

DOI: 10.7868/S0869587313020230

Глобальное потепление — одна из наиболее обсуждаемых экологических проблем. Активно функционируют системы торговли квотами на выбросы парниковых газов, во многих странах разворачиваются программы адаптации к новым климатическим условиям. При этом темпы роста глобальной температуры в XXI в. снизились, а голоса противников концепции антропогенного потепления стали громче. Кому же верить — сторонникам или противникам глобального потепления и к чему готовиться — к жаре или холоду?

ЕСТЕСТВЕННАЯ И АНТРОПОГЕННАЯ КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Д.Г. Замолодчиков

По степени воздействия на мировое общественное мнение, политику и экономику проблема глобального потепления не имеет равных среди других экологических проблем. В 1992 г. была выработана Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН), закрепившая основные положения климатической политики: современное потепление негативно сказывается на существовании общества и природы; основной причиной потепления является рост концентрации парниковых газов атмосферы; этот рост определяется увеличением антропогенных эмиссий, в первую очередь от сжигания ископаемого топлива; задача сохранения глобального климата требует сокращения антропогенных эмиссий парниковых газов [1]. С разной степенью детализации перечисленные положения растиражированы в десятках тысяч научных публикаций. Наиболее последовательно и всесторонне концепция антропогенного потепления рассматривается в оценочных и специальных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [2, 3 и др.].

Проблемы потепления климата неизменно занимают видное место в средствах массовой информации, причём такие сообщения зачастую имеют сенсационный или даже скандальный оттенок. Достаточно вспомнить “климатгейт” 2009 г., вызванный электронной утечкой архива с перепиской и предварительными результатами обработки данных из отдела климатологии университета Восточной Англии. Опубликованная переписка включала обмен мнениями по ряду проблемных вопросов климатических изменений между видными исследователями, входившими в состав МГЭИК. Наличие подобных вопросов дало повод к критике МГЭИК со стороны СМИ, обвинениям в тенденциозном представлении данных и сокрытии сведений о реальной климатической ситуации.

Критика антропогенной концепции потепления вообще и выводов МГЭИК в частности звучит не только в СМИ, но и со страниц научных публикаций, авторы которых являются серьёзными экспертами в разных областях знаний. Например, в серии работ группы исследователей из Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) [4] современная динамика температуры связывается с наличием двух естественных циклов — 60-летнего и 200-летнего. В механизм формирования циклов вовлечено ветровое поле планеты, а именно так называемые циркумполярные вихри, определяющие западно-восточные переносы воздуха в тропосфере умеренных широт. 60-летний цикл связан с изменениями интенсивности вихрей (в периоды потепления происходит их углубление), а 200-летний — с модификациями их пространственного положения (при потеплении они расширяются). Внешняя причина возникновения цикличности



ЗАМОЛОДЧИКОВ Дмитрий Геннадьевич — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, заведующий кафедрой общей экологии биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

связана с ритмикой солнечной активности, причём имеется сдвиг по фазе на 20–25 лет между вековой динамикой солнечных пятен и состоянием циркумполярных вихрей. Согласно цитируемым работам, сложение циклических компонент на грани XX и XXI вв. уже привело к смене потепления похолоданием, подтверждением чему служит тенденция к снижению глобальной температуры во второй половине 2000-х годов. Сходные взгляды разделяет и ряд других исследователей [5, 6], хотя в выделении периодов солнечной ритмики и описании медиаторных климатических механизмов имеются значительные расхождения.

Ныне лицам, принимающим решения, и остальной заинтересованной публике приходится выбирать между двумя противоположными концепциями — антропогенного потепления и естественной цикличности климата, причём значимость выбора очень высока. Нужно ли сокращать промышленные эмиссии парниковых газов, неизбежно повышая экономические издержки, или это затратная, но совершенно бесполезная борьба с естественными факторами космического масштаба? Необходимо ли модифицировать планы по экономическому освоению северных регионов в связи с деградацией мерзлоты и льдов Северного Ледовитого океана или, наоборот, ориентироваться на развитие наземных транспортных систем в условиях развития похолодания? К чему адаптировать сельское и лесное хозяйство — к жаре или холоду?

Цель данной статьи состоит в сравнительном анализе степени соответствия альтернативных концепций климатических изменений имеющимся сведениям по динамике глобальной температуры. Такое сравнение будет осуществлено с помощью простых приёмов статистической обработки данных. Подчеркну, что целью работы не ставится непременно доказательство выбранной априори концепции, а сделанные заключения являются следствием сбалансированного анализа. Такой подход отличает настоящую работу от большинства сходных по проблематике, в которых авторы заранее стоят на той или иной позиции, что приводит к усилению апологетики собственных взглядов и акцентированной критике альтернативной концепции.

* * *

Основными источниками исходных сведений служили: данные по аномалиям глобальной температуры за 1850–2010 гг. Центра анализа информации по диоксиду углерода (Оак Ридж, США) [7], исторические сведения по динамике атмосферной концентрации CO_2 за 1850–1958 гг. [8] и данные мониторинга атмосферной концентрации CO_2 по станции Мауна-Лоа [9] Национального управления океанических и атмосферных

исследований (Боулдер, США). Отметим, что как сторонники, так и противники концепции антропогенного потепления не высказывают сомнений в корректности цитируемых наборов данных, расхождения лежат в сфере их интерпретации. При последующей обработке данные по температурным аномалиям были пересчитаны в значения среднегодовой температуры по Цельсию. Дополнительные сведения, использованные при интерпретации выявленных тенденций и осуществлении прогнозных расчётов, представлены информацией Сети палеоклиматических реконструкций Национального управления океанических и атмосферных исследований (Боулдер, США) [10], сведениями по глобальной динамике эмиссий CO_2 от сжигания ископаемого топлива Центра анализа информации по диоксиду углерода (Оак Ридж, США) [11] и прогнозными сценариями антропогенных эмиссий и атмосферных концентраций CO_2 , предложенными МГЭИК [12].

