

УДК 551.583

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-24-33

Научная статья

EDN: CUFGUI

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АРРЕНИУСА О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ НА ВЫБРОСЫ АНТРОПОГЕННЫХ
ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

В.В. ТЕТЕЛЬМИН

Институт экологии РУДН им. Патриса
Лумумбы, Москва, Российская Федерация

Решена задача, которую в конце XIX века сформулировал шведский химик Аррениус по определению чувствительности земной системы к выбросам парниковых газов, включая увеличение в два раза содержания в атмосфере диоксида углерода. На основании анализа термодинамических параметров климатической системы в доиндустриальный и последний ледниковый периоды истории Земли получены функции зависимости радиационно-равновесной температуры глобального потепления от накопленной в атмосфере концентрации антропогенных выбросов парниковых газов. Определена объемная концентрация 850 ppm-eq (млн^{-1}), соответствующая состоянию насыщения атмосферы антропогенными парниковыми газами. Эта концентрация определяет максимально возможную радиационно-равновесную температуру $8,7^\circ\text{C}$ глобального потепления, которая может быть обеспечена на Земле антропогенным парниковым эффектом. Дается определение парникового эффекта как потока тепловой энергии определенной мощности, перехваченного содержащимися в атмосфере парниковыми газами.

Ключевые слова: глобальное потепление, парниковые газы, чувствительность климатической системы, антропогенный парниковый эффект, радиационно-равновесная температура

В XXI веке климатологи всего мира пришли к заключению, что наблюдаемое глобальное изменение климата – это следствие роста содержания антропогенных парниковых газов (ПГ) в атмосфере. Содержание основных антропогенных ПГ в атмосфере (CO_2 , CH_4 , N_2O) приводится в единицах объемной концентрации K (млн^{-1}), эквивалентных потенциалу

Original article

SOLUTION TO ARRHENIUS'S PROBLEM
OF THE EARTH SYSTEM SENSITIVITY
TO EMISSIONS OF ANTHROPOGENIC
GREENHOUSE GASES

V.V. TETELMIN

INSTITUTE OF ECOLOGY OF RUDN
UNIVERSITY NAMED AFTER PATRICE
LUMUMBA, MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

The problem formulated by the Swedish chemist Arrhenius at the end of the 19th century to determine the Earth system sensitivity to greenhouse gas emissions, including a doubling of the atmospheric carbon dioxide content, has been solved. Based on the analysis of the thermodynamic parameters of the climatic system in the preindustrial and last glacial periods of the Earth's history, the functions of the radiation-equilibrium temperature dependence of global warming on the concentration of anthropogenic greenhouse gas emissions accumulated in the atmosphere are obtained. The volume concentration of 850 ppm-eq (млн^{-1}) corresponding to the state of the atmosphere saturation with anthropogenic greenhouse gases is determined. This concentration determines the maximum possible radiation-equilibrium temperature of $8,7^\circ\text{C}$ of global warming, which can be ensured on Earth by the anthropogenic greenhouse effect.

A definition of the greenhouse effect is given as a flow of thermal energy of a certain power intercepted by greenhouse gases contained in the atmosphere.

KEYWORDS: global warming, greenhouse gases, climatic system sensitivity, anthropogenic greenhouse effect, radiative equilibrium temperature

GWP глобального потепления диоксида углерода CO_2 (ppm-eq). За последние полтора века человечество за счет преимущественного использования ископаемого топлива произвело около $8,3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч энергии, в результате чего к 2020 г. в атмосфере накопилось около 182 ppm-eq антропогенных ПГ [9], содержание которых повысилось до значений: CO_2 – 416 ppm, CH_4 – 1,88 ppm, N_2O – 0,335 ppm (табл. 1). Сильные полосы поглощения фотонов водяным паром (1,35–1,45; 1,8–1,95; 5,5–7,5 мкм), диоксидом углерода (4,5–5,0; 14–18 мкм), метана (7,5–8,0 мкм) и закиси

ТАБЛИЦА 1.

Показатели роста выбросов и накопленной в атмосфере объемной концентрации антропогенных парниковых газов

Период, годы	CO ₂ ppm	CH ₄ ppm-eq	N ₂ O ppm-eq	Суммарное значение, ppm-eq
1990–2000	14,28	1,75	1,86	17,89
2000–2010	20,0	0,7	2,07	22,77
2010–2020	24,75	1,96	2,6	29,54
1850–2020	132	33	17	182

азота (3,0–5,0; 7,5–9,0 мкм) обеспечивают непрозрачность атмосферы на этих длинах волн. Попавшие в атмосферу молекулы антропогенных ПГ начинают работать на потепление климата в соответствии с законами молекулярной физики, поглощая отраженное земной поверхностью излучение в дальнем инфракрасном диапазоне электромагнитных волн (3,0–70 мкм).

При климатическом прогнозировании важно знать предельное значение максимальной радиационно-равновесной температуры Т_{МАХ}, к которой стремится глобальное потепление при фиксированном содержании антропогенных парниковых газов К в атмосфере. Основу для развития количественной модели по определению влияния парниковых газов на глобальное изменение климата заложил нобелевский лауреат шведский химик Сванте Аррениус [12]. В конце XIX века Аррениус подсчитал, что повышение содержания CO₂ в атмосфере в два раза должно привести за счет увеличения радиационного эффекта к росту средней глобальной температуры до 6 °С. Другой нобелевский лауреат Сукуро Манабе с учетом общей циркуляции атмосферы дал другой ответ на эту задачу – по его мнению удвоение концентрации CO₂ приведет к глобальному потеплению в приповерхностном слое атмосферы примерно на 2 °С [13]. Согласно современным оценкам, полученным с помощью сложных климатических моделей, удвоение содержания CO₂ в атмосфере увеличит глобальную температуру приземного слоя атмосферы на 2–4,5 °С [5, 6, 14].

Подобный разброс оценок влияния антропогенных выбросов ПГ на климатическое будущее цивилизации не может удовлетворить научную общественность. По этой причине в «Федеральной научно-технической программе в области экологического развития РФ и климатических изменений на 2021–2030 гг.» (ФНТП) в ряду фундаментальных задач исследований поставлена следующая: уточнение оценок чувствительности климатической системы (КС) Земли к антропогенным выбросам парниковых газов для определения экономически оправданных возможностей их сокращения.

