

## Прогноз роста глобальной температуры в XXI веке на основе простой статистической модели

Д. Г. Замолодчиков

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Биологический факультет,  
Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, 1/12  
Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,  
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14

E-mail: dzamolod@mail.ru

*Получено 10 февраля 2016 г.  
после доработки 21 февраля 2016 г.*

Предложена простая статистическая модель динамики среднегодовой глобальной температуры, комбинирующая логарифмический эффект роста концентрации диоксида углерода и вклад климатических циклов. Параметры модели определены по известным данным инструментальных измерений за 1850–2010 гг. Модель подтверждает достоверное наличие в динамике двух циклических процессов периодичности в 10.5 и 68.8 лет. С использованием сценариев изменения концентрации двуоксида углерода, предложенных в 5-ом оценочном докладе МГЭИК, построен прогноз изменения среднегодовой глобальной температуры в XXI веке. Оказалось, что траектории роста глобальной температуры из доклада МГЭИК на 0.9–1.8 °C выше полученных в модели.

Ключевые слова: глобальные изменения климата, диоксид углерода, статистическая модель, прогноз, климатические циклы

### Forecasting the global temperature increase for the XXI century by means of a simple statistical model

D. G. Zamolodchikov

*M. V. Lomonosov Moscow State University, 1/12 Lenin Hills, Moscow, 119234, Russia*

**Abstract.** — A simple statistical model is developed for the dynamics of the mean global annual temperature. The model combines the logarithmic effect of carbon dioxide concentration increase and the input by climatic cycles. Model parameters are determined from data of instrumental observations for 1850–2010. The model confirms the presence of climatic cycles with the period of 10.5 and 68.8 years in the global temperature dynamics. The trajectories of the global temperature changes for the XXI century are obtained under the scenarios of carbon dioxide concentration changes from the 5<sup>th</sup> IPCC Assessment Report. The comparison revealed that the global temperature trajectories from the Report are 0.9–1.8 °C above those obtained in the model.

Keywords: Global Climate Change, carbon dioxide, statistical model, projection, climatic cycles

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 379–390 (Russian).

Работа выполнена в рамках темы ЦЭПЛ РАН «Климатогенные и антропогенные модификации биосферных функций бореальных лесов и арктических экосистем России».

## Введение

За последние десятилетия математические модели превратились из средства элитарного научного анализа в типичный исследовательский инструмент, что связано как с развитием математического аппарата моделей, так и с совершенствованием вычислительной техники. В современной экологии моделирование используется при исследовании объектов разных иерархических уровней, от отдельных популяций до биосферы в целом. Одновременно с расширением модельного подхода менялось и восприятие его результатов. В XX веке преобладала исследовательская компонента моделирования, т. е. стремление к выявлению системы значимых внутренних или внешних связей, управляющих поведением изучаемого объекта. К настоящему времени на первый план вышли прогнозные и оптимизационные функции моделирования. На основе модельных прогнозов принимаются решения о допустимых нормах вылова или заготовки биоресурсов в природных популяциях, о мерах по минимизации промышленного загрязнения, о формировании оптимальной структуры охраняемых природных территорий и т. д. Вполне очевидно, что степень адекватности модели, а также границы ее применимости оказываются критически важными для успеха ее практического применения.

Проблема глобального изменения климата и история международных усилий, направленных на противодействие этому процессу, являются хорошим примером того, как меняется отношение к модельным результатам и в какой степени они влияют на принятие решений. Напомним, что, согласно доминирующей научной концепции, главной причиной современного потепления является усиление парникового эффекта атмосферы, вызванное антропогенными эмиссиями парниковых газов, в первую очередь  $\text{CO}_2$ . Это концепция всесторонне рассматривается и развивается в оценочных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Первый оценочный доклад МГЭИК, вышедший в 1990 г. [Climate Change, 1990], уже включал формулировку сценариев антропогенных выбросов парниковых газов (BaU, B, C, D) и модельные прогнозы роста глобальной температуры по этим сценариям, полученные при различных значениях параметра климатической чувствительности. Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН), принятая через 3 года после публикации Первого оценочного доклада, поставила целью стабилизацию концентраций парниковых газов в атмосфере на уровне, не допускающем опасного антропогенного воздействия на климатическую систему. Текст РКИК ООН не содержал каких-либо количественных ориентиров по сокращению выбросов парниковых газов, ограничиваясь общими призывами к осуществлению таких мероприятий.

Пятый оценочный доклад МГЭИК, вышедший в 2013 г. [Изменение климата..., 2013], использует очередную модификацию сценариев выбросов (RPC2.6, RPC4.5, RPC6, RPC8.5) и мультимодельный ансамбль CMIP5 для прогнозных расчетов. Оценки роста глобальной температуры формируются путем усреднения результатов отдельных моделей, различия этих результатов используются для расчета меры неопределенности прогноза. Парижское климатическое соглашение, принятое в декабре 2015 г., в качестве цели по смягчению изменений климата ставит удержание средней глобальной температуры ниже  $+2^\circ\text{C}$  к доиндустриальному уровню [Принятие..., 2015]. Национальные вклады по сокращению выбросов парниковых газов были заявлены странами заранее, зафиксированы и проанализированы органами РКИК ООН [Synthesis report..., 2015]. Было установлено, что объявленные национальные вклады не достаточны для удержания потепления в пределах  $2^\circ\text{C}$ , а рост глобальной температуры пойдет по траектории в  $3^\circ\text{C}$ . Эти вполне конкретные и официальные заявления были сделаны при активном использовании прогнозных результатов 5-го оценочного доклада МГЭИК. Дополнительное сокращение выбросов парниковых газов, необходимое для перехода на траекторию  $2^\circ\text{C}$ , потребует серьезных финансовых затрат и экономических преобразований, т. е. цена возможной ошибки прогноза крайне высока.