Статистическая обработка данных состояла в построении нелинейных регрессионных моделей методом минимальных квадратов при помощи пакета Statistica 6.1 (Stat Soft Inc., USA). Процедуры нелинейной оценки при сложных формах анализируемых уравнений и высокой дисперсии исходных данных могут приводить к обнаружению нескольких локальных минимумов остаточной дисперсии. Для нахождения уравнения с наименьшей величиной остаточной дисперсии проводили вычисления с разными наборами стартовых значений параметров. В окончательную форму включали лишь те параметры, уровень значимости которых соответствовал $P \leq 0.05$ (за исключением одного специально оговоренного случая). При осуществлении регрессионной оценки не использовали приёмы, связанные с начальной фиксацией значений отдельных параметров.

Рассмотрение динамики глобальной температуры приземного слоя воздуха за 1850–2010 гг. (рис. 1) позволяет выделить ряд специфических черт. Во-первых, это ярко выраженная в 1910–2010 гг. тенденция к росту температуры. Именно эта тенденция послужила основой для формирования с начала 1970-х годов концепции антропогенного потепления и последующего развития системы действий по его предотвращению. Напомним, что в соответствии с концепцией антропогенного потепления тренд к увеличению глобальной температуры объясняется повышением концентрации углекислого и прочих парниковых газов в атмосфере. Второй особенностью динамики является локальный максимум температуры, пришедшийся на 1940-е годы. Можно также отметить менее выраженные максимумы в 1880-х и, вероятно, в первой половине 2000-х годов. Наличие этих трёх максимумов объясняется сторонниками концепции естественных изменений как проявление 60–70-летних циклов [4, 5]. Третья

особенность, проявляющаяся на линии 5-летнего скользящего среднего цикла, состоит в фиксации локальных максимумов температуры с периодичностью, приблизительно равной 11 годам. Эта особенность объясняется 11-летним солнечным циклом. Отметим, что исследования связи погодных вариаций с этим циклом насчитывают долгую историю, а сами связи достоверно устанавливаются в современных работах по энергобалансу земной атмосферы [13 и др.].

Сначала разделим точку зрения сторонников концепции антропогенного потепления и предложим уравнение, которое способно воспроизвести отмеченные особенности динамики глобальной температуры. При этом учтём, что зависимость температуры от концентрации CO_2 нелинейна. Дело в том, что основная полоса поглощения длинноволнового спектра молекулами CO_2 ограничена и находится в пределах 4.2–4.3 мкм. Исчерпание этой полосы происходит уже при небольших концентрациях CO_2 в воздухе. При дальнейшем увеличении концентрации газа поглощение излучения растёт за счёт краевых частей (крыльев) полосы, но чем дальше от основной полосы, тем менее эффективно молекулы CO_2 удерживают излучение. Таким образом, способность углекислого газа к задержке длинноволнового излучения снижается по мере увеличения его атмосферной концентрации, что приводит к логарифмической связи между тепличным эффектом и концентрацией CO_2 . С учётом данного факта для описания динамики глобальной температуры можно предложить следующее уравнение:

$$T = a + b \ln(\text{CO}_2) + c_1 \sin(c_2 + c_3 Y) + d_1 \sin(d_2 + d_3 Y), \quad (1)$$

где T — средняя глобальная температура, °C; CO_2 — концентрация углекислого газа в атмосфере, ppm; Y — порядковый номер года; $a, b, c_1, c_2, c_3, d_1, d_2, d_3$ — параметры. Все параметры имеют чёткую физическую интерпретацию: a — средняя глобальная температура без учёта парникового влияния углекислого газа, °C; b — парниковый эффект натурального логарифма концентрации углекислого газа, °C ppm⁻¹; c_1 и d_1 — полуразмах колебаний двух циклических процессов, °C; c_2 и d_2 — сдвиг фазы цикла относительно начала номера стартового года; c_3 и d_3 — характеристики периода циклов (выраженный в годах период равен отношению 2π к c_3 или d_3).

Исходная информация по зависимой T и одной из независимых Y переменных уравнения (1) представлена на рисунке 1. Динамика второй независимой переменной (CO_2) показана на рисунке 2. Для этой величины характерен ускоряющийся рост от 287 ppm в 1850 г. до 390 ppm в 2010 г. Причиной этого роста являются антропогенные

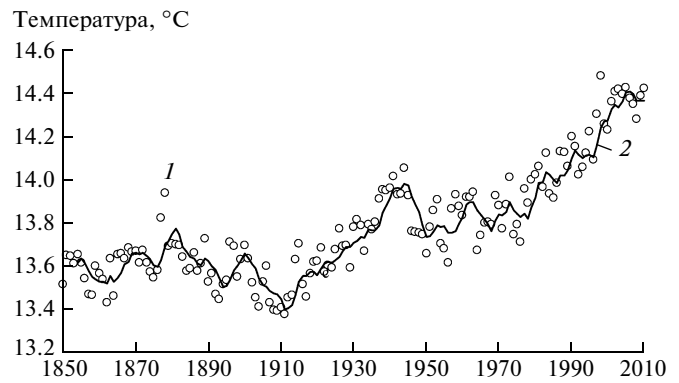


Рис. 1. Динамика среднегодовой глобальной температуры за 1850–2010 гг.