Основными источниками информации о происходящих в КС Земли процессах являются Оценочные доклады Межправительственной группы экспертов ООН (МГЭИК) по изменению климата [4, 14]. В названных источниках разброс оценок при опреде-

лении концентрации ПГ в атмосфере не превышает ±3%, погрешность в определении глобального тренда температуры составляет ±20%, а разброс оценок накопленной КС Земли парниковой тепловой энергии в пределах ± 30%. В табл. 2 приводятся систематизированные показатели происходивших до 2020 г. изменений в КС Земли. Эти натурные данные являются результатом действия всех энергетических потоков на Земле, включая действие положительных и отрицательных климатических обратных связей. К 2020 г. текущее значение средней глобальной температуры приземного слоя атмосферы увеличилось примерно на 1,2 °С. Такого быстрого темпа роста средней земной температуры не наблюдалось никогда.

Сила воздействия единицы содержания парниковых газов на глобальное потепление зависит от их концентрации К (ppm-eq) в атмосфере. По мере насыщения атмосферы парниковыми газами радиационная эффективность единицы их содержания в атмосфере снижается [5, 6, 11]. Например, поступившая в атмосферу дополнительная масса диоксида углерода будет поглощать только ту часть длинноволнового излучения земной поверхности, которая не была поглощена уже присутствующим в атмосфере этим газом. Добавление новых порций CO₂ оказывает меньшее воздействие на потепление, потому что им приходится конкурировать с ранее поступившим в атмосферу газом за излучение в диапазонах длин волн 4–4,4 мкм и 14–19 мкм. По этой причине удвоение содержания CO₂ в атмосфере не увеличит вдвое поглощение ИК-излучения.

Атмосфера со своей теплоемкостью и парниковыми газами препятствует идеальному радиационному теплообмену в системе «Космос-Земля-Космос». Совокупный спектр поглощения содержащихся в атмосфере антропогенных ПГ формирует в дальнем ИК-диапазоне электромагнитных волн соответствующую единичную мощность (интенсивность) потенциала радиационного усиления J_R Вт/м² [10]. Каждому значению концентрации К (ppm-eq) содержащихся в атмосфере ПГ соответствует свое значение потенциала радиационного усиления J_R и определенное значение максимальной радиационно-равновесной температуры глобального потепления Т_{МАХ} °С приземного слоя атмосферы. Функциональная зависимость между

ТАБЛИЦА 2.

Примерные показатели происходивших до 2020 г. изменений в климатической системе Земли, вызванных антропогенными выбросами парниковых газов

Годы	Содержание парниковых газов, К ppm-eq	Интенсивность поглощения тепла КС Земли $Q_0 \times 10^{15}$ кВт·ч/10 лет	Накопленная энергия в КС Земли, $Q_{КС} \times 10^{15}$ кВт·ч	Рост средней глобальной температуры, °С
1910	24,0	10,0	15,0	0,12
1930	34,3	11,5	37,0	0,18
1950	44,6	12,5	61,5	0,24
1970	70,0	13,8	88,0	0,30
1980	90,0	16,6	101,8	0,48
1990	112	22,6	121,1	0,66
2000	132	28,2	145,7	0,84
2010	155	34,5	176,7	1,02
2020	182	42,0	215,0	1,20

этими двумя физическими величинами определяется уравнением Стефана-Больцмана [2]:

$$(150 + J_R) + S(1 - a)/4 = \sigma \times (288 + T_{MAX})^4 \text{ Вт/м}^2, (1)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – постоянная Стефана; $S = 1368 \text{ Вт/м}^2$ – современное значение Солнечной постоянной; $a = 0,3$ – среднее значение глобального альбедо; 150 Вт/м^2 – потенциал радиационного усиления, сформированный всеми ПГ в доиндустриальную эпоху; 288 К – средняя температура приповерхностного слоя атмосферы по шкале Кельвина в доиндустриальную эпоху.

В понимании С. Аррениуса чувствительность КС Земли к воздействию антропогенных ПГ характеризуется значением максимальной радиационно-равновесной температуры T_{MAX} глобального потепления, соответствующей тому или иному значению концентрации K (ppm-eq) ПГ в атмосфере. Для определения температуры T_{MAX} строятся математические модели, которые учитывают соотношение между физическими, химическими и биологическими процессами, происходящими в климатической системе Земли, включающими динамические процессы атмосферной и океанической циркуляции. Полученные решения дают большой разброс результатов. Например, из опубликованных в докладе МГЭИК ОД-4 результатов расчетов семи климатических сценариев следует, что при концентрации антропогенных ПГ в атмосфере на уровне 550 ppm-eq оценка соответствующей глобальной температуры T_{MAX} составляет от 2 до 4,5°С, а при $K = 800 \text{ ppm-eq}$ – от 3 до 7°С [6].

Поставленную Аррениусом задачу о «температурной чувствительности» земной системы можно решить, используя полученные в последние десятилетия данные о параметрах климатической системы Земли в

последний ледниковый период [3]. Изменение средней глобальной температуры на Земле, происходит в первую очередь за счет изменения солнечной постоянной S , которая в настоящее время равна 1368 Вт/м^2 . Из трех известных циклов Миланковича [2] периодически происходящие на Земле ледниковые периоды обеспечиваются только одним циклом – изменением эксцентриситета $\varepsilon = c/a$ эллиптической орбиты Земли, где c – половина фокусного расстояния, a – большая полуось эллиптической орбиты.

Началу последнего ледникового периода послужила существенная корректировка орбиты Земли гравитационным воздействием планет Солнечной системы, увеличившая примерно 130 тыс. лет назад эксцентриситет орбиты от значения 0,017 до значения 0,042. Изменение эксцентриситета орбиты Земли снизило интенсивность лучистой энергии на внешней границе земной атмосферы, в результате летний приход Солнечной радиации на широте 65° северной широты уменьшился на 40 Вт/м^2 по сравнению с современным периодом, что на 100 тыс. лет ввергло планету в ледниковый период. В этот длительный период температура изменялась в диапазоне 5,8–16,4°С, концентрация CO_2 в диапазоне 190–290 ppm, CH_4 в диапазоне 0,35–0,70 ppm, N_2O в диапазоне 0,20–0,27 ppm. При этом независимо от того, что было первичным – изменение температуры, вслед за которым изменялась концентрация ПГ в атмосфере, или наоборот, осредненные значения названных величин изменялись согласованно.