Помимо научной поддержки переговорного процесса формирование и развитие сценариев изменения климата МГЭИК серьезно воздействовало на всю систему научных исследований в области экологии, гидрологии, почвоведения и других дисциплин, для которых климатиче-

ские характеристики являются значимыми внешними факторами. Информационная политика МГЭИК обеспечила открытый интернет-доступ к базам данных климатических сценариев, представленных для ряда будущих временных периодов по узлам координатной сети. Это привело к появлению огромного числа научных работ, рассматривающих функционирование разнообразных природных систем локального и регионального масштаба при изменении климата по сценариям МГЭИК. К примеру, в ряде работ выдающегося российского исследователя А. С. Комарова, памяти которого посвящен данный номер журнала, рассматривается влияние изменений климата на бюджет углерода и азота в лесах некоторых лесничеств Европейской России [Шанин и др., 2010; Shanin et al., 2011; Komarov, Shanin, 2012]. Изменения климата в этих работах задаются сценарием A1f, т. е. вариантом наиболее сильного потепления из рассматриваемых в 4-м оценочном докладе МГЭИК [Изменение климата..., 2007]. Вполне очевидно, что надежность созданного огромными научными усилиями массива специализированной информации напрямую зависит от корректности исходных климатических сценариев МГЭИК.

При всей детальности, масштабности и всесторонности оценочных докладов МГЭИК, формируемых на основе публикаций в рецензируемых журналах, в научном сообществе существуют альтернативные точки зрения на причины и будущее развитие глобального потепления. Альтернативные точки зрения достаточно разнообразны, наиболее популярная из них объясняет современное потепление наличием климатических циклов разной периодичности (1800, 200, 60–70 лет), наложение восходящих ветвей которых привело к росту температуры в XX веке [Абдусаматов, 2009; Башкирцев, Машнич, 2004, 2005; Фролов и др., 2010; Гудкович и др., 2012, 2013; Sharp, 2015 и др.]. При этом отмечается, что на грани XX и XXI столетий восходящий итог наложения климатических циклов сменился нисходящим, т. е. начался период глобального похолодания. Эти представления нашли некоторое подтверждение в современной динамике глобальной температуры, что будет подробнее рассмотрено ниже.

Автор настоящей статьи несколько лет назад предложил простую статистическую модель, описывающую динамику глобальной температуры как функцию от логарифма атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  и двух климатических циклов с периодичностью 10.5 и 68 лет [Замолодчиков, 2013, 2014]. Эта модель фактически объединяет как традиционную (рост парникового эффекта), так и альтернативную (климатические циклы) точки зрения на ключевые причины потепления. Результаты прогноза изменения глобальной температуры в XXI веке по этой модели оказались заметно ниже, чем средние оценки роста температуры в 4-ом оценочном докладе МГЭИК [Изменение климата..., 2007]. За время, прошедшее с момента разработки статистической модели, временной ряд значений глобальной температуры получил еще несколько точек и вышел в свет очередной, 5-ый, оценочный доклад МГЭИК [Изменение климата..., 2013]. Цель настоящей статьи состоит в сравнении прогнозных результатов модели [Замолодчиков, 2013, 2014] с наиболее современными инструментальными данными по динамике глобальной температуры, а также модельными прогнозами из 5-го оценочного доклада МГЭИК.

## Описание исходных данных и модели

В исходной формулировке модели и при ее идентификации [Замолодчиков, 2013, 2014] были использованы данные по аномалиям глобальной температуры за 1850–2010 гг. Центра анализа информации по двуокиси углерода (Оак Ридж, США) [Jones et al., 2012], исторические сведения по динамике атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  за 1850–1958 гг. [Brown, 2012] и данные мониторинга атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  по станции Мауна-Лоа [Tans, Keeling, 2012] Национального управления океанических и атмосферных исследований (Боулдер, США). Массивы данных по глобальной температуре и атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$  являются пополняемыми. Более того, сравнение версий массива по глобальной температуре от 2012 [Jones et al., 2012] и 2016 [Jones et al., 2016] гг. показало, что некоторые изменения присутствуют и в значениях по всему сроку наблюдений. По-видимому, эти изменения связаны с совершенствованием процедур фильтрации и усреднения исходных инструментальных данных. В настоящей статье

мы используем наиболее позднюю версию массивов данных по глобальной температуре и концентрации  $\text{CO}_2$ , но при этом оставляем без изменений значения параметров модели, оцененные по версиям массивов от 2012 г. Исходные величины температурных аномалий (в сравнении с климатической нормой 1961–1990 гг.) были пересчитаны нами в значения среднегодовой температуры.

Рассмотрение динамики глобальной температуры приземного слоя воздуха за 1850–2014 гг. (рис. 1) позволяет выделить ряд специфических черт. Во-первых, это ярко выраженная в 1910–2005 гг. тенденция к росту температуры. Именно эта тенденция и послужила основой для формирования традиционной концепции антропогенного потепления. Второй особенностью динамики является локальный максимум температуры, пришедшийся на 1940-ые годы. Есть и менее выраженные максимумы в 1880-ых и, вероятно, в первой половине 2000-ых годов. Наличие этих трех максимумов интерпретируется как проявление 60–70-летних климатических циклов [Гудкович и др., 2012; Фролов и др., 2010; Lyubushin, Klyashtorin, 2012]. Третья особенность, проявляющаяся на кривой 5-летнего скользящего среднего, состоит в фиксации локальных максимумов температуры с периодичностью, варьирующей от 8 до 19 лет.