1 — данные инструментальных измерений [7], 2 — 5-летнее скользящее среднее значение

эмиссии углекислого газа, в основном связанные со сжиганием ископаемого топлива и дополняемые изменениями землепользования (сведение лесов), а также сельским хозяйством (потери гумуса пахотными почвами). В некоторых работах можно встретить указания на то, что современный рост концентрации CO_2 обусловлен его эмиссией океанами, поскольку увеличение температуры воды снижает растворимость углекислого газа [14]. Этот тезис не выдерживает критики. Достаточно сравнить годовые величины антропогенных эмиссий и изменений запаса CO_2 атмосферы, выраженные в одинаковых единицах (рис. 2). Изменение запаса CO_2 атмосферы приблизительно в 2 раза меньше годовой антропогенной эмиссии, следовательно, глобальная природная среда, включающая океаны, поверхность суши и верхние оболочки литосферы, является

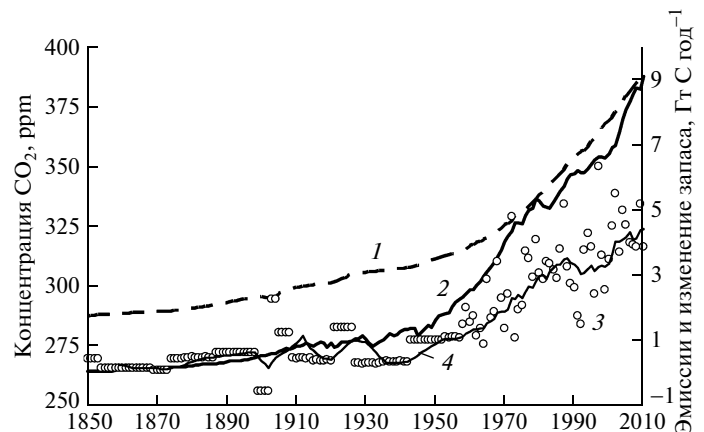


Рис. 2. Динамика атмосферной концентрации CO_2 [8, 9], антропогенные эмиссии CO_2 [11] и изменение запаса CO_2 атмосферы за 1850–2010 гг.

1 — концентрация; 2 — эмиссии; 3 и 4 — годовые величины и 10-летнее скользящее среднее изменения запаса

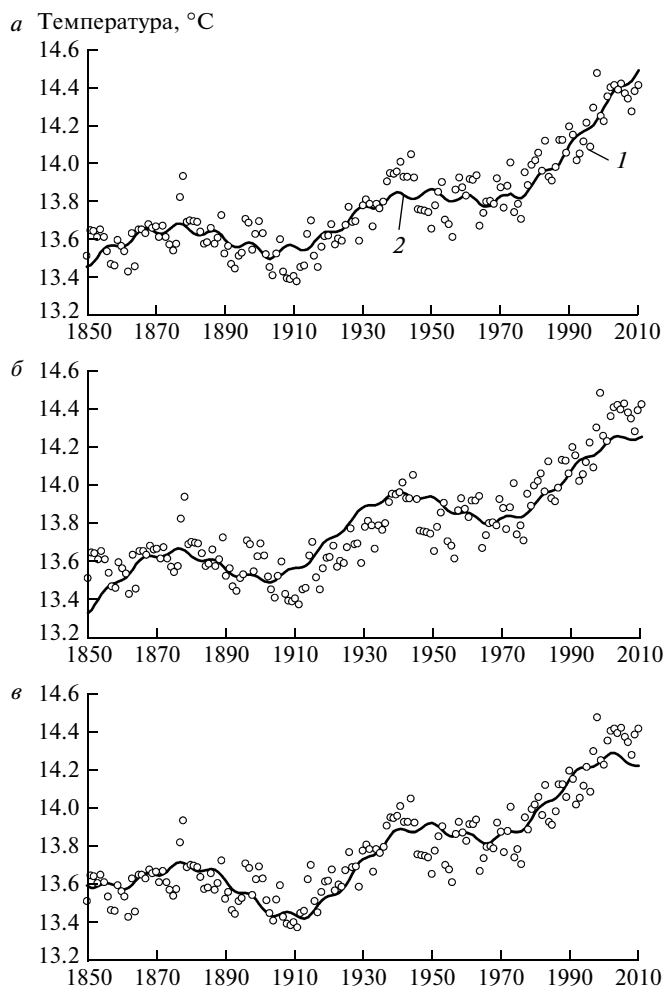


Рис. 3. Модельные имитации динамики глобальной температуры

а – учёт линейной связи с логарифмом концентрации CO_2 и двух циклов (10.5 и 68.8 года); *б* – учёт линейной связи с номером года и двух циклов (10.5 и 66.5 года); *в* – учёт трёх циклов (10.5, 60.2 и 229.8 лет); 1 – данные инструментальных измерений [7]; 2 – имитация

стоком, но никак не источником атмосферного углерода. Картина глобальных стоков и источников углекислого газа детально рассматривается как в докладах МГЭИК [2], так и многочисленных научных публикациях [15, 16 и др.].