После возвращения эксцентриситета орбиты и Солнечной постоянной к современным значениям, соответственно, 0,017 и 1368 Вт/м^2 планета Земля в период своей истории от 20 до 8 тыс. лет назад медленно выходила из ледникового периода к современному межледниковому состоянию. Можно принять, что по

причине малой скорости этого процесса КС Земли на протяжении всей фазы выхода из состояния ледникового периода, длившейся около 12 тыс. лет, проходила через ряд квазистационарных термодинамических состояний. В таком случае на каждый момент времени соотношение средней глобальной температуры T_{MAX} и средней концентрации K парниковых газов в атмосфере примерно отвечало состоянию радиационного баланса КС Земли. Подобный подход к анализу финальной части палеопериода позволяет получить значения предельных отношений $P_K = T_{\text{MAX}}/K$ (град./ppm-с) для трех отмеченных точек на графике рис. 1.

Функции зависимости предельного значения «нагревательного» потенциала единицы объемной концентрации $P_K = T_{\text{MAX}}/K$ от содержащихся в атмосфере ПГ можно получить, используя свойство тесной корреляции между концентрацией ПГ в палеоатмосфере Земли и соответствующей глобальной радиационно-равновесной температурой в последней фазе ледникового периода (рис. 1). В табл. 3 приводятся фактические значения концентрации K парниковых газов в палеоатмосфере и соответствующие значения температуры T_{MAX} для трех моментов времени, рассчитанные на основе данных графиков рис. 1.

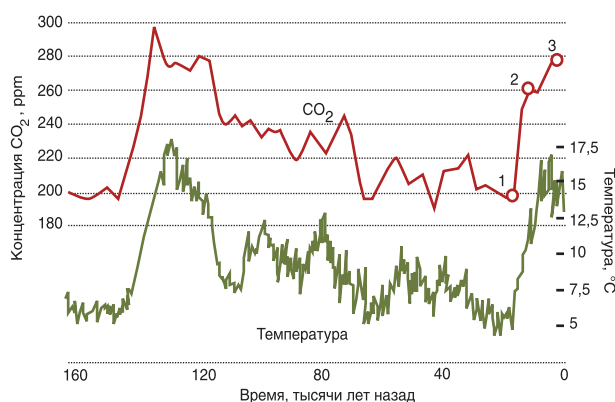


РИС. 1.

Ход изменения глобальной температуры и концентрации диоксида углерода в атмосфере за последние 160 тыс. лет и три расчетные точки [3]

ТАБЛИЦА 3.

Натурные данные радиационно-равновесной температуры атмосферы T_{MAX} для трех квазистационарных состояний климатической системы Земли в последней фазе (20–8 тыс. лет назад) ледникового периода при трех значениях концентрации основных (CO_2 , CH_4 , N_2O) парниковых газов в атмосфере

Период, тыс. лет назад	Концентрация CO_2 К ppm	Концентрация трех ПГ К ppm-с	Нагрев атмосферы всеми ПГ, град	Доля нагрева тремя ПГ, град	Доля нагрева одним CO_2 , град
20–18	193	261	24,8	7,0	5,35
14–12	262	346	32,0	8,8	6,90
8–0	280	370	33,4	9,4	7,20

Примерное постоянство содержания ПГ в атмосфере на протяжении последних восьми тысяч лет современного межледникового периода обеспечивало квазистационарное состояние климатической системы Земли. Эта особенность позволяет получить первую искомую точку графика функции $P_K = f(K)$ град./ppm-с. В доиндустриальный период средняя концентрация каждого из трех основных ПГ в атмосфере составляла $\text{CO}_2 - 280$ ppm, $\text{CH}_4 - 0,7$ ppm, $\text{N}_2\text{O} - 0,27$ ppm. В переводе на единицы, эквивалентные потенциалу глобального потепления диоксида углерода GWP, общая доиндустриальная объемная концентрация этих ПГ составляла 370 ppm-с. Известно, что в доиндустриальном периоде доля основных ПГ (CO_2 , CH_4 и N_2O) в общем увеличении глобальной температуры на Земле составляла $9,4^\circ\text{C}$ из $33,4^\circ\text{C}$ [1]. Отсюда находим свойственный для этого периода потенциал нагревания содержащихся в атмосфере ПГ в единицах объемной концентрации $P_K = T_{\text{MAX}}/K = 9,4^\circ\text{C}/370$ ppm-с = $25,4 \times 10^{-3}$ град./ppm-с.

На рис. 2 приводятся графики зависимости «нагревательного потенциала» единицы объема отдельно диоксида углерода и смеси трех парниковых газов $P_K = T_{\text{MAX}}/K$ в зависимости от их общего содержания

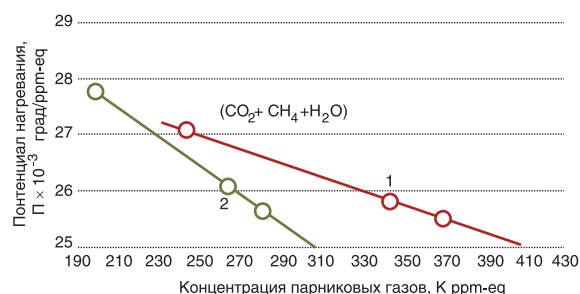


РИС. 2.

Зависимость потенциала нагревания парниковых газов от их общего объемного содержания в атмосфере: 1 — для смеси трех парниковых газов; 2 — для диоксида углерода в составе смеси парниковых газов

в атмосфере. Графики имеют вид падающих прямых линий. Для смеси трех ПГ график 1 описывается следующей линейной функцией:

$$T_{\text{MAX}}/K = 29,8 \cdot 10^{-3} - 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot K \text{ (град./ppm-eq)}, \quad (2)$$

где K (ppm-eq) – общая концентрация трех ПГ в атмосфере.