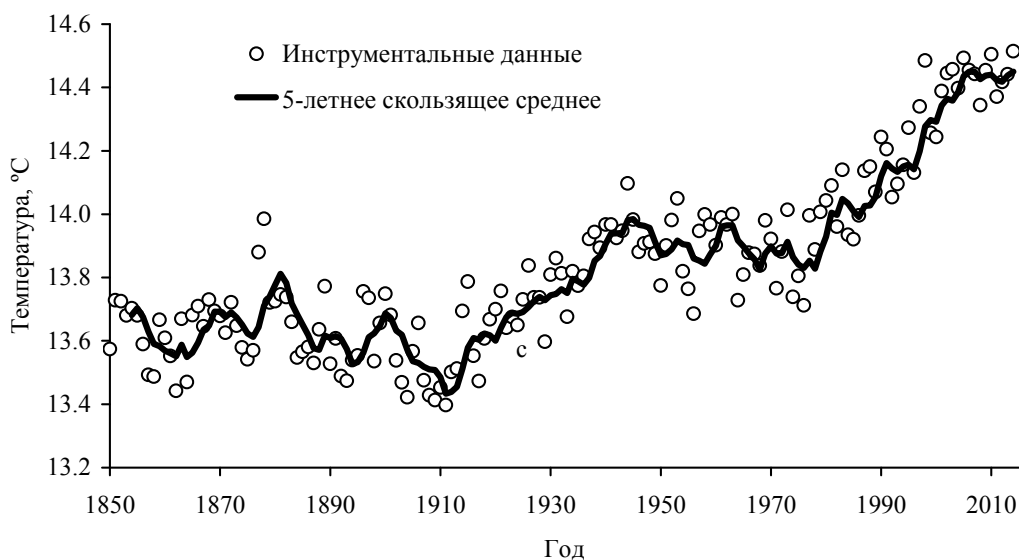


Рис. 1. Динамика средней глобальной температуры за 1850–2014 гг. [Jones et al., 2016]

Предложим уравнение, которое способно воспроизвести отмеченные особенности динамики глобальной температуры. Учтем, что зависимость температуры от концентрации  $\text{CO}_2$  нелинейна. Дело в том, что основная полоса поглощения длинноволнового спектра молекулами  $\text{CO}_2$  ограничена и находится в пределах 4.2–4.3 мкм. Исчерпание этой полосы происходит уже при небольших концентрациях  $\text{CO}_2$  в воздухе. При дальнейшем увеличении концентрации газа поглощение излучения растет за счет краевых частей (крыльев) полосы, но чем дальше от основной полосы, тем менее эффективно молекулы  $\text{CO}_2$  удерживают излучение. Таким образом, способность углекислого газа к задержке длинноволнового излучения снижается с ростом его атмосферной концентрации, что приводит к логарифмической связи между тепличным эффектом и концентрацией  $\text{CO}_2$  [Archer, 2011]. С учетом 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,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\text{CO}_2$  — концентрация углекислого газа в атмосфере, ppm;  $Y$  — порядковый номер года по нашей эре;  $a$ ,  $b$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  — параметры. Все параметры имеют четкую физическую интерпретацию:  $a$  — средняя глобальная температу-

ра без учета парникового влияния углекислого газа, °C;  $b$  — парниковый эффект натурального логарифма концентрации углекислого газа, °C ppm<sup>-1</sup>;  $c_1$  и  $d_1$  — полуразмах колебаний двух циклических процессов, °C;  $c_2$  и  $d_2$  — сдвиг фазы цикла относительно номера стартового года;  $c_3$  и  $d_3$  — характеристики периода циклов (выраженный в годах период равен отношению  $2\pi$  к  $c_3$  или  $d_3$ ).

При нахождении численных значений параметров уравнения (1) в состав независимых переменных были включены номер года по нашей эре и значения концентрации CO<sub>2</sub> из источников [Brown, 2012; Tans, Keeling, 2012]. Атмосферная концентрация CO<sub>2</sub> возрастала от 287 ppm в 1850 г. до 401 ppm в 2015 г. (рис. 2).

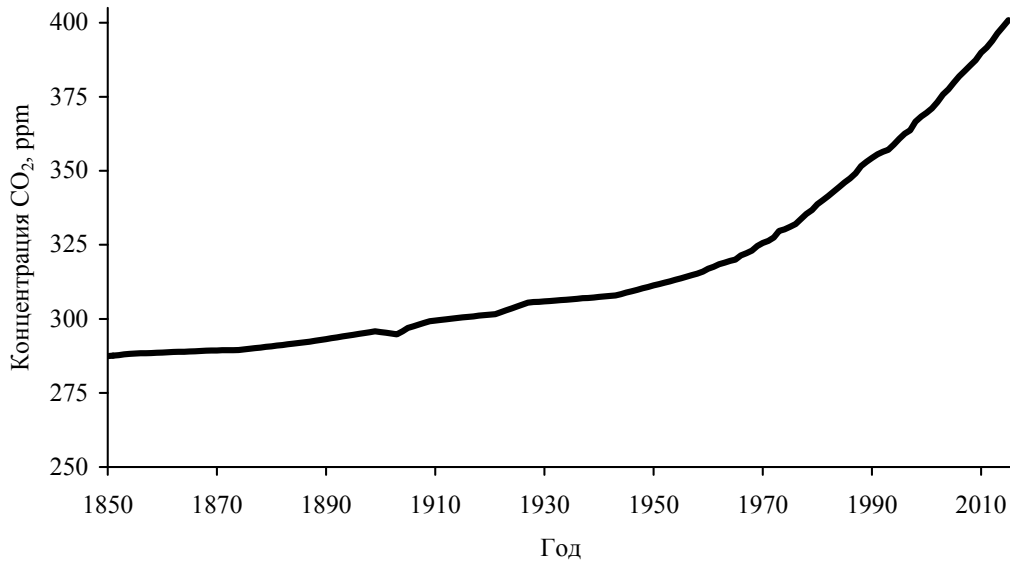


Рис. 2. Динамика атмосферной концентрации CO<sub>2</sub> за 1850–2015 гг. [Brown, 2012; Tans, Keeling, 2016]

Оценку параметров уравнения (1) проводили методом наименьших квадратов в пакете Statistica 6.1 (Stat Soft Inc., USA). Процедуры нелинейной оценки при сложных формах анализируемых уравнений и высокой дисперсии исходных данных могут обнаруживать несколько локальных минимумов остаточной дисперсии. Чтобы найти уравнение с наименьшей величиной остаточной дисперсии, проводили вычисления с разными наборами стартовых значений параметров. В окончательную форму включали лишь те параметры, уровень значимости которых соответствовал  $P \leq 0.05$ . Итоговое уравнение (2) имеет следующий вид:

$$T = -2.46 + 2.82 \ln(\text{CO}_2) - 0.101 \sin(15.7 + 0.0914 Y) + 0.0247 \sin(0.600 Y), \quad (2)$$

$$R^2 = 0.866, P < 0.01, n = 161.$$

Уравнение (2) описывает 86.6 % дисперсии исходных данных для интервала 1850–2010 гг., что следует признать хорошим показателем для регрессионных зависимостей, найденных по натурным материалам. Регрессия в целом и все параметры уравнения (2) статистически значимы для  $P \leq 0.02$ . Параметр фазы у 10.5-летнего цикла был отброшен в связи со статистической незначимостью ( $P = 0.19$ ).