Проведём регрессионную оценку параметров уравнения (1):

$$\begin{aligned}
 T = & -2.46 + 2.82 \ln(\text{CO}_2) - \\
 & -0.101 \sin(15.7 + 0.0914Y) + \\
 & + 0.0247 \sin(0.600Y), \\
 R^2 = & 0.866, \quad P < 0.01, \quad n = 161.
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает 86.6% дисперсии исходных данных, что можно назвать очень хорошим показателем для регрессионных зависимо-

стей, найденных по натурным материалам. Регрессия в целом и все параметры уравнения (2) статистически значимы для $P \leq 0.02$. Зависимость воспроизводит все отмеченные выше особенности динамики глобальной температуры (рис. 3, *а*): тренд к увеличению, циклы периодичностью 10.5 лет (солнечный цикл) и 68.8 года (цикличность циркумполярных вихрей). Подчеркнём, что параметры цикличности устанавливаются в процессе регрессионного анализа, то есть выявленные циклы описывают максимальные доли вариации исходных данных по сравнению с процессами другой периодичности, которые потенциально могут быть вовлечены в динамику глобальной температуры. Параметр фазы у 10.5-летнего цикла был отброшен в связи со статистической незначимостью ($P = 0.19$). Размах колебаний 69-летнего цикла приблизительно равен 0.202°C , а 10.5-летнего 0.049°C , иначе говоря, эти компоненты объясняют часть вариации исходных данных, но не могут быть использованы для изучения климатических трендов, превышающих 0.251°C .

Согласно уравнению (2), тепличный эффект натурального логарифма концентрации CO_2 составляет $2.82^\circ\text{C ppm}^{-1}$. Получаем, что в 1850 г. тепличный эффект CO_2 достигал 16.0°C , ныне он равен 16.9°C , то есть повысился на 0.86°C . Согласно работам [17, 18], из 33°C суммарного парникового эффекта на долю углекислого газа приходится $7-8^\circ\text{C}$, то есть 23–25%. Вытекающая из уравнения (2) оценка тепличного эффекта CO_2 в 2 раза превосходит эту величину. Для объяснения такого расхождения следует учесть, что в климатической системе имеются многочисленные обратные связи, в частности, между температурой и содержанием водяного пара (а это доминирующий по вкладу парниковый газ), температурой и альбедо (расширение снежного покрова при похолодании) и др. Изменение концентрации CO_2 влияет на перечисленные взаимосвязи, поэтому его воздействие на температуру усиливается. Недавнее исследование, основанное на экспериментах с моделью глобальной циркуляции атмосферы GISS ModelE, показало, что при гипотетическом полном удалении углекислого газа из атмосферы Земли её средняя температура в течение последующих 50 лет снизится до -21°C , то есть будет даже ниже, чем если просто убрать весь современный парниковый эффект. В свете этих данных полученная по уравнению (2) оценка средней глобальной температуры на Земле при нулевом парниковом вкладе CO_2 , равная -2.46°C , выглядит вполне умеренной.

Теперь примем точку зрения сторонников концепции естественных причин климатических изменений и сформулируем уравнения, не вклю-

чающие концентрацию CO_2 в состав независимых переменных. С.-И. Акасофу [8] рассматривает две естественные компоненты климатических изменений: линейный тренд восстановления после малого ледникового периода, длившегося с 1400 по 1800 г., и мультидекадную осцилляцию с периодичностью около 60 лет [6]. В цитируемой работе, доступной на веб-сайте Университета Аляски, но так и не опубликованной в рецензируемом научном журнале, отмечается, что перечисленных естественных факторов вполне достаточно для описания динамики температуры в 1880–2007 гг. Проверим это положение для расширенного по сравнению с исходной работой временного ряда 1850–2010 гг. Модифицируем уравнение (1), заменив логарифм концентрации CO_2 на порядковый номер года (такая замена воспроизводит линейный тренд “восстановления после малого ледникового периода”), при этом оставив обе циклические компоненты. Исходная модель Акасофу включает линейную и лишь одну циклическую компоненту, включение второй компоненты обеспечивает сходство анализируемых уравнений. Выполнив регрессионный анализ, получаем уравнение:

$$\begin{aligned} T = & 5.03 + 0.00453Y - \\ & - 0.138\sin(10.0 + 0.0945Y) + \\ & + 0.0187\sin(0.600Y), \end{aligned} \quad (3)$$

$$R^2 = 0.789, \quad P < 0.01, \quad n = 161.$$

Регрессия (3) является статистически значимой, однако степень описания исходной дисперсии по сравнению с уравнением (2) несколько ухудшается ($R^2 = 0.789$). Параметры значимы для $P \leq 0.03$, если не принимать во внимание полуразмах 10.5-летнего цикла ($P = 0.17$). В порядке исключения данный параметр оставлен в уравнении регрессии, иначе пришлось бы удалить всю короткопериодическую компоненту. Уравнение (3) воспроизводит оба циклических процесса, но с описанием тренда на увеличение температуры есть некоторые проблемы (рис. 3, б): недооценка температур в 1850–1860 и 2000–2010 гг.