Из выражения (2) получается функция зависимости радиационно-равновесной температуры глобального потепления (чувствительности земной системы) от общей концентрации K содержащихся в атмосфере трех основных (CO_2 , CH_4 и N_2O) парниковых газов:

$$T_{\text{MAX}} = (29,8 \cdot 10^{-3} \cdot K - 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot K^2 - 9,4)^\circ \text{C}, \quad (3)$$

где $T_{\text{MAX}}^\circ \text{C}$ – температура глобального потепления приземного слоя атмосферы (чувствительность) от действия антропогенного парникового эффекта; K ppm-eq – **общая объемная концентрация содержащихся** в атмосфере трех основных парниковых газов, изменяющаяся в пределах ($370 \leq K \leq 1220$) ppm-eq.

Радиационно-равновесная температура T_{MAX} , к которой через продолжительное время приходит содержащая парниковые газы земная атмосфера, определяется нелинейным уравнением параболического типа. Исследуя функцию (3) на экстремум, получаем максимальное значение $K = 1210$ ppm-eq общей концентрации трех основных ПГ, при которой наступит «парниковое насыщение» атмосферы. Этому значению общей концентрации соответствует температура максимально возможного антропогенного потепления $T_{\text{MAX}} = 8,7^\circ \text{C}$ от действия антропогенного парникового эффекта в современных условиях межледникового периода.

Зависимость между общей концентрацией K трех основных парниковых газов в атмосфере и концентрацией K_A антропогенных выбросов этих газов следующая: $K = (K_A + 370)$ ppm-eq. Подставляя это выражение в (3), получаем функцию зависимости радиационно-равновесной температуры глобального потепления T_{MAX} (чувствительности земной системы) от концентрации содержащихся в атмосфере выбросов антропогенных парниковых газов [9]:

$$T_{\text{MAX}} = 20,9 \times 10^{-3} \times K - 12,3 \times 10^{-6} \times K^2 (^\circ \text{C}), \quad (4)$$

где K ppm-eq – **объемная концентрация содержащихся** в атмосфере антропогенных выбросов парниковых газов, изменяющаяся в пределах ($0 \leq K \leq 850$) ppm-eq; коэффициент первого слагаемого имеет размерность $20,9 \cdot 10^{-3}$ (град./ppm-eq); коэффициент второго слагаемого имеет размерность $12,3 \cdot 10^{-6}$ град./(ppm-eq)².

Функции (3) и (4) определяют радиационно-равновесную температуру $T_{\text{MAX}}^\circ \text{C}$ глобального потепления по шкале Цельсия, формируемую парнико-

вым эффектом. Отсчет температуры в этих функциях ведется от значения температуры 288K ($+15^\circ \text{C}$), соответствующей средней глобальной температуре в доиндустриальный период.

Исследуя функцию (4) на экстремум, получаем максимальное значение концентрации содержащихся в атмосфере антропогенных парниковых газов $K = 850$ ppm-eq, при которой наступает «парниковое насыщение» атмосферы. Этому значению концентрации соответствует максимальная радиационно-равновесная температура глобального потепления $T_{\text{MAX}} = 8,7^\circ \text{C}$, которая может быть обеспечена антропогенными выбросами в атмосферу парниковых газов. С использованием функций (3) и (4) находим, что в 2020 г. при содержании в атмосфере антропогенных ПГ в количестве 182 ppm-eq (табл. 1) их «нагревательный потенциал» был использован на 71%.

Полученные функции определяют зависимость радиационно-равновесной температуры глобального потепления $T_{\text{MAX}}^\circ \text{C}$ от общей концентрации (3) содержащихся в атмосфере трех парниковых газов и от концентрации антропогенных выбросов (4) парниковых газов. Эти же функции определяют «чувствительность» реакции климатической системы Земли на выбросы антропогенных парниковых газов, как её понимал С. Аррениус [12].

На рис. 3 приводится единый график функций (3) и (4) в двух системах отсчета: в системе отсчета общей концентрации трех ПГ в атмосфере и в системе антропогенной концентрации этих газов. Точка начала антропогенной системы отсчета имеет координаты 370 ppm-eq и $9,4^\circ \text{C}$, соответствующие состоянию КС Земли в начале индустриального периода. О справедливости предлагаемых функций свидетельствует принципиальное совпадение их графика с графиком Д. Сильвера [6], который свел воедино результаты математического моделирования семи климатических

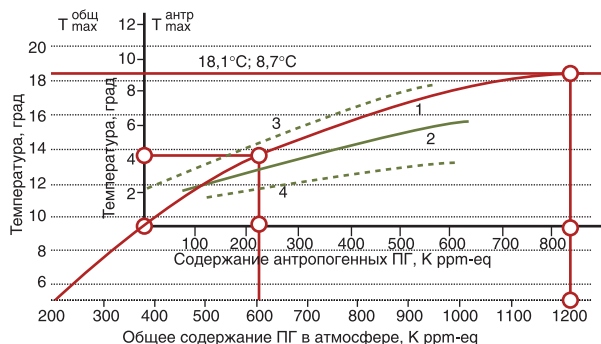


РИС. 3.

Совмещенный график 1 функций зависимости максимального глобального потепления (3) и (4) от содержания в атмосфере парниковых газов: 2 – точка парникового насыщения атмосферы; 3 и 4 – полученные моделированием верхний и нижний пределы оценки T_{MAX}

сценариев, приведенных в докладе МГЭИК ОД-4. График функций (3) и (4) укладывается в диапазон оценок чувствительности реакции КС Земли на изменение концентрации ПГ в атмосфере, полученный математическим моделированием семи климатических сценариев (рис. 3).

В справедливости полученных функций можно также убедиться, обратившись к уравнению Стефана-Больцмана (1). Земля отражает получаемую солнечную радиацию в виде длинноволнового теплового излучения мощностью 240 Вт/м^2 , из которых около 40 Вт/м^2 свободно проходят через «окно прозрачности» атмосферы в пределах длин волн от $7,5$ до 13 мкм [3]. Из оставшейся мощности излучения 200 Вт/м^2 около 150 Вт/м^2 было перехвачено содержащимися в атмосфере всеми ПГ еще в доиндустриальный период. Таким образом, в современных условиях на долю антропогенных ПГ остается ресурс около 50 Вт/м^2 по перехвату мощности отражаемой земной поверхностью радиации. Подстановка этого значения «свободной» мощности в уравнение Стефана-Больцмана (1) дает максимальную температуру глобального потепления около $T_{\text{MAX}} = 8,7^\circ \text{C}$, которую могут обеспечить антропогенные ПГ. Этот результат совпадает с экстремумом функций (3) и (4), что также подтверждает их справедливость.

