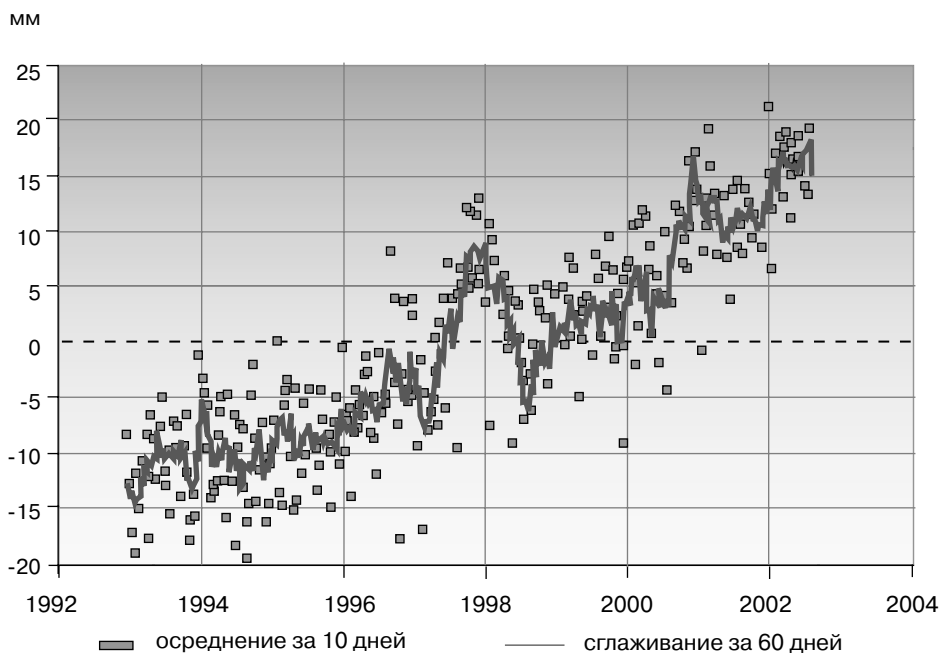
Рис. 1-2. Аномалии средней глобальной температуры атмосферы ($^{\circ}\text{C}$) за последнее тысячелетие по данным МГЭИК. По горизонтальной оси — годы, н.э.

его естественных вариаций, оцененных на отрезке около 1000 лет, но после этого величина колебаний превысила эту величину, и стало возможным говорить об антропогенном глобальном потеплении. Ход температуры за последнее тысячелетие по данным МГЭИК изображен на рис. 1-2.

Отметим, что при глобальном потеплении наряду с ростом глобальной температуры атмосферы Земли зарегистрировано увеличение климатических аномалий во всех локальных и региональных участках планеты. Это ставшие хорошо известными то короткие, то длительные периоды с сильным повышением температуры или со значительным похолоданием, сильные наводнения, засухи и т.д.

Дополнительная информация 1

Наблюдаемое повышение уровня Мирового океана



Эти данные, полученные со спутника, запущенного в 1992 г., показывают рост глобального среднего уровня Мирового океана за последнее десятилетие.

Источник: Воздействие потепления в Арктике: Оценка климатических воздействий в Арктике. Издательство Кембриджского университета – ACIA, Impacts of Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, 2004. – С.42.

Одним из проявлений глобального потепления является повышение уровня поверхности Мирового океана (Дополнительная информация 1). Уровень океана поднимается сейчас примерно на 3 мм в год. Эта величина вдвое больше скорости подъема уровня океана в доиндустриальный период. Причиной подъема является таяние льдов Антарктиды, Гренландии, ледников континентов. Однако данные подъема уровня океана различны у разных исследователей (скорость подъема оценивается от 2 до 3,5 мм/год), а данные о таянии льдов Гренландии и Антарктиды и ледников континентов различаются. Баланс процессов таяния и образования нового льда пока не сводится. Таким образом, сейчас уровень поднятия поверхности Мирового океана не является хорошим диагностическим параметром происходящего глобального потепления.

РОСТ СОДЕРЖАНИЯ CO₂ В АТМОСФЕРЕ

Диоксид углерода является одним из парниковых газов атмосферы. Он присутствует в атмосфере в очень малом количестве, его современная объемная концентрация составляет 360 млн⁻¹ (объемных частей на миллион). Тем не менее CO₂ является важным фактором, определяющим климат Земли и процессы в биосфере. Еще в середине XIX века М. Тиндал предположил, что повышение содержания диоксида углерода в атмосфере приведет к росту температуры атмосферы. Хотя метан, водяной пар и другие парниковые газы также являются важными факторами, влияющими на климат, их влияние намного меньше по сравнению с атмосферным CO₂.

Увеличение количества CO₂ в атмосфере происходит за счет выделения его в результате хозяйственной деятельности: сжигания органических ископаемых топлив, таких как каменный уголь, нефть, природный газ (индустриальные выбросы), – 7,91 Гт С/год в 2004 г. [3] (здесь и далее данные по CO₂ приводятся в пересчете на углерод), эрозии почв — около 1,0 Гт С/год, вырубки лесов — около 1,0 Гт С/год. Одновременно CO₂ поглощается экосистемами суши и океаном. Величины индустриальных выбросов за последние 100 лет и темпы роста выбросов за последние 40 лет представлены на рис. 1-3.

Видно, что индустриальные выбросы постоянно росли со спадами, связанными с Первой и Второй мировыми войнами (интересно, что каждый раз спад выбросов происходил после окончания войны), великой депрессией 1930-х годов, энергетическим кризисом 1970-х годов и др. Темпы роста выбросов максимально составляли 8% в год. Судя по пятилетним скользящим средним, значительный спад темпа роста был после 1967 г., резкий подъем – после 1983 г. Следующий спад был после 1987 г. Последний сильный спад темпа роста выбросов происходил после 1997 г. Он связан с началом перехода ряда развитых стран на энергосбережение и с подготовкой к выполнению Рамочной конвенции ООН о стабилизации климата.



Рис. 1-3. Индустриальные выбросы CO_2 (Гт С/год) в атмосферу в 1900–2000 гг. и темпы роста выбросов (среднее скользящее за 5 лет – % в год) в 1960–2000 гг. (по данным [9])

Впервые инструментально рост индустриальных выбросов CO_2 установил Х.Е. Зюсс в начале 50-х годов XX века, открыв эффект, вскоре названный его именем [12]. По изменению отношения углерода C_{14}/C_{12} в древесных кольцах Х.Е. Зюсс сделал вывод о том, что атмосферный диоксид углерода уже со второй половины XIX века пополняется выбросами CO_2 от сжигания ископаемых топлив. Он обнаружил, что отношение радиоактивного C_{14} , постоянно образующегося в атмосфере благодаря действию космических частиц, к стабильному C_{12} уменьшается в течение последних ста лет в результате «разбавления» атмосферного CO_2 потоком CO_2 из ископаемых топлив, практически не содержащих C_{14} (период полураспада C_{14} равен 5730 лет). Парадоксально, но эффект Зюсса показал рост индустриальных выбросов CO_2 на основе измерений не в атмосфере, а в годовых кольцах деревьев.

Начавшаяся в 1958 г. регистрация атмосферной концентрации CO_2 на станции Мауна Лоа в Тихом океане подтвердила ее ежегодный рост, который составил около 0,4% в год. Сейчас такие измерения проводятся на нескольких десятках станций, расположенных по всему миру [13, 14].

О росте CO_2 свидетельствуют также данные послойного анализа соотношения изотопов C_{12} и C_{14} в ледовых ядрах, которые были получены в Антар-

ктиде. Эти данные касаются изменения содержания CO_2 в атмосфере в течение нескольких последних тысяч лет. На рис. 1-4 представлены две кривые: ход концентрации CO_2 в атмосфере в 1745–1973 гг., полученный на основании анализа ледового керна Антарктиды (станция Сипл), и зарегистрированный в обсерватории Мауна Лоа (1959–1992 гг.). Видно, что рост концентрации CO_2 в атмосфере за последние 250 лет составил 27%.