Уравнение (2) воспроизводит все отмеченные выше особенности динамики глобальной температуры (рис. 3): тренд к увеличению, циклы периодичностью 10.5 лет и 68.8 года. Подчеркнем, что параметры цикличности устанавливаются в процессе регрессионного анализа, т. е. выявленные циклы описывают максимальные доли вариации исходных данных по сравнению с процессами другой периодичности, которые потенциально могут быть вовлечены в динамику глобальной температуры. Вопрос о наличии среднесрочного климатического цикла продолжительностью около 70 лет будет детально обсуждаться ниже. Краткосрочный климатический цикл 10.5 лет можно сопоставить с широко известным 11-летним циклом солнечной активности.

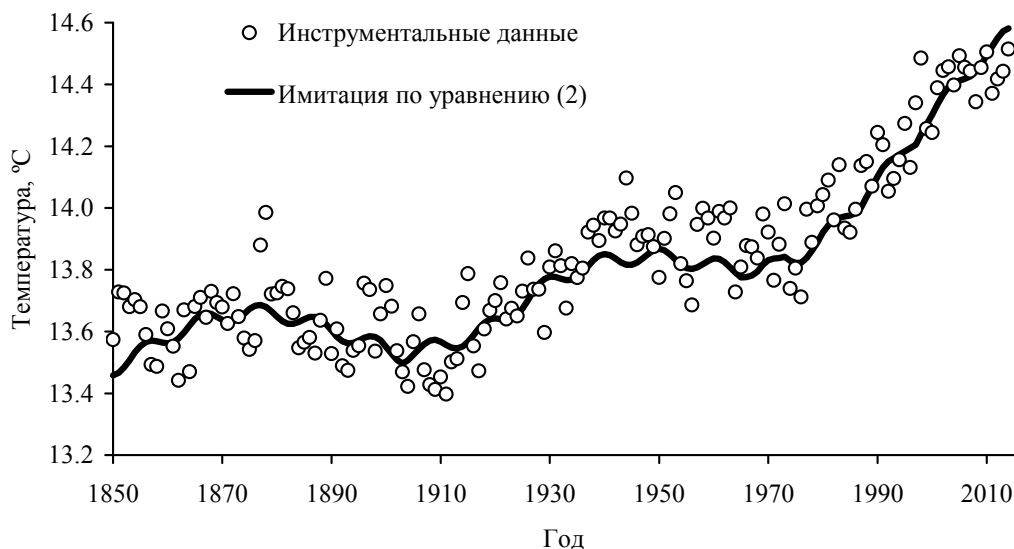


Рис. 3. Динамика средней глобальной температуры за 1850–2014 гг. и ее имитация уравнением (2)

Исследования связи погодных вариаций с этим циклом имеют долгую историю, а сами связи устанавливаются во многих современных работах по энергобалансу земной атмосферы [Rind et al., 2008, Krivova et al., 2010 и др.]. В других работах обосновываются несколько иные периоды краткосрочной цикличности солнечной радиации, например 8- и 11-летние фазы 19-летнего солнечного цикла [Федоров, 2015]. Переменность периода краткосрочной климатической цикличности снижает адекватность описания динамики глобальной температуры уравнением (2). В частности, уравнение (2) не вполне адекватно воспроизвело динамику температуры в период после 2009 г.: 2 фактических значения (2010 и 2014 гг.) находятся в пределах  $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$  от расчетных, в то время как 3 других (2011–2013 гг.) — ниже расчетных величин на  $0.13\text{--}0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Сходные или даже большие отклонения расчетных значений от измеренных встречались и в предшествующие временные интервалы, т. е. отмеченное расхождение находится в типичных пределах адекватности статистической модели.

Напомним, что уравнения (1) и (2) были предложены в ранее опубликованной работе [Замолодчиков, 2013]. В ней рассматривались и другие формы простых статистических связей в климатической системе Земли, в частности включающие линейный тренд либо третью циклическую компоненту вместо логарифмической зависимости от концентрации  $\text{CO}_2$ . Статистический анализ показал, что такие уравнения менее адекватно описывают динамику температуры за 1850–2010 гг. Наличие циклических компонент с длительным периодом (около 2000 лет), но при этом с фазой и амплитудой, достаточной для объяснения роста температуры в XX веке, не подтверждается палеоклиматическими реконструкциями. Именно поэтому уравнение (2) было выбрано в качестве базового для проведения прогнозного расчета динамики глобальной температуры на XXI век.

## Прогноз динамики глобальной температуры на XXI век

Уравнение (2) позволяет осуществить прогноз динамики глобальной температуры в XXI веке. Для такого прогноза необходимо иметь сценарий изменения атмосферной концентрации  $\text{CO}_2$ , которая, в свою очередь, зависит от будущей динамики антропогенных эмиссий и компенсирующих реакций природной среды. В 5-м оценочном докладе МГЭИК используется новый прогнозный набор эмиссий по 4 сценариям, получившим название «representative concentrations pathways» (RCP) [Изменение климата..., 2013]. Сценарий «низких эмиссий» RCP2.6 предполагает постоянные и амбициозные действия по сокращению антропогенных выбросов парнико-

вых газов. Сценарии RCP4.5 и RCP6.0 («промежуточные эмиссии») основаны на использовании различных сочетаний технологического прогресса и стратегий по сокращению выбросов. RCP8.5 («высокие эмиссии») характеризует ситуацию, когда мировое экономическое развитие остается привязанным к использованию ископаемого топлива без осуществления мер климатической политики. Сценарии RCP были использованы в моделях системы «Земля» (ESM) для прогнозных расчетов концентраций парниковых газов [Meinshausen et al., 2011]. Результаты этих расчетов входят в набор информационной поддержки сценариев изменения климата МГЭИК и доступны в Интернете [Meinshausen et al., 2009]. При реализации RCP2.6 концентрация CO<sub>2</sub> к 2100 г. составит 421 ppm, в то время как при осуществлении RCP8.5 она достигнет 936 ppm (рис. 4).