Наконец, в достоверности полученных функций можно убедиться, используя данные радиационного баланса Земли в 2009 г., приведенные в работе К. Тренберта [15], в которой приводится количественная характеристика потенциала радиационного усиления $J_R = 17 \text{ Вт/м}^2$, присутствовавшего в атмосфере в виде «явного тепла». Из табл. 2 находим, что в 2009 г. концентрация антропогенных ПГ в атмосфере составляла 152 ppm-eq . Из функции (4) находим соответствующую этой концентрации радиационно-равновесную температуру $T_{\text{MAX}} = 2,86^\circ \text{C}$. Подстановкой этой температуры в уравнение Стефана-Больцмана (1) получаем значение «явного тепла» $J_R = 17 \text{ Вт/м}^2$, совпадающего с приведенным Тренбертом значением в числе составляющих радиационного баланса Земли в 2009 г. Этот расчет является третьим подтверждением справедливости «функций чувствительности» (3) и (4) к антропогенным выбросам парниковых газов.

Из функции (4) следует практически важный вывод: чтобы ограничить рост средней глобальной температуры значением $+2^\circ \text{C}$, которую назначает Парижское соглашение, человечество должно было полностью прекратить выбросы ПГ в 1990 г., когда их концентрация в атмосфере составляла около 100 ppm-eq [8]. Этот результат подтверждает справедливость формулировки п. 17 Климатической доктрины РФ, в котором также отмечается, что «удержать рост глобальной температуры ниже $+2^\circ \text{C}$ по сравнению с 1900 г. не удастся». Действительно, в настоящее время при намного большем содержании в атмосфере

антропогенных ПГ (около 190 ppm-eq) ставить перед человечеством такую цель бессмысленно и антинаучно.

Из графика 2 рис. 2 аналогичным образом выводится функция вклада антропогенных выбросов диоксида углерода CO_2 в обеспечение радиационно-равновесной температуры глобального потепления [9]:

$$T_{\text{MAX}} = 19,2 \times 10^{-3} \times K - 23,1 \times 10^{-6} \times K^2 (^\circ \text{C}), \quad (5)$$

где $0 \leq K \leq 416 \text{ ppm-eq}$ – объемная концентрация антропогенных выбросов CO_2 в составе трех ПГ в атмосфере.

Из выражения (5) получаем максимально возможный вклад в глобальное потепление выбросов антропогенного диоксида углерода: $T_{\text{MAX}} = 4^\circ \text{C}$ при $K = 416 \text{ ppm-eq}$. На рис. 4 приводятся графики квадратичных функций (4) и (5), которые определяют чувствительность климата в том смысле, в котором её понимал С. Аррениус [12]. Например, в 2020 г. в атмосфере содержалось 182 ppm-eq антропогенных парниковых газов, из которых на долю диоксида углерода CO_2 приходилось 135 ppm . Из «уравнений чувствительности» климатической системы Земли (4) и (5) и графиков рис. 4 следует, что присутствовавшая в 2020 г. в атмосфере смесь трех парниковых газов обеспечила бы в будущем глобальное потепление КС Земли до радиационно-равновесной температуры $T_{\text{MAX}} = 3,4^\circ \text{C}$, из которой на долю вклада диоксида углерода CO_2 приходилось бы $2,2^\circ \text{C}$. В 2020 г. общий «нагревательный потенциал» этого парникового газа с учетом его доиндустриального содержания в атмосфере был использован на 84% . Оставшийся нереализованный нагревательный потенциал диоксида углерода около $1,8^\circ \text{C}$ будет полностью реализован тогда, когда в атмосферу будет дополнительно выброшено около 280 ppm этого парникового газа.

Из функции (5) находится решение канонической задачи Аррениуса: при увеличении концентрации диоксида углерода CO_2 в атмосфере относительно естественного доиндустриального уровня на 280 ppm-eq (то есть в два раза) радиационно-равновесная температура глобального потепления приземного слоя атмосферы увеличится примерно на $3,6^\circ \text{C}$. Это решение является средним между решениями Аррениуса $5-6^\circ \text{C}$ [12] и Манабе 2°C [13], а также укладывается в диапазон оценок в докладе МГЭИК ОД-4, систематизированных в монографии [6].

Полученные функции подтверждают известную закономерность, что по мере насыщения атмосферы парниковыми газами радиационная эффективность единицы их содержания в атмосфере снижается [5]. Например, из (4) следует, что при концентрации $K = 200 \text{ ppm-eq}$ выброс в атмосферу 1 ppm-eq увеличивает радиационно-равновесную температуру T_{MAX} на $0,016^\circ \text{C}$. Это означает, что при

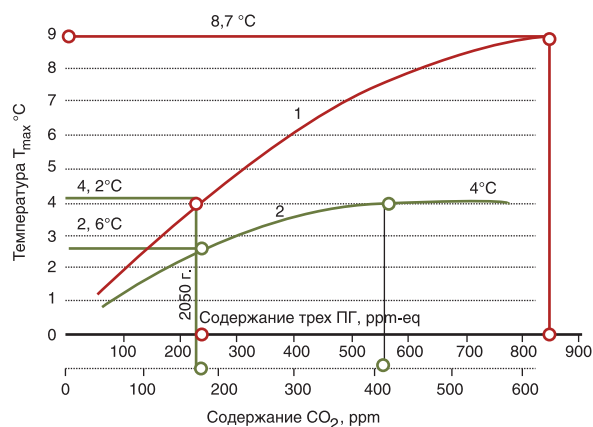


РИС. 4.