В работе научного коллектива из Арктического и Антарктического научно-исследовательского института [19] тренд на увеличение температуры интерпретируется как следствие 200-летнего циклического процесса, в оригинале заданного двумя линейными компонентами: повышающейся в 1850–2000 гг. и понижающейся после 2000 г. Для проверки гипотезы о вкладе 200-летнего цикла используем модификацию уравнения (3), где линейная компонента заменена третьим цикли-

ческим процессом. В этом случае регрессионный анализ приводит к уравнению (4):

$$\begin{aligned} T = & 13.8 - 0.302\sin(0.024Y) - \\ & - 0.131\sin(-9.40 + 0.104Y) + \\ & + 0.0222\sin(0.600Y), \end{aligned} \quad (4)$$

$$R^2 = 0.852, \quad P < 0.01, \quad n = 161.$$

Уравнение (4), как и предыдущие, является статистически значимым. По степени описания дисперсии исходных данных оно превосходит уравнение (3), но уступает уравнению (2). Все параметры значимы при $P \leq 0.05$. Третья циклическая компонента имеет период 229 лет и размах 0.603°C . Сложение трёх циклических компонент в максимуме может обеспечить потепление на 0.911°C , после чего должно начаться похолодание. Рассматривая корректность описания уравнением (4) динамики температуры по временным промежуткам (рис. 3, в), отметим некоторую недооценку в 2000–2010 гг.

Следует констатировать, что статистический анализ данных по динамике глобальной температуры воздуха за 1850–2010 гг. не позволяет сделать однозначный выбор между концепциями антропогенного и естественного потепления. Регрессия в целом и большинство параметров уравнений (2–4) значимы при малых P , а превосходство уравнения (2) над уравнениями (3) и (4) по R^2 не столь уж велико. Недооценку уравнениями (3) и (4) значений температуры в 2000–2010 гг. можно объяснить просто как проявление остаточной дисперсии данных, во всяком случае, она не выглядит исключительной по сравнению с другими десятилетиями. Таким образом, как сторонников, так и противников концепции антропогенного потепления нельзя обвинить в некорректной трактовке имеющихся данных: просто на рассматриваемом временном интервале практически любая независимая переменная с наличием близкой к равномерной тенденции на повышение продемонстрирует статистически достоверную связь с ростом глобальной температуры. В чистом виде этот тезис подтверждает уравнение (3), где тренд задаётся простой линейной связью с порядковым номером года. Потому для выбора между концепциями необходимо привлечь дополнительный набор данных (палеоклиматических реконструкций).

К настоящему времени существует достаточное число реконструкций палеоклимата, основанных на анализе дендрохронологических серий, слоистости ледников, скоростей роста кораллов, информации исторических документов. Воспользуемся наиболее полной по набору исходных данных реконструкцией динамики глобальной температуры (суша и океан) для периода 500–1995 гг. [20]. Ограничим период рассмотрения 500–1900 гг. (рис. 4), то есть интервалом, в ко-

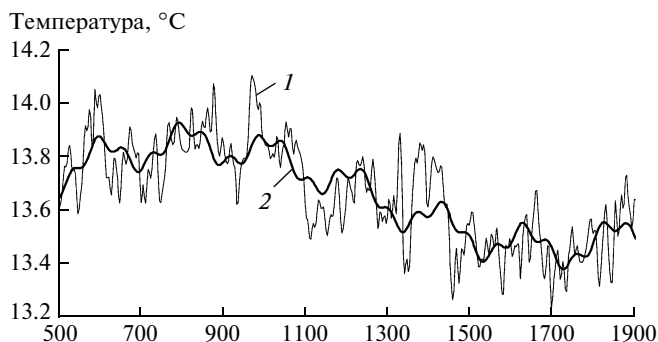


Рис. 4. Реконструкция динамики глобальной температуры за 500–1900 гг.

1 – [20]; 2 – её имитация уравнением (5)

тором потенциальное антропогенное влияние на климат пренебрежимо мало. Визуальный анализ динамики выделяет наличие долговременного изменения с максимумом в 600–900 гг. и минимумом в 1500–1800 гг. Минимум соответствует малому ледниковому периоду. Кроме того, прослеживаются колебания с периодами в несколько десятков или сотен лет, однако их визуальная идентификация затруднительна. Проведём регрессионный анализ, поставив задачей нахождение трёх циклических компонент, максимально объясняющих вариацию исходных данных. В использованном пакете Statistica 6.1 число случаев, включённых в нелинейную регрессионную оценку, не может превышать 500. Потому выберем из полной реконструкции данные с шагом в три года (500, 503 и так далее до 1901 г.) и проведём нелинейную оценку:

$$T = 13.7 - 0.193\sin(-1.35 + 0.00357Y) - 0.0622\sin(-0.852 + 0.0303Y) - 0.0266\sin(3.55 + 0.0973Y), \quad (5)$$

$$R^2 = 0.678, \quad P < 0.01, \quad n = 468.$$

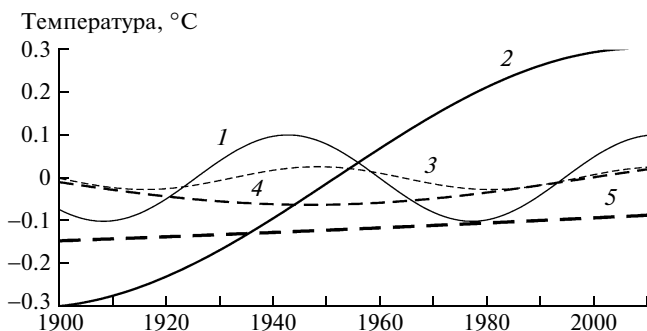


Рис. 5. Потенциальный вклад циклических компонент в динамику глобальной температуры за 1900–2010 гг.