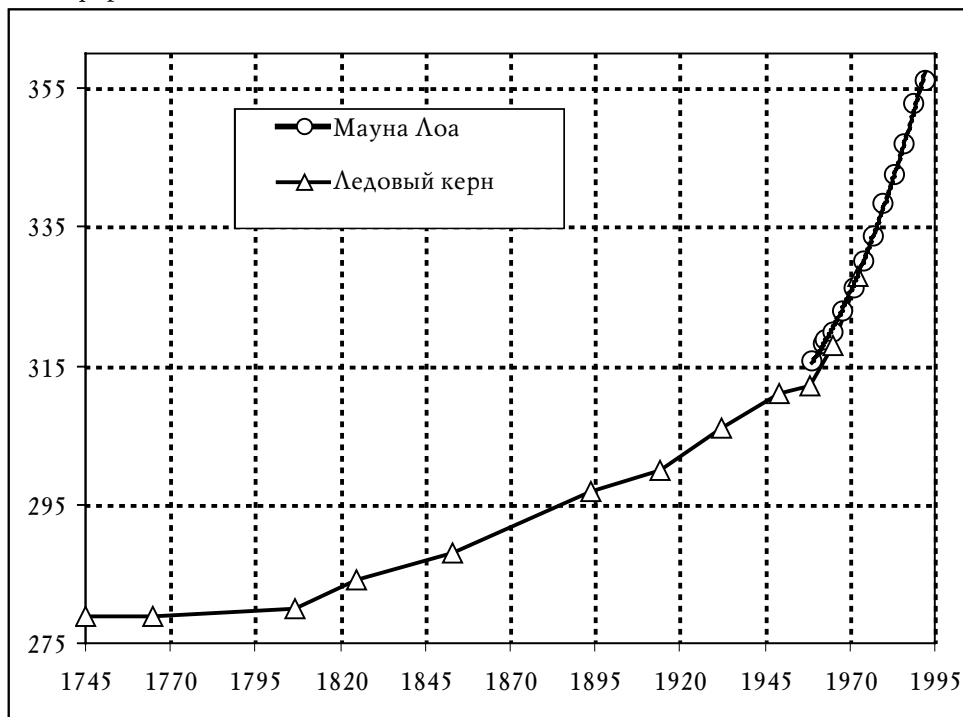
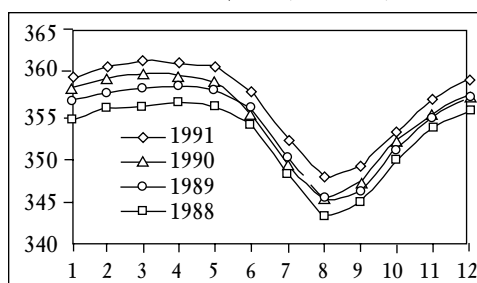


Рис. 1-4. Рост концентрации CO_2 (млн^{-1}) в атмосфере по данным анализа ледового керна Антарктиды 1745–1973 гг. и измерений на станции Мауна Лоа 1959–1992 гг. (по данным [13])

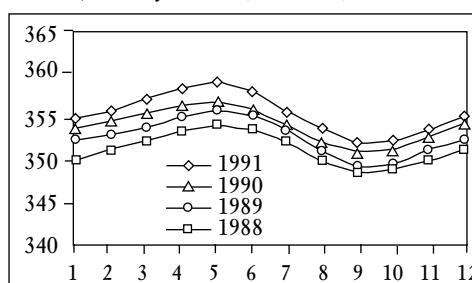
Обратим внимание на динамику сезонного хода CO_2 на разных станциях мониторинга. На рис. 1-5 станции расположены в порядке изменения географической широты: от 66° с.ш. до 89° ю.ш. Видно, что на всех станциях каждый следующий год новая кривая хода CO_2 на графике расположена выше предыдущей. Это является еще одним доказательством постоянного увеличения содержания диоксида углерода в атмосфере. Отметим, что на всех станциях в течение года наблюдаются вариации содержания CO_2 в атмосфере. Наибольшие изменения наблюдаются в высоких и средних широтах Северного полушария – 15 млн^{-1} на Океанской станции М. При этом минимум концентрации CO_2 приходится на август. И уменьшение концентрации летом, и его величина зависят от того, что летом в высоких и средних широтах Северного полуша-

рия идет интенсивный фотосинтез растительности суши. Чем ближе к югу, тем амплитуда колебаний становится меньше, а минимум сдвигается от августа к сентябрю вплоть до экватора. В южном полушарии вплоть до Южного полюса минимум колебаний приходится на февраль–март, кривая хода CO_2 все больше становится похожа на возрастающую кривую (размах колебаний составляет $1,2 \text{ млн}^{-1}$). Здесь минимум в феврале можно объяснить тем, что на некотором отдалении находятся фотосинтезирующие растения суши, у которых максимум фотосинтеза приходит на антарктическое лето, и эффект переноса воздушных масс распространяется до Южного полюса.

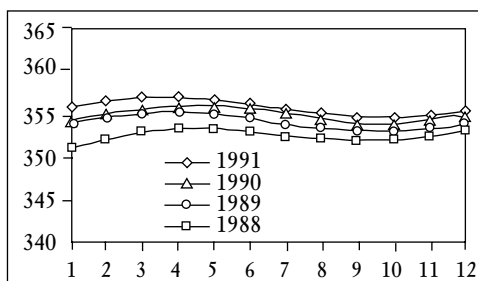
Океанская станция М, 66° с.ш., 2° в.д.



Станция Мауна Лоа, 19° с.ш., 155° з.д.



Станция Экватор, 0° с.ш., 150° з.д.



Станция Южный полюс, 89° ю.ш., 24° з.д.

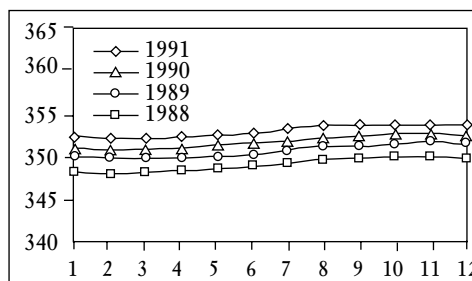


Рис. 1-5. Динамика концентрации атмосферного CO_2 (млн^{-1}) на станциях мониторинга в 1988–1991 гг. (ось ординат – млн^{-1} ; ось абсцисс – месяцы года)

СВЯЗЬ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ И РОСТА КОНЦЕНТРАЦИИ CO_2 . ПРИНЦИП ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ

Какова связь глобального потепления и роста содержания CO_2 в атмосфере? Самое естественное предположение – объяснение современного потепления ростом промышленных выбросов CO_2 . Однако это обстоятельство в настоящее время не доказано. Наличие статистической связи между двумя процессами не означает, что эта связь причинная. Несмотря на заявление МГЭИК о превышении температурой естественных вариаций климата, мы не можем говорить

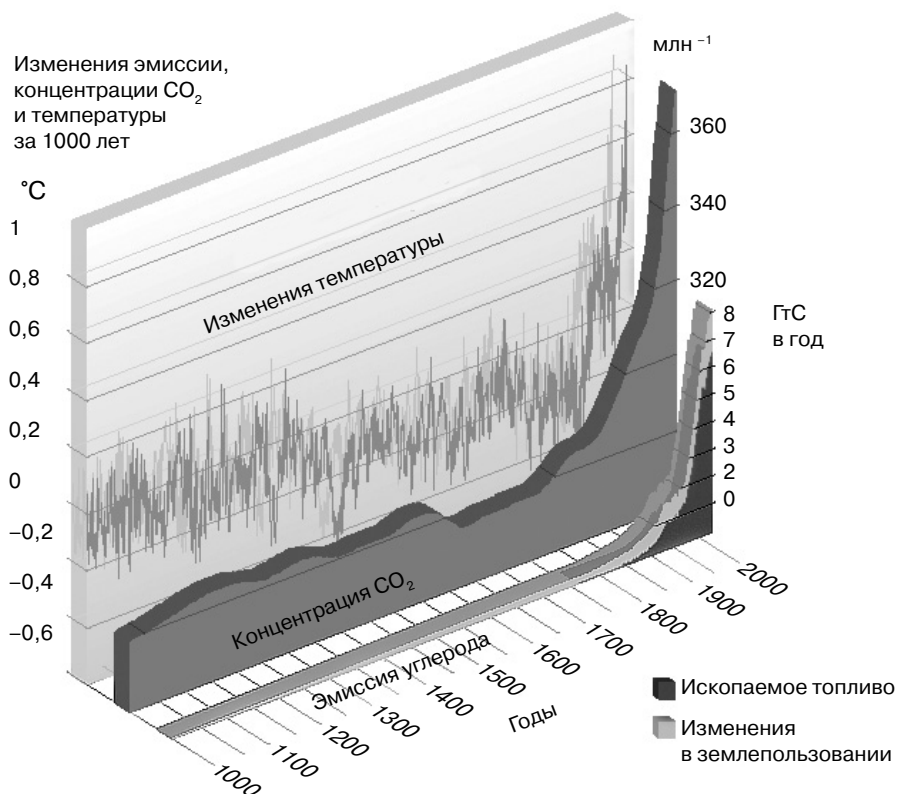
о достоверной причинной связи происходящего потепления и антропогенного роста концентрации CO_2 в атмосфере (Дополнительная информация 2).