Графики зависимости максимальной температуры приземного слоя атмосферы от объемной концентрации антропогенных выбросов парниковых газов: 1 — для смеси трех основных парниковых газов; 2 — для диоксида углерода в составе смеси трех парниковых газов

$K = 200$ ppm-eq радиационная эффективность парниковых газов (чувствительность КС Земли к выбросам ПГ), представляющая собой производную dT_{max}/dK , равна $0,016^\circ\text{C}/\text{ppm-eq}$. Соответственно, из (4) получаем: при увеличении концентрации до значения $K = 400$ ppm-eq радиационная эффективность (чувствительность КС Земли) снижается до $dT_{\text{max}}/dK = 0,011^\circ\text{C}/\text{ppm-eq}$; при $K = 600$ ppm-eq радиационная эффективность (чувствительность КС Земли) снижается до $0,006^\circ\text{C}/\text{ppm-eq}$. При концентрации близкой к состоянию насыщения атмосферы парниковыми газами $K = 800$ ppm-eq радиационная эффективность новых порций выбросов (чувствительность КС Земли) закономерно приближается к нулевому значению $dT_{\text{max}}/dK = 0,001^\circ\text{C}/\text{ppm-eq}$.

Полученные параболические функции представляют собой аналитические решения задачи С. Аррениуса о чувствительности реакции климатической системы Земли на выбросы в атмосферу антропогенных парниковых газов, которую он сформулировал в конце XIX века. Предлагаемые функции зависимости радиационно-равновесной температуры глобального потепления от антропогенных выбросов ПГ исключают неопределенность оценок чувствительности КС Земли, и делает более достоверными прогнозные расчеты параметров климатического будущего цивилизации. Задачу С. Аррениуса по снижению неопределенности оценок чувствительности КС Земли на выбросы антропогенных ПГ, обозначенную в действующей до 2030 г. Федеральной научно-технической программе в области экологического развития РФ и климатических изменений как одно из фундаментальных направлений исследований, можно считать решенной.

«Функцию чувствительности КС Земли» (4) можно использовать совместно с уравнением Стефана-

Больцмана (1) для нахождения потенциала радиационного усиления J_R , который является энергетическим эквивалентом антропогенного парникового эффекта [11]. На рис. 5 приводятся графики зависимости максимальной температуры глобального потепления T_{max} и потенциала радиационного усиления J_R от концентрации K антропогенных ПГ в атмосфере, построенные с помощью функции (4) и функции (1). Присутствующий в атмосфере в виде явного тепла потенциал радиационного усиления J_R ($\text{Вт}/\text{м}^2$) является основным фактором, определяющим и характеризующим энергетику антропогенного парникового эффекта (рис. 5А). Потенциал радиационного усиления J_R присутствует в атмосфере в виде явного тепла, которое постепенно нагревает все составляющие КС Земли и увеличивает среднюю глобальную приземную температуру до значения T_{max} , соответствующего радиационно-равновесному состоянию Земли.

В связи со сказанным парниковому эффекту можно дать следующее «энергетическое» определение. Парниковый эффект — это поток перехваченной парниковыми газами и остающейся в атмосфере в виде явного тепла части J_R ($\text{Вт}/\text{м}^2$) мощности теплового излучения Земли. В соответствии с данным определением парниковый эффект как физическое явление имеет энергетическое наполнение и соответствующую размерность единичной мощности (интенсивности). Величина парникового эффекта — это потенциал мощности радиационного усиления J_R ($\text{Вт}/\text{м}^2$, значение которого при известной концентрации антропогенных ПГ в атмосфере определяется с помощью уравнения Стефана-Больцмана (1) и функции «температурной чувствительности» (4).

Точка 1 рис. 5 соответствует потенциалу радиационного усиления (единичной мощности парникового эффекта) $J_R = 19,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и температуре $T_{\text{max}} = 3,4^\circ\text{C}$, которые соответствуют значению концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в 2020 г. Точка 2 определяет соответствующие параметры $J_R = 32,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и $T_{\text{max}} = 5,8^\circ\text{C}$ при концентрации антропогенных ПГ в атмосфере $K = 350$ ppm-eq, которая установится в 2100 г. при умеренном сценарии декарбонизации с темпом снижения выбросов ПГ $\Delta K = 2 \text{ ppm-eq}/10 \text{ лет}$ [10]. Точка 3 соответствует максимально возможному проявлению антропогенного парникового эффекта на Земле в состоянии насыщения атмосферы антропогенными ПГ при концентрации $K = 850$ ppm-eq и температуре $T_{\text{max}} = 8,7^\circ\text{C}$.

На рис. 6 приводятся графики синхронного роста концентрации 1 антропогенных ПГ в атмосфере до 2100 г. и соответствующего роста радиационно-равновесной температуры 2 для умеренного сценария декарбонизации мировой энергетики. При достижении в 2100 г. углеродной нейтральности при $K = 350$ ppm-eq процесс глобального потепления будет продолжаться не менее 200 лет. В течение этого

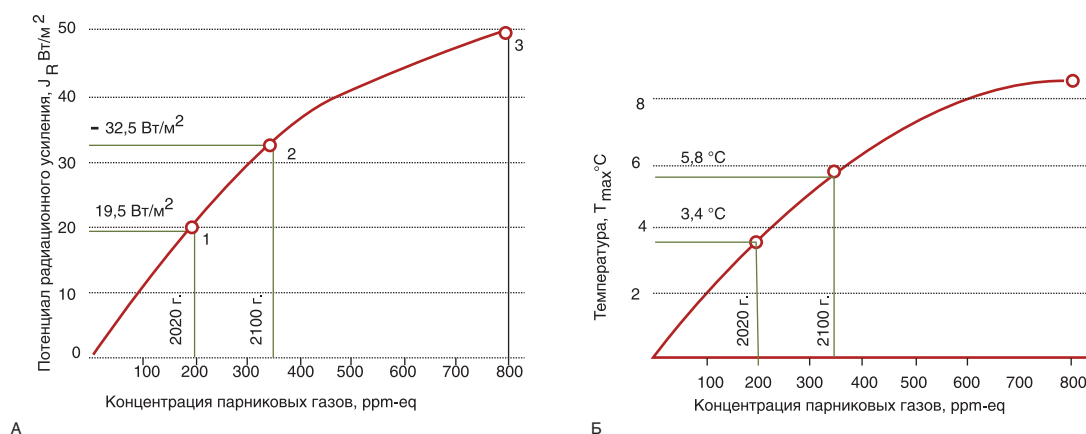


РИС. 5.