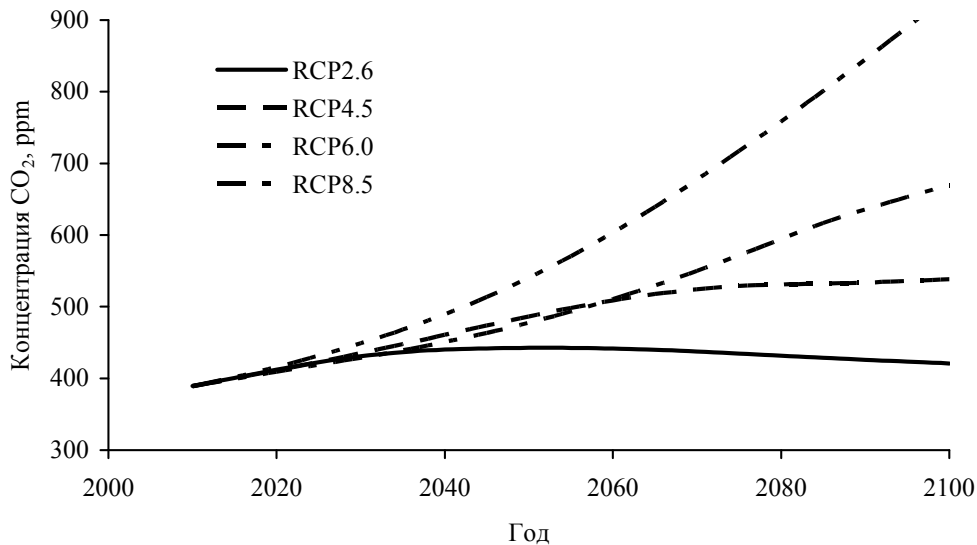


Рис. 4. Прогноз динамики концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере по сценариям 5-го оценочного доклада МГЭИК [Meinshausen et al., 2009, 2011]

Используя траектории концентраций CO<sub>2</sub> (рис. 3) и порядковые номера лет, рассчитаем ход глобальной температуры по уравнению (2) для 2010–2100 гг. с шагом в 1 год (рис. 4). При реализации наиболее жесткого сценария RCP8.5 средняя глобальная температура достигнет 16.8 °С. Иначе говоря, потепление за 2010–2100 гг. составит 2.4 °С. Для сценариев RCP6.0 и RCP4.5 рост температуры за 90 лет равен 1.4 и 0.8 °С соответственно. Сценарий RCP2.6 приводит к росту глобальной температуры всего на 0.1 °С.

Приведенный в 5-м оценочном докладе МГЭИК [Изменение климата..., 2013; Annex II..., 2013] прогноз роста глобальной температуры, осуществленный по ансамблю моделей CMIP5, дал для сценариев RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 и RCP2.6 следующие оценки роста температуры за 2010–2100 гг.: 4.1, 2.4, 1.9 и 0.9 °С соответственно (рис. 5). Эти значения на 0.9–1.8 °С выше, чем полученные по уравнению (2). Схожие результаты были получены нами ранее [Замолотчиков и др., 2013, 2014] при сравнении результатов расчетов по уравнению (2) и прогнозных оценок по ансамблю моделей CMIP3 из 4-го оценочного доклада МГЭИК. Впрочем, это не удивительно. RCP 5-го оценочного доклада МГЭИК имеют близкие аналоги из сценариев выбросов 4-го доклада; модели, входящие в ансамбль CMIP, совершенствуются с целью все более детального учета различных процессов, однако эти модификации не носят принципиального характера. Так как и модели, и исходные данные (сценарии выбросов) в 4-ом и 5-ом оценочных докладах МГЭИК весьма близки, невелики различия и в прогнозах динамики глобальной температуры для сходных вариантов сценариев.

Обсуждаемые выше траектории роста глобальной температуры из 5-го доклада МГЭИК являются средними по 21 модели, составляющей ансамбль CMIP5. Прогнозы по отдельным моделям заметно различаются между собой, и эти различия создают основу для оценки неопреде-

ленности температурного прогноза. Траектории температуры, рассчитанные по уравнению (2), идут несколько выше нижних пределов неопределенности прогнозов МГЭИК. Это означает, что некоторые из моделей ансамбля СМIP5 дают результаты, близкие к уравнению (2). Однако в ансамбле преобладают модели, которые более чувствительны к росту концентрации  $\text{CO}_2$ , и потому траектория усредненного прогноза заметно превышает линию, рассчитанную по уравнению (2). Тем не менее можно сделать вывод, что расчеты по уравнению (2) укладываются в диапазон вариации модельных прогнозов ансамбля СМIP5.