1 – 69 лет из уравнения (2); 2 – 230 лет из уравнения (4); 3, 4, 5 – 65, 207 и 1759 лет из уравнения (5) соответственно

Уравнение (5) объясняет 67.8% дисперсии исходных данных, все параметры (в том числе и фазы) значимы при $P \leq 0.02$. Уравнение идентифицирует три циклические компоненты с периодами 1759, 207 и 65 лет. Отметим, что исходная климатическая реконструкция представлена значениями 10-летнего скользящего среднего, поэтому по ней в принципе невозможно выделение 10.5-летнего короткопериодического цикла. По той же самой причине сокращение используемой в анализе выборки до 33.3% от исходной мало влияет на итоговый регрессионный результат.

Компоненты 65 и 207 лет могут быть сопоставлены с близкими по периоду циклами из уравнений (2–4). Однако здесь имеет значение фаза цикла. На рисунке 5 приведено сравнение различных циклических компонент уравнений (2, 4, 5) по их потенциальному вкладу на интервале 1990–2010 гг. Компонента 69 лет из уравнения (2) и компонента 65 лет из уравнения (5) близки по фазе, хотя и различны по амплитуде. Близость фаз обсуждаемых циклов позволяет сделать вывод, что наличие циклической компоненты с периодом около 65–70 лет не опровергается палеоклиматическими данными.

Иная ситуация складывается с 230-летним циклом, объясняющим тренд к современному увеличению температуры в уравнении (4). Он совершенно не совпадает по фазе с циклом 207 лет из уравнения (5) (см. рис. 5). Следовательно, палеоклиматическая ретроспектива не подтверждает наличие 200-летнего климатического цикла такого фазового положения, которое могло бы привести к постоянному росту температуры в 1900–2000 гг. Более того, визуальный анализ ретроспективы не позволяет идентифицировать циклические процессы с периодом около 200 лет, амплитуда которых составляла бы 0.6°C , как в уравнении (4). Колебания сходных амплитуд прослеживаются либо на больших (тысячелетие), либо на меньших (десятилетия) временных интервалах.

Климатическая реконструкция даёт возможность проверить гипотезу о наличии линейного тренда “восстановления после малого ледникового периода” [6], на которой базируется уравнение (3). Для 1800–1900 гг. устанавливается статистически значимый ($P < 0.01$) линейный тренд к повышению температуры – $0.00231^\circ\text{C}/\text{год}^{-1}$. Аналогичная величина из уравнения (3) равна $0.00453^\circ\text{C}/\text{год}^{-1}$, то есть в 2 раза больше. Разница средней температуры между наиболее холодным периодом 1500–1800 гг. и самым тёплым 600–900 гг. составляет 0.39°C . С учётом потепления климата на 0.23°C за XIX в., для восстановления после малого ледникового периода в XX в. остаётся лишь 0.13°C , в то время как действительный рост температуры был около 0.65°C . Таким образом, анализ климатической реконструкции не

подтверждает гипотезу о наличии линейного тренда глобальной температуры, обладающего такими характеристиками, чтобы объяснить современное потепление.

Обратим внимание на долгопериодическую компоненту — 1759 лет, возникающую в уравнении (5). Она достаточно велика по амплитуде (0.39°C) и определяет изменение от тёплого интервала 600–900 гг. к малому ледниковому периоду 1500–1800 гг. Однако в современное потепление она вносит крайне малый вклад из-за длительности своего периода (см. рис. 5). Обсуждаемая долгопериодическая компонента, скорее всего, определяется 2000-летним циклом солнечной активности, который имеет название “цикл Холлстатта” [21]. Вместе с упоминавшимся выше 10.5-летним циклом Швальбе это наиболее чётко идентифицируемые гармонические осцилляции Солнца. Среди осцилляций ещё выделяют 88 (70–100)-летний цикл Гляйсберга, 211-летний цикл Зюйса и ряд других [21, 22], хотя согласованная позиция по составу и периодичности декадных и вековых солнечных циклов среди астрофизиков до сих пор не сформирована. Существует мнение [23], что солнечные осцилляции такой периодичности вообще отсутствуют, а среднепериодические минимумы и максимумы активности определяются стохастическими процессами. Добавим, что ретроспектива динамики глобальной температуры (см. рис. 5), скорее, подтверждает эту точку зрения, чем опровергает её.

* * *

Проведённый анализ ретроспективных сведений по динамике глобальной температуры показывает, что на временном интервале 500–1900 гг. не наблюдалось циклических процессов такого сочетания периодичности и амплитуды, которое могло бы привести к наблюдавшемуся в XX в. потеплению, а значит, его нельзя объяснить без привлечения антропогенного фактора. Впрочем, именно такой вывод содержится и детально обосновывается в 4-м оценочном докладе МГЭИК [2]. Однако и игнорировать естественную цикличность не стоит, поскольку она определяет ряд специфических черт современной климатической динамики, либо снижая, либо увеличивая темпы изменения температуры.