Графики зависимости потенциала радиационного усиления J_R (А) и максимальной температуры глобального потепления T_{MAX} (Б) от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере

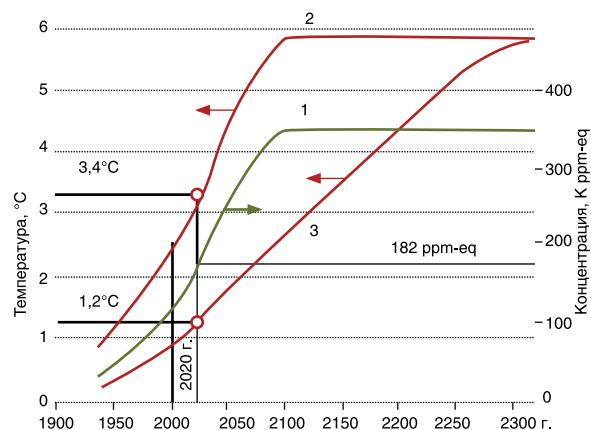


РИС. 6.

Расчетные графики изменения параметров КС Земли при умеренном сценарии декарбонизации: 1 – рост концентрации антропогенных ПГ в атмосфере; 2 – соответствующий рост радиационно-равновесной температуры глобального потепления; 3 – рост средней глобальной температуры приземного слоя атмосферы до достижения климатической системой Земли радиационно-равновесного состояния [10]

времени текущее значение средней глобальной температуры будет увеличиваться и достигнет максимально-го радиационно-равновесного значения $T_{MAX} = 5,8^\circ\text{C}$ примерно в 2320 г.

В табл. 4 приводятся расчетные данные о средней чувствительности энергетических параметров парникового эффекта к изменению концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в пределах изменения концентрации антропогенных ПГ от современного значения 200 ppm-eq до 350 ppm-eq в 2100 г. при умеренном сценарии декарбонизации энергетики [11]. Например, в рассматриваемом диапазоне концентраций среднее значение «температурной чувствительности» климатической системы Земли к выбросам антропогенных ПГ определяется производной функции (4) и равно $dT_{MAX}/dK = 0,015$ град/ppm-eq. Увеличение мощности парникового эффекта от роста выбросов антропогенных ПГ можно представить в виде эквивалента уменьшения расстояния от Земли до Солнца. Эмиссия в атмосферу одной порции антропогенных

ТАБЛИЦА 4.

Чувствительность энергетических параметров парникового эффекта к изменению концентрации антропогенных парниковых газов в XXI веке при умеренном сценарии декарбонизации энергетики [11]

Энергетический параметр парникового эффекта	Среднее значение параметра в период 2020–2030 гг. ($K = 200$ ppm-eq)	Чувствительность параметра, $\Delta/\text{ppm-eq}$
Потенциал радиационного усиления (явное тепло), J_R	20,8 Вт/м ²	+0,08 (Вт/м ² ·ppm-eq)
Температура максимального глобального потепления, T_{MAX}	3,7°C	+0,015 (°C/ppm-eq)
Интенсивность накопления тепловой энергии всей земной поверхностью, ΔQ	47,2·10 ¹⁵ кВт·ч/10 лет	+0,276·10 ¹⁵ (кВт·ч/10 лет·ppm-eq)
Нетто-поглощение тепловой энергии Землей, I_0	1,05 Вт/м ²	+0,006 (Вт/м ² ·ppm-eq)
Эквивалент уменьшения расстояния от Земли до Солнца за счет усиления парникового эффекта	2,1 млн км	11·10 ³ (км/ppm-eq)

ПГ в количестве 1 ppm-eq увеличивает среднее значение потенциала радиационного усиления в XXI веке примерно на $0,08 \text{ Вт/м}^2$, что по кумулятивному тепловому воздействию на планету эквивалентно приближению Земли к Солнцу на 11 тыс. км. Человек, выбрасывая в атмосферу миллиарды тонн ПГ и трансформируя энергетические потоки в КС Земли, совершает действия поистине космического масштаба.

ВЫВОДЫ

Получено аналитическое решение задачи, сформулированной в конце XIX века нобелевским лауреатом Сванте Аррениусом, о количественной оценке чувствительности земной системы к антропогенным выбросам парниковых газов. Для термодинамических условий современного межледникового периода предложены не имеющие аналогов функции зависимости чувствительности радиационно-равновесной температуры T_{MAX} глобального потепления от концентрации К антропогенных парниковых газов в атмосфере.

Предлагаемое решение задачи Аррениуса снижает неопределенность оценок чувствительности климатической системы Земли к выбросам парниковых газов и делает более достоверными прогнозные расчеты параметров климатического будущего цивилизации.

Формируемый антропогенный парниковый эффект характеризуется единичной мощностью (интенсивностью) J_R (Вт/м^2) перехваченного парниковыми газами потока теплового излучения Земли, который присутствует в атмосфере в виде явного тепла и увеличивает глобальную приземную температуру до значения T_{MAX} , соответствующего радиационно-равновесному состоянию системы «Земля–Космос».

Полученное эмпирическое решение «температурной чувствительности» (4) свидетельствует о том, что при накопленной в атмосфере концентрации антропогенных парниковых газов $K = 850 \text{ ppm-eq}$ наступит состояние «парникового насыщения» атмосферы, при котором радиационно-равновесная температура глобального потепления достигнет своего максимального возможного значения $T_{\text{MAX}} = 8,7^\circ\text{C}$, после чего климатическая система Земли не будет откликаться повышением температуры на дальнейшие выбросы парниковых газов.

Парниковый эффект, формируемый тремя основными антропогенными парниковыми газами (CO_2 , CH_4 , N_2O), не может повысить среднюю глобальную температуру приземного слоя атмосферы более чем на $8,7^\circ\text{C}$ сверх доиндустриального уровня $+15^\circ\text{C}$ (288K). Человечеству следует готовиться к возможному установлению на Земле в будущем именно такой максимальной температуры глобального потепления и предпринимать соответствующие необходимые адаптивные действия.

При умеренном темпе декарбонизации мировой экономики на протяжении всего XXI века до-

бавление в атмосферу одной миллионной объемной доли (1 ppm-eq) антропогенных парниковых газов будет увеличивать единичную мощность потенциала радиационного усиления J_R (интенсивность парникового эффекта) примерно на $0,08 \text{ Вт/м}^2$, что по возрастанию получаемого планетой потока энергии эквивалентно приближению Земли к Солнцу примерно на 11 тыс. км/ppm-eq.