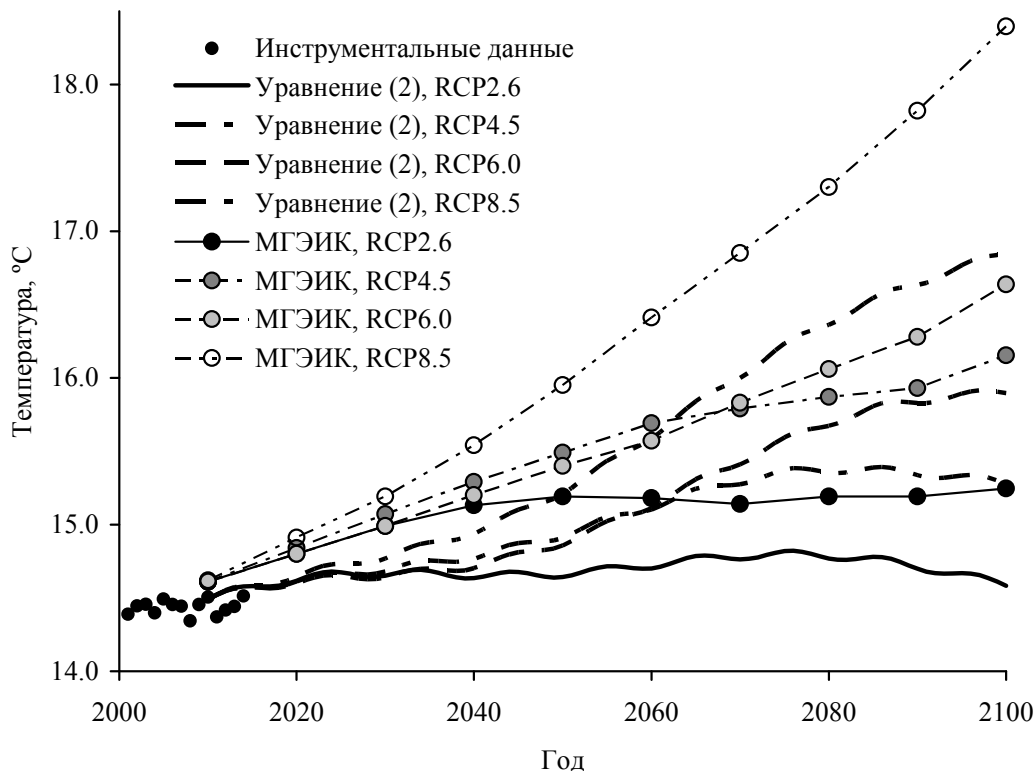


Рис. 5. Прогноз средней глобальной температуры на 2010–2100 гг. по уравнению (2) и согласно 5-му оценочному докладу МГЭИК

Согласно прогнозу МГЭИК, на траектории RCP8.5 годовое приращение температуры будет варьировать от 0.03 до 0.05 °C, на траектории RCP6.0 — от 0.02 до 0.03 °C, при этом температура за XXI век будет характеризоваться плавным ростом (рис. 5). Траекториям RCP2.6 и RCP4.5 свойственна большая вариация годовых изменений температуры, что приводит к замедлению и даже остановке ее роста после 2050 г. Причины этого замедления определяются динамикой концентрации  $\text{CO}_2$  (рис. 4), в свою очередь связанной со значительным абсолютным сокращением антропогенных эмиссий парниковых газов, стартующим с 2040 г. в сценарии RCP4.5 и с 2020 г. — в RCP2.6. Температурные прогнозы по уравнению (2) характеризуются постоянными вариациями годовых изменений температуры, вызываемых не только динамикой концентрации  $\text{CO}_2$ , но и действием климатических циклов периодичностью 10.5 и 68.8 лет.

### Среднесрочная климатическая цикличность

Рассмотрим подробнее воздействие климатического цикла 68.8 лет, важность которого отмечается во многих работах «климатических скептиков» [Гудкович и др., 2012; Фролов и др., 2010; Lyubushin, Klyashtorin, 2012]. Согласно уравнению (2) максимумы этого цикла должны наблюдаться в 1944, 2012, 2081 гг. При этом модифицирующее воздействие этого цикла на рост



глобальной температуры выражается вызываемым им годичным изменением температуры, фактически представляющим первую производную от циклических колебаний (рис. 6). Обратим внимание на ближайшие к современности эффекты рассматриваемого цикла. Величина годичного изменения температуры была положительной и находилась в пределах 0.08–0.09 °С в 1989–2000 гг. Именно для этого периода характерен наиболее быстрый фактический рост глобальной температуры (рис. 1). Однако затем годичное изменение за счет 68.8-летнего цикла стало уменьшаться, в 2005 г. оно сократилось до 0.05 °С, а с 2012 стало отрицательным, т. е. снижающим темпы роста глобальной температуры.

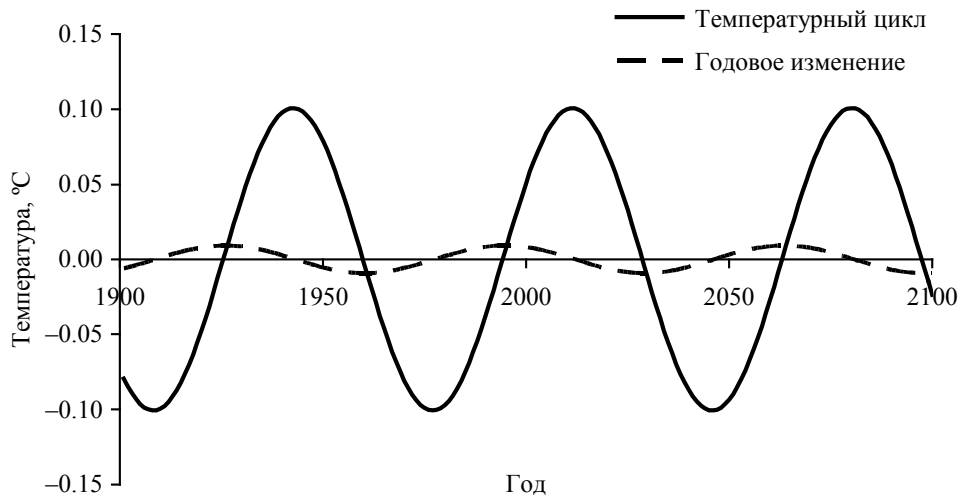


Рис. 6. Влияние климатического цикла 68.8 лет на изменение глобальной температуры согласно уравнению (2)

Замедление роста температуры после 2000 г. является вполне очевидным фактом, оно не было спрогнозировано в докладах, предшествовавших этому событию, что послужило поводом для специального обсуждения в 5-м оценочном докладе МГЭИК [Изменение климата..., 2013, с. 62]. Среди источников расхождения модельных прогнозов и фактической динамики отмечены тенденция «некоторых моделей СМIP5 имитировать более сильное потепление, чем наблюдаемое, в качестве отклика на повышение концентрации парниковых газов». Точно такой же вывод был сделан несколькими абзацами выше на основе сравнения полосы неопределенности температурного прогноза из 5-го оценочного доклада МГЭИК с результатами расчета по уравнению (2).