Современные климатические модели общей циркуляции атмосферы и океана на основании учета парникового эффекта индустриальных выбросов CO_2

Дополнительная информация 2

Ряд за 1000 лет показывает рост эмиссии углерода вследствие деятельности человека (сжигание ископаемого топлива и сокращение лесов), последующий рост концентрации углекислого газа в атмосфере и рост температуры воздуха. Более ранние части восстановленного ряда температуры Северного полушария получены на основе обработки исторических данных, колец деревьев, кораллов, тогда как более поздние ряды получены прямыми измерениями. Измерения углекислого газа (CO_2) в пузырьках воздуха, содержащихся в ледовых кернах, формируют начальную часть ряда данных по CO_2 , прямые измерения концентрации углекислого газа в атмосфере начались в 1957 г.

Источник: Воздействие потепления в Арктике: Оценка климатических воздействий в Арктике. Издательство Кембриджского университета – ACIA, Impacts of Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, 2004. – С.3.



и учета действия аэрозолей на климат описывают указанный выше ход температуры в XX веке – как повышения температуры, так и ее уменьшения; однако, как известно, математическая модель не может быть доказательством причинной связи.

Недавно МГЭИК признала большую вероятность причинной связи потепления и выбросов диоксида углерода. При этом она основывалась на следующих результатах. Обычно характеристикой действия парникового эффекта углекислого газа служит рассчитанная на моделях величина повышения средней глобальной температуры атмосферы ΔT_{2x} при увеличении концентрации CO_2 вдвое по сравнению с ее современным значением. Применяемые климатические модели имеют разброс в предсказании потепления, величина которого в разных моделях лежит в пределах $1,5^\circ\text{C} \leq \Delta T_{2x} \leq 4,5^\circ\text{C}$. На невозможность утверждения о функциональной связи двух коррелированных процессов указывалось выше. В дополнение к этому отметим, что указанный вывод МГЭИК, основанный на анализе разброса диапазонов изменения температур разных моделей, не подтверждается современными данными. По мнению климатологов США М. Шлесинжера и Н.Г. Андроновой [11], недавние измерения обнаружили большую вероятность того, что величина ΔT_{2x} лежит вне диапазона $1,5^\circ\text{C} \leq \Delta T_{2x} \leq 4,5^\circ\text{C}$. Проведенный ими анализ показал, что требуется уменьшение неопределенности в отношении действия антропогенных и естественных факторов (изменение излучения Солнца и вулканической активности). Для определенного утверждения необходимы более длинные ряды инструментальных наблюдений приземной температуры, чтобы отделить сигнал вынужденного изменения температуры от естественных климатических колебаний. По мнению климатологов, весьма вероятно, что переговоры политиков об уменьшении антропогенных изменений климата в обозримом будущем будут вестись на фоне глубокой неопределенности. Таким образом, сейчас мы не можем утверждать, что глобальное потепление происходит от повышения концентрации CO_2 в атмосфере.

Главы государств, участвовавшие в конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро в 1992 г., знали как о недоказанности антропогенного происхождения глобального потепления, так и о возможных серьезных последствиях увеличения содержания CO_2 в атмосфере. Почему же они приняли Рамочную конвенцию о стабилизации климата, предусматривающую значительное сокращение выбросов в атмосферу парниковых газов, в первую очередь диоксида углерода?

Их решение базировалось на утвержденном ими же в Декларации на этой конференции фундаментальном принципе предосторожности [1]: «В случае существования серьезного или непоправимого ущерба природе недостаток полной научной информации не должен служить причиной для отсрочки эффективных по затратам мер по предотвращению деградации окружающей среды».

Рамочная конвенция «О стабилизации климата» предполагает введение на государственном уровне глобальных мер по добровольному ограничению

воздействий на биосферу. Она предполагает уменьшение государствами выбросов парниковых газов в атмосферу, в первую очередь углекислого газа при сжигании ископаемых органических топлив. То есть еще до того, как «вина» парниковых газов «доказана», на конференции приняли превентивные меры, основанные на заботе о природе и людях.

Вслед за Рамочной конвенцией в 1997 г. в г. Киото был принят Киотский протокол, конкретизирующий сокращения выбросов парниковых газов некоторыми странами. В Киотском протоколе было указано, что страны должны к 2010 г. сократить свои выбросы парниковых газов до величины, на 5% меньшей уровня 1990 г. Суммарный выброс странами Киотского протокола парникового газа диоксида углерода в 1990 г. составлял 61% от выбросов всех стран мира.

Так же как и лидеры стран – участниц конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро 1992 г., мы будем, в соответствии с принципом предосторожности, придерживаться того мнения, что глобальное потепление происходит от роста концентрации CO_2 в атмосфере.

ЦИКЛ МЕТАНА В БИОСФЕРЕ

Метан атмосферы относится к малым газовым примесям, определяющим парниковый эффект. Концентрация его в атмосфере в 2002 г. составляла $1,78 \text{ млн}^{-1}$ [14]. Несмотря на то что содержание метана в атмосфере в 200 раз меньше, чем диоксида углерода, интерес исследователей к циклу метана не меньше, чем к циклу диоксида углерода. Это объясняется сильным парниковым эффектом метана. Удвоение CH_4 в атмосфере может привести к повышению температуры на $0,2\text{--}0,4^\circ \text{C}$ [10]. Метан отличается от диоксида углерода большей неопределенностью в части достаточности количественных данных, а также понимания причин его динамики в атмосфере.

На рис. 1-6 представлен ход концентрации метана в атмосфере в 1981–1993 гг. Видно, что рост CH_4 за 12 лет составил 11%. В этот период количество метана в атмосфере росло в 2 раза быстрее, чем диоксида углерода, за год его количество в атмосфере увеличивалось на 0,9%.

В следующее десятилетие скорость роста концентрации метана сильно менялась, главным образом снижалась, и к 2000–2001 гг. рост содержания CH_4 почти прекратился [14]. Если взглянуть на кривые изменения температуры и темпов роста CH_4 в атмосфере (рис. 1-7), то мы увидим, что они почти синхронны и близки по фазе: в одни годы ход температуры опережает CH_4 , в другие – наоборот. Видно, что подъем температуры часто предшествует увеличению темпов роста содержания метана, а ее спад начинается позже максимума темпов.

Широтное распределение концентрации метана почти не меняется от Южного полюса до 20° ю.ш., а затем концентрация CH_4 повышается и от 40° с.ш. до Северного полюса остается на 8% большей, чем вблизи Южного [14]. Это обстоятельство можно объяснить тем, что основные источники метана в атмосфере находятся в Северном полушарии. Действительно, метан плохо поглощается океаном, а биогенные и антропогенные источники метана находятся в Северном полушарии.

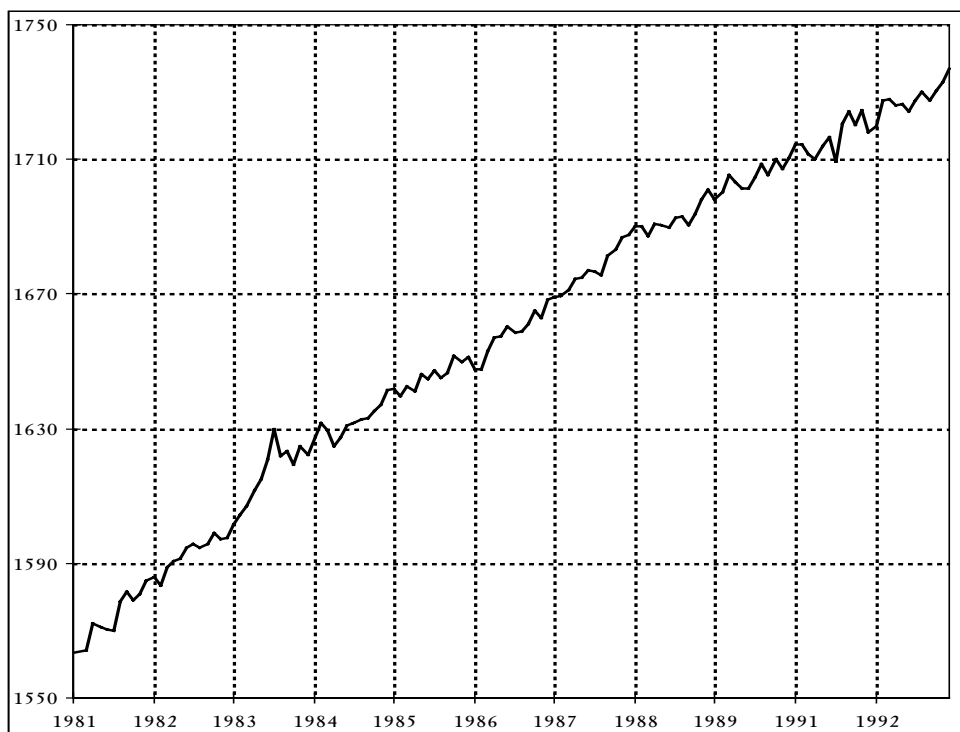


Рис. 1-6. Ход концентрации метана (млрд⁻¹) в атмосфере в 1981–1993 гг. [13]