Сделав выбор в пользу уравнения (2), включающего как направленную антропогенную, так и циклические естественные компоненты, используем его для прогноза динамики глобальной температуры в XXI в. Для такого прогноза необходимо иметь сценарий изменения атмосферной концентрации CO_2 , которая, в свою очередь, зависит от будущей динамики антропогенных эмиссий и разнообразных реакций природной среды. Будущая динамика определяется многими факторами,

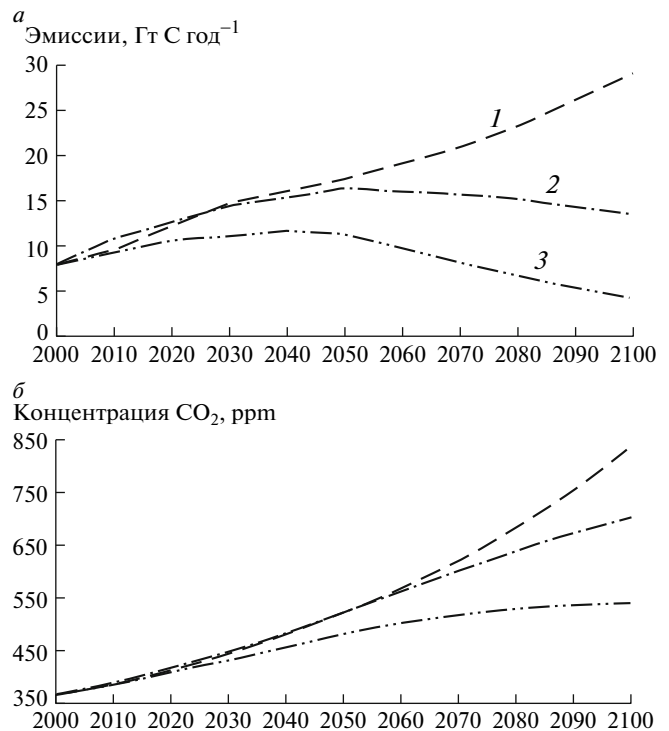


Рис. 6. Предложенные МГЭИК сценарии антропогенных эмиссий CO_2 (а) и прогнозные изменения концентрации CO_2 (б) [12]: 1, 2, 3 — сценарии A2, A1B и B1 соответственно

в частности, технологическим прогрессом (особенно в отношении альтернативных форм энергетики), темпами развития мировой экономики, успехом либо провалом деятельности по выработке дальнейших международных климатических соглашений и т.д. Как перечисленные, так и прочие факторы принимались во внимание МГЭИК при разработке набора сценариев антропогенных эмиссий [24], далее использованных в многочис-

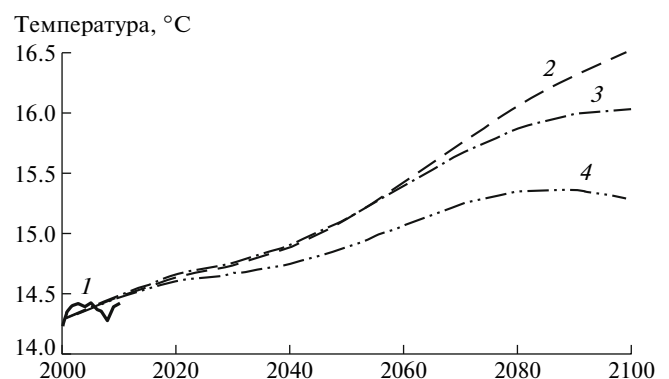


Рис. 7. Прогноз изменения глобальной температуры по уравнению (2) при разных сценариях МГЭИК 1 — данные инструментальных измерений [7]; 2, 3, 4 — прогнозные значения при сценариях A2, A1B и B1 соответственно

ленных работах по прогнозному моделированию глобального климата. Для нашего прогноза используем сценарии A2, A1B и B1 (рис. 6, а), вернее, прогнозные оценки изменений атмосферной концентрации CO_2 по этим сценариям [12]. Прогноз осуществим по уравнению (2) с использованием в качестве независимых переменных концентрации CO_2 (рис. 6, б) и соответствующие порядковые номера года. Поскольку исходные данные по концентрации CO_2 [12] доступны с шагом в 10 лет, найденные прогнозные оценки температуры (рис. 7) не воспроизводят 10.5-летний цикл и точное положение экстремумов 69-летнего цикла. Тем не менее следует обратить внимание на замедление роста температуры в 2020–2040 гг., объясняемое вкладом нисходящей ветви 69-летней циклической компоненты. Но обеспечить устойчивое похолодание длительностью в пару десятилетий (аналог ситуации 1950–1970 гг.) при росте антропогенных эмиссий в соответствии с принятыми сценариями данная компонента уже не может.

При реализации наиболее жёсткого сценария A2 концентрация CO_2 к 2100 г. достигнет 836 ppm, а средняя глобальная температура $+16.5^\circ\text{C}$. Иначе говоря, потепление за XXI в. составит $+2.2^\circ\text{C}$. Для сценариев A1B и B1 рост температуры за столетие равен 1.8 и 1.0°C соответственно. Поскольку все параметры уравнения (2) имеют ясный физический смысл и с достаточной точностью идентифицированы по эмпирическим данным, надёжность этого прогноза следует считать высокой.

Приведённый в 4-м оценочном докладе МГЭИК [2] прогноз, сделанный по моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), дал для сценариев A2, A1B и B1 следующие оценки роста температуры в XXI в.: 3.6, 2.8 и 1.8°C соответственно. Эти значения в 1.5–1.6 раза выше, чем полученные по уравнению (2). Впрочем, выраженная чувствительность одного из компонентов МОЦАО к атмосферным концентрациям CO_2 отмечалась выше при обсуждении вклада этого газа в парниковый эффект. Добавим, что цитируемые оценки являются средними для набора моделей. Наши оценки соответствуют нижнему пределу разброса прогнозных значений МОЦАО, то есть некоторые из моделей дают результаты, аналогичные полученным по уравнению (2).