Само замедление роста температуры после 1998 г. в докладе МГЭИК [Изменение климата..., 2013, с. 63] объясняется «отрицательным трендом воздействия вулканических извержений» и нисходящей фазой 11-летнего солнечного цикла. В ряде разделов доклада встречаются утверждения об отсутствии среднесрочных циклов (т. е. с периодами порядка десятилетий) как для потока солнечной радиации, так и во внутренней климатической изменчивости. Тем самым фактически отвергается как наличие 60–70-летнего климатического цикла, так и его влияние на скорость изменения глобальной температуры. Уравнение (2) дает возможность продемонстрировать, насколько явно проявляется климатический цикл 60–70 лет в динамике глобальной температуры. Для этого из уравнения (2) была удалена компонента, задающая данный цикл, и проведен расчет для периода 1850–2014 гг. Полученные значения характеризуют эффекты роста концентрации  $\text{CO}_2$  и 10.5-летнего климатического цикла. Далее была рассчитана разность между данными инструментальных измерений (рис. 1) и найденными величинами. Эта разность характеризует фактический вклад 60–70-летнего цикла (и прочих климатических факторов — извержений вулканов, войн, прочих внутренних причин климатической изменчивости) в динамику глобальной температуры (рис. 7). Результат вполне очевиден, наиболее явно выражаясь в траектории 20-летнего скользящего среднего: в 1850–2014 гг. в динамике глобальной

температуры явно присутствовал климатический цикл периодичностью около 70 лет. Следует отметить, что призывы к учету 60–70-летнего цикла в прогнозировании климатически зависимых характеристик, например, ледового покрова Северного Ледовитого океана, ныне раздаются и среди сторонников традиционного взгляда на природу современного потепления [Parker, Ollier, 2015].

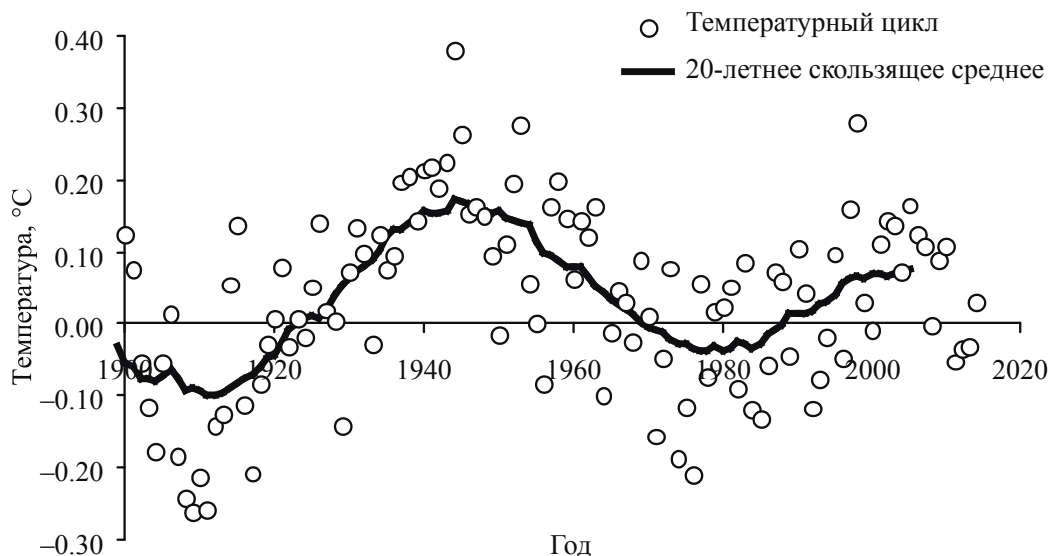


Рис. 7. Климатический цикл 68.8 лет, найденный по разности инструментальных данных и двух компонентов уравнения (2)

## Заключение

Значимость расхождений прогноза глобальной температуры по уравнению (2) и усредненной оценки CMIP5 из 5-оценочного доклада МГЭИК велика в связи с постановкой Парижским соглашением цели удержания «прироста глобальной средней температуры намного ниже 2 °C сверх доиндустриальных уровней и приложения усилий в целях ограничения роста температуры до 1.5 °C» [Принятие..., 2015, с. 25]. Доиндустриальный уровень в климатической политике соответствует периоду 1850–1990 гг., среднее значение глобальной температуры за этот период составляет 13.6 °C. Следовательно, при достижении целей соглашения глобальная температура не должна превысить 15.6 °C. Согласно прогнозу по ансамблю моделей CMIP5 глобальная температура достигнет 15.6 °C в 2042 г. по сценарию RCP8.5, в 2056 г. по RCP4.5, в 2062 г. по RCP6.0. Только лишь сценарий RCP2.6 оказывается соответствующим цели Парижского соглашения. Если опираться на прогноз по уравнению (2), то превышение границы 2 °C произойдет в 2061 г. при RCP8.5 и в 2075 г. при RCP6.0. Сценарии RCP4.5 и RCP2.6 будут соответствовать целям Парижского соглашения. Это означает, что человечеству надо приложить значительно меньшие усилия по сокращению выбросов парниковых газов и в более длительные сроки.

МГЭИК выполняет огромную работу по анализу и обобщению материалов, публикуемых в отношении климатической проблемы международным научным сообществом. Доклады и руководства МГЭИК, особенно в отношении прогнозов климатических изменений, все более активно используются в различных странах для планирования развития экономических отраслей, природоохранной деятельности и т. д. Однако, как показывают результаты данной статьи, некоторые положения докладов МГЭИК дают повод для критики. В первую очередь это повышенная чувствительность некоторых моделей CMIP5 к концентрациям парниковых газов, что дает сильное завышение прогнозных значений глобальной температуры. Во-вторых, это недооценка роли климатических циклов средней периодичности (десятилетия), которые оказывают модифицирующее влияние на рост глобальной температуры. Учет этих факторов позволит сделать прогнозы МГЭИК более реалистичными, но при этом не столь пессимистичными, как ныне.