Намеченная Парижским Соглашением ограничительная цель по удержанию роста средней глобальной температуры ниже $+2^\circ\text{C}$ по сравнению с доиндустриальным периодом нереальна и не может быть обеспечена ни при каких обстоятельствах. Ограничительную температуру глобального потепления $+2^\circ\text{C}$ можно было удержать в долгосрочном плане при условии, если бы человечество обеспечило углеродную нейтральность в 1990 г., когда концентрация антропогенных парниковых газов в атмосфере не превышала 100 ppm-eq. Современная концентрация около 190 ppm-eq антропогенных парниковых газов в атмосфере способна гарантированно нагреть климатическую систему Земли до $3,5^\circ\text{C}$ по сравнению с доиндустриальным уровнем.

В 2020 г. сформированный антропогенными парниковыми газами потенциал парникового эффекта по повышению радиационно-равновесной температуры приземного слоя атмосферы был использован на 71%, а потенциал диоксида углерода CO_2 – на 84%. На оставшиеся 16% нереализованного вклада «нагревательного потенциала» диоксида углерода приходится около $1,8^\circ\text{C}$, из которой на долю выбросов от сжигания ископаемого топлива приходится примерно $1,4^\circ\text{C}$.

Человечеству следует выполнить сравнительный анализ и сопоставить высокую для современной цивилизации социально-экономическую цену осуществления сценария полного отказа от использования ископаемого топлива с тем эффектом, который будет получен в будущем от смягчения глобального потепления на $1,4^\circ\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. БАЖИН Н.М. Метан в окружающей среде. Новосибирск: СО РАН. 2010. 126 с.
2. БРИНКМАН Э. Физические проблемы экологии. М.: ИНТЕЛЛЕКТ. 2012. 288 с.
3. ДЖИРАД ДЖ. Основы химии окружающей среды. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008. 640 с.
4. ПАЧАУРИ Р., МЕЙЕР Л. и др. МГЭИК. Изменение климата, Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в пятый оценочный доклад МГЭИК. Женева: МГЭИК, 2014. С. 44.
5. СЕМЕНОВ С.М. Парниковый эффект: открытие, развитие, концепции, роль в формировании глобального климата и его антропогенных изменений. Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. №2. С. 103–126.

6. СИЛВЕР ДЖ. Глобальное потепление без тайн. М.: Эксмо. 2009. 336 с.
7. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Энергетический анализ особенностей глобального потепления и его последствий. Вестник Российской академии естественных наук. 2023. №3. Т. 23. С. 91–99.
8. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Расчетное подтверждение недосяжимости климатических целей Парижского соглашения. Экология промышленного производства. 2024. №2. С. 58–63.
9. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Энергетические особенности и пределы глобального потепления. Энергия: экономика, техника, экология. 2023. №3. С. 27–34.
10. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Расчетные функции обогревающего воздействия антропогенного парникового эффекта // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2024. №4. С. 23–31.
11. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Физика антропогенного парникового эффекта и глобальное потепление в XXI веке при умеренном сценарии декарбонизации мировой энергетики. Использование и охрана природных ресурсов в России. 2025. №1. С. 31–41.
12. ARRHENIUS S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1896. 41. P. 237–276.
13. MANABE S., WETHERALD R.T. The effects of doubling of the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. Journal of the Atmospheric Science, Vol. 32. N 1. P. 3–15.
14. Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. P. 33–144.
15. TRENBERTH K.E., FASULLO J.T., KIEHL J. Earth's global energy budget. Bulletin of American Meteorological Society, march 2009. P. 311–323.
6. SILVER J. Global warming without secrets. Moscow: Eksmo. 2009:336. (In Russian).
7. TETELMIN V.V. Energy analysis of the features of global warming and its consequences. Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences. 2023;23:91–99. (In Russian).
8. TETELMIN V.V. Calculated confirmation of the unattainability of the climate goals of the Paris Agreement. Ecology of industrial production. 2024;2: 58–63. (In Russian).
9. TETELMIN V.V. Energy features and limits of global warming. Energy: economics, technology, ecology. 2023;3:27–34. (In Russian).
10. TETELMIN V.V. Calculated functions of the heating effect of the anthropogenic greenhouse effect. *Ispol'zovaniye i okhrana prirodnnykh resursov v Rossii*. 2024;4:23–31. (In Russian).
11. TETELMIN V.V. Physics of the anthropogenic greenhouse effect and global warming in the 21st century under a moderate scenario of decarbonization of the world energy sector. *Ispol'zovaniye i okhrana prirodnnykh resursov v Rossii*. 2025;1:31–41. (In Russian).
12. ARRHENIUS S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1896;41:237–276.
13. MANABE S., WETHERALD R.T. The effects of doubling of the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Science*, 32;1:3–15.
14. Technical Summary. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 33–144.
15. TRENBERTH K.E., FASULLO J.T., KIEHL J. Earth's global energy budget. Bulletin of American Meteorological Society, March 2009:311–323.

REFERENCE

1. BAZHIN N.M. Methane in the environment. Novosibirsk: SB RAS. 2010:126. (In Russian).
2. BRINKMAN E. Physical problems of ecology. Moscow: INTELLECT. 2012:288. (In Russian).
3. GIRARD J. Fundamentals of environmental chemistry. Moscow: FIZMATLIT. 2008:640. (In Russian).
4. PACHAURI R., MEYER L. ET AL. IPCC. Climate Change, Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the IPCC Fifth Assessment Report. Geneva: IPCC, 2014:44. (In Russian).
5. SEMENOV S.M. Greenhouse effect: discovery, development, concepts, role in shaping the global climate and its anthropogenic changes. Fundamental and Applied Climatology. 2015;2:103–126. (In Russian).

Тетельмин Владимир Владимирович,
д.т.н., главный специалист Института экологии РУДН
им. Патриса Лумумбы, член Общественного совета при Минэнерго РФ

✉ 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
117198, Moscow, Miklukho-Maklaya st., 6,
e-mail: v-tetelmin@rambler.ru