Обратим внимание на динамику сезонного хода концентрации метана на двух станциях мониторинга (рис. 1-8). Одна станция находится в Северном полушарии, другая – в Южном. Видно, что каждый новый год новая кривая CH_4 расположена выше предыдущей, так же, как и на кривых сезонного хода CO_2 . Это обстоятельство подтверждает постоянное увеличение содержания метана в атмосфере. Заметим, что на станциях в течение года наблюдаются вариации содержания атмосферного метана. При этом минимум концентрации CH_4 приходится на июль в Северном полушарии и на февраль в Южном, то есть так же, как и для CO_2 . Схожая сезонная динамика для CH_4 и CO_2 не может иметь одну причину, т.к. метан не поглощается растительностью.

Потоки метана из различных источников оценены не так точно, как потоки CO_2 . Общее выделение метана в атмосферу в год составляет 700–1000 млн т. При этом около 80% – источники биотического происхождения [5]: 280 млн т – рисовые поля, 130–260 млн т – болота, 10–15 млн т – почвы, 1,25–2,5 млн т – пресные озера, 100–220 млн т – ферментация в кишечнике животных и т.д. Около 100 млн т метана в год поступает в атмосферу в процессе добычи ископаемых топлив.

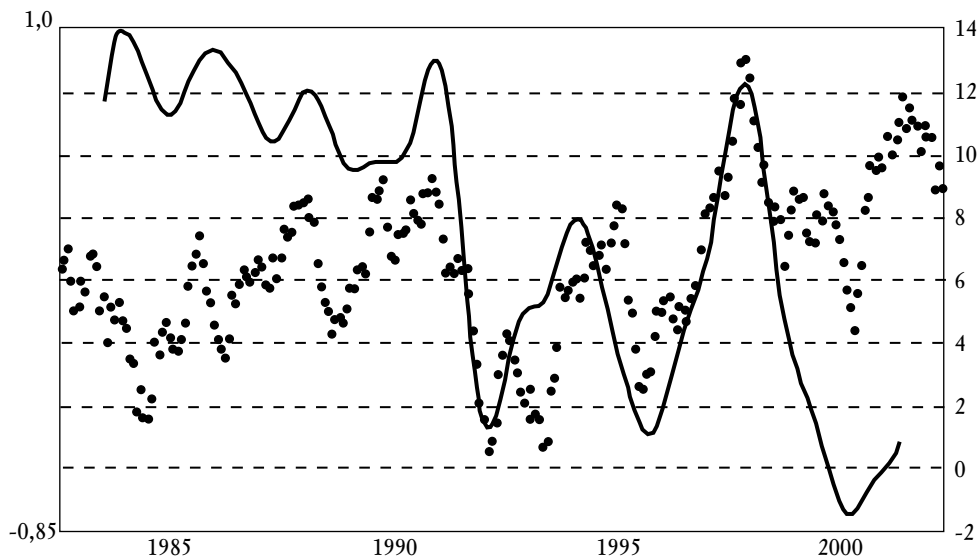


Рис. 1-7. Динамика скорости роста количества метана (сплошная линия, $\text{млрд}^{-1}/\text{год}$, изображено скользящее среднее по 5 месяцам, ось слева) и величина отклонений температуры атмосферы (точки, $^{\circ}\text{C}$, ось справа) в 1985–2000 гг. График взят из [14]

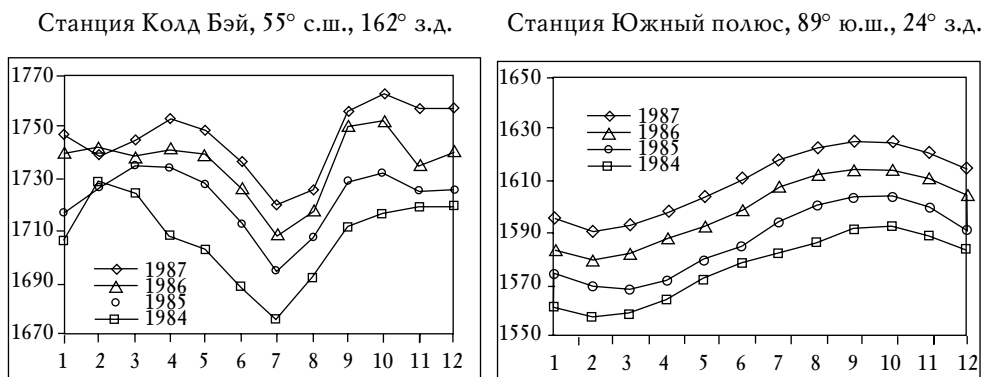
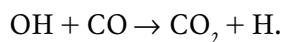
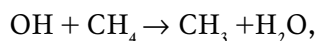


Рис. 1-8. Динамика концентрации атмосферного метана (млрд^{-1}) на станциях мониторинга в 1984–1997 гг.

В отличие от диоксида углерода метан не возвращается из атмосферы в ту среду, в которой образовался. Вступая в химические реакции с газами атмосферы, метан постепенно окисляется до CO_2 .

Характерное время пребывания метана в атмосфере (отношение количества метана к интенсивности его поступления в атмосферу) составляет по разным оценкам от 5 до 12 лет [14]. Химические превращения метана в атмосфере исследованы недостаточно подробно, но известно, что окисление его идет в фотохимических реакциях с участием гидроксильных радикалов. Метан ступенчато окисляется сначала до CO , а затем до CO_2 .

Существует CO – OH – CH_4 цикл, который играет важную роль в процессах окисления CH_4 и CO . Выпишем следующие химические реакции:



Считается, что эти реакции определяют основные стоки CH_4 и CO_2 и что последующее окисление CH_3 является одним из важных источников CO_2 в атмосфере. Кроме того, указанные две реакции являются основными процессами потери OH радикалов в атмосфере. Метан и окись углерода конкурируют за радикалы OH . Радикалы OH образуются в атмосфере в не слишком больших количествах в основном в процессе фотолиза паров воды. Таким образом, одним из важных стоков CH_4 является его связывание в атмосфере в указанных реакциях.

Рассмотрим источники метана, связанные с хозяйственной деятельностью. Рисовые поля, ферментация в кишечнике домашних животных, добыча полезных ископаемых дают около 50% выделений метана в атмосферу. Опишем динамику метана в атмосфере уравнением

$$\frac{dM}{dt} = V - kM,$$

где M – количество метана в атмосфере, V – поток метана в атмосферу, $k = 1/5 - 1/12 \text{ год}^{-1}$ – коэффициент, характеризующий время пребывания метана в атмосфере.

Пусть значение правой части дифференциального уравнения равно нулю, то есть состояние метана в атмосфере равновесное.

Пусть поток V состоит из двух равных потоков: первый не меняется, второй увеличивается в год на 3% (что соответствует темпам роста от хозяйственной деятельности в 1980-е годы). Легко показать, что в этом случае рост количества метана возможен не более чем на 0,3% в год при характерном времени пребывания метана в атмосфере 1/5 и не более чем на 0,12% – при времени пребывания метана в атмосфере 12 лет. Следовательно, наблюдавшийся в 1980-е годы рост концентрации метана на 0,9% в год нельзя объяснить только антропогенными источниками.

Проанализируем причины описанной динамики метана. Во-первых, болота не могут быть стоком метана, так как метан плохо растворим в воде. Сделаем предположение, что одним из стоков CH_4 является его микробиологическое поглощение в почвах. Тогда легко объясняется сезонная динамика содержания метана: летом повышается температура почвы, и микробиологическая активность повышается. Большее значение концентрации метана в Северном полушарии, чем в Южном, как уже говорилось, связано с более мощными его источниками в Северном полушарии: выделение биологическое и антропогенное, связанное, главным образом, с увеличением добычи ископаемых топлив. Уменьшение темпа роста содержания метана в атмосфере объясняется уменьшением добычи ископаемых топлив в этот период и усилением микробиологической активности при повышении температуры.

Корреляция аномалий температуры и скорости роста содержания метана в атмосфере также может быть объяснена наличием биотического стока, когда чем выше температура, тем больше поглощение. Таким образом, основные черты динамики содержания метана в атмосфере можно объяснить с помощью предложенной гипотезы. Нет сомнения, что ее проверка будет возможна при наличии более полных и достоверных данных измерений содержания CH_4 .

Таким образом, поскольку метан не может сохраняться в атмосфере и распадается там, то рост его концентрации в атмосфере не может быть значительным, а поскольку последние два десятилетия рост его концентрации в атмосфере значительно затормозился, то можно считать, что метан не может обеспечить наблюдающееся в настоящее время глобальное потепление атмосферы.

Рассмотрим состояние и прогнозы глобальных биосферных процессов, полученные с помощью математической модели глобального цикла диоксида углерода.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ЦИКЛА УГЛЕРОДА

Как уже говорилось, мы будем исходить из принципа предосторожности и для математических расчетов будем полагать, что рост температуры связан с парниковым эффектом диоксида углерода.

Расчеты динамики биосферных процессов с учетом влияния хозяйственной деятельности для всего мира, стран и регионов были проведены в ВЦ РАН с помощью пространственной математической модели глобального цикла углерода в системе «атмосфера–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. Модель описывает процессы роста и отмирания растительности, накопления и разложения гумуса в тер-

минах обмена углеродом между атмосферой, растениями и гумусом почвы в каждой ячейке суши. Климат в данной ячейке характеризуется среднегодовой температурой воздуха у поверхности земли и количеством осадков за год. Значения температуры и осадков для каждой ячейки суши в зависимости от количества углерода в атмосфере (парниковый эффект) рассчитываются с помощью климатической модели общей циркуляции атмосферы и океана [2]. Модель была дополнена моделью цикла углерода в системе «атмосфера–океан» [3].

Модель содержит более 200 тысяч дифференциальных уравнений. Компьютерные карты годичной продукции растительности суши и гумуса адекватно воспроизводят действительность. Например, в тропических регионах продукция максимальна, в пустынях и в приполярных областях она минимальна. Количество углерода в гумусе почв максимально в российских черноземах и минимально – в пустынях и приполярных областях.

Моделировалась динамика биосферы с 1860 по 2100 гг. Был принят следующий базовый сценарий. Антропогенное поступление CO_2 в атмосферу происходит в результате промышленных выбросов CO_2 от сжигания ископаемых органических топлив [14], вырубки лесов, эрозии почв. После 2004 г. темпы роста промышленных выбросов сохраняются такими же, какими они были предыдущее десятилетие (1,618% в год). 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 не поглощается растениями и остается в атмосфере. Эрозия почв связана в первую очередь с сельскохозяйственной эксплуатацией земель, соответствующее количество CO_2 также поступает в атмосферу. Эрозия начинается в 1860 г. и составляет в год 0,15%. Для вырубки и эрозии задаются соответствующие пространственные распределения.

Результаты базового расчета динамики биосферных параметров показаны на рис. 1-9. Согласно расчетам, в атмосфере происходил рост содержания CO_2 . Биосферная реакция на воздействия в целом замедляла его рост и приводила к росту продуктивности растений суши и увеличению их биомассы. Количество гумуса почвы сначала снижалось, а затем, по мере проявления компенсаторных свойств биосферы, увеличивалось.

Согласно расчету, к 2100 г. следует ожидать роста концентрации углекислого газа в атмосфере Земли в среднем в 2,17 раза и повышения средней температуры атмосферы на 1,77° С по сравнению с их значениями в 1860 г.

Отметим, что, по расчетам, экосистемы суши в 2007 г. поглотили 2,22 Гт С/год, а океан поглотил 1,72 Гт С/год. Видно, что экосистемы суши поглощают CO_2 несколько больше, чем океан. Данные о поглощении CO_2 различаются в разных моделях глобального цикла углерода в системе «атмосфера–наземные экосистемы–океан», однако эти различия не превышают неопределенности знания параметров циклов, а суммарное количество поглощения CO_2 экосистемами суши и океаном, как правило, всегда постоянно (и с точностью

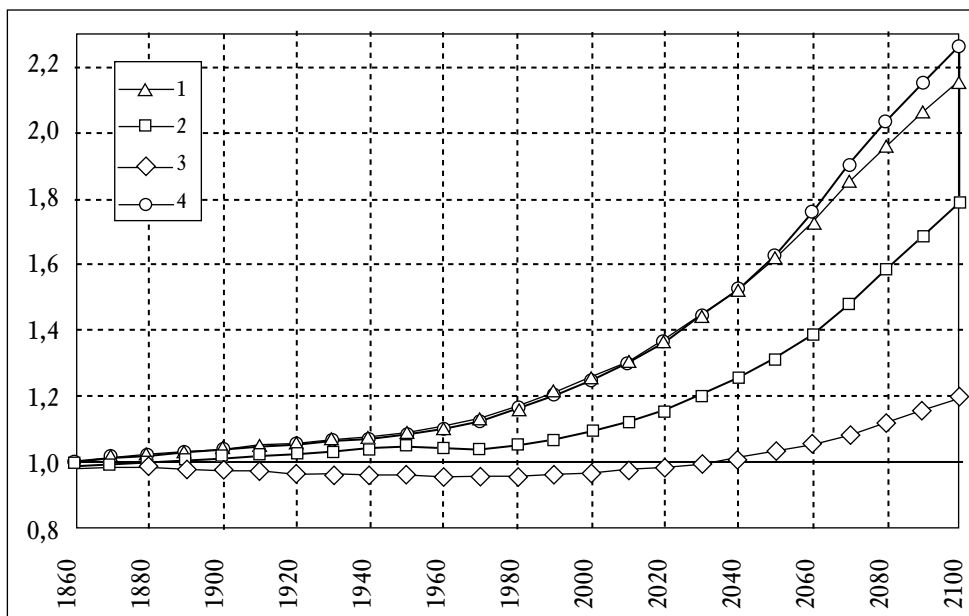


Рис. 1-9. Результаты расчета динамики относительных значений углерода в атмосфере (1), в фитомассе растений (2), гумусе почв (3) и годичной продукции (4) в период 1860–2100 гг.

до доли процента равно половине годичного индустриального выброса), т.к. модели проходят идентификацию, при которой это равенство суммы принципиально.

В большинстве стран индустриальные выбросы углекислого газа существенно превышают их поглощение биотой (растительностью и гумусом) (рис. 1-10). Наибольшие выбросы в 2004 г. были у США, Китая и России. Больше всех стран поглощает CO_2 Россия, за ней идут Канада, Бразилия и Австралия. У большинства стран выбросы превышают поглощение, а у таких стран, как Канада, Бразилия, Австралия, Швеция, Аргентина и др. поглощение выбросов больше, чем выделение.

Выделение CO_2 в атмосферу территорией страны равно разности индустриальных выбросов и поглощения экосистемами суши. Проведенные нами расчеты (см. рис. 1-10) показали, что в 2004 г. для России поглощение было чуть меньше (0,2%), чем выбросы. Поглощение CO_2 экосистемами суши на территории страны увеличивалось последнее десятилетие за счет роста концентрации CO_2 в атмосфере и за счет роста температуры атмосферы, а выбросы начали слабо расти лишь после 1999 г. в результате выправления экономики (рис. 1-11).

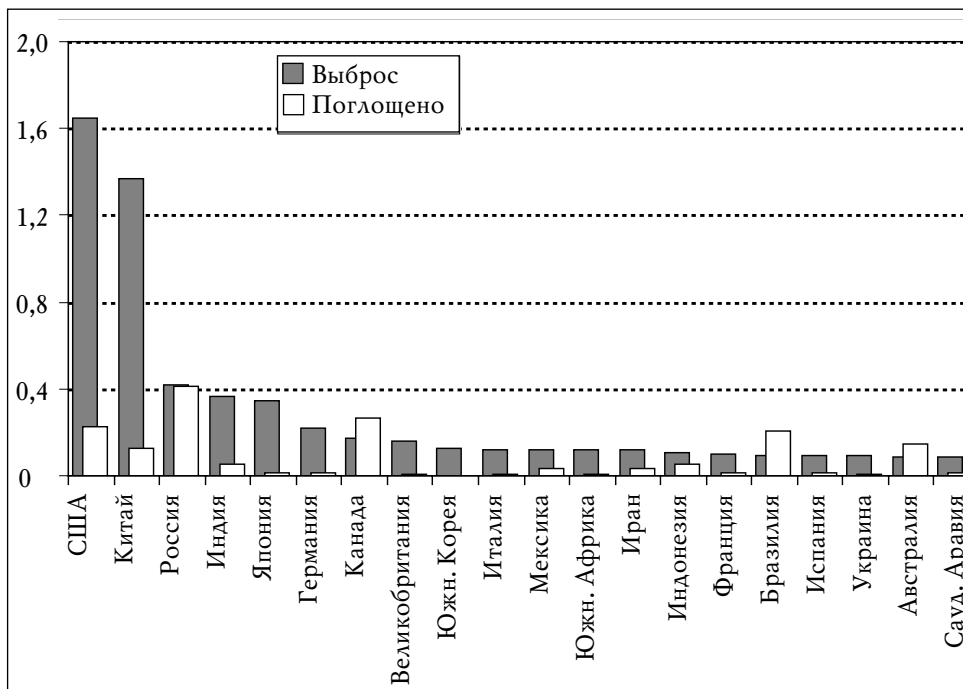


Рис. 1-10. Сравнение промышленных выбросов и поглощения углерода экосистемами крупнейших стран – выделителей CO₂ в 2004 г. (Гт С/год)

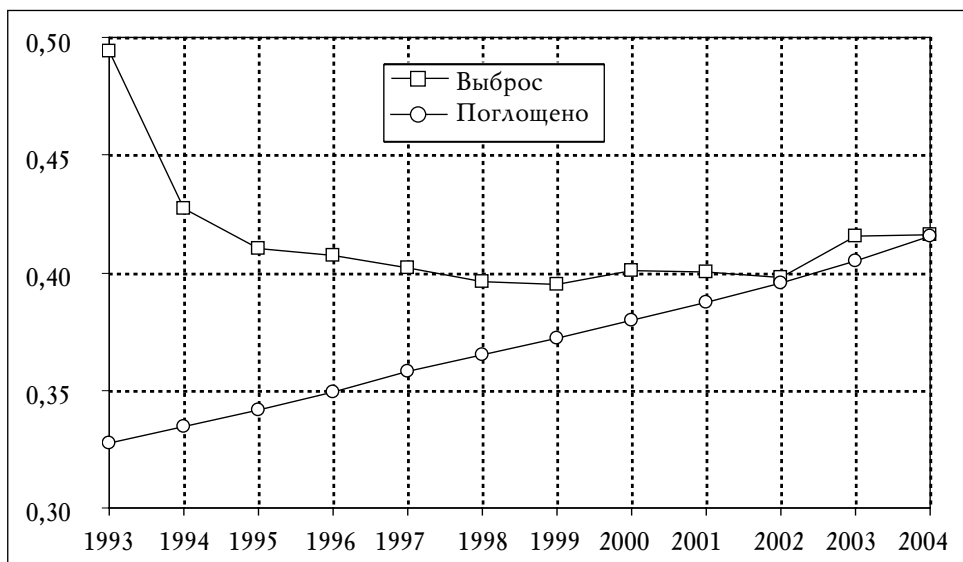


Рис. 1-11. Динамика выделения и поглощения CO₂ (Гт С/год) в России в 1993–2004 гг.

Таким образом, наибольшее возмущение естественной атмосферы происходит от самых промышленно развитых стран (США, Япония) и стран с наибольшим населением (Китай, Индия). Именно эти страны, а не Россия, несут главную ответственность за быстрый рост содержания CO_2 в атмосфере.

В теперешнем виде Киотский протокол не учитывает, что в реальности важны не абсолютные значения промышленных выбросов двуокиси углерода странами, а разность выбросов и поглощения экосистемами суши. В разное время эту идею пытались внести в Протокол, но она не имела успеха. Для Бразилии, Австралии, Аргентины, Канады, Швеции, Аргентины, у которых поглощение CO_2 больше, чем промышленные выбросы, такая постановка вопроса была бы справедлива и выгодна. К этим же странам относится, безусловно, и Россия.

ОГРАНИЧЕНИЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ. ВЫПОЛНЕНИЕ КИОТСКОГО ПРОТОКОЛА К РАМОЧНОЙ КОНВЕНЦИИ ООН ОБ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Согласно Киотскому протоколу (1997 г.) к Рамочной конвенции ООН об изменении климата (1992 г.) страны-участницы к 2010 г. должны уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу до уровня на 5% ниже промышленных выбросов CO_2 1990 г. Выбросы стран, участвовавших в подписании протокола, в 1990 г. составляли около 61% всех выбросов CO_2 . Рассмотрим, какой эффект могут дать различные ограничения, приводящие к уменьшению выбросов CO_2 и, следовательно, к торможению глобального потепления. На рис. 1-12 представлены результаты расчетов динамики содержания CO_2 в атмосфере в 2000-2100 гг. Рассматривались следующие сценарии:

- Изложенный выше базовый сценарий антропогенных воздействий (на рисунке – «Нет ограничения выбросов»).
- Базовый сценарий, но начиная с 2010 г. вырубка лесов и эрозия почв прекращаются («Прекращение вырубки и эрозии»).
- Базовый сценарий, но начиная с 2010 г. страны за исключением США выполняют Киотский протокол («Киото протокол при неучастии США»).
- Базовый сценарий, но начиная с 2010 г. страны за исключением США выполняют Киотский протокол, при этом страны ЕС к 2020 г. доводят свои выбросы до значений на 20% меньше уровня 1990 г. («Киото и ЕС при неучастии США»).
- Базовый сценарий, но начиная с 2010 г. страны выполняют Киотский протокол («Киото протокол выполняется»).
- Базовый сценарий, но начиная с 2010 г. страны выполняют Киотский протокол, а страны ЕС к 2020 г. доводят свои выбросы до значений на 20% меньше уровня 1990 г. («Киото протокол и ЕС выполняются»).
- Базовый сценарий, но начиная с 2010 г. все страны мира выполняют Рамочную конвенцию о стабилизации климата (сокращают выбросы до величины на 5% меньше, чем в 1990 г.) («Все страны выполняют Конвенцию»).

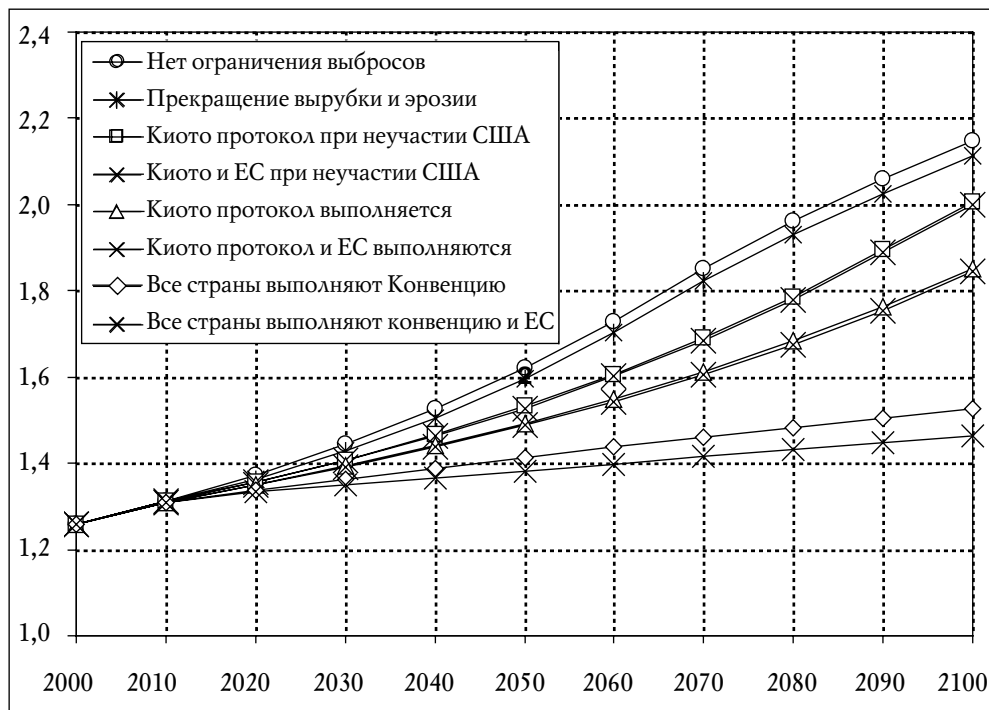


Рис. 1-12. Расчет изменения содержания CO₂ в атмосфере в результате выполнения различных сценариев уменьшения выбросов. Подробно описание сценариев приведено в тексте. 4 группы кривых и соответствующие им надписи в легенде расположены по порядку сверху вниз. По вертикальной оси отложены относительные значения углерода в атмосфере (по отношению к 1860 г.)

– Базовый сценарий, но начиная с 2010 г. все страны мира выполняют Рамочную конвенцию о стабилизации климата (сокращают выбросы до величины на 5% меньше, чем в 1990 г.) и все страны, включая страны ЕС, начиная с 2020 г. доводят свои выбросы до значений на 20% меньше уровня 1990 г. («Все страны выполняют Конвенцию и ЕС»)

Самым лучшим было бы выполнение Рамочной конвенции о стабилизации климата всеми странами (две нижние кривые на рис. 1-12). Но это не соответствует условиям Киотского протокола и очевидно, что на сегодняшний день это нереально.

Выполнение Киотского протокола приведет к тому, что концентрация CO₂ в атмосфере снизится на 16% по сравнению с невыполнением ограничений к 2100 г., то есть эффект не очень сильный. Решение стран ЕС дополнительно к этому уменьшить выбросы CO₂ приведет к сокращению концентрации диоксида углерода лишь на 1%. Отказ США участвовать в выполнении протокола

приведет к сокращению концентрации CO_2 лишь на 7,4% по сравнению с отсутствием ограничений. При неучастии США выполнение решения странами ЕС дополнительно сократит содержание CO_2 всего на 2,8%.

Влияние прекращения вырубки и эрозии дает самый слабый эффект – уменьшение концентрации CO_2 на 1,7% по сравнению с базовым сценарием.

Для сравнения значимости разных видов ограничений выбросов примем за 100% сокращение роста содержания CO_2 в случае выполнения Киотского протокола к 2100 г. по сравнению с базовым сценарием (рис. 1-13). Тогда выполнение странами ЕС своего решения по сокращению выбросов к 2020 г. добавит 3% к замедлению роста содержания CO_2 . Это весьма малая величина.

Выполнение Киотского протокола при неучастии США дает 48% сокращения прироста содержания CO_2 – видно, что и это очень небольшая величина, и остается надеяться на то, что США, выполняя свою собственную программу по ограничению выбросов, добьются заметных успехов. Дополнительное сокращение выбросов странами ЕС при неучастии США добавляет еще 2% (с 48% до 50%), что также является незначительной величиной. Прекращение вырубки лесов и эрозии почв даст лишь 12% уменьшения прироста CO_2 по сравнению с базовым сценарием (отсутствием ограничений).

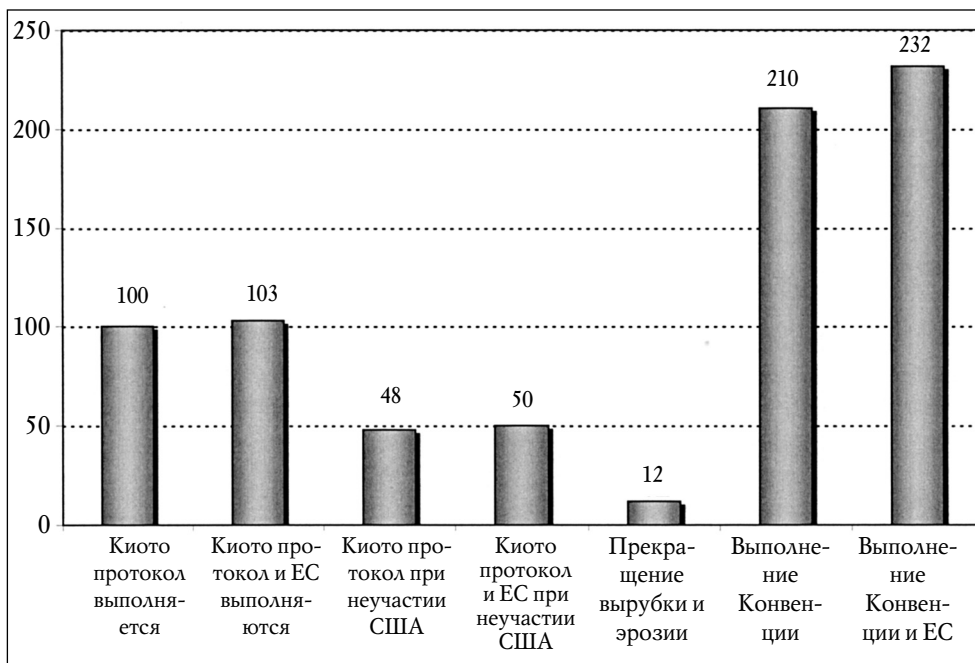


Рис. 1-13. Снижение концентрации CO_2 в атмосфере при выполнении Киотского протокола и Рамочной конвенции о стабилизации климата (%).

За 100% принята разность концентраций CO_2 в 2100 г. по базовому сценарию и в случае выполнения Киотского протокола

Как уже говорилось, самый сильный эффект давало бы выполнение Рамочной конвенции о стабилизации климата всеми странами мира. При этом сокращение концентрации CO_2 достигло бы 210%, а при выполнении странами ЕС своего намерения это добавило бы еще 22%. Однако данные сценарии не предполагается выполнять.

Мы видим, что выполнение Киотского протокола даст не очень большое ограничение роста содержания CO_2 и, соответственно, замедление глобального потепления. Можно надеяться, что страны – участницы переговоров в Киото руководствовались не столько результатами численных прогнозов на моделях, сколько принципом предосторожности, и что значение принятого ограничения будет особенно важно как для последующих сокращений выбросов CO_2 , так и для серьезного совершенствования технологий в сфере топливной энергетики и развития альтернативных источников энергии.

Россия в конце 2004 г. подписала Киотский протокол, и можно полагать, что участие в протоколе сулит ей политические и экономические выгоды.

Отметим, что Протокол содержит конкретные ограничения на выбросы CO_2 лишь для некоторых стран и не предусматривает их для многих других. Глобальное уменьшение темпов роста выбросов CO_2 в атмосферу, достигнутое в недавние годы, было определено успешным экономическим развитием в отдельных развитых странах, а также спадом в странах с переходной экономикой. В некоторых странах с невысоким уровнем развития и большим населением (табл. 1-1) темпы роста индустриальных выбросов CO_2 высоки – от 3,1% до 9,8% в год и опережают темпы прироста численности населения.

Таблица 1-1

Параметры развития некоторых стран с высокой численностью населения в 2000 г.

Страна	Время усреднения до 2000 г., годы (в случае прироста населения)	Население, млн чел.	Прирост населения, %/год	Выбросы CO_2 , млрд. т углерода в год	Средний рост выбросов CO_2 , %/год	ВВП на душу населения, \$ США
Индия	5	1015,9	1,60	0,292	3,1	450
Индонезия	5	206,3	1,31	0,074	6,2	570
Бразилия	5	170,1	1,34	0,084	3,8	3610
Пакистан	3	138,1	2,41	0,029	3,7	450
Бангладеш	3	131,1	1,74	0,008	5,0	380
Нигерия	3	126,9	2,31	0,010	7,1	270
Мексика	3	98,0	1,47	0,116	3,1	5100
Вьетнам	3	78,5	1,27	0,016	9,8	390
Филиппины	5	76,6	2,18	0,021	3,8	1030

Весьма вероятно, что через 10–30 лет в этих странах рост экономического развития и численность населения станут настолько высокими, что не будет другой альтернативы, кроме развития энергетики и увеличения выбросов CO_2 . В частности, если принять, что темпы роста выбросов в указанных девяти странах сохранятся, то к 2060 г. их суммарный выброс будет равным 11,6 Гт С/год, т.е. в 1,47 раза больше суммарного выброса всех стран мира в 2004 г. При таких условиях эффективность ограничений Киотского протокола и, соответственно, торможение глобального потепления могут оказаться незначительными.

ВЫПОЛНЕНИЕ ПРИНЦИПА ЛЕ-ШАТЕЛЬЕ В БИОСФЕРЕ. ВОЗМОЖНОСТЬ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ БИОСФЕРЫ

Понятие устойчивого развития тесно связано со способностью сложной системы ослаблять воздействия на нее. Чем больше выражена эта способность у биосферы, тем в большей степени она компенсирует антропогенные воздействия. Если же эта способность утрачена, частично или полностью, то устойчивое развитие уменьшается или прекращается. Из физики и химии в глобальную экологию пришел принцип Ле-Шателье, который выражает способность системы уменьшать внешние воздействия на нее: внешнее воздействие, выводящее систему из равновесия, стимулирует в ней процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия.

Рассмотрим выполнение принципа Ле-Шателье в биосфере в глобальном плане. Вычислительные эксперименты показывают, что в настоящее время в диапазоне возможных параметров системы принцип Ле-Шателье выполняется: экосистемы суши и океан поглощают часть промышленных выбросов CO_2 , тем самым стабилизируя климат³. Однако при достаточно больших воздействиях возможно нарушение этой способности.

Выше мы использовали линейную зависимость годичной продукции растительности суши от концентрации атмосферной CO_2 . Теперь рассмотрим базовый сценарий, но тот случай, когда проявляется нелинейная зависимость годичной продукции (рис. 1-14) и при превышении концентрации CO_2 некоторого предела (в 1,7 раза) продукция растительности начинает уменьшаться (такие эффекты получались в экспериментах над растениями в фитотронах). Наличие в параметрах модели некоторых неопределенностей дает нам основание рассматривать линейный и нелинейный варианты развития биосферы.

Расчеты показывают, что в случае нелинейной зависимости, если Киотский протокол соблюдается всеми странами, то до 2100 г. предельное значение концентрации CO_2 не достигается и принцип Ле-Шателье выполняется (рис. 1-14, А). Если же протокол не соблюдается, то в период между 2050 и 2100 гг.

³ Расчет показывает, что в настоящее время экосистемы суши вместе с океаном поглощают около половины промышленных выбросов CO_2 .

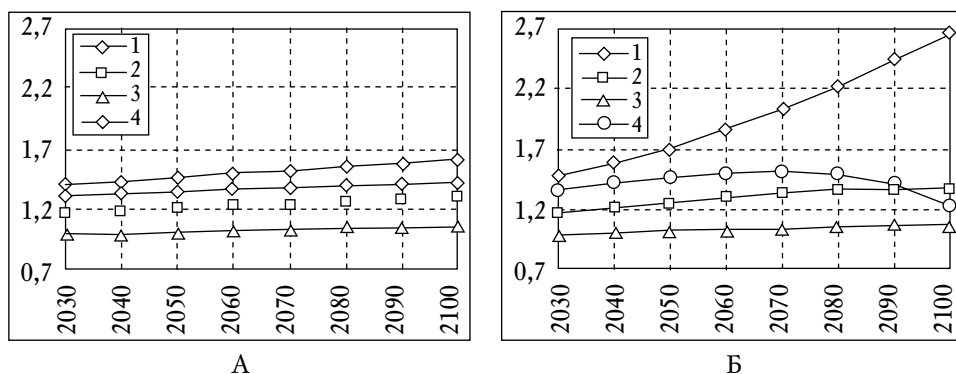


Рис. 1-14. Расчет двух вариантов динамики относительных значений углерода при нелинейной зависимости годичной продукции от концентрации CO_2 в атмосфере (1), фитомассы растений (2), гумуса (3) и продуктивности (4) в 1860–2100 гг. А – протокол Киото выполняется всеми странами, Б – протокол Киото не выполняется. По вертикальной оси отложены значения углерода по отношению к 1860 г.

возможно нарушение принципа Ле-Шателье: в рассматриваемом расчете годичная продукция начинает убывать, соответственно начинает уменьшаться биомасса растений и количество гумуса, а CO_2 атмосферы и температура увеличиваются значительно сильнее, чем в первом случае (рис. 1-14, Б).

Таким образом, мы можем утверждать, что в настоящее время в глобальном аспекте биосфера отвечает на рассмотренные воздействия в соответствии с принципом Ле-Шателье, частично компенсирует их результаты и глобальное потепление замедляется. Однако начиная с 2050 г., если не будут приняты меры по ограничению выбросов в атмосферу, не исключена возможность прекращения компенсации биосферой антропогенных воздействий, нарушения устойчивого развития биосферы и, следовательно, увеличения глобального потепления. Если же Киотский протокол будет выполняться всеми странами мира, то такой опасности нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы проанализировали возможные причины глобального потепления атмосферы. Из всех причин наиболее вероятной является рост количества диоксида углерода в атмосфере, связанный со сжиганием ископаемых органических топлив, вырубкой лесов и эрозией почв. Эта характеристика выбрана, во-первых, исходя из принципа предосторожности, во-вторых, она наиболее значима с точки зрения физики и возможности описания ее роли с помощью климатических математических моделей.

Человечество на уровне глав государств (Конференция ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро в 1992 г.) признало глобальную

зависимость от природы и необходимость ограничения и совершенствования экономической деятельности с целью эффективного сосуществования с природой. Многие страны предпринимают шаги с целью уменьшения глобального потепления, ограничивая выбросы в атмосферу диоксида углерода и отчасти других парниковых газов (Киотский протокол 1997 г. и последующие решения). При этом принимаются меры по совершенствованию технологий сжигания топлив и развитию альтернативных источников энергии.

Согласно расчетам, Россия находится в исключительном положении среди стран мира: экосистемы ее территории в большей степени, чем других стран, поглощают CO₂ атмосферы, в то же время промышленные выбросы с ее территории практически равны поглощению. Следовательно, Россия не ответственна за происходящий рост содержания CO₂ в атмосфере.

На основе математического моделирования были оценены последствия сокращения выбросов диоксида углерода и показано, что это позволит в некоторой степени снизить скорость роста содержания диоксида углерода в атмосфере. Предполагаемое уменьшение будет не слишком велико, однако, как показывают расчеты на математической модели глобального цикла углерода, если не будут приняты меры по ограничению выбросов в атмосферу, не исключена возможность, начиная с 2050 г., прекращения компенсации биосферой выбросов диоксида углерода, нарушение устойчивого развития биосферы и значительное увеличение глобального потепления.

Работа выполнена при поддержке РФФИ
(гранты 05-01-00649 и 08-01-00607)

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад Конференции Организации Объединенных Наций по окружающей среде и развитию. – Рио-де-Жанейро, 3–14 июня 1992 года, Том 1, Резолюции, принятые на Конференции. Приложение 1 A/CONF. 151/26/REV.1 (VOL. I).
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. Физические основы климата и его изменений. // Национальная программа СССР ПИГАП-климат. – М., 1977.
5. Ehhalt D.H. The atmospheric cycle of methane. // Microbial production and utilization of gases. – Eds.: Schlegel H.G., Gottschalk O., Pfennig N. – 1986. – P. 13–22.
6. IPCC, a: Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton J.T., Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskel, and C.A. Johnson eds.). Cambridge University Press Cambridge and New York, 2001. – 881 p.
7. IPCC, b: Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.

Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken, and K.S. White eds.). Cambridge University Press, Cambridge and New York. 2001. – 1032 p.

8. Jones P.D., Parker D.E., Osborn T.J., and Briffa K.R. Global temperature anomalies in 1856-1999 // TRENDS'93: A Compendium of Data on Global Change, 1994, Boden T.A., Kaiser D.P., Sepanski R.J., and Stoss F.W. (eds.). Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, Updated data of 2001. (см. <http://cdiac.ornl.gov>)

9. Marland G., Boden T., and Andres B. Global CO₂ Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751–2004. NDP-030. – Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 2007. <http://cdiac.ornl.gov>.

10. Rasmussen R.A. , Khalil A.K. Atmospheric methane (CH₄): trends and seasonal cycles. // Journal of geophysical research. – 1981. – V. 86. – No C. 10. – P. 9826–9832.

11. Schlesinger M.E., Andronova N.G. Climate Sensitivity: Uncertainty and Learning. // World Climate Change Conference, Moscow, Sep. 29 – Oct. 3, 2003. – P. 45–46.

12. Suess H.E. Bristlecone pine calibration of the radiocarbon time scale from 4100 B.C. to 1500 B.C. // In: Radioactive Dating and Methods of Low-Level Counting. Vienna: IAEA. 1967. – P. 143–151.

13. TRENDS'93: A Compendium of Data on Global Change. // Boden T.A., Kaiser D.P., Sepanski R.J., Stoss F.W. (eds.). Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 1994. – P. 950.

14. WMO WDCGGases Data Summary. WDCGG No. 28. GAW Data. Volume IV-Greenhouse and Other Atmospheric Gases. // Japan meteorological Agency in Co-operation with World Meteorological Organization. 2004. – P. 98.