## Список литературы

- Абдусаматов Х. И.* Солнце диктует климат Земли. — СПб.: Logos, 2009.
- Башикирцев В. С., Машнич Г. П.* Переменность Солнца и климат Земли // Солнечно-земная физика. — 2004. — Вып. 6. — С. 135–137.
- Башикирцев В. С., Машнич Г. П.* Солнечная активность и изменения климата Земли // Солнечно-земная физика. — 2005. — Вып. 8. — С. 179–181.
- Гудкович З. М., Карклин В. П., Миронов Е. У., Иванов В. В., Лосев С. М., Дымент Л. Н., Смоляницкий В. М., Фролов С. В., Юлин А. В., Усольцева Е. А.* Развитие ледовых и метеорологических условий в Арктике в период 2007–2013 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 2 (66). — С. 90–102.
- Гудкович З. М., Карклин В. П., Смоляницкий В. М., Фролов И. Е.* Что происходит с климатом Земли? // Экологический вестник России. — 2012. — № 5. — С. 34–41.
- Замолодчиков Д. Г.* Естественная и антропогенная концепции современного потепления климата // Вестник Российской академии наук. — 2013. — Т. 83, № 3. — С. 227–235.
- Замолодчиков Д. Г.* Естественная и антропогенная компоненты современных изменений глобальной температуры // Доклады Академии наук. — 2014. — Т. 456, № 3. — С. 351–354.
- 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. Р. К. Пачаури, А. Райзингер. — Женева: МГЭИК, 2007.
- Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа, резюме для политиков, техническое резюме и часто задаваемые вопросы / Ред. Т. Ф. Стокер и др. — МГЭИК, 2013.
- Принятие Парижского соглашения. — Рамочная конвенция Организации объединенных наций об изменении климата, 2015. — URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r01r.pdf> (дата обращения: 05.02.2016).
- Федоров В. М.* Широтная изменчивость приходящей солнечной радиации в различных временных циклах // Доклады Академии наук. — 2015. — Т. 460, № 3. — С. 339–342.
- Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Смоляницкий В. М.* Изменения климата — результат действия естественных причин // Экологический вестник России. — 2010. — № 1. — С. 49–54.
- Шанин В. Н., Михайлов А. В., Быховец С. С., Комаров А. С.* Глобальные изменения климата и баланс углерода в лесных экосистемах бореальной зоны: имитационное моделирование как инструмент прогноза // Известия РАН. Серия биологическая. — 2010. — № 6. — С. 719–730.
- Annex II: Climate System Scenario Tables // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. T. F. Stocker et al. — Cambridge: Cambridge University Press, 2013. — P. 1395–1445.
- Archer D.* Global Warming: Understanding the forecast, 2nd Edition. — Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- Brown L. R.* Full Planet, Empty Plates: The New Geopolitics of Food Scarcity. Supporting data. — Washington: Earth Policy Institute, 2012. — URL: [http://www.earth-policy.org/books/fpep/fpep\\_data](http://www.earth-policy.org/books/fpep/fpep_data) (дата обращения: 18.10.2012).
- Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. / Eds. J. T. Houghton, G. J. Jenkins and J. J. Ephraums. — Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- Jones P. D., Parker D. E., Osborn T. J., Briffa K. R.* Global and hemispheric temperature anomalies — land and marine instrumental records // 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. — URL: <http://cdiac.ornl.gov/trends/temp/jonescru/jones.html> (дата обращения: 18.10.2012).
- Jones P. D., Parker D. E., Osborn T. J., Briffa K. R.* Global and hemispheric temperature anomalies — land and marine instrumental records // Trends: A Compendium of Data on Global Change. — Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2016. — URL: <http://cdiac.ornl.gov/trends/temp/jonescru/jones.html> (дата обращения: 05.02.2016).
- Komarov A. S., Shanin V. N.* Comparative analysis of the influence of climate change and nitrogen deposition on carbon sequestration in forest ecosystems in European Russia: simulation modeling approach // Biogeosciences. — 2012. — Vol. 9. — P. 4757–4770. — doi:10.5194/bg-9-4757-2012.
- Krivova N. A., Vieira L. E. A., Solanki S. K.* Reconstruction of solar spectral irradiance since the Maunder minimum // J. Geophys. Res. — 2010. — Vol. 115. — A12112. — doi:10.1029/2010JA015431.
- Lyubushin A. A., Klyashtorin L. B.* Short term global DT prediction using (60–70)-years periodicity // Energy & Environment. — 2012. — Vol. 23, No. 1. — P. 75–85.
- Meinshausen M., Smith S. J., Calvin K., Daniel J. S., Kainuma M. L. T., Lamarque J.-F., Matsumoto K., Montzka S. A., Raper S. C. B., Riahi K., Thomson A., Velders G. J. M., van Vuuren D. P. P.* The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // Climatic Change. — 2011. — Vol. 109. — P. 213–241.
- Meinshausen M., Smith S. J., Riahi K., van Vuuren D. P. P.* RCP Concentration Calculations and Data. — Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), 2009. — URL: <http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/> (дата обращения: 05.02.2016).
- Parker A., Ollier C. D.* Is there a quasi-60 years' oscillation of the Arctic sea ice extent? // Journal of Geography, Environment and Earth Science International. — 2015. — Vol. 2. — P. 77–94.
- Rind D., Lean J., Lerner J., Lonergan P., Leboissitier A.* Exploring the stratospheric/tropospheric response to solar forcing // J. Geophys. Res. — 2008. — Vol. 113. — D24103. — doi:10.1029/2008JD010114.
- Shanin V. N., Komarov A. S., Mikhailov A. V., Bykhovets S. S.* Modelling carbon and nitrogen dynamics in forest ecosystems of Central Russia under different climate change scenarios and forest management regimes // Ecological Modelling. — 2011. — Vol. 222. — P. 2262–2275.
- Sharp G.* Projecting Climate Change and ecological responses // Journal of Aquaculture & Marine Biology. — 2015. — Vol. 3. — 00057. — doi: 10.15406/jamb.2015.03.00057.
- Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions. — United Nations Framework Convention of Climate Change, 2015. — URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/07.pdf> (дата обращения: 05.02.2016).
- Tans P., Keeling R.* Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. — Boulder: Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, NOAA, 2012. — URL: [http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2\\_data\\_mlo.html](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2_data_mlo.html) (дата обращения: 18.10.2012).
- Tans P., Keeling R.* Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. — Boulder: Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, NOAA, 2016. — URL: [ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2\\_annmean\\_mlo.txt](ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/co2_annmean_mlo.txt) (дата обращения: 05.02.2016).