Значимость расхождений нашего прогноза и усреднённой оценки МОЦАО велика в связи с распространённым мнением, что для предотвращения опасных изменений потепление надо ограничить 2°C по сравнению с доиндустриальной эпохой. Это положение активно обсуждается на последних конференциях сторон РКИК ООН и, возможно, оно будет включено в будущие климатические соглашения. Чем быстрее “отклик” температуры на рост концентрации CO_2 , тем

большие усилия по сокращению выбросов надо предпринимать, чтобы достичь цели -2°C . Согласно усреднённому прогнозу МОЦАО [2], при сценариях эмиссий A2 и A1B превышение границы 2°C произойдёт в 2050 г., при сценарии B1 – в 2060 г. Согласно прогнозу по уравнению (2), при двух первых сценариях превышение температурной границы состоится в 2070 г., а при сценарии B1 вообще не будет иметь места. Такая ситуация предоставляет человечеству больше времени на решение проблемы антропогенных эмиссий парниковых газов.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” 2009–2013 гг. (соглашение № 8107).

ЛИТЕРАТУРА

1. Рамочная Конвенция Организации Объединённых Наций об изменении климата. Официальный русский перевод. ООН, 1992.
2. Изменение климата, 2007 г. Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в 4-й доклад об оценке Межправительственной группы по изменению климата / Ред. Пачаури Р.К., Райзингер А. Женева: МГЭИК, 2007.
3. Managing the risks of extreme events and disasters to advance Climate Change adaptation. IPCC special report / Eds. Field C.B., Barros V., Stocker T.F. et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
4. Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. Что происходит с климатом Земли? // Экологический вестник России. 2012. № 5.
5. Кляшторин Л.Б. Сравнительная динамика глобального и арктического климата. Возможность прогнозирования // Глобальные экологические процессы. Материалы Международной научной конференции. М.: Academia, 2012.
6. Akasofu S.-I. Two natural components of the recent Climate Change (1). The recovery from the little ice age (a possible cause of Global Warming) and (2) the multi-decadal oscillation (the recent halting of the warming). 2009. http://people.iarc.uaf.edu/~sakasofu/pdf/Natural_Components_of_Climate_Change
7. Jones P.D., Parker D.E., Osborn T.J., Briffa K.R. Global and hemispheric temperature anomalies – land and marine instrumental records. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2012. doi: 10.3334/CDIAC/cli.002 <http://cdiac.ornl.gov/trends/temp/jonescru/jones.html>
8. Brown L.R. Full Planet, Empty Plates: The New Geopolitics of Food Scarcity. Supporting data. Washington: Earth Policy Institute, 2012. http://www.earth-policy.org/books/fpep/fpep_data
9. Tans P., Keeling R. Trends in atmospheric carbon dioxide. Boulder: Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, NOAA, 2012. http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2_data_mlo.html

10. NOAA Paleoclimatology Reconstructions Network. Boulder: NOAA, 2012. <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/pubs/pcn/pcn.html>
11. Boden T.A., Marland G., Andres R.J. Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions. Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2012. DOI: 10.3334/CDIAC/00001_V2012. http://cdiac/ornl/gov/trends/emistre_glob/html
12. Carbon dioxide: Projected emissions and concentrations. IPCC Data Distribution Center, 2011. http://www.ipcc-data.org/ddc_co2.html
13. Rind D., Lean J., Lerner J. et al. Exploring the stratospheric/tropospheric response to solar forcing // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. D24103. DOI:10.1029/2008JD010114.
14. Сорохтин О.Г. Эволюция климатов Земли и происхождение ледниковых эпох // Вестник РАН. 2006. № 8.
15. Ballantyne A.P., Alden C.B., Miller J.B. et al. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years // Nature. 2012. V. 488. DOI: 10.1038/nature11299.
16. Bates R.N. Multi-decadal uptake of carbon dioxide into subtropical mode water of the North Atlantic Ocean // Biogeosciences. 2012. V. 9. DOI: 10.5194/bg-9-2649-2012.
17. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физических наук. 2000. № 4.
18. Kiehl J.T., Trenberth K.E. Earth's annual global mean energy budget // Bulletin of the American Meteorological Society. 1997. № 2.
19. Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е. Переход от потепления к похолоданию климата Земли как результат действия естественных причин // Глобальные экологические процессы: Материалы Международной научной конференции. М.: Academia, 2012.
20. Mann M.E., Zhang Z., Hughes M.K., Bradley R.S. et al. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2008. V. 105. DOI: 10.1073/pnas.0805721105.
21. Damon P.E., Jirikowic J.L. The sun as a low-frequency harmonic oscillator // Radiocarbon. 1992. № 2.
22. Braun H., Christ M., Rahmstorf S. et al. Possible solar origin of the 1.470-year glacial climate cycle demonstrated in a coupled model // Nature. 2005. V. 438. DOI: 10.1038/nature04121.
23. Usoskin I.G., Solanki S.K., Kovaltsov G.A. Grand minima and maxima of solar activity: new observational constraints // Astronomy and Astrophysics. 2007. V. 471. DOI: 10.1051/0004-6361:20077704.
24. Emissions scenarios. IPCC special report / Eds. Nakicenovic N., Swart R